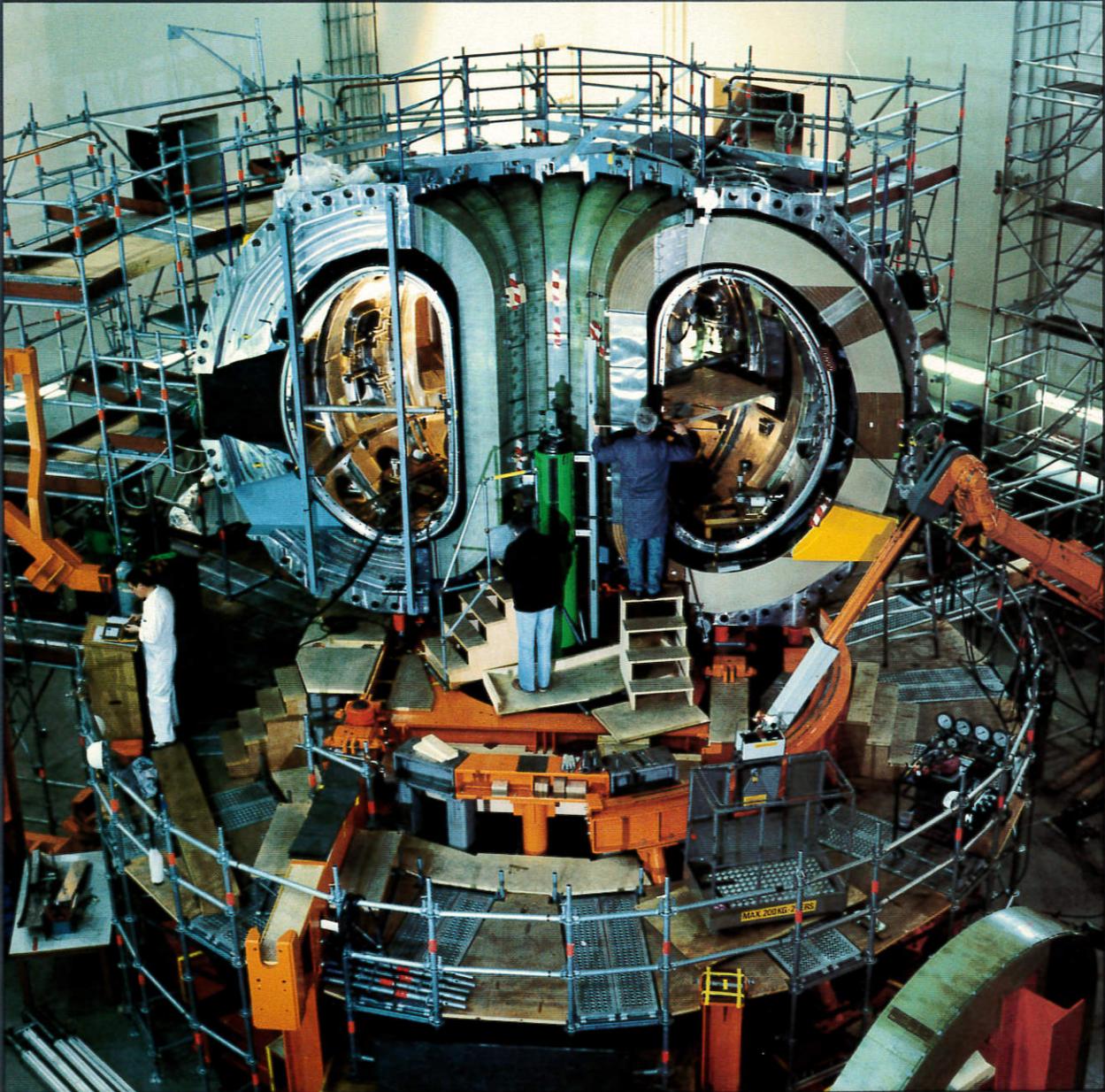


MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK GARCHING BEI MÜNCHEN



J
64
1987-
1988

JAHRESBERICHT 1987/88

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
- Bibliothek -
Boltzmannstraße 2
85748 Garching bei München

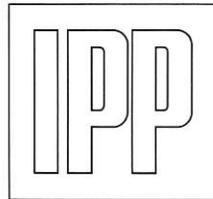
J 64

Zum Titelbild

Das Fusionsexperiment ASDEX Upgrade während des Aufbaus: Die erste Torushälfte – bestehend aus dem ringförmigen Plasmagefäß, das von Magnetspulen und deren Stützstruktur umgeben ist – wurde im Januar 1989 fertiggestellt.

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Garching bei München



Jahresbericht 1987/88

0757-89 (500 42728)

Inhaltsverzeichnis

Aufgaben des IPP	5	Allgemeine Arbeiten zur Fusion	48
Auftrag	7	Plasma-Wand-Wechselwirkung	48
Organisation	7	Theorie 1	49
Kernfusion – eine internationale Gemeinschaftsaufgabe	8	Theorie 2	50
Das Deutsche Fusionsprogramm	9	Theorie 3	51
		Technologie	52
		Plasmatechnologie	53
		Informatik	54
Einführung in die Arbeiten des IPP	11	Zusammenarbeit	56
Grundlagen der Kernfusion	13	Zusammenarbeit mit Hochschulen	56
Fusionsreaktionen	13	Nachwuchsförderung	57
Zündbedingungen	14	Internationale Zusammenarbeit	57
Plasmadruck	16	Zusammenarbeit mit der Industrie	58
Stöße und Verunreinigungen	16		
Instabilitäten	17	Wissenschaftliche Infrastruktur	59
Plasmaheizung	17	Rechenzentrum Garching	59
Magnetfeldkonfiguration – Experimenttypen	19	Zentrale Technische Einrichtungen	60
Der Tokamak	19		
Der Stellarator	20	Verwaltung und Allgemeine Dienste	63
Elemente der Fusionsexperimente	21	Personalabteilung	63
Vakuumgefäß	21	Beschaffungsabteilung	64
Limiter	22	Finanzabteilung	64
Magnetischer Limiter	22	Rechts- und Patentabteilung	64
Divertor	23	Bauabteilung	65
Brennstoffnachfüllung	23	Sozialabteilung	65
Plasmadiagnostik	24		
Sicherheits- und Umweltaspekte der Fusion	25	Geschäftsführung und Wissenschaftlich-Technisches Büro	66
		Organisation	66
Ergebnisbericht des IPP	29	Revision	66
Die Arbeitsbereiche des Instituts für Plasmaphysik	31	Betriebsärztlicher Dienst	66
Tokamaks	32	Wissenschaftlich-Technisches Büro	66
ASDEX	33	Sicherheit	66
ASDEX Upgrade	36	Öffentlichkeitsarbeit	67
JET-Mitarbeit	37		
NET/ITER-Mitarbeit	40		
Stellaratoren	42	Der organisatorische Aufbau des IPP	69
WENDELSTEIN VII-AS	43		
WENDELSTEIN VII-X	46		

Aufgaben des IPP

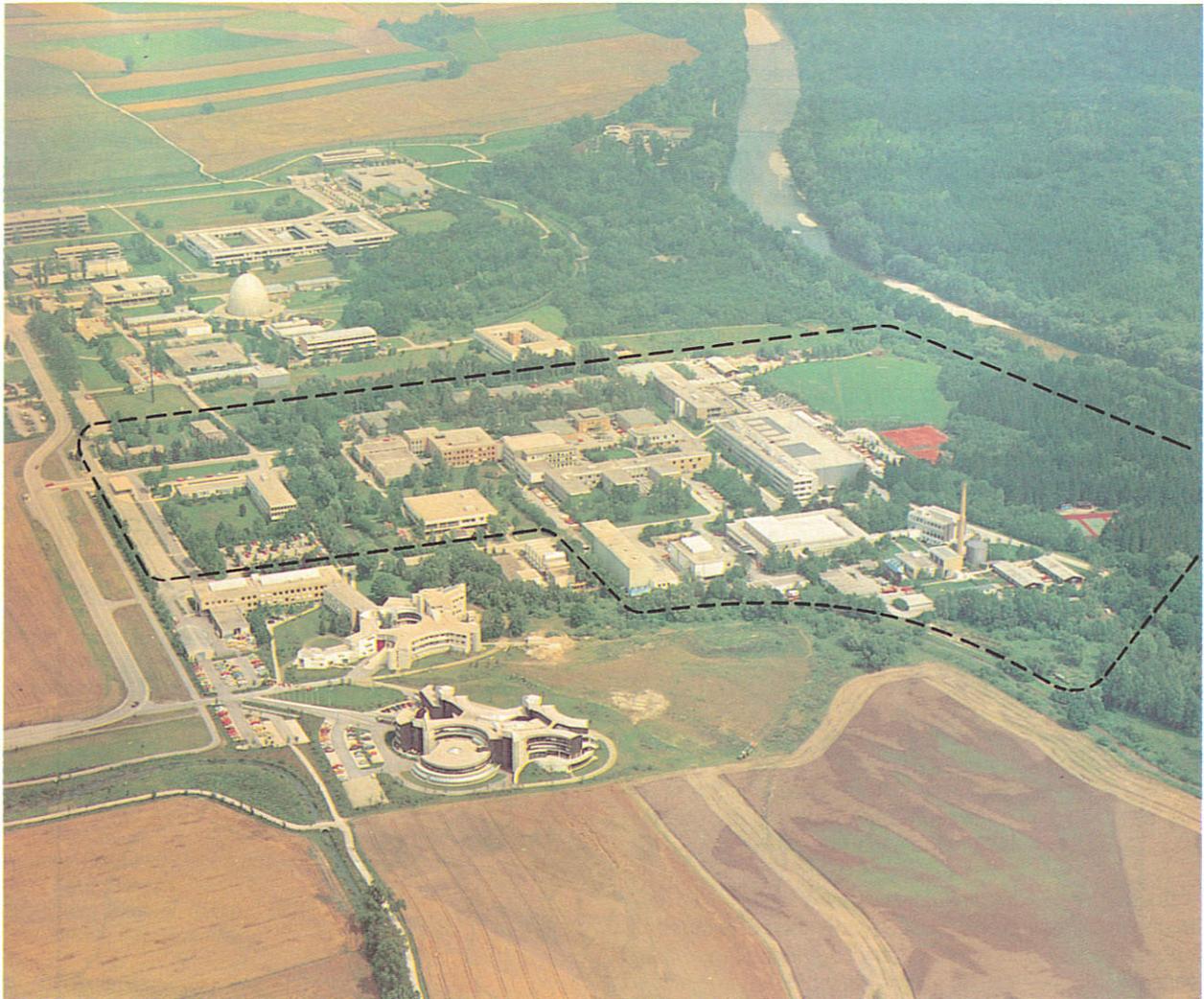


Abbildung 1: Das Institut für Plasmaphysik auf dem Forschungsgelände Garching

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 dieser 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 Durchführung der 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

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 Fusionsforschung.

In Europa wird die Fusionsforschung gemeinsam von den Ländern der Europäischen Gemeinschaft sowie Schwe-

den 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 Studien-Gruppe in Garching den auf JET folgenden »Nächsten Europäischen Torus« (NET), der bereits die Vorstufe eines

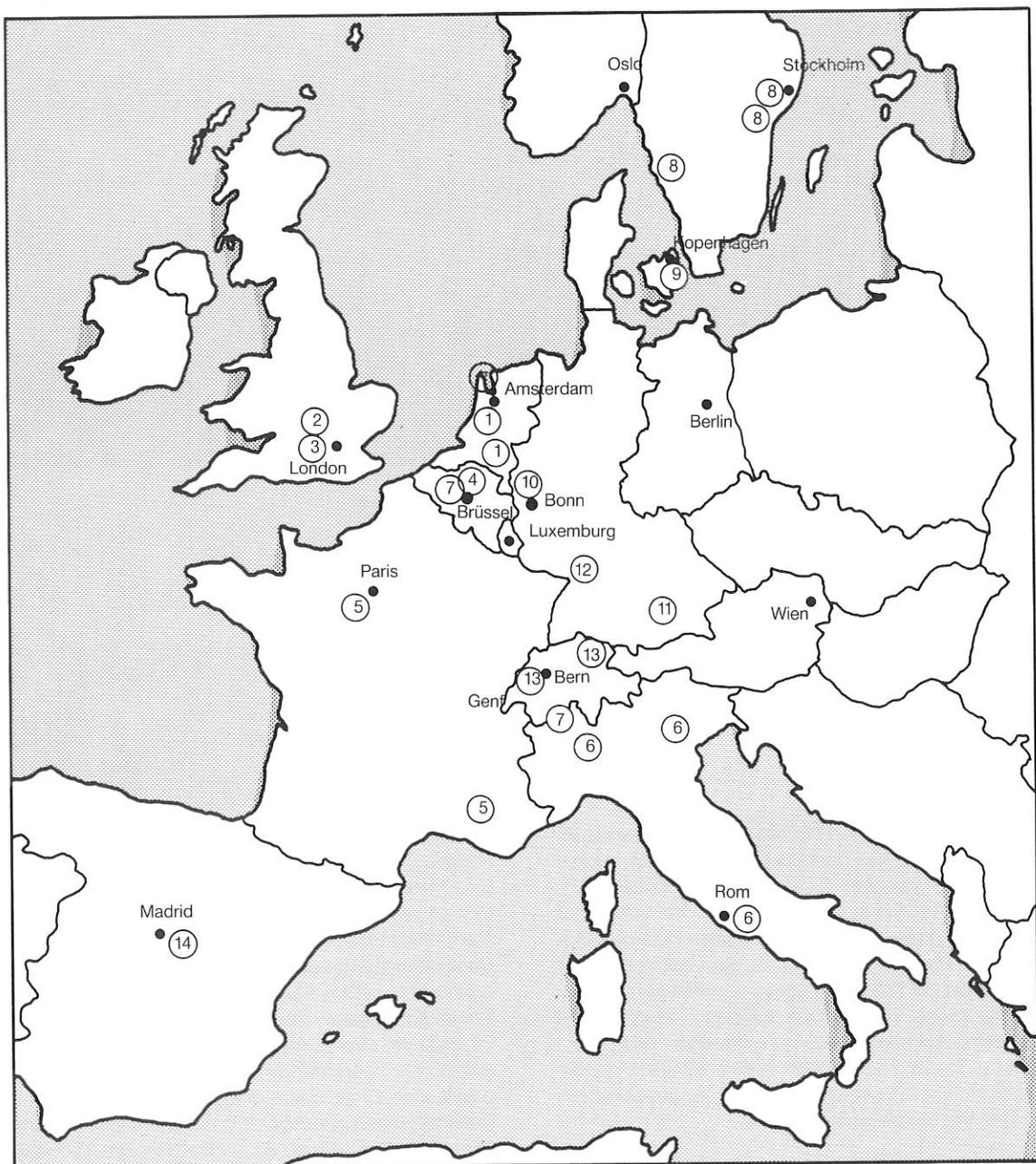


Abbildung 2: Fusionslaboratorien in Europa

- 1 *Stichting voor Fundamental Onderzoek der Materie (FOM), Niederlande*
 - FOM Amsterdam Holland
 - FOM Nieuwegein Holland
 - ECN Petten
- 2 *United Kingdom Atomic-Energy Authority (UKAEA), Großbritannien*
 - Culham Laboratory, Abingdon
 - AERE, Harwell
- 3 *JET Joint Undertaking, Abingdon, Großbritannien*
- 4 *Etat Belge, Belgien*
 - Ecole Royale Militaire, Brüssel
 - Université Libre de Bruxelles
 - SCK/CEN, Mol
- 5 *Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Frankreich*
 - Cadarache
 - Saclay
- 6 *Comitato Nazionale per la Ricerca e lo Sviluppo dell' Energia Nucleare e delle Energie Alternative (ENEA), Italien*
 - CRE Frascati
 - CRE Cassacia
 - IFP/CNR Milano
 - IGI/CNR Padova
- 7 *Joint Research Centre (IRC)*
 - Geel, Belgien
 - Ispra (Varese), Italien
 - Petten, Niederlande
- 8 *Naturvetenskapliga Forskningsradet (NFR), Schweden*
 - Stockholm
 - Göteborg
 - Studsvik
- 9 *Forsøgsanlaeg Riso, Roskilde, Dänemark*
- 10 *Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Bundesrepublik*
- 11 *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Bundesrepublik*
- 12 *Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Bundesrepublik*
- 13 *Confédération Suisse*
 - Centre de Recherche en Physique des Plasmas (CRPP), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
 - PSI, Villingen und Würenlingen
- 14 *Centro de Investigaciones Energeticas Mediambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spanien*

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 in Garching gemeinsam an der Planung eines »Internationalen Thermonuklearen Experimentalreaktors« (ITER).

Insgesamt sind in Europa etwa 1200 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 zu NET 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 erfolgreich gearbeitet. Diese Arbeiten werden mit dem Experiment ASDEX Upgrade fortgesetzt, das einen für NET geeigneten Divertor testen wird. Diese Experimente ergänzen auch das Programm von JET, der noch ohne Divertor geplant wurde. JET plant daher 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, müssen daher auch andere Fusionskonzepte weiterverfolgt werden. Von diesen ist der Stellarator, der von Anfang an zum Programm des Instituts gehörte, am aussichtsreichsten und am weitesten entwickelt. Das europäische Programm sieht vor, daß die Untersuchung des Stellarators im Institut für Plasmaphysik vorangetrieben wird.

Das Deutsche Fusionsprogramm

In der Bundesrepublik 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 die Kernforschungsanlage Jülich mit dem Tokamak TEXTOR und seinem Programm zur Plasma-Wand-Wechselwirkung.

Einführung in die Arbeiten des IPP

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).

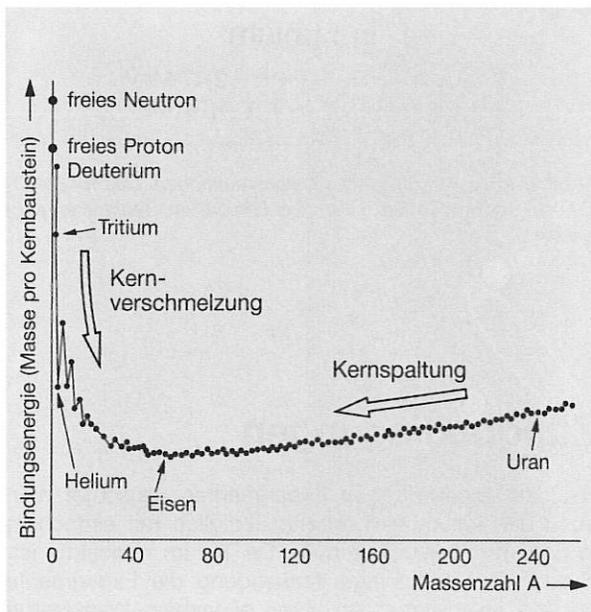


Abbildung 3: Die Kernbausteine sind von einer Atomsorte zur anderen verschieden stark aneinander gebunden. Durch Umordnung der Kernbausteine in fester verbundene Gruppierungen – entweder durch die Spaltung schwerer Kerne oder durch die Verschmelzung leichter Kerne wie Wasserstoff – können große Energiemengen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

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, 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.

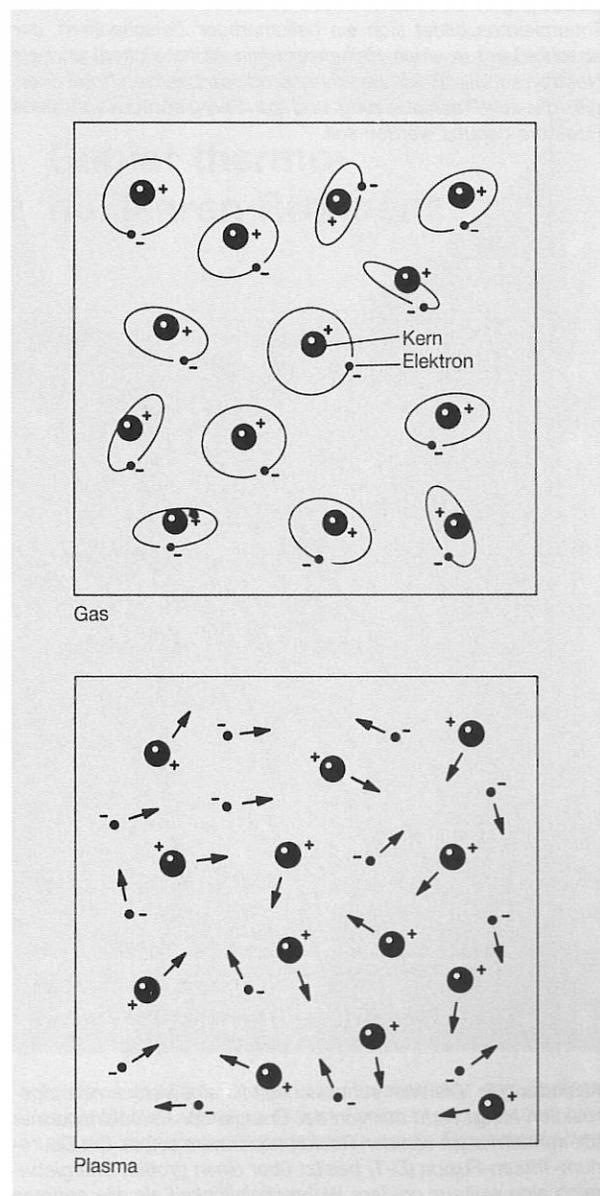


Abbildung 4: In einem Gas sind die Elektronen an die Atomkerne gebunden, in einem Plasma dagegen sind Elektronen und Kerne (Ionen) voneinander getrennt.

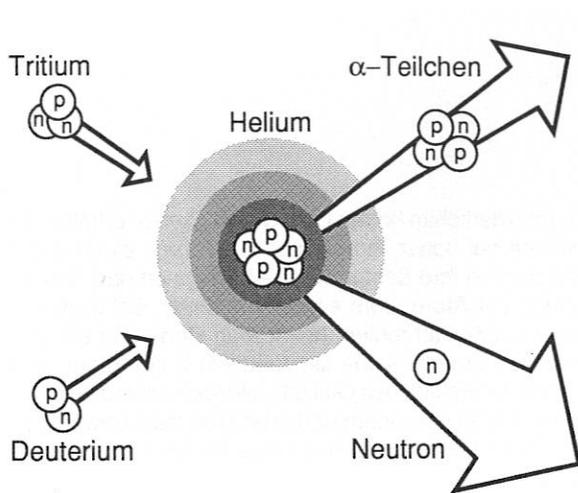
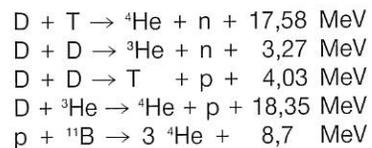


Abbildung 5: Beim Zusammenstoß eines Deuterium- und eines Tritiumkernes bildet sich ein heliumartiger Zwischenkern, der anschließend in einen Heliumkern (ein Alphateilchen) und ein Neutron zerfällt. Beide Reaktionsprodukte besitzen hohe Energie, die zur Plasmaheizung und zur Energieproduktion eines Reaktors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

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.

Fusionsreaktionen



Brutreaktionen in Lithium

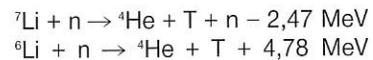


Abbildung 7: Verschiedene Fusionsreaktionen. Das für die D-T-Fusion nötige Tritium kann aus Lithium im Reaktor erzeugt werden.

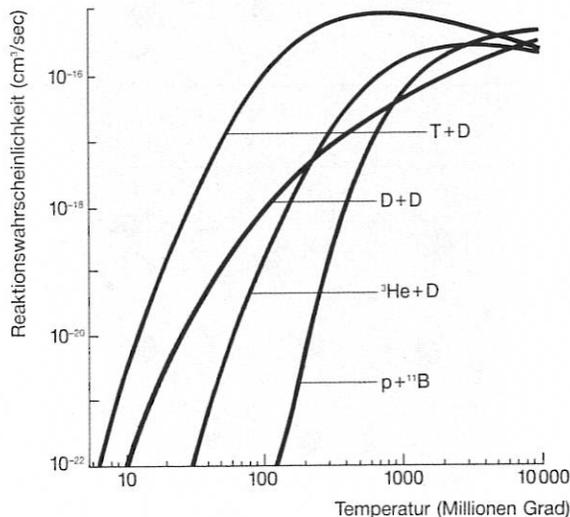


Abbildung 6: Die Wahrscheinlichkeit für eine Verschmelzungsreaktion hängt nicht nur von der Energie der Reaktionspartner ab, sondern auch von den Reaktionspartnern selbst. Die Deuterium-Tritium-Fusion (D-T) besitzt über einen großen Energiebereich eine weitaus größere Wahrscheinlichkeit als alle anderen 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 Energie der dabei erzeugten Alphateilchen (Heliumkerne) ausreicht, die Temperatur des Plasmas aufrechtzuerhalten. Das Plasma brennt dann ohne äußere Energiezufuhr weiter.

Für die Zündung sind vor allem drei Eigenschaften des Plasmas von Bedeutung: die Temperatur, die Plasmadichte und die Energieeinschlußzeit, die ein Maß ist für die Güte der Wärme-Isolation des Plasmas. Die günstigsten Bedingungen für Einschlußzeit und Dichte erhält man bei einer Temperatur von etwa 100 Millionen Grad. Dann fordert das erweiterte »Lawson-Kriterium« (siehe Abbildung 8) für das Produkt aus Dichte und Einschluß-

zeit einen Wert von etwa 10^{14} Sekunden pro Kubikzentimeter. (Als typische Werte werden Einschlußzeiten von ein bis zwei Sekunden und Dichten von etwa 10^{14} Ionen pro Kubikzentimeter angestrebt.) Wegen dieser extrem niedrigen Dichte – 250000fach dünner als die Lufthülle der Erde – besitzt ein gezündetes Plasma trotz der hohen Temperatur eine kaum größere Leistungsdichte als eine normale Glühbirne.

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

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

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

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

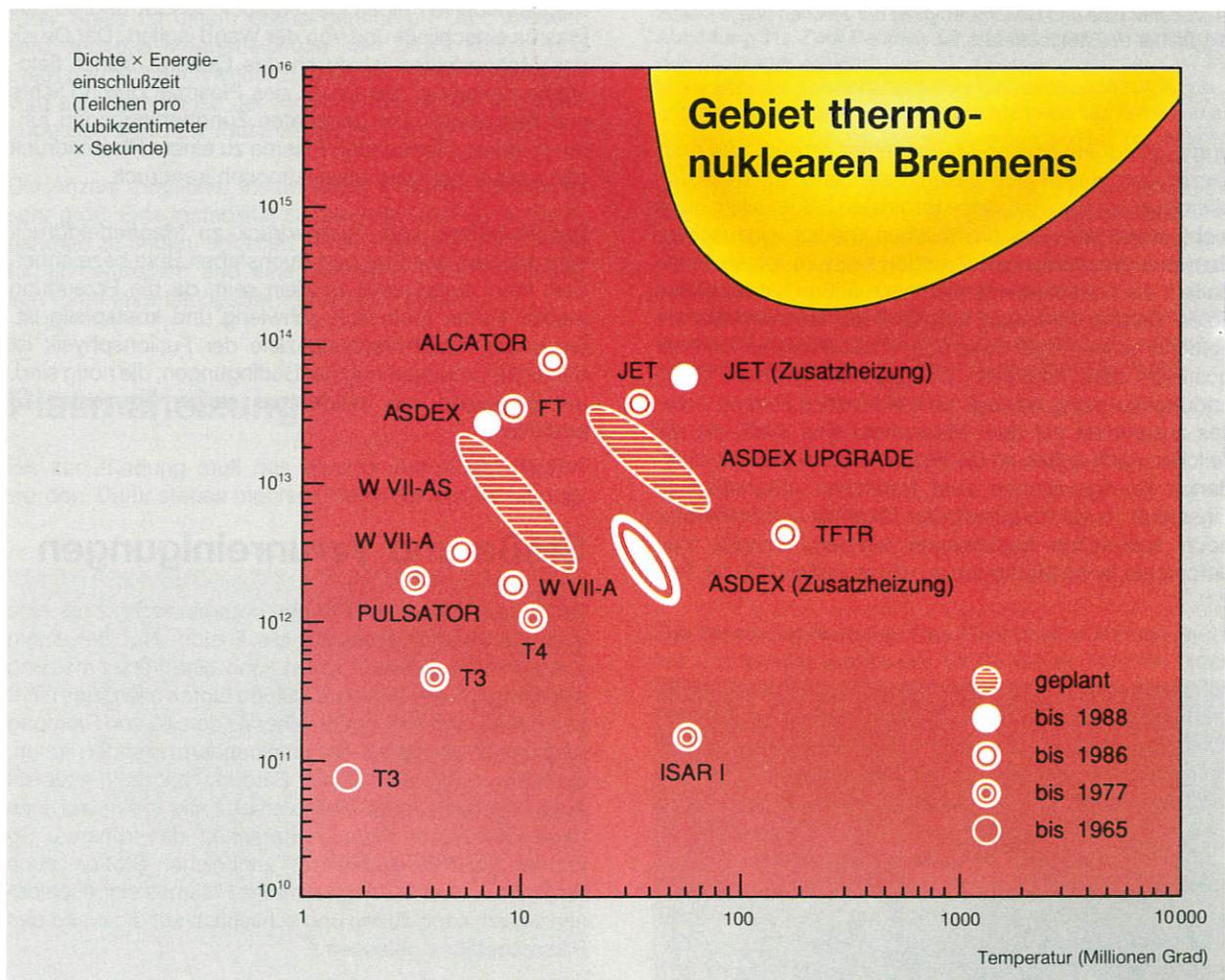


Abbildung 8: Nach dem erweiterten Lawson-Kriterium ist Zündung möglich, wenn das Produkt aus Plasmadichte und Energieeinschlußzeit größer ist als etwa 10^{14} Sekunden pro Kubikzentimeter. Dies gilt für die Deuterium-Tritium-Reaktion und erfordert eine Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin. Wie die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

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

ISAR 1: Garching, BRD
 JET: Culham, Großbritannien
 Pulsator: Garching BRD

T3, T4: Moskau, UdSSR
 TFTR: Princeton, USA
 WENDELSTEIN: Garching, BRD

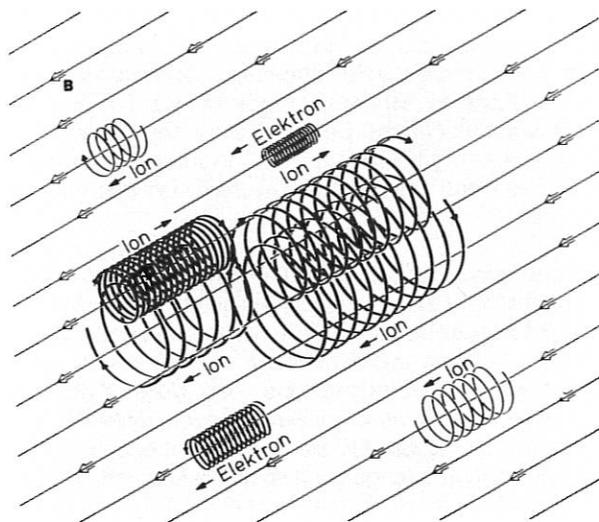


Abbildung 9: Geladene Teilchen bewegen sich spiralförmig um die Magnetfeldlinien. Der Radius der Spirale wird um so größer, je größer Masse und Geschwindigkeit der Teilchen und je kleiner die Stärke des Magnetfeldes ist.

durch geeignete Spulen Magnetfelder erzeugt, die ringförmig (toroidal) in sich geschlossen sind. Es stellt sich allerdings heraus, daß diese toroidalen Felder allein noch nicht ausreichen, um die Teilchen wirklich einzuschließen: aus geometrischen Gründen sinkt im reinen Toroidalfeld die Feldstärke nämlich nach außen hin ab. Diese Feldänderung verursacht eine Drift der Teilchen über die Feldlinie hinweg nach oben oder unten entsprechend der positiven oder negativen Ladung der Teilchen. Diese Ladungstrennung erzeugt ein elektrisches Feld und dieses zusammen mit dem Magnetfeld eine Kraft, die die Teilchen nach außen an die Wand treibt. In den verschiedenen Konfigurationen zum toroidalen magnetischen Einschluß, deren Hauptvertreter Tokamak und Stellarator noch ausführlich beschrieben werden, wendet man unterschiedliche Methoden an, diese Außendrift der Teil-

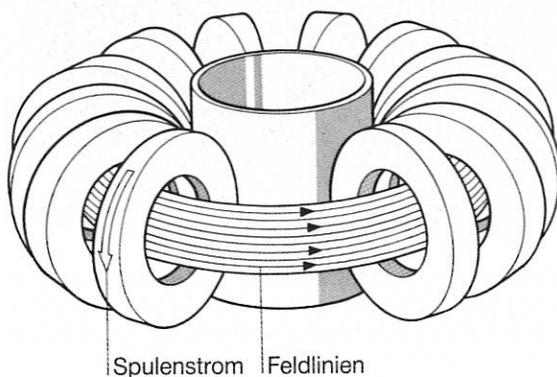


Abbildung 10: Durch eine toroidale Anordnung von ringförmigen Spulen läßt sich ein in sich geschlossenes Magnetfeld ohne offene Enden herstellen.

chen zu verhindern. (Andere Einschlußkonzepte wie zum Beispiel »magnetische Spiegel« oder »Trägheitseinschluß« werden im IPP nicht bearbeitet.)

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

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 1 bar, also etwa Atmosphärendruck.

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

Stöße und Verunreinigungen

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

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

Instabilitäten

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

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

Plasmaheizung

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

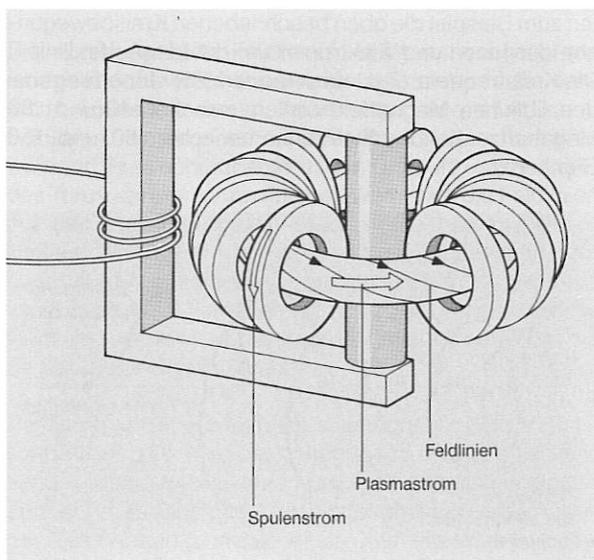


Abbildung 12: Stromheizung: Ein relativ kleiner Strom, der in vielen Windungen um den Eisenkern eines Transformators geführt wird, kann in der »Sekundärwicklung«, dem Plasmaring, einen großen Strom treiben.

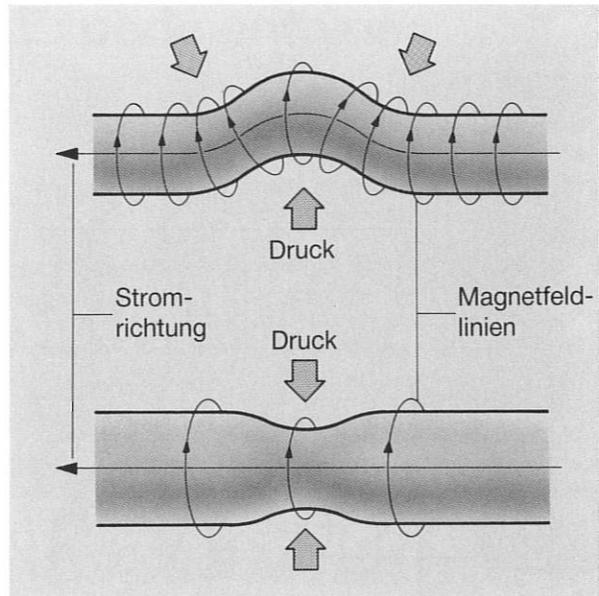


Abbildung 11: Zwei Beispiele für Instabilitäten in einem stromdurchflossenen Plasma:

In der Abbildung oben hat sich der Plasmaschlauch zufällig nach oben ausgebeuldet. 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 Gegendruck aus.

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

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

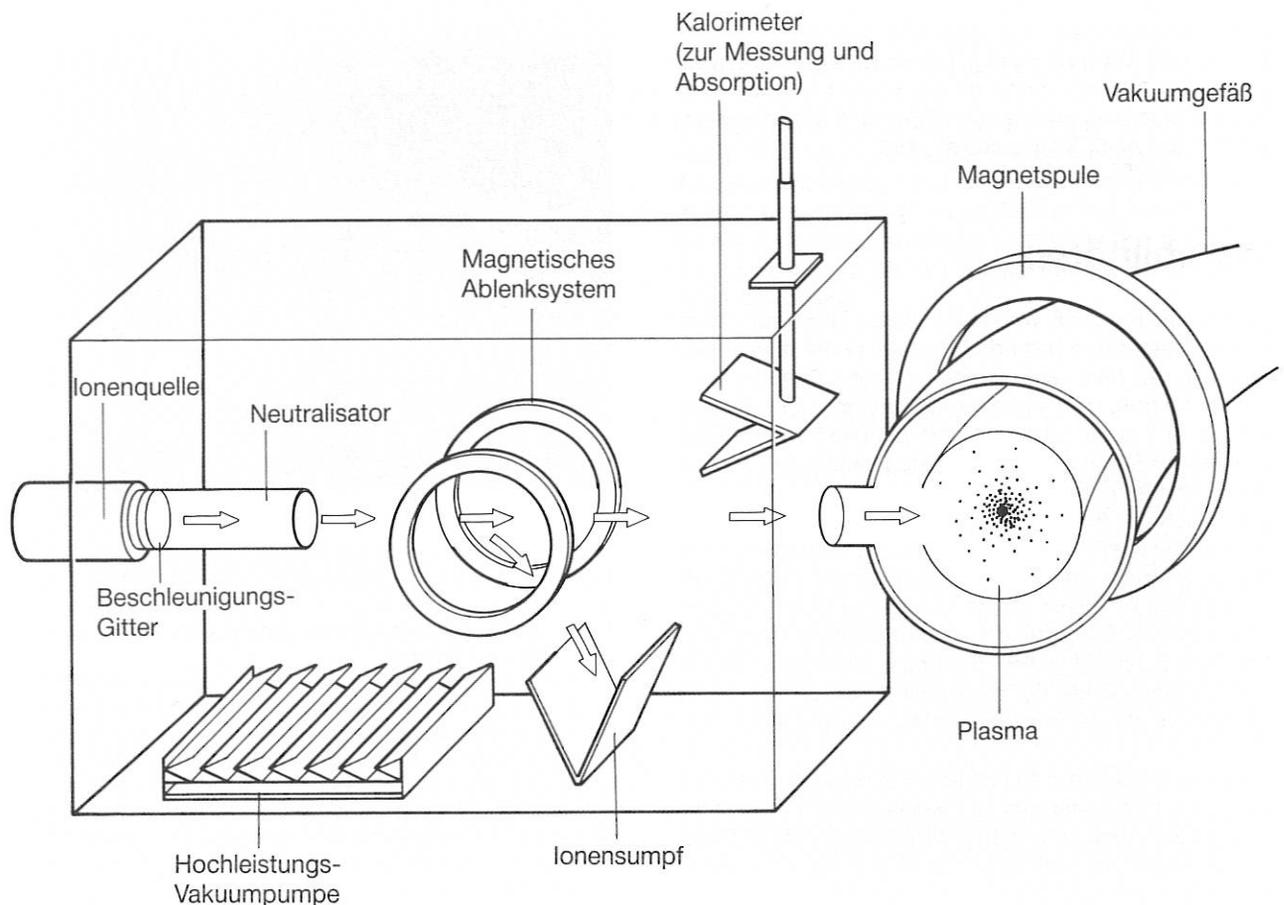


Abbildung 13: Neutralteilchenheizung: In dem Injektor werden in einer Ionenquelle Ionen erzeugt, dann beschleunigt und neutralisiert. Die schnellen Teilchen dringen in das Plasma ein, wo sie ihre Energie über Stöße an die Plasmapartikel weitergeben.

Die Neutralinjektionsheizung: Teilchen hoher Bewegungsenergie, die in das Plasma hineingeschossen und dort eingefangen werden, geben über Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen ab und heizen sie auf (siehe Abbildung 13): 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 Ablenksystem aus dem Strahl entfernt und 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.

Die Hochfrequenzheizung: Die Ionen und Elektronen eines Plasmas im Magnetfeld führen verschiedenartige Eigenschwingungen aus, die von außen durch Einstrahlung einer elektromagnetischen Welle der richtigen Frequenz resonant angeregt werden können. Dabei nehmen die Teilchen Energie aus dem elektromagnetischen Feld

der Welle auf und geben sie über Stöße an die anderen Teilchen weiter. Besonders geeignete Resonanzen bieten zum Beispiel die oben beschriebenen Kreisbewegungen der Ionen und Elektronen um die Magnetfeldlinien. Die Kreisfrequenz (Zyklotronfrequenz) der Ionen liegt bei den üblichen Magnetfeldstärken zwischen 10 und 100 Megahertz, die der Elektronen zwischen 60 und 150 Gigahertz.

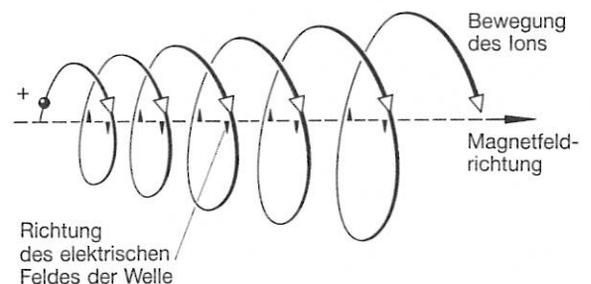


Abbildung 14: Hochfrequenzheizung: Wenn eine elektromagnetische Welle die gleiche Drehfrequenz hat wie ein Ion im Magnetfeld, kann das Ion aus dem elektrischen Feld der Welle Energie aufnehmen.

Magnetfeldkonfiguration – Experimenttypen

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

Der Tokamak

In einem Tokamak schließen zwei sich überlagernde Magnetfelder das Plasma ein: erstens ein toroidales Feld, das durch äußere Spulen erzeugt wird, und zweitens das Feld eines im Plasma erzeugten Stroms, dessen Feldlinien sich kreisförmig um den Strom schließen. (Der Plasmastrom wird üblicherweise durch eine Transformatorspule auf der Achse des Torus erzeugt. Diese Spule wird so angeordnet, daß ihr Magnetfeld das Plasma möglichst nicht beeinflusst.) Wie im vorigen Kapitel gezeigt, wird ein Plasma in einem rein toroidalen Feld nach außen an die Wand getrieben. In dem kombinierten Feld laufen die Feldlinien und die an sie gebundenen Teilchen nicht mehr kreisförmig um die Torusachse, sondern winden sich schraubenförmig um die Seele des Torus, die zentrale Magnetfeldlinie. Teilchen, die diesen Feldlinien folgen, empfinden zwar weiterhin eine Drift, zum Beispiel nach unten. Solange sich die Feldlinien bei ihrem schraubenförmigen Verlauf aber in der oberen Hälfte des Plasmatorus 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. Nach einem ganzen Umlauf eines Teilchens hat sich damit seine Entfernung von der Seele nicht geändert. Außer dem Toroidalfeld und dem Feld des Stromes benötigt der Tokamak noch ein drittes, vertikales Feld, das die Lage des Stromes im Plasmagefäß fixiert.

Die umlaufenden Feldlinien spannen sogenannte »magnetische Flächen« auf, die man sich wie die Jahresringflächen in einem Baumstamm vorstellen kann. Feldlinien, die in einem »Jahresring« starten, behalten während ihres schraubenförmigen Umlaufs um die Seele des Torus »ihren« Jahresring bei. Wenn sich die Feldlinien auf den ineinandergeschachtelten Flächen bei einem Umlauf um den Torus alle gleich oft um die Seele drehen, nennt man das Feld verscherungsfrei. Ein Tokamakfeld weist stets eine Verscherung auf. Hier drehen sich die Feldlinien auf den inneren Magnetfeldflächen öfter um die Seele als auf den äußeren.

Der Strom im Tokamak dient also nicht nur zum Heizen, sondern wird vorwiegend benötigt, um ein gut einschließendes Magnetfeld zu erzeugen. Er darf daher auch nach Zündung des Plasmas nicht abgeschaltet werden. Weil der Plasmastrom normalerweise über einen Transformator induziert wird, arbeitet der Tokamak nicht kontinuierlich, sondern gepulst: In einem Transformator kann nur für eine beschränkte Zeit ein ansteigender Strom in der Primärwicklung erzeugt und damit ein Strom im Plasma getrieben werden. Danach muß der Transformator »ent-

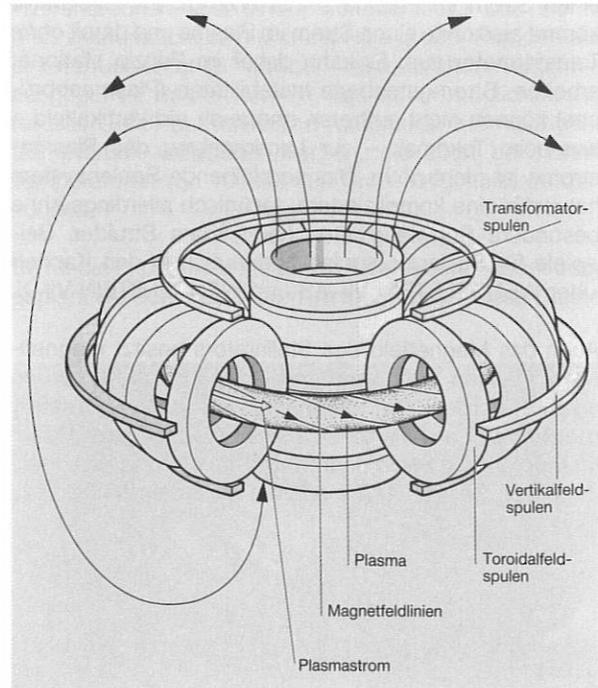


Abbildung 15: Die Schemaskizze eines Tokamaks zeigt die Transformator-, Toroidalfeld- und Vertikalfeldspulen sowie den Plasmastrom, die zusammen das Magnetfeldsystem eines Tokamaks erzeugen.

laden« und der Strom von neuem hochgefahren werden. Bei einem Tokamakreaktor kann man sich Pulszeiten von etwa 20 Minuten vorstellen. Da jedoch ein Reaktor aus technischen Gründen kaum gepulst betrieben werden darf, werden Methoden untersucht, einen kontinuierlichen Strom – zum Beispiel durch Hochfrequenzwellen – zu erzeugen. Dieses Verfahren wurde erfolgreich an dem Experiment ASDEX erprobt.

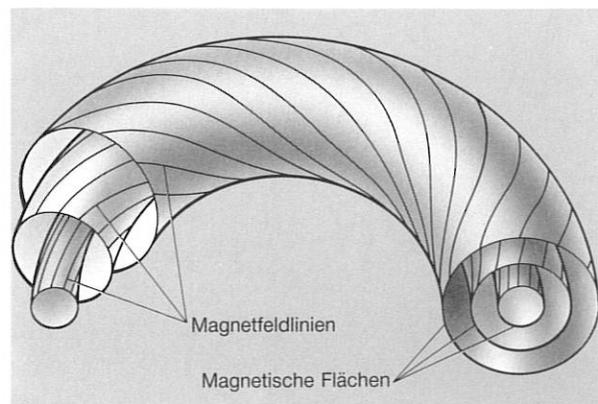


Abbildung 16: Die von den Magnetlinien aufgespannten magnetischen Flächen in einem Tokamak. Die Feldlinien auf den inneren Flächen drehen sich öfter um die Seele – die zentrale Ringlinie – als Feldlinien auf den äußeren Flächen: Das Feld hat eine Verscherung.

Der Stellarator

In einem Stellarator wird die schraubenförmige Drehung (Rotation) der Feldlinien um die Torus-Seele ausschließlich durch Ströme in äußeren Spulen und nicht durch einen Strom im Plasma selbst erzeugt. Ein Stellarator kommt also ohne einen Strom 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 Lageregelung des Plasmaströms ist nicht nötig. Das verbleibende Spulensystem hat dafür eine kompliziertere, technisch allerdings ohne besondere Schwierigkeiten herstellbare Struktur. Beispiele für Stellaratorspulen finden sich in den Kapiteln über WENDELSTEIN VII-AS und WENDELSTEIN VII-X.

Auch das Magnetfeld des Stellarators besitzt magnetische Flächen und kann mit und ohne Verscherung erzeugt werden. Die sogenannte »**Rotationstransformation**« gibt an, wie oft sich eine Feldlinie beim Umlauf im Ring um die Seele gedreht hat. Ist dies eine rationale Zahl (zum Beispiel $1/3$), bedeutet dies, daß die Feldlinie

(im Beispiel nach drei Umläufen) wieder in sich zurückläuft. Ist die Rotationstransformation nicht rational, laufen die Feldlinien beliebig oft auf ihrer magnetischen Fläche um, ohne jemals wieder an die gleiche Stelle im Torus zu kommen. In einem Magnetfeld ohne Verscherung haben alle Feldlinien die gleiche Rotationstransformation und schließen sich bei einem rationalen Wert nach der gleichen Zahl von Umläufen mit sich selbst. Es zeigt sich, daß 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.

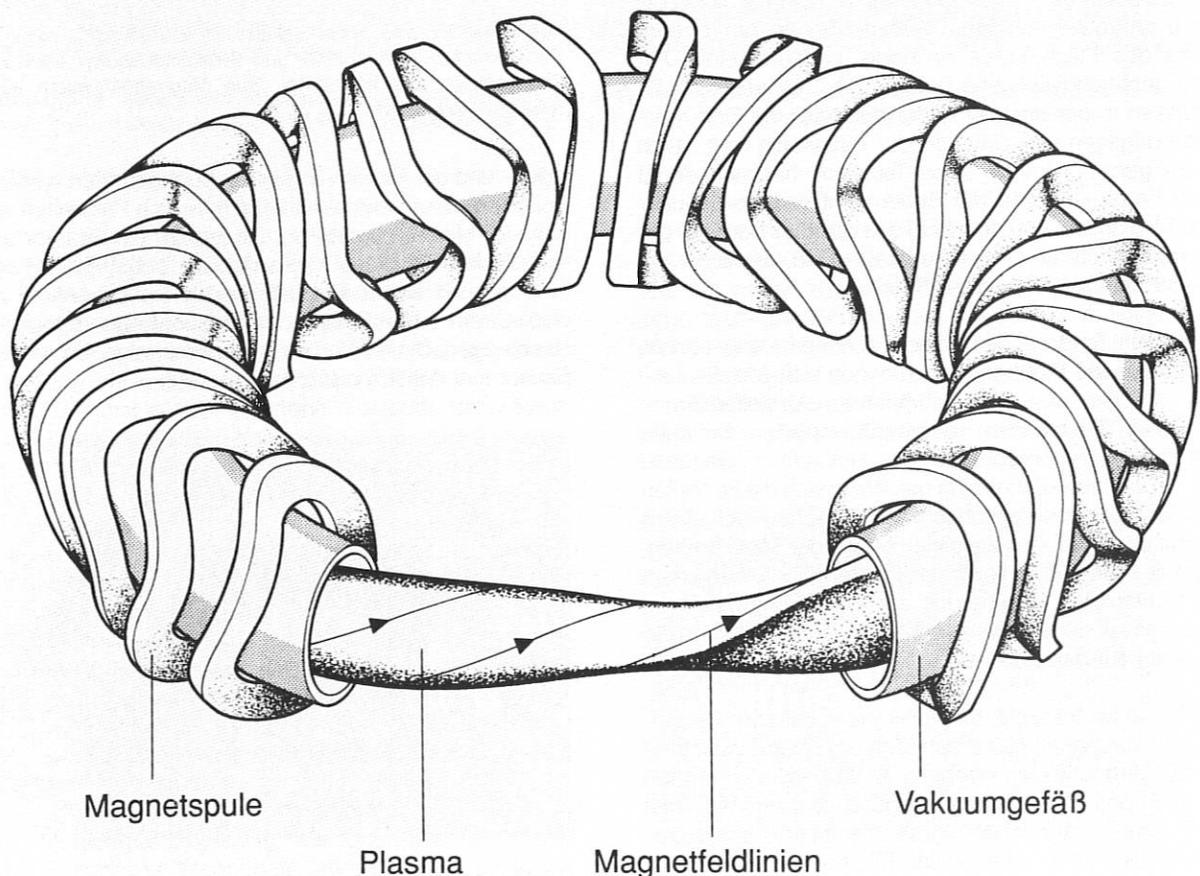


Abbildung 17: Die schematische Skizze eines Stellarators zeigt ein System aus nicht ebenen Einzelspulen. Ihre spezielle Form bewirkt die Drehung der Feldlinien um die Seele, ohne daß ein Strom im Plasma fließen muß.

Elemente der Fusionsexperimente

Vakuumpfäß

Obwohl das Plasma durch ein Magnetfeld eingeschlossen wird, muß es in einem Vakuumpfäß erzeugt werden, das sowohl das Eindringen von Luft als auch das Austreten des Brennstoffs – einfacher Wasserstoff und Deuterium, später das radioaktive Tritium – verhindert. Schon das Eindringen geringer Mengen von Luft würde ein brennendes Plasma sofort zum Erlöschen bringen. (Ein Fusionsreaktor ist dadurch inhärent sicher gegen ein

»Durchbrennen« bei einem Schadensfall.) Das Gefäß muß vakuumdicht sein und mit Hilfe großer Pumpen auf einen Druck unter 10^{-8} Millibar – also Ultrahochvakuum – ausgepumpt werden können. Das ist nur möglich, wenn für das Gefäß ausschließlich Materialien mit niedrigem Dampfdruck verwendet werden, die auch bei hohen Temperaturen von 100 bis 300 Grad ausgeheizt werden können.

Da für die Experimente, die im IPP betrieben, gebaut oder geplant werden, kein Tritium benötigt wird, müssen keine



Abbildung 18: Blick in die Vakuumkammer von ASDEX: Die engen Schlitze oben und unten führen in die Divertorkammern. Den Zwischenraum überbrückt auf beiden Seiten ein Limiter, der mehr oder weniger nahe an das Plasma herangefahren werden kann. Auf diese Weise können in ASDEX sowohl Limiter- als auch Divertorentladungen ablaufen.

Vorkehrungen gegen das Entweichen von Tritium getroffen werden. Anders ist dies bei Experimenten wie NET, die mit einem gezündeten Plasma und daher auch mit Tritium arbeiten werden. Hier werden an das Gefäß besondere Anforderungen gestellt, wie zum Beispiel Doppelwandigkeit.

Damit der Transformator den Strom im Plasma und nicht im Gefäß induziert, muß die Leitfähigkeit des Gefäßes sehr gering oder der Torus durch einen Isolatorspalt getrennt sein. Wegen der hohen Beanspruchung durch Druck und magnetische Kräfte, die durch lokal induzierte Ströme hervorgerufen werden können, kommt als Gefäßmaterial vor allem Edelstahl in Frage. Für Diagnostiken, Heizung und viele Steuerungen benötigt das Gefäß zahlreiche Öffnungen und Stutzen, die angeschweißt oder über Metall dichtungen mit dem Gefäß verbunden werden.

Limiter

Das Plasma in einem toroidalen Magnetfeld breitet sich wegen der Stöße der Teilchen so weit aus, bis es die Wand berührt, wo es neutralisiert wird. Die Gefäßwand übernimmt dabei – abgesehen von der Strahlung – an den Berührungsstellen die ganze Energie, die aus dem Inneren des Plasmas nach außen transportiert wird. Dafür

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

Magnetischer Limiter

Der direkte Kontakt des eingeschlossenen Plasmas mit der Wand läßt sich vermeiden, wenn das Magnetfeld so gestaltet wird, daß auf einen geschlossenen äußersten »Jahresring« nur noch offene Magnetflächen folgen, deren Feldlinien auf die Wand treffen. Die letzte geschlossene Magnetfläche wird »Separatrix« genannt; sie separiert das Gebiet des guten Einschlusses innen von einem nicht eingeschlossenen Gebiet außen. Wenn nur die äußeren Zonen der Felder die Wand oder Limiter-ähnliche Strukturen berühren, laufen die meisten Verunrei-

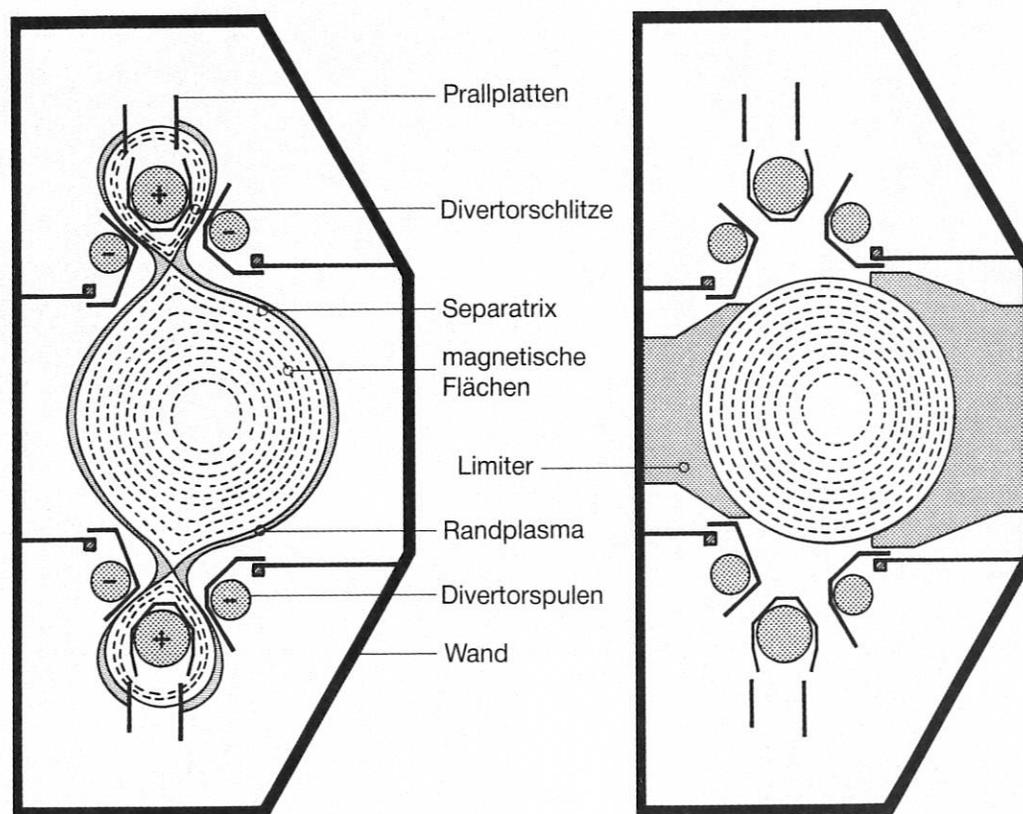


Abbildung 19: Zwei Querschnitte durch das ASDEX-Gefäß und die magnetischen Flächen des Feldes: rechts mit Limiter, links mit Divertor. Der Limiter begrenzt das Plasma und fängt alle Teilchen auf, die über die letzte geschlossene Magnetfläche hinausgehen. Bei Betrieb mit Divertor werden die Teilchen, die die Separatrix nach außen überqueren, in den Divertor geführt und dort auf den Prallplatten neutralisiert. Die Platten um die Divertorspulen trennen die Plasmakammern durch enge Schlitze von der Divertorkammer.

gungen auf die Wand, bevor sie in das Plasma eindringen können. Weil das gut eingeschlossene Plasma durch die Form des Magnetfeldes limitiert ist, spricht man von einem »magnetischen Limiter«. Da bei einem magnetischen Limiter das gut eingeschlossene Plasma nicht in direktem Kontakt mit der Wand steht, kann der Plasmarand viel heißer sein als bei materieller Limiterbegrenzung. Wie sich bei gegenwärtigen Messungen herausstellt, könnte dies die Ursache für die beobachtete Verbesserung des Einschlusses in Experimenten mit magnetischem Limiter sein.

Divertor

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

Die vor allem im Institut für Plasmaphysik an ASDEX (Axialsymmetrisches Divertorexperiment) mit Divertor durchgeführten Experimente haben nicht nur zu beson-

ders sauberen Plasmen geführt, sondern auch Plasmen mit hohen Einschlußzeiten ermöglicht, die in Limiterentladungen nicht erreichbar sind. Es scheint daher, daß ein Divertor oder zumindest ein magnetischer Limiter für einen späteren Fusionsreaktor notwendig ist.

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

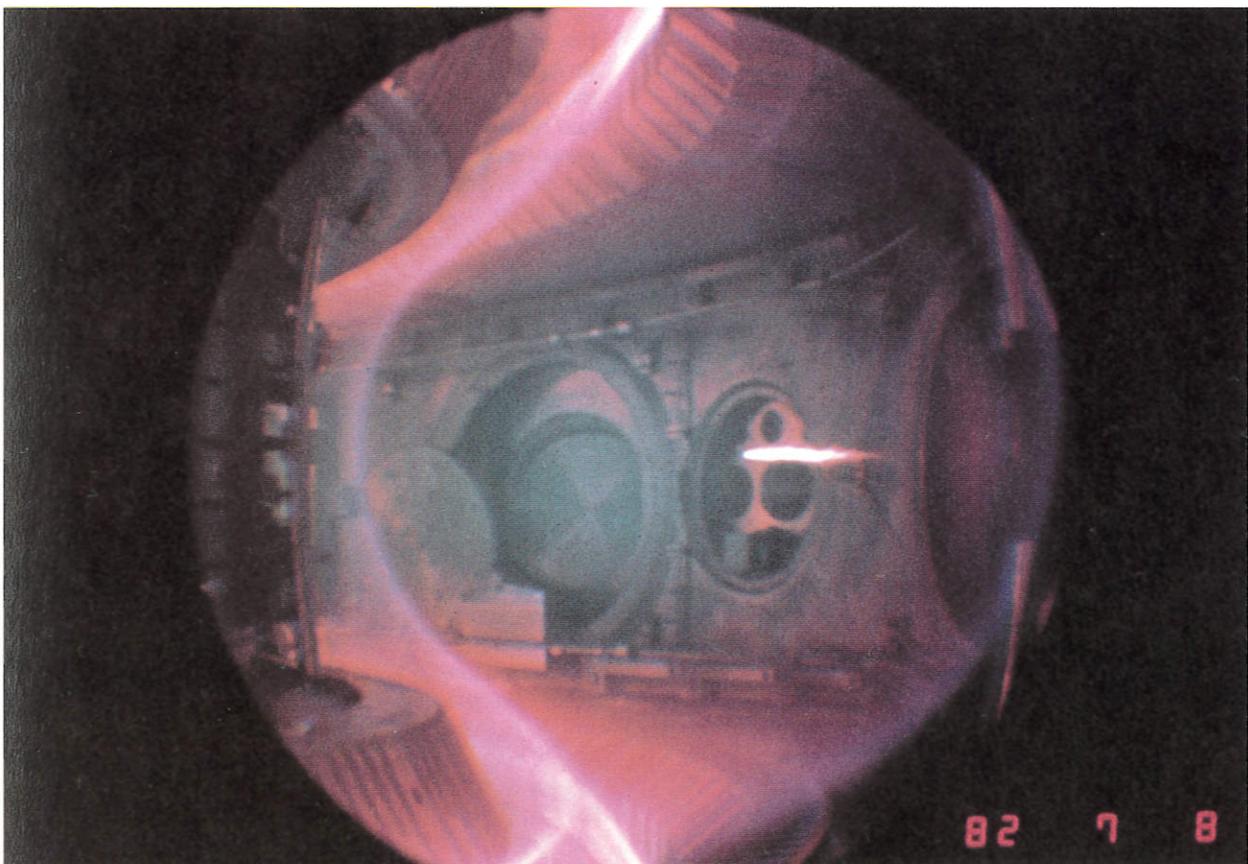


Abbildung 20: Blick in das Plasmagefäß von ASDEX während einer Entladung: Da ein heißes Wasserstoffplasma nicht im sichtbaren Bereich leuchtet, ist nur das relativ kalte Plasma am Rand und die Strahlung von Verunreinigungen zu sehen. Die helle Spur rechts ist die Bahn eines Pellets, das im Plasma verdampft, das Plasma dadurch abkühlt und sichtbar macht.

Plasmadiagnostik

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

Neben diesen »passiven« Methoden werden auch aktive 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.

Messung der Elektronentemperatur

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

Eine andere Methode benutzt die vom Plasma ausgesandte Elektronen-Zyklotronstrahlung. Die Plasmaelektronen, die sich mit der Zyklotronfrequenz auf Kreisbahnen um die Magnetfeldlinien bewegen, strahlen dabei Wellen dieser Frequenz und deren Oberschwingungen ab. In normalen Fusionsplasmen hängt die Intensität der zweiten Oberschwingung dieser Strahlung nur von der Temperatur ab, die auf diese Weise meßbar wird. 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 die Dichte der Elektronen bestimmen. Mit geeichten Detektoren, die das Streulicht des Laserstrahls von verschiedenen Orten des Plasmas aufsammeln,

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

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

Messung der Ionentemperatur

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

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

Abbildung 21: Zahlreiche Diagnostiken und Heizeinrichtungen umgeben das Fusionsexperiment ASDEX. ►

Sicherheits- und Umweltaspekte der Fusion

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

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

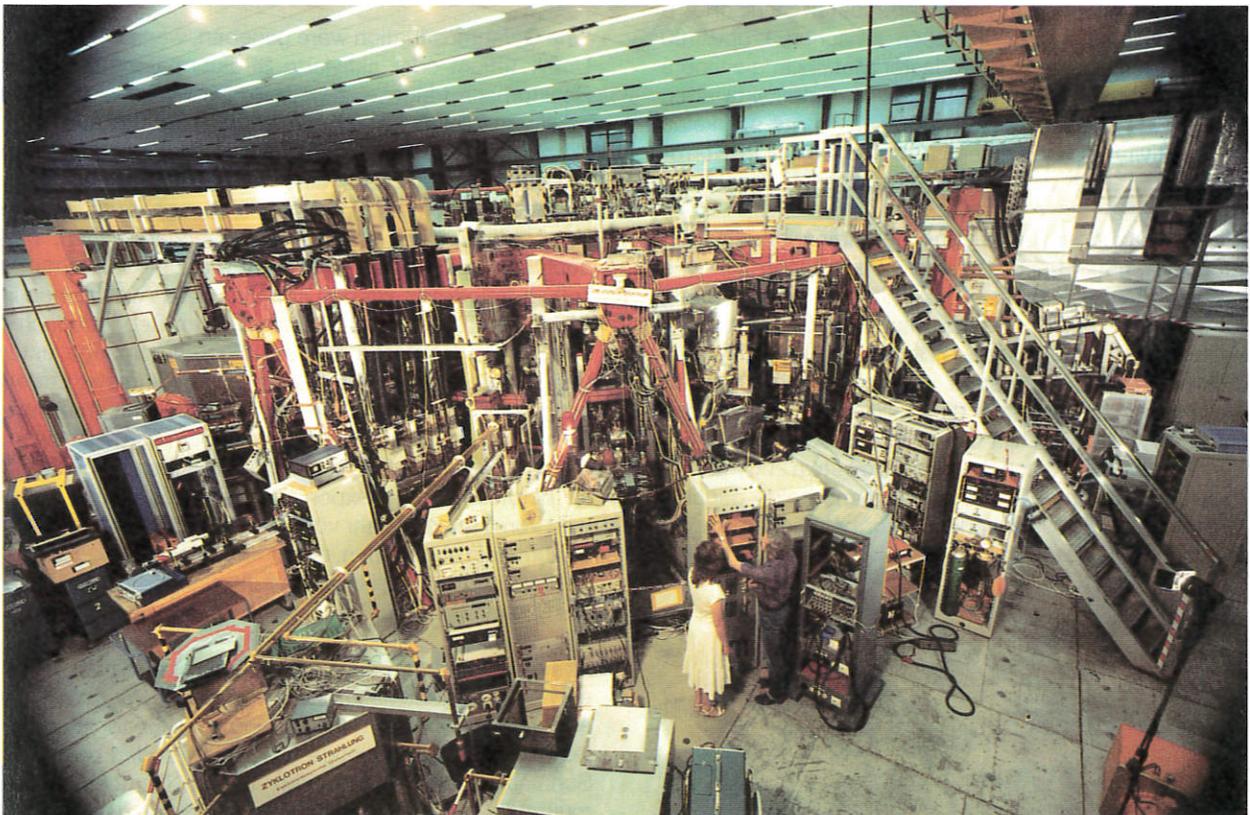
- Ein »Durchgehen«, das heißt ein unkontrollierter Leistungsanstieg über die Nennleistung hinaus, ist in einem Fusionsreaktor nicht möglich.
- Die auch in einem Fusionsreaktor auftretenden radioaktiven Substanzen – Tritium sowie die aktivierten Strukturmaterialien – haben ein relativ niedriges biologisches Gefährdungspotential.

- Langfristig sieht man die Möglichkeit, Menge und Langzeitaktivität der entstehenden radioaktiven Stoffe durch geeignete Materialentwicklung für die erste Wand und das Blanket ganz erheblich zu vermindern.

Radioaktive Belastung im Normalbetrieb

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

Tritium, die schwerste und einzige radioaktive Variante des Wasserstoffs, besitzt eine Halbwertszeit von 12,3



Jahren. Seine radioaktive Strahlung – Beta-Strahlung, das heißt Elektronen – kann menschliche und tierische Haut nicht durchdringen. Für Lebewesen wird sie dann gefährlich, wenn das Tritium durch Einatmen, Essen oder Trinken vom Körper aufgenommen wird. Einmal in den Körper gelangt, besitzt Tritium dort je nach Anlagerungs-ort eine biologische Halbwertszeit zwischen zehn Tagen – für den Hauptteil des aufgenommenen Tritiums – bis zu 450 Tagen. Eine Gefahr entsteht dabei durch den Teil des Tritiums, der während dieser Zeit zerfällt. Im Ökosystem verteilt und verdünnt sich Tritium – auch in der Form tritiierten Wassers – wesentlich schneller als etwa Spaltprodukte und kann Land und Gebäude nicht für längere Zeit kontaminieren. Ebenso wenig gibt es Anzeichen für eine Tritiumanreicherung in der Nahrungskette.

Da das Tritium erst an Ort und Stelle im Brutmantel aus 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 2 Gramm Tritium pro Jahr aus dem Reaktor entweichen werden. Zum Vergleich: Die im Jahre 1985 weltweit vorhandene Menge an Tritium, die hauptsächlich aus Kernwaffenversuchen, aber auch aus natürlichen Quellen und Kernkraftwerken stammt, wird auf etwa 100 Kilogramm geschätzt.

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

Alle Freisetzungen zusammengenommen bedeuten – berechnet unter ungünstigsten Bedingungen für eine Person, die sich ständig in einem Kilometer Entfernung vom Reaktor aufhält – eine maximale Dosis von 1,5 Millirem pro Jahr. Die mittlere Belastung für die in einem Umkreis von 50 Kilometern um den Reaktor lebende Bevölkerung beträgt dann 0,01 Millirem pro Jahr. Diese Werte entsprechen etwa einem bzw. 0,005 Prozent der natürlichen radioaktiven Belastung von etwa 200 Millirem in der Bundesrepublik. Sie liegen damit beide 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 10 Sekunden Brenndauer aus.

Die Leistungsdichten im Plasma und Blanket sind mit etwa 3 bzw. 20 Watt pro Kubikzentimeter gering. 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.

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

Eine Gefahrensituation wäre gegeben, wenn durch einen Unfall Tritium oder aktivierte Strukturmaterialien in die Reaktorhalle freigesetzt werden. Da der Reaktor nach heutigem Wissen keine Energiequellen enthält, die einen Durchbruch der Reaktor-Sicherheitshülle von innen bewirken könnten, hätte ein solcher Unfall geringe Auswirkungen nach außen. Unterstellt man trotzdem ein Versagen der Sicherheitshülle, so erwartet man, daß auch im ungünstigsten Fall nicht mehr als 200 Gramm Tritium freigesetzt werden können. Beim Ausströmen in 20 Meter Höhe – etwa durch ein Leck im Gebäudedach – hätte diese kurzfristig freigesetzte Tritiummenge unter ungünstigsten Wetterbedingungen in 1 Kilometer Entfernung, das heißt am Zaun der Anlage, eine maximale Belastung von 6 bis 8 rem zur Folge. Ein Vergleichswert: Die deutsche Regelung für kerntechnische Anlagen sieht für beruflich strahlenexponierte Personen einen Grenzwert von 5 rem pro Jahr vor. Über einen 100 Meter hohen Schornstein abgegeben, ergibt die gleiche Menge Tritium an der gleichen Stelle gemessen eine maximale Belastung von etwa 0,25 rem.

Aktivierte Strukturmaterialien könnten bei einem Unfall entweder als Metallstaub freigesetzt werden oder nach einer starken örtlichen Überhitzung von Reaktorteilen, die festes Material in flüchtige Oxide umwandelt oder zum Schmelzen und Verdampfen bringt. Darüber hinaus müßte die Rückhaltefunktion aller Barrieren gestört sein.

Es ist heute noch nicht bekannt, wieviel festes Strukturmaterial auf diese Weise mobilisiert werden und in das Reaktor-Sicherheitsbehältnis gelangen könnte. Weil sich diese Freisetzen zunächst innerhalb der Sicherheitshülle ablagern, kann man nach heutigem Wissen annehmen, daß auch im Falle eines unterstellten Leckes 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.

Es ist noch unbekannt, ob es langfristig gelingen kann, anstelle der Deuterium-Tritium-Fusion andere Fusionsreaktionen technisch nutzbar zu machen, bei denen die Tritiumherstellung im Reaktor entfallen und auch die Neutronenproduktion gesenkt werden könnte, die für den radioaktiven Abfall verantwortlich ist.

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 4000 Kubikmeter an mittelaktivem und 2000 Kubikmeter an hochaktivem metallischen Abfall. Dies entspricht der Menge nach etwa dem doppelten Abfall aus einem Spaltungsreaktor, bei der Sicherheit bestehen jedoch große Unterschiede:

So ist das biologische Gefährdungspotential der Fusion etwa 100fach, nach 100 Jahren bereits 2000fach geringer. Die Halbwertszeiten der wesentlichen Fusionsrückstände sind bedeutend kleiner – 1 bis 100 Jahre gegenüber 100 bis 10000 Jahren im Falle der Kernspaltung. Diese Vorzüge lassen sich noch erheblich steigern, wenn anstelle der jetzt in Betracht gezogenen konventionellen Stahlsorten für die erste Wand und das Blanket modifizierte Stähle entwickelt werden können. Stähle ohne störende Beimengungen, wie zum Beispiel Nickel und Molybdän, deren wirtschaftliche Herstellung nach einiger Entwicklungsarbeit als möglich betrachtet wird, könnten bereits nach einigen Jahren Zwischenlagerung als mittelaktiver Abfall behandelt werden. Bei sehr günstiger Entwicklung würde Abfall dann nur in der Verbraucher-Generation anfallen, die ihn erzeugt hat. In größeren Zeiträumen käme es deshalb wegen der kurzen Halbwertszeiten zu keiner Anhäufung hochradioaktiver Materialien, eventuell könnte ein Teil der Metalle sogar wieder verwendet werden.

Ergebnisbericht des IPP

Die Arbeitsbereiche des Instituts für Plasmaphysik

Das Institut ist in neun Bereiche aufgegliedert, fünf vorwiegend experimentelle, drei theoretische sowie den Bereich Informatik. Der Wissenschaftliche Direktor des IPP ist **Prof. Klaus Pinkau**.

Der experimentelle Bereich E1 unter **Dr. Michael Kaufmann** ist zuständig für Planung und Bau des Experimentes ASDEX Upgrade und entwirft und baut Diagnostiken für das europäische Gemeinschaftsexperiment JET. Der experimentelle Bereich E2 unter der Leitung von **Dr. Günter Grieger** faßt die Aktivitäten des Instituts auf dem Gebiet des Stellarators zusammen. Hauptaufgabe des experimentellen Bereiches E3 unter Leitung von **Dr. Friedrich Wagner** ist der Betrieb des Tokamak ASDEX. Der Bereich Oberflächenphysik unter Leitung

von **Prof. Volker Dose** betreibt vorwiegend experimentelle Arbeiten zur Plasma-Wand-Wechselwirkung. Der Bereich Technologie unter **Prof. Rolf Wilhelm** vereinigt die Gruppen, die für die Zusatzheizung an den Experimenten verantwortlich sind. Der Bereich Theorie 1 unter **Prof. Dieter Pfirsch** widmet sich vorwiegend grundlegenden Problemen der Plasmaphysik. Der Bereich Theorie 2 unter Leitung von **Prof. Arnulf Schlüter** ergänzt die experimentellen Untersuchungen des Bereichs 2 mit theoretischen Arbeiten zum Stellarator. Der Bereich Theorie 3 wird von **Prof. Karl Lackner** geleitet und befaßt sich mit theoretischen Arbeiten zur Tokamak-Physik. **Prof. Friedrich Hertweck** leitet den Bereich Informatik, der vor allem die Datenverarbeitung von ASDEX Upgrade vorbereitet.

Bereich / Bereichsleiter		Experimentelle Plasmaphysik 3 Wagner	Oberflächenphysik Dose	Experimentelle Plasmaphysik 1 Kaufmann	Theorie 3 Lackner	Experimentelle Plasmaphysik 2 Grieger	Theorie 2 Schlüter	Technologie Wilhelm			Theorie 1 Pfirsch	Informatik Hertweck		
Projekt / Projektbeauftragter	Arbeitsgruppe / Gruppenleiter	ASDEX Wagner	Plasma-Wand-Wechselwirkung Dose	ASDEX Upgrade Köppendörfer	ASDEX Upgrade Diagnostik Röhr	Tokamakphysik Lackner	WENDELSTEIN VII - AS Renner	WENDELSTEIN VII - X Wobig	Stellaratorphysik Nührenberg	Neutralinjektion Speth	LHRH Leuterer	ICRH Wesner	Theorie 1 Biskamp	Informatik Hertweck
	PROJEKTE	ASDEX Wagner	●	●		○	●				●	●	●	
ASDEX Upgrade Köppendörfer		◎	◎	●	●	●				●		●		●
JET- Mitarbeit Kaufmann		○	◎		●	◎								
NET / ITER - Mitarbeit Grieger		○	○			◎								
WENDELSTEIN VII - AS Renner			○				●	○		●		●		
WENDELSTEIN VII - X Wobig							○	●	●	○		○		
	Allgemeine Physik (incl. Plasmaprozeß- technik)		●									●		

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

Abbildung 1: Beiträge der Gruppen und Bereiche zu den einzelnen Forschungsprojekten.

Tokamaks

Tokamaks wurden Anfang der 50er Jahre in der Sowjetunion entwickelt und wegen ihrer Erfolge und ihrer prinzipiellen Einfachheit bald weltweit zum führenden Experimenttyp der Fusionsforschung. Das Institut für Plasmaphysik arbeitet gegenwärtig an fünf verschiedenen Tokamak-Experimenten: an ASDEX, an dem Nachfolgeexperiment ASDEX Upgrade, das derzeit gebaut wird, sowie an dem im englischen Culham betriebenen europäischen Gemeinschaftsexperiment JET (Joint European Torus). Außerdem beherbergt das Institut eine europäische Studiengruppe, die den JET-Nachfolger NET (Next European Torus) plant, sowie die europäisch-amerikanisch-sowjetisch-japanische ITER-Gruppe, die den Internationalen Thermonuklearen Experimentalreaktor (ITER) vorbereitet.

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 bei Zusatzheizung zu einer bedeutenden Verbesserung der Einschlußzeiten führt. Nach den Erfolgen mit ASDEX soll in dem Nachfolgeexperiment ASDEX Upgrade der Divertor in einer Form untersucht werden, die auch in einem Reaktor einsetzbar wäre. Ergebnisse dieses Experimentes werden daher auch für NET 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.

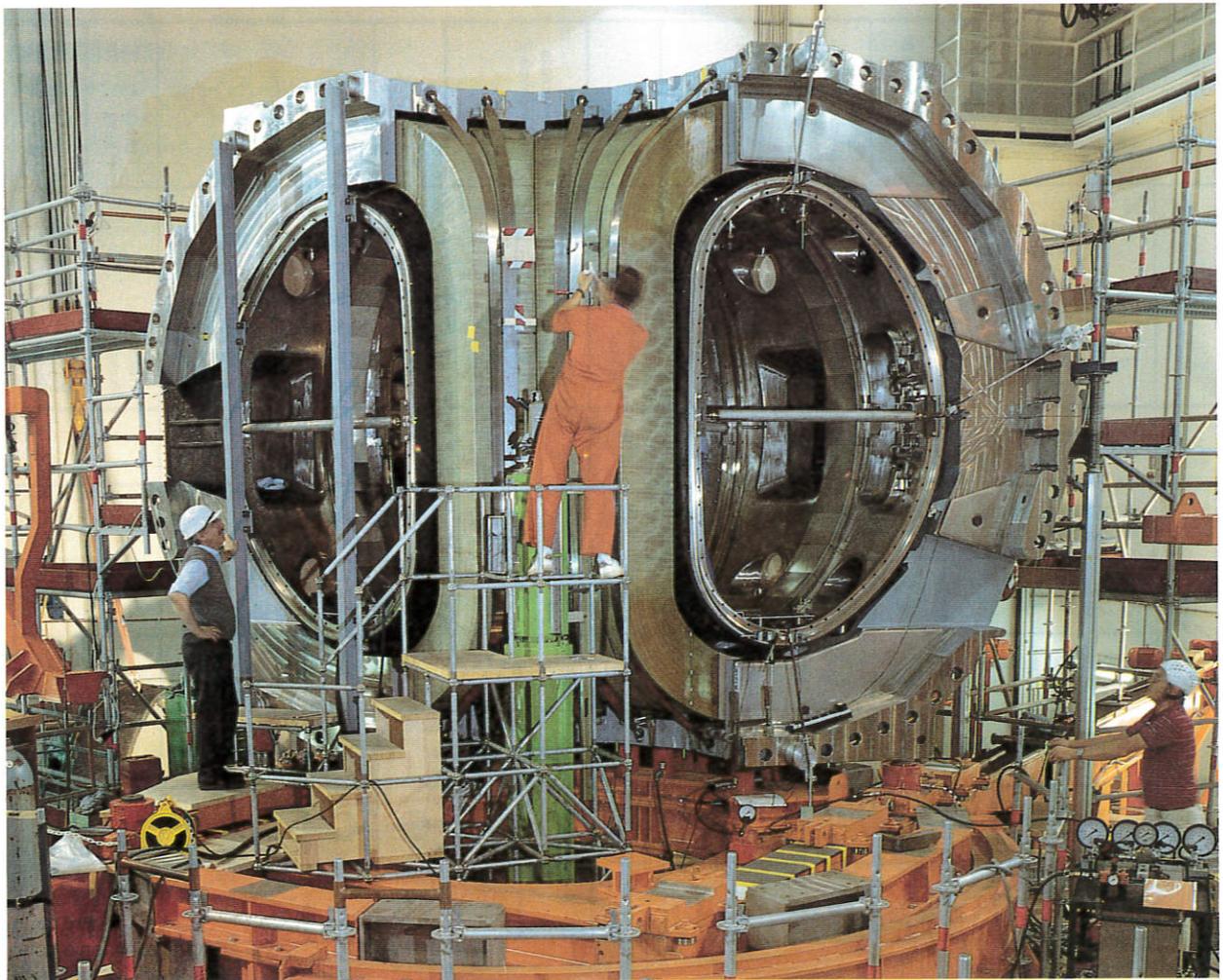


Abbildung 2: Montage des Fusionsexperimentes ASDEX Upgrade. Zu sehen sind Teile des Vakuumgefäßes, Hauptfeldspulen sowie die äußere Stützstruktur.

ASDEX

Projektleiter: Dr. Friedrich Wagner

ASDEX ist ein axialsymmetrisches Divertor-Experiment vom Typ Tokamak. Die Besonderheit des Divertors ist eine spezielle Magnetfeldkonfiguration, die das Plasma durch eine einhüllende Magnetfeldfläche begrenzt und so den Kontakt mit der Gefäßwand verhindert. Im klassischen Limiter-Tokamak dagegen wird die Ausdehnung des Plasmaschlauches durch den Kontakt mit einer materiellen Blende – dem sogenannten Limiter – eingeschränkt. Da an dem Limiter ein großer Teil des Energie- und Teilchenstroms aus dem Plasma abgegeben wird, führt dies zu kontinuierlicher Erosion des Limiters und zur Verschmutzung des Plasmas mit Limitermaterial. Hingegen werden in einem Divertor-Tokamak die Energie- und Teilchenströme aus der Randschicht des Plasmas entlang einer »magnetischen Entsorgungsstrecke« durch enge Schlitze ober- und unterhalb der Plasmahauptkammer in separate Nebenkammern abgelenkt (divertiert). Hier wird die Energie des Plasmas dann von speziellen Prallplatten aufgenommen. Obwohl das in der Hauptkammer eingeschlossene Plasma bis zum Rand hin hohe Temperaturen besitzt (bis zu mehreren 100 Elektronenvolt bzw. einigen Millionen Grad) und auch heiß in die Randschicht eindiffundiert, ist das Plasma an den Stellen, an denen es schließlich mit den Prallplatten in Berührung kommt, abgekühlt. Dieses verhältnismäßig »kalte« Plasma (unter 10 Elektronenvolt bzw. 100 000 Grad) richtet wesentlich weniger Schaden an den Wänden an.

Das Divertorkonzept hat in der Vergangenheit seine Leistungsfähigkeit bei der Reinhaltung des Plasmas gezeigt. Zusätzlich bietet die Divertorkonfiguration die Möglich-

keit, unter verbesserten Einschlußbedingungen zu arbeiten. Vor einiger Zeit hatte man nämlich weltweit in Limiterexperimenten eine Verschlechterung des Energieeinschlusses beobachtet, wenn das Plasma – zusätzlich zur Ohmschen Heizung durch den Plasmastrom – von außen geheizt wurde. Unter diesen Umständen mußte man es für unmöglich halten, die Zündbedingungen in einem zusatzgeheizten Tokamak zu erreichen. Daher war es um so bemerkenswerter, daß sich im Divertorbetrieb von ASDEX ein Entladungstyp einstellen ließ, in dem die Zusatzheizung keine Verschlechterung des Einschlusses zur Folge hatte, sondern hohe Dichte und Einschlußzeit beobachtet wurden. Diese Betriebsart wurde vom ASDEX-Team »H-Regime« (high confinement-regime) genannt, im Unterschied zu den bisherigen schlechten Einschlußverhalten, dem »L-Regime« (low confinement-regime). Wegen seiner ausschlaggebenden Bedeutung für einen zukünftigen Fusionsreaktor wurde daraufhin weltweit in allen Tokamak-Labors nach dem H-Regime gesucht. Dabei wird es immer sicherer, daß nur Tokamaks mit Divertor oder wenigsten mit magnetischem Limiter das H-Regime erreichen können.

Um die Eigenschaften des Divertors weiter kritisch zu prüfen, wurde ASDEX seit 1986 umgebaut, um Divertorplasmen nun auch bei langen Heizpulsen bis zu 10 Sekunden Dauer und hohen Heizleistungen untersuchen zu können. Mit den längeren Pulszeiten können 20- bis 30fach höhere Energiebeträge als bisher von der Heizung in das Plasma eingestrahlt werden. Die wesentlichen technischen Fragestellungen hierbei betreffen die Regulierbarkeit der Dichte und die Aufrechterhaltung einer niedrigen Verunreinigungskonzentration über lange Zeiten. Das physikalische Interesse richtet sich auf langsame Vorgänge im Plasma, die zum Beispiel durch Stromdiffusion – mit Einstellzeiten von etwa einer Sekunde – bestimmt werden, oder durch Transportvorgänge im Plasma-Inneren von einigen 100 Millisekunden Dauer. Außerdem bieten lange Heizpulse die Möglichkeit, diagnostische Techniken anzuwenden, die bislang nur den lange andauernden Ohmschen Entladungen vorbehalten waren.

Zur »Härtung« des Experimentes für die Langpuls-Experimente wurden in den Divertorkammern die bisherigen Prallplatten aus Titan durch wassergekühlte Kupferplatten ersetzt. Auch die Gefäßwände der Divertorkammern wurden durch wassergekühlte Zwischenwände vor Überhitzung geschützt. Parallel zum Gefäßumbau wurde die Neutralinjektions-(NI-) und Ionen-Zyklotronheizung (ICRH) für den Langpulsbetrieb umgerüstet. Die wesentlichen Elemente sind wassergekühlte Gitter in den Ionenquellen und wassergekühlte ICRH-Antennen. Der Langpulsbetrieb von ASDEX bietet die erstmalige Gelegenheit, die Zusatzheizung praktisch unter Dauerbetriebsbedingungen zu testen. Der Umbau von ASDEX wurde auch genutzt zur Umrüstung des Pellet-Injektors auf größere Pellets. Bis zu 80 gefrorene Wasserstoffpartikel können zur Teilchennachfüllung tief ins Plasmainnere eingeschossen werden. Außerdem wurden Antennen für Alf-

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

Abbildung 3: Charakteristische Daten des Experimentes ASDEX

venwellenheizung eingebaut (eine Kooperation mit dem **CRPP Lausanne**), eine neue Lower Hybrid-Heizung bei 2,45 Gigahertz vervollständigt (eine Kooperation mit **ENEA Frascati** und **PPPL Princeton**) sowie die diagnostische Ausstattung an ASDEX verbessert.

Nach etwa einjähriger Betriebspause ging ASDEX im April 1987 wieder in Betrieb. Trotz der mehr als 1000 Flanschverbindungen im Inneren des Vakuumgefäßes traten keinerlei technische Probleme mit der Wasserkühlung der Divertoreinbauten auf. Die bisherigen Betriebserfahrungen zeigen, daß die vorgenommenen Modifikationen im Normalbetrieb auch keine nachteiligen Auswirkungen auf die Plasmaeigenschaften haben: Das Wasserstoff-Recycling ist leicht erhöht, erkennbar an geringeren Gasverbrauch während der Entladung. Dies erschwert zwar die Kontrolle der Dichte; grundsätzlich liegen jedoch noch Niedrig-Recycling-Bedingungen vor, erkennbar etwa an der Abnahme der Dichte bei Neutralteilchenheizung. Das Verunreinigungsverhalten ist vergleichbar mit dem der alten Divertorkammer. Aufgrund des gewechselten Materials der Prallplatten finden sich nun statt Titan ähnliche Mengen an Kupfer im Plasma.

Abbildung 4 zeigt Meßdaten aus einer langen Entladung mit Neutralinjektionsheizung. Dokumentiert wird Stationarität der Dichte und der Verunreinigungen im Plasma während der Heizphase. Die Dichte wird erkennbar durch Sägezahninstabilitäten in der Plasmamitte moduliert. Während des Heizpulses kommt es zu 81 Sägezahnvorgängen, die nahezu mit der Präzision eines Uhrwerks ablaufen. Die Sägezahn-Repetitionsphase wird bestimmt durch Stromdiffusionszeit und Aufheizzeit des Plasmas – wird also letztlich von vielen Plasmaparametern festgelegt. Die strenge Periodizität des Sägezahnvorganges ist ein empfindliches Maß für die Stationarität der Plasmaparameter.

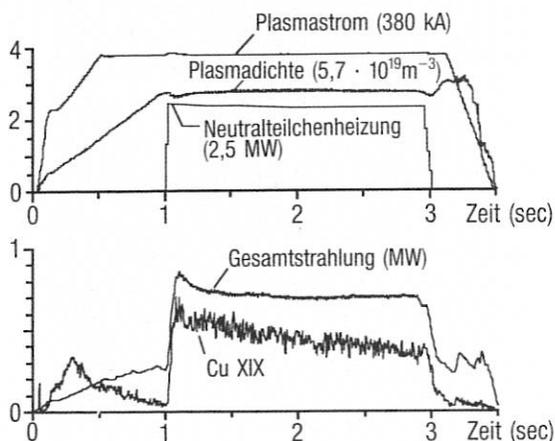


Abbildung 4: Beispiel für eine Entladung mit Neutralteilchenheizung. Aufgetragen ist (oben) der Verlauf von Plasmastrom, Dichte und Heizleistung sowie (unten) die Strahlung der Verunreinigungen, insbesondere von Kupfer (Cu XIX).

Das bisherige weitgehende Unverständnis von Energie- und Teilchentransport im Tokamak, die direkt die Güte der Wärme-Isolation bestimmen, macht die Vorhersage des Verhaltens zukünftiger Experimente nur ungenau möglich. Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand an ASDEX sind deshalb die Transportvorgänge im Plasma. Insbesondere von Interesse sind Plasmen mit »spitzen Dichteprofilen«. Diese Profilform, bei der die Dichte im Zentrum besonders hoch ist und nach außen rasch abfällt, ist nämlich offensichtlich verbunden mit reduziertem Ionentransport, also guter Wärme-Isolation. Da dies auch von der Theorie vorhergesagt wird, bietet sich bei Plasmen mit spitzen Dichteprofilen erstmals die Gelegenheit, theoretische Transportvorstellungen im Experiment zu prüfen. Es gibt drei Operationsbereiche bei ASDEX, in denen Plasmen mit spitzen Dichteprofilen erzeugt werden können: Pellet-Injektion (siehe auch Jahresbericht 1985/86), Neutralteilchen-Injektion entgegen der Richtung des Plasmastromes und das sogenannte IOC-Regime, das nach dem Divertorumbau entdeckt wurde.

Die Pelletnachfüllung der Plasmen profitiert von der Möglichkeit langer Heizpulse, weil nun mit etwa 20 nacheinander eingeschossenen Pellets ein langsamer Dichteaufbau möglich ist. Der Einschub von wesentlich größeren Deuterium-Pellets als früher erbrachte bei mäßiger Neutralteilchenheizung spitze Dichteprofile mit deutlicher Verbesserung des Energie-Einschlusses. Die Einschlußzeit verbleibt oberhalb der Kurve mit Gasnachfüllung, nimmt jedoch mit steigender Heizleistung ab. Mögliche Ursache für diese Einschlußverschlechterung könnte die zunehmende Verbreiterung des Dichteprofiles mit erhöhter Heizleistung sein.

Auch mit der Neutralteilchenheizung alleine lassen sich spitze Dichteprofile erzeugen. Dabei ermöglicht die längere Pulsdauer zum ersten Mal fundierte Untersuchungen auch an solchen injektionsgeheizten Entladungen, deren Dichteprofile sich langsam ändern. So wird eine langsame Zuspitzung der Dichteprofile bei Injektion entgegen der Richtung des Plasmastromes (Counter-NI) beobachtet. Dabei wurde im L-Regime eine bemerkenswerte hohe Energie-Einschlußzeit von 80 Millisekunden erreicht. Dieser Wert ist vergleichbar mit den Einschlußzeiten, die man im H-Regime beobachtet, und etwa doppelt so hoch wie im L-Regime mit Co-Injektion (Einschub der Neutralteilchen in Richtung des Plasmastromes). Dies widerspricht der bisherigen Annahme, daß die Einschlußzeiten bei Co- und Counter-Injektion gleich seien. Der Grund für diese Fehleinschätzung könnte die kurze Pulslänge bisheriger Experimente sein, die eine volle Entwicklung der Entladungen nicht gestattete.

Bei den geänderten Bedingungen für das Wasserstoff-Recycling in der neuen Konfiguration kann im Deuteriumbetrieb mit Gasblasen die Sättigung des Ohmschen Einschlusses nicht beobachtet werden, die früher bei Dichten oberhalb von 3×10^{13} Teilchen pro Kubikzentimeter einsetzte. Statt dessen wird der Energie-Einschluß mit steigender Dichte über die bisherige Grenze hinaus kontinuierlich besser. Dies ist um so bemerkenswerter, als die Sättigung des Einschlusses seit Beginn des ASDEX-Betriebs vorlag und den bisherigen Erfahrungen nach nur mit Pelletnachfüllung vermeidbar war. Das neue Einschlußregime wurde »improved ohmic confinement«

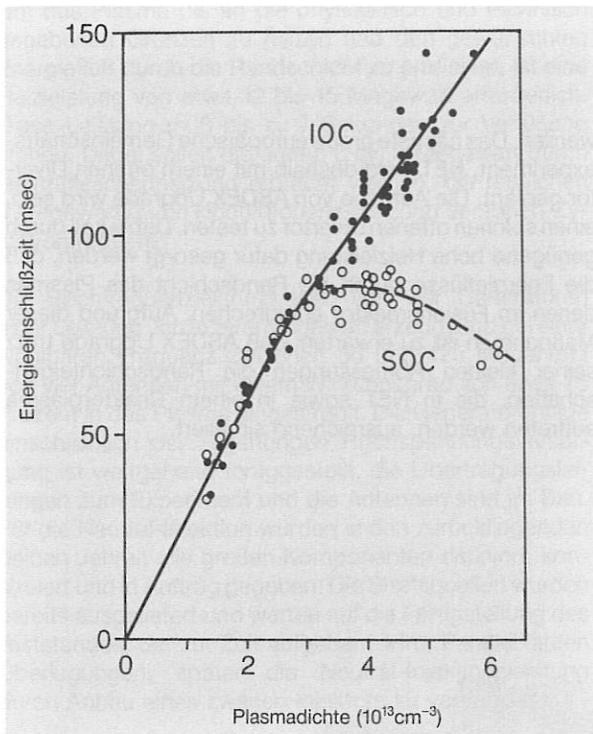


Abbildung 5: Das nach dem ASDEX-Umbau entdeckte IOC-Regime im Vergleich mit dem bisherigen SOC-Regime. Aufgetragen ist der Verlauf der Energie-Einschlußzeit bei ansteigender Plasmadichte.

(IOC) – im Vergleich zum »saturated ohmic confinement« (SOC) – genannt. Der Übergang in das IOC-Regime wird – aus bisher unbekanntem physikalischen Gründen – allein durch die Reduzierung des äußeren Gasflusses beim Übergang in die Dichteplateau-Phase eingeleitet. Die so erreichte Zuspitzung des Dichteprofiles führt auch hier zur Verbesserung des Einschlußverhaltens (vergleiche Abbildung 5).

Gemeinsames Element aller drei Entladungstypen mit spitzen Dichteprofilen – bei Pelletnachfüllung, mit Counter-NI oder dem IOC-Regime – ist die beobachtbare Abnahme der Ionen-Wärmeleitung. Außerdem ist eine konsistente Beschreibung der Plasmaparameter mit neoklassischer Theorie der Ionen-Wärmeleitung möglich. Dieser Befund ist insofern bemerkenswert, als die spitzen Dichteprofile mit drei ganz unterschiedlichen Methoden erzeugt werden. Zur Erklärung dieses Sachverhalts ist anzunehmen, daß das Einschlußverhalten von Tokamaks normalerweise durch einen Typ von Instabilitäten beeinträchtigt wird, der sich durch Zuspitzung des Dichteprofiles unterdrücken läßt. Die Theorie sagt als Instabilitäten bei breiten Dichteprofilen sogenannte η -Moden voraus. In der Tat lassen sich die jeweiligen Gegenfälle (Co-NI- und SOC-Plasmen) mit dem Ionen-Wärmeleitungskoeffizient beschreiben, der für η -Moden berechnet wird. Es wird derzeit an ASDEX eine neue Diagnostik aufgebaut, um die Existenz dieser Instabilität in einem Streuexperiment nachzuweisen.

Der reduzierte Ionentransport bei Entladungen mit spitzem Dichteprofil unterscheidet diesen Plasmazustand grundlegend von den an ASDEX früher entdeckten H-Entladungen, die bei starker Zusatzheizung ebenfalls eine erhöhte Energie-Einschlußzeit aufweisen. Grund für die Einschlußverbesserung im H-Regime ist hauptsächlich die Abnahme des Elektronentransports. Es ist prinzipiell nicht auszuschließen, daß sich beide Arten der Einschlußverbesserung kombinieren lassen. Gute H-Entladungen ließen sich jedoch nach dem Umbau des Divertors nur sehr schwer erzeugen. Durch Verschließen aller unnötigen Öffnungen zwischen der Divertor- und der Entladungskammer im Sommer 1988, um die störende Rückströmung von Kaltgas aus den Divertorkammern zu verhindern, sollte die Ausbildung der H-Mode erleichtert werden.

ASDEX Upgrade

Projektleiter: Dr. Walter Köppendörfer

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. 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. Das nächste große europäische Gemeinschaftsexperiment, NET, wird deshalb mit einem offenen Divertor geplant. Die Aufgabe von ASDEX Upgrade wird sein, einen solchen offenen Divertor zu testen. Dabei soll durch genügend hohe Heizleistung dafür gesorgt werden, daß die Energieflüsse durch die Randschicht des Plasmas denen im Fusionsreaktor entsprechen. Aufgrund dieser Maßnahmen ist zu erwarten, daß ASDEX Upgrade trotz seiner kleinen Abmessungen die Randschichteigenschaften, die in NET sowie in einem Reaktorplasma auftreten werden, ausreichend simuliert.

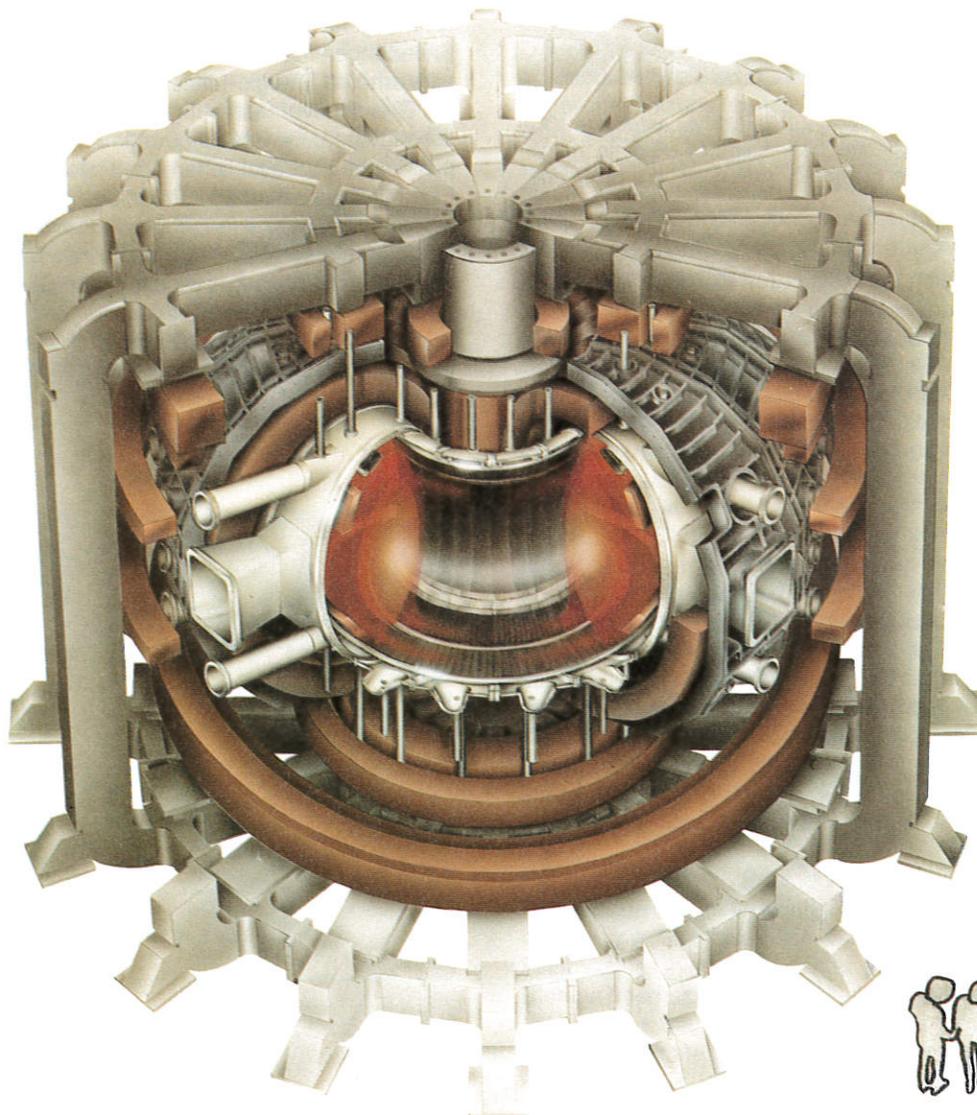


Abbildung 6: Ansicht des Tokamak-Systems von ASDEX Upgrade (aufgeschnitten) mit Vakuumgefäß, Toroidalmagneten, Poloidalfeldspulen und äußerem Stützgerüst.

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

Die Hochfrequenzleistung wird von vier Generatoren einer Leistung von je zwei Megawatt erzeugt und bei einer wählbaren Frequenz zwischen 30 und 120 Megahertz von vier Antennen mit einem Wirkungsgrad von etwa 75 Prozent in das Plasma eingestrahlt. Die Generatoranlage einschließlich der zugehörigen Hochspannungsversorgung ist weitgehend fertiggestellt, die Übertragungsleitungen zum Experiment und die Antennen sind im Bau. Für die Neutral-Injektion wurden in den zurückliegenden beiden Jahren alle großen Komponenten definiert, konstruiert und in Auftrag gegeben. Die Strahlquellen wurden bereits ausgeliefert und warten auf die Fertigstellung des Teststandes, der zur Zeit aufgebaut wird. Parallel laufen Überlegungen, später die Neutral-Injektionsleistung durch Anbau eines zweiten Injektors zu verdoppeln.

Gesamtradius:	5 Meter
Höhe:	9 Meter
Gewicht:	800 Tonnen
Großer Plasmaradius:	1,65 Meter
Plasmahöhe:	1,60 Meter
Plasmbreite:	1,00 Meter
Toroidalfeld:	3,90 Tesla
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	16
Toroidalfeldspulenstrom:	84 Kiloampere
Maximaler Plasmastrom:	2 Megaampere
Entladungsdauer:	10 Sekunden
Heizleistung (total):	15 Megawatt
– Neutral-Injektion:	9 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	6 Megawatt

Abbildung 7: Charakteristische Daten des Experimentes ASDEX Upgrade.

Die Torusmontage begann im Mai 1988 nach der Lieferung der ersten Hauptfeldspulen und der ersten Schalenelemente der Stützstruktur. Die bis zu zwei Jahren verzögerte Fertigung und Auslieferung einzelner Komponenten hatte den Beginn der Montage entsprechend aufgehalten. Der Torus wird in acht Teilstücken – bestehend aus äußerer Stützstruktur, zwei Hauptfeldspulen und einem Achtel des Vakuumgefäßes – vormontiert, die anschließend zusammengefügt werden. Im Januar 1989 war die erste Torushälfte fertiggestellt. Die Montage des gesamten Tokamak-Systems wird im Frühjahr 1990 beendet sein.

Im Laufe des Jahres 1988 wurden sämtliche Zusatzspulen und Zubehörteile ausgeliefert oder stehen auf Abruf bereit. Die Bauteile für den Innenausbau des Plasmagefäßes wurden ausgeschrieben und bestellt. Im Gefäß wurden alle notwendigen Halterungen angebracht und die Montage-Hilfsvorrichtungen gefertigt. Auch die Energieversorgung für das Experiment und die äußere Kühlanlage wurden fertiggestellt und getestet. Die Peripherie in der Torushalle – Spulenanschlüsse, Versorgungsleitungen und Kühlwasseranschlüsse – wurde konstruiert und in Auftrag gegeben.

Steuerung und Plasma-Lageregelung wurden im Detail festgelegt und ein Timersystem erstellt. Der Bereich Informatik entwickelt hierzu Bauteile und schnelle Rechnerkonzepte auf der Basis von Transputern (siehe Kapitel Informatik).

Die wichtigsten Diagnostiken – Thomsonstreuung, HCN-Laser für Spektroskopie, Vielkanal-Bolometer, Neutronspektrometer (Zusammenarbeit mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe), schnell verschiebbare Langmuirsonde, quasistationäre Pelletnachfüllung sowie Mikrowellen-Interferometrie – sind in Vorbereitung.

JET-Mitarbeit

Projektleiter: Dr. Michael Kaufmann

Das Tokamak-Experiment JET (Joint European Torus), das gemeinsam von den Europäern in Culham/Großbritannien betrieben wird, ist das weltweit größte Unternehmen auf dem Gebiet der Kernfusion: Der Plasmaring des Experiments hat einen Umfang von 20 Metern, eine Höhe von über 4 Metern und einen Durchmesser von 2,5 Metern. Das Experiment wurde ab 1972 von den Europäern gemeinsam konzipiert, innerhalb des vorgegebenen Kosten- und Zeitrahmens gebaut und seit 1983 auch

Gesamtradius:	7,5 Meter
Höhe:	11,5 Meter
Gewicht:	4000 Tonnen
Großer Plasmaradius:	2,96 Meter
Plasmahöhe:	4 Meter
Plasmbreite:	2,5 Meter
Toroidalfeld:	3,45 Tesla
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	32
Toroidalfeldspulenstrom:	66 Kiloampere
Maximaler Plasmastrom:	7 Megaampere
Entladungsdauer:	20 Sekunden
Heizleistung:	38 Megawatt
– Neutral-Injektion:	21 Megawatt
– Ionen-Zyklotron- heizung:	17 Megawatt

Abbildung 8: Charakteristische Daten des Experimentes JET

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.

Mit dem Ende des Jahres 1988 hatte JET etwa die Hälfte seines geplanten Programms erfüllt. Die Untersuchungen mit reiner Stromheizung und die Phase mit Zusatzheizung konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Es steht noch aus die Optimierung mit voller Zusatzheizung und der Betrieb mit Tritium.

In der Ohmschen Phase konnten bei Limiterentladungen Plasmaströme bis zu 7 Mega-Ampere – ursprünglich geplant waren nur 5 Mega-Ampere – mit entsprechender Verbesserung der Plasma-Parameter gefahren werden.

In Entladungen mit magnetischem Limiter und Zusatzheizung wurden Ströme von 5 Mega-Ampere erreicht. Mit diesem Entladungstyp konnte JET in das von ASDEX entdeckte H-Regime vordringen. Die hierbei erzielte Energie-Einschlußzeit von 1,2 Sekunden ist der weltweit beste Wert für diese Größe. In anderen Entladungen mit 21 Megawatt Zusatzheizung durch Neutral-Injektion und 17 Megawatt durch Ionen-Zyklotronwellen wurden Ionentemperaturen von etwa 250 Millionen Grad erzielt. In jeweils verschiedenen Entladungen ist JET den zur Plasmazündung nötigen Werten für Dichte, Temperatur und Energie-Einschlußzeit also schon sehr nahegekommen. Gemeinsam in einer Entladung konnten Bedingungen erreicht werden, unter denen das Plasma bei Betrieb mit Tritium bereits zehn Prozent der benötigten Heizleistung über thermonukleare Prozesse selbst erzeugen würde. Dieser Prozentsatz wächst in dem Maße, in dem es gelingt, Temperatur, Dichte und Einschlußzeit gleichzeitig zu erhöhen. Dieses Ziel wird verstärkt in der nächsten Experimentierphase angestrebt. Da das bisher Erreichte schon nahezu den Zieldaten von JET entspricht, ist zu hoffen, daß auch die kommenden Phasen erfolgreich abgeschlossen werden.

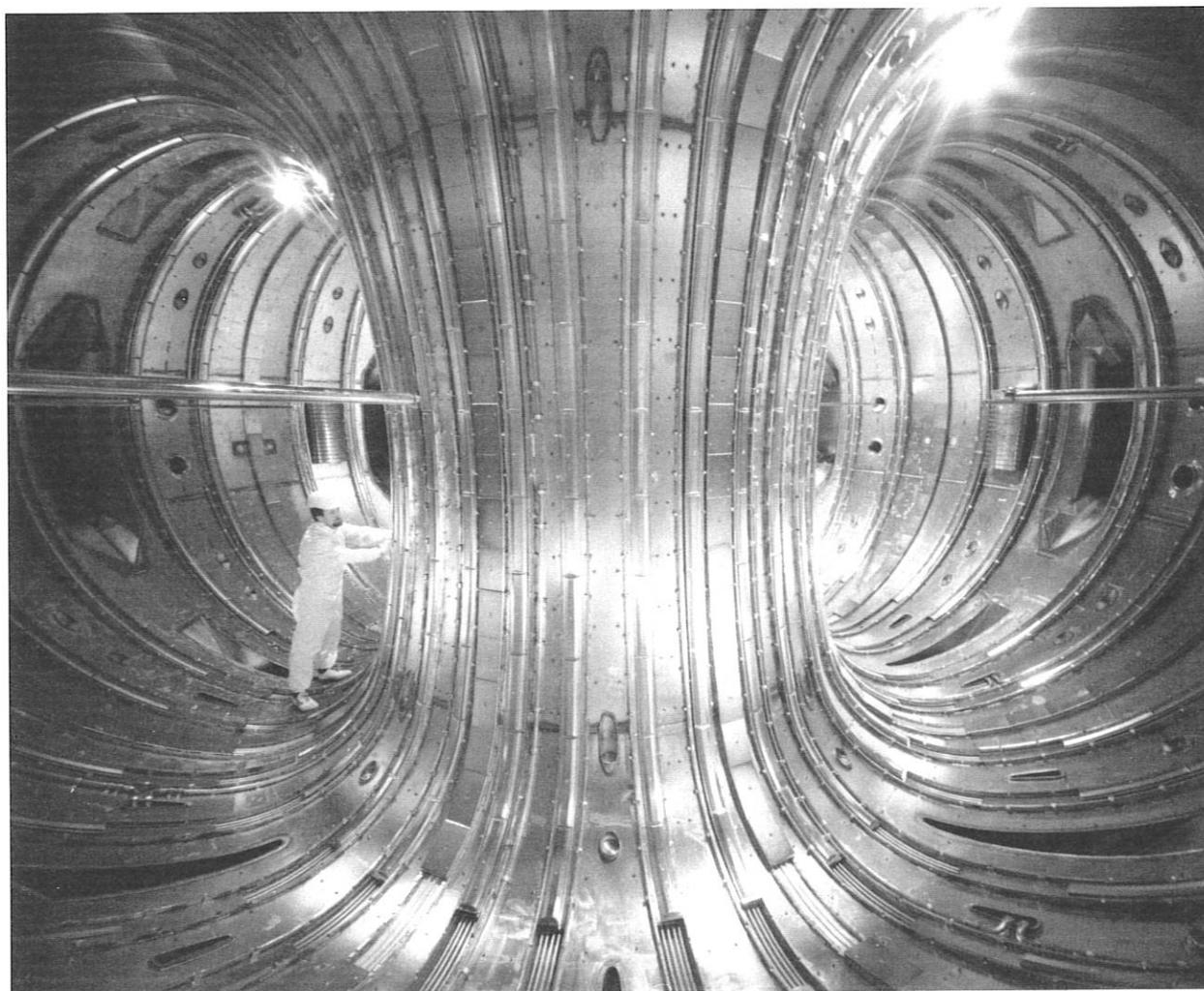


Abbildung 9: Blick in das Innere von JET. Die Plasmakammer besitzt ein Volumen von etwa 300 Kubikmetern, das Plasma erfüllt davon etwa 100 Kubikmeter.

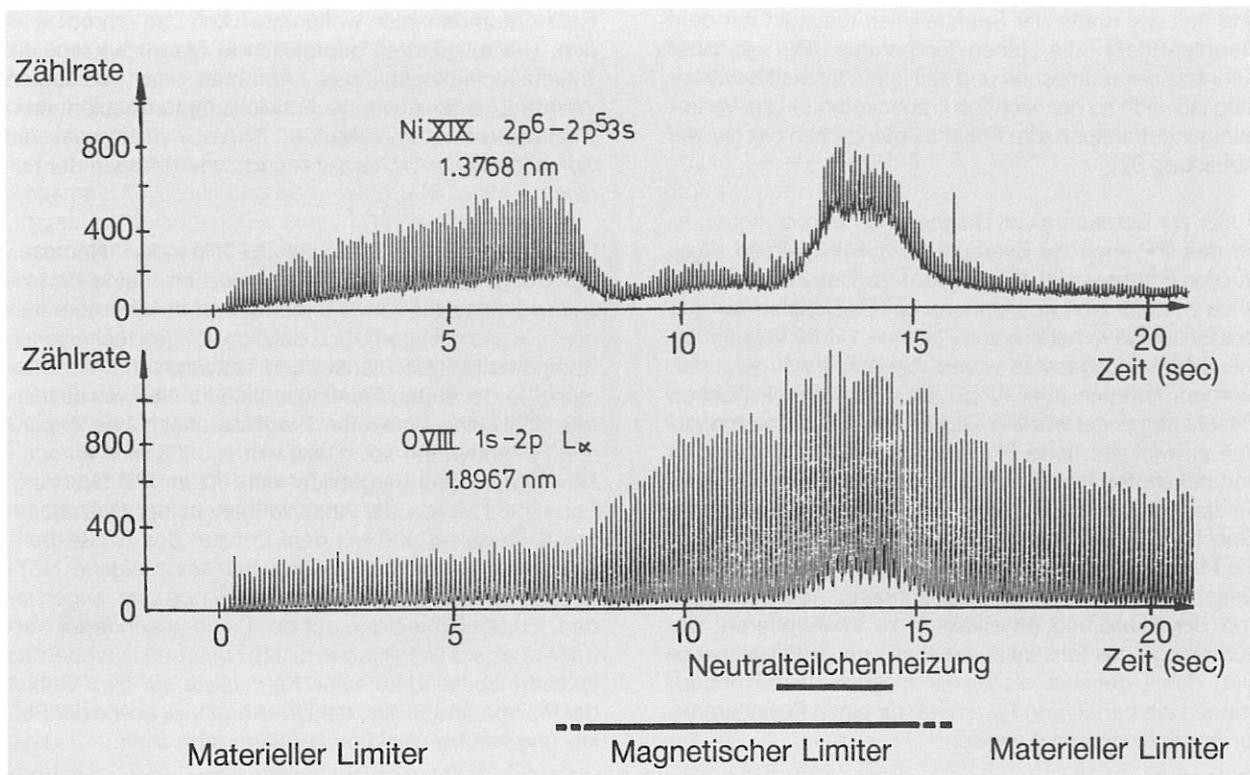


Abbildung 10: Der Zeitverlauf einer Nickel- und einer Sauerstofflinie, die von einem Kristallspektrometer über die gesamte JET-Entladung verfolgt werden. Die Entladung beginnt als normale Limiter-Entladung und wird etwa 8 Sekunden mit magnetischem Limiter gefahren, das heißt mit reduziertem Wandkontakt. Nach 12 Sekunden wird die Zusatzheizung eingeschaltet. Man sieht, daß die Nickel- und Sauerstoffverunreinigungen im Plasma sich hierbei völlig unterschiedlich verhalten, und kann daraus auch auf ihren Ursprung schließen.

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 Betrieb und tragen wesentlich zur Untersuchung des JET-Plasmas bei. Das Institut bemüht sich, diese Diagnostiken auch zu warten, zu betreiben und ihre Ergebnisse zu interpretieren. Dies geschieht durch die Abordnung von Wissenschaftlern zu JET für den Zeitraum von ein bis zwei Jahren.

Insgesamt sechs Diagnostiken wurden vom IPP gebaut und sind bei JET in Betrieb: Zwei Bolometerkameras messen orts- und zeitaufgelöst die Strahlung, die von den Verunreinigungen im Plasma abgestrahlt wird. Zwei Röntgenkameras tasten das Plasma im Gebiet der weichen Röntgenstrahlung ab. Da sie mit hoher Raum- und Zeitauflösung arbeiten, eignen sie sich besonders zur Untersuchung von schnell ablaufenden Instabilitäten im Plasma, wie zum Beispiel »Sägezähne«. Mit einem Pellet-Injektor werden gefrorene Wasserstoffkügelchen zur Nachfüllung in das Plasma eingeschossen.

Außerdem entwickelte das IPP eine Oberflächen-Analysestation, mit deren Hilfe Proben ausgewertet werden können, die an verschiedenen Stellen der Gefäßwand angebracht wurden, um so die Wechselwirkung des

Plasmas mit der Wand studieren zu können. Die Zusammenarbeit mit JET auf dem Gebiet der Oberflächenuntersuchung schließt auch Untersuchungen am IPP mit ein. Dabei konnte der wichtige Effekt des Wandpumpens erklärt werden, mit dem sich die Wasserstoffdichte im Plasma kontrollieren läßt. Bis zur Hälfte des angebotenen Wasserstoffs einer JET-Entladung wird auf den Wänden gespeichert.

Die Reihe der für JET entwickelten Diagnostiken schließt mit zwei Kristallspektrometern, die im Gebiet des weichen Röntgenlichtes die Linienstrahlung von hoch ionisierten Verunreinigungen messen. Eines der Geräte arbeitet orts- und zeitaufgelöst, das zweite verzichtet auf die Ortsauflösung. Dafür ist es aber so abgeschirmt, daß auch bei hoher Hintergrundstrahlung, wie sie während des Tritiumbetriebs an JET zu erwarten ist, Messungen möglich sind: Bei den hohen Plasma-Temperaturen sind die Verunreinigungselemente sehr hoch ionisiert (das Element Nickel hat zum Beispiel bei 100 Millionen Grad bereits 27 seiner 28 Elektronen verloren). Für die weiche Röntgenstrahlung, die die Verunreinigungen in diesem Zustand bevorzugt abstrahlen, stellen die Netzebenen homogener Kristalle natürliche Gitter mit hoher spektraler Auflösung dar. Mit den charakteristischen Wellenlängen seiner Spektrallinien kann daher jedes dieser Elemente im Plasma identifiziert werden. Aus der Linienintensität ergibt sich darüberhinaus die Konzentration des Elementes, aus dem Intensitätsverhältnis von Spektrallinien kann die Elektronen-Energieverteilung erschlossen werden

und aus der Breite der Spektrallinien resultiert mit dem Doppler-Effekt die Ionen-Temperatur. Bei genauer Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Intensitätsverteilung läßt sich so der wichtige Fragenkomplex des Verunreinigungstransports im Plasma untersuchen (vergleiche Abbildung 9).

Außer zur Betreuung von Diagnostiken werden Mitarbeiter des IPP auch zur Bearbeitung von Problemen allgemeinen Interesses zu JET abgeordnet. Besonders erfolgreich war hier eine Zusammenarbeit zu Beschreibungen des Einschlußverhaltens von Plasmen. Die bisher benutzten Skalierungsgesetze waren rein empirisch gefunden worden, konnten aber nicht von einem physikalischen Gesetz abgeleitet werden. Das in IPP-JET-Zusammenarbeit entwickelte neue Skalierungsgesetz wird dagegen von bekannten Instabilitäten abgeleitet, die als Ursache für den in Tokamaks beobachteten anomal schlechten Einschluß der Elektronen gelten. Diese Beschreibung gibt die Meßdaten besser wieder als die bisher verwendeten Gesetze und erlaubt es insbesondere, Abweichungen von der Skalierung physikalisch zu interpretieren. Die Vorhersage des Einschlußverhaltens neuer Experimente wird damit genauer als bisher möglich. Insbesondere können die benötigten Parameter für einen Fusionsreaktor enger eingegrenzt werden.

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

Gesamtradius:	ca. 11,5 Meter
Höhe:	25 Meter
Gewicht:	7000 Tonnen
Großer Plasmaradius:	6,3 Meter
Plasmahöhe:	9 Meter
Plasmabreite:	4 Meter
Toroidalfeld:	5–6 Tesla
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	16
Maximaler Plasmastrom:	25 Megaampere
Heizleistung:	ca. 50 Megawatt
Fusionsleistung:	ca. 1000 Megawatt
Brenndauer:	200 Sekunden – Dauerbetrieb

Abbildung 11: Charakteristische Daten des NET-Experimentes (nach dem Stand der Planungen im Januar 1989)

Reaktorkomponenten weiterentwickelt und erprobt werden. Hierzu gehören supraleitende Magnetspulen, die Tritium-Technologie, das Abführen der erzeugten Wärme-Energie sowie die Entwicklung fernbedient austauschbarer Komponenten. Ebenso wichtig ist die Erforschung der Sicherheits- und Umweltfragen der Fusion.

Diese Aufgaben sind dem auf JET folgenden »Nächsten Europäischen Torus« (NET) zugewiesen. Seine Dimensionen werden die von JET noch einmal deutlich übersteigen, vor allem wegen der zusätzlich nötigen technischen Komponenten wie Blanket und radiologischer Abschirmung. In der ersten Planungsphase für NET wurde festgelegt, welche konkreten Fragestellungen das Experiment beantworten soll. Dazu wurde 1983 eine europäische Studiengruppe gebildet mit Sitz im IPP Garching. Ende 1985 wurde der Abschlußbericht der Definitionsphase vorgelegt und mit dem Entwurf des Großexperiments begonnen. Das Institut hat seine eigene NET-Gruppe dieser europäischen Studiengruppe angegliedert. Zusätzlich werden auf der Basis gesonderter Verträge spezielle Detailfragen für NET bearbeitet, wobei das Institut insbesondere seine Kenntnisse auf dem Gebiet der Plasmarandphysik, der Divertorphysik sowie der Pellet- und Neutral-Injektion zur Verfügung stellt.

So wurden im Rahmen einer Vertragsstudie Modelle für den Energie- und Teilchentransport untersucht. 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.

Die Aufgaben des NET-Experimentes auf dem Weg zu einem Fusionsreaktor könnten aber auch – in weltweiter Zusammenarbeit – von dem »Internationalen Thermonuklearen Experimental-Reaktor« (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 vorzubereiten.

Das ITER-Projekt wurde 1985 auf dem Genfer Gipfeltreffen zwischen dem sowjetischen Generalsekretär Michail Gorbatschow und dem amerikanischen Präsidenten Ronald Reagan eingeleitet. Im Frühjahr 1988 begannen dann am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik als Gastlabor die Planungsarbeiten. Etwa vierzig Wissenschaftler der weltweit wichtigsten Fusionsprogramme – aus Europa, den Vereinigten Staaten von Amerika, der Sowjetunion und Japan – arbeiten seither in Garching gemeinsam an der Vorbereitung des Experiments. Ende

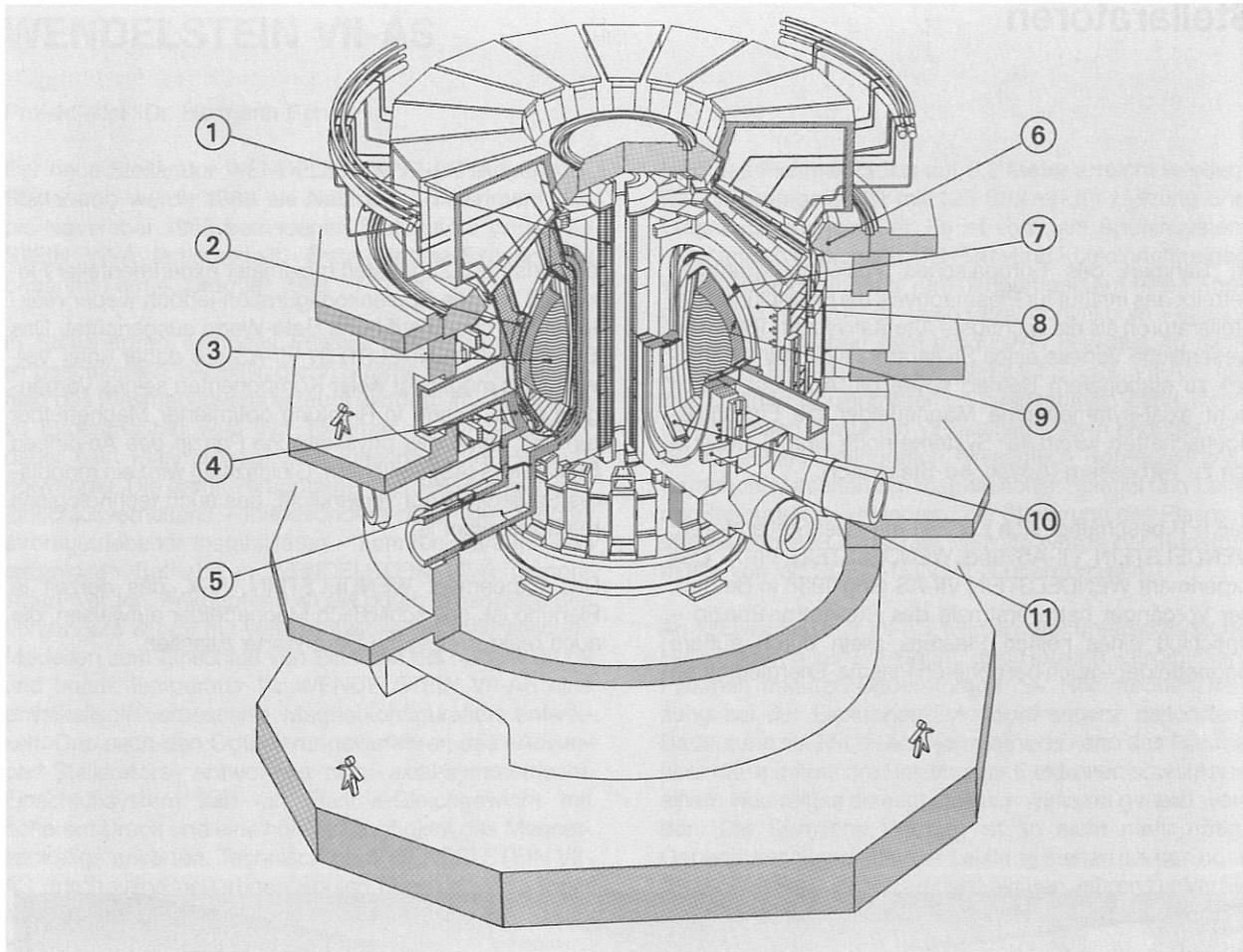


Abbildung 12: Entwurf des NET-Experimentes von der europäischen Studiengruppe in Garching

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. Innere Poloidalfeldspulen | 7. Kontrollspulen |
| 2. Blanket für Energieumsatz
und Brüten von Tritium | 8. Toroidalfeldspulen |
| 3. Plasma | 9. Erste Wand |
| 4. Vakuumgefäß, Abschirmung | 10. Divertorspulen |
| 5. Pumpsystem | 11. Äußere Poloidalfeldspulen |
| 6. Kryostat zur Wärme-Isolierung der Spulen,
Abschirmung | |

1988 wurde die erste Planungsphase mit der Festlegung der Basisdaten für ITER beendet. Das Projekt, das unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atom-Energie-Agentur (IAEA) in Wien steht, wurde zunächst auf drei Jahre befristet. Am Ende der Studienphase soll 1990 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 zum internationalen Experimentalreaktor wird im wesentlichen durch die NET-Studiengruppe getragen. 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. Darüberhinaus stehen die IPP-Wissenschaftler in allen physikorientierten Fragen in engem Kontakt mit der ITER-Gruppe.

Vorgänger der ITER-Aktivitäten war das Projekt INTOR (**I**nternationaler **T**orus), an dem ebenfalls Europa, die Vereinigten Staaten von Amerika, Japan und die Sowjetunion beteiligt waren. Das IPP stellte den Leiter sowie ein weiteres Mitglied der europäischen Delegation. Nach zehnjähriger Arbeitszeit wurde das INTOR-Projekt 1988 mit der Veröffentlichung des Abschlußberichtes beendet.

Stellaratoren

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

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 maximaler experimenteller Flexibilität war die Spulenkonfiguration jedoch weder reaktortauglich noch auf hohe Beta-Werte ausgerichtet. Das Experiment WENDELSTEIN VII-AS soll daher unter Verwendung möglichst vieler Komponenten seines Vorgängers einen Schritt in Richtung optimierter Magnetfelder tun und damit das physikalische Prinzip des **Advanced Stellarators (AS)** absichern. Gleichzeitig wird ein modulares Spulenkonzept verwirklicht, das auch technologisch reaktorrelevant ist.

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

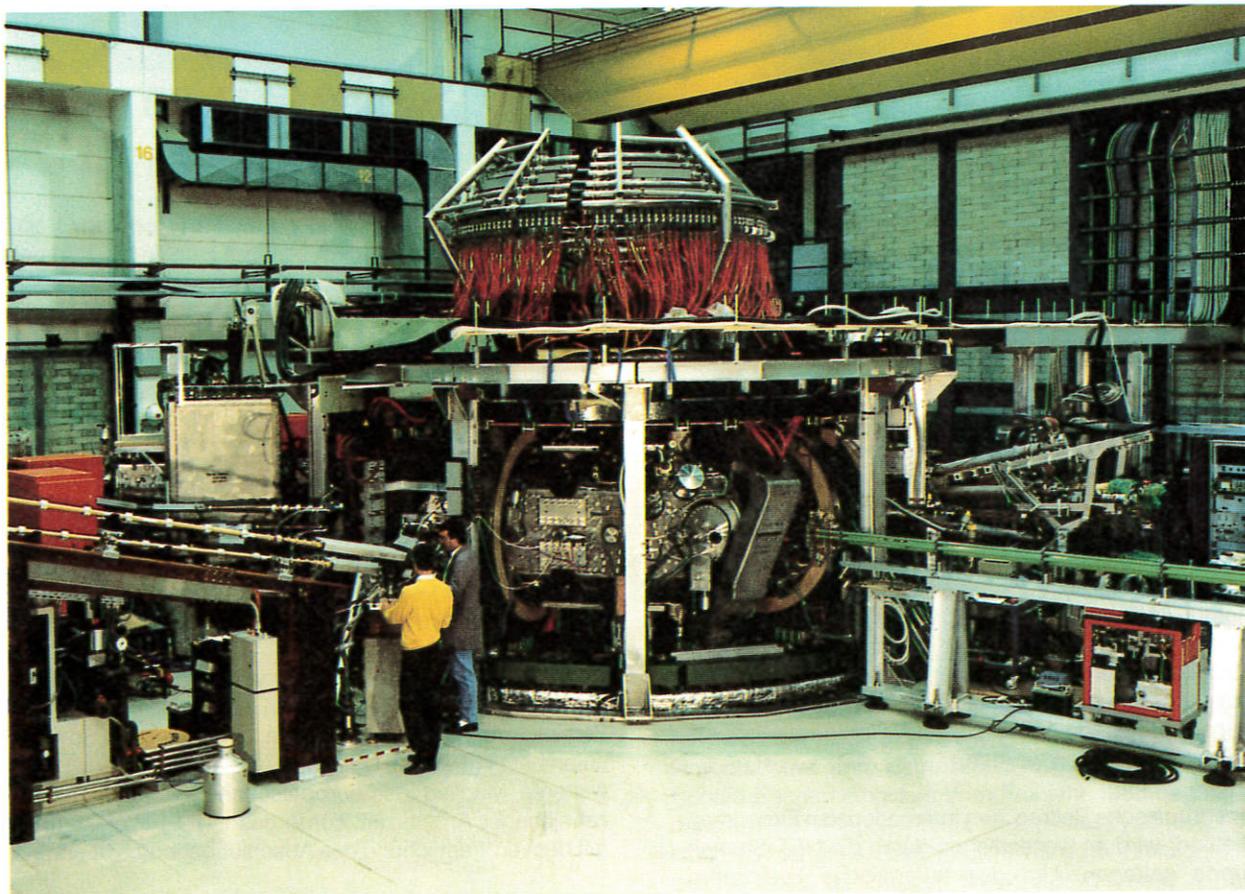


Abbildung 1: Das Stellarator-Experiment WENDELSTEIN VII-AS wurde im Mai 1988 mit dem Ausmessen der Magnetfelder in Betrieb genommen. Das erste Plasma erzeugte WENDELSTEIN VII-AS im Oktober 1988.

WENDELSTEIN VII-AS

Projektleiter: Dr. Hermann Renner

Der neue Stellarator WENDELSTEIN VII-AS (Advanced-Stellarator) wurde 1988 als Nachfolge-Experiment des bis November 1985 betriebenen Stellarators WENDELSTEIN VII-A fertiggestellt. Erste Plasma-Experimente begannen am 4. Oktober 1988.

In Stellaratoren wird das Plasma durch Magnetfelder eingeschlossen, die allein durch Ströme in Spulen außerhalb des Plasmabereichs erzeugt werden. Im Gegensatz zu Experimenten vom Typ Tokamak ist im Stellarator daher kein Plasmastrom zum Einschluß des Plasmas notwendig. Die damit verbundenen Verbesserungen des Einschlußverhaltens – insbesondere durch den Wegfall stromgetriebener Instabilitäten – konnten während des stromlosen Betriebs in WENDELSTEIN VII-A demonstriert werden. Anknüpfend an die guten Ergebnisse des Vorgängers wurde mit weiterentwickelten theoretischen Modellen zum Einschluß von Plasmen bei hohem Druck und hoher Temperatur für WENDELSTEIN VII-AS eine physikalisch verbesserte Magnetkonfiguration entwickelt. Das nach den Optimierungsverfahren des »Advanced-Stellarators« entworfene nicht axial-symmetrische Einschlußsystem läßt ein Plasma-Gleichgewicht mit höherem Druck und eine höhere Dichtigkeit des Magnetfeldkäfigs erwarten. Technisch geht WENDELSTEIN VII-AS durch seine neuartigen Spulen über den Vorgänger hinaus: Ein einziger Satz aus 45 nicht ebenen Einzelspulen produziert das gesamte zum Plasma-Einschluß nötige Feld. Der modular aufgebaute Spulensatz kann die berechnete Magnetfeldstruktur mit ausreichender Präzision realisieren und auch bei größeren Dimensionen die Wechselwirkungskräfte zwischen den Spulenströmen beherrschen.

Das Ziel der Untersuchungen an WENDELSTEIN VII-AS ist es, die physikalischen und technischen Grundlagen des 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 Verunreinigungstransport und Verunreinigungskontrolle studiert, Gleichgewicht und Stabilität abhängig vom Plasmadruck untersucht sowie die verschiedenen Heizverfahren optimiert werden. Falls sich die physikalischen und technischen Innovationen an WENDELSTEIN VII-AS bewähren, soll eine darauffolgende größere Anlage – WENDELSTEIN VII-X – die Reaktortauglichkeit der Stellaratoren beweisen.

Um möglichst kostengünstig zu bleiben, wurde das neue Experiment als Ausbaustufe des Vorgängers geplant. Deshalb konnte eine Reihe von Bauteilen übernommen werden. Neu anzufertigen waren im wesentlichen die modularen Spulen, ihre Abstützung sowie das dem neuen Spulenquerschnitt angepaßte Plasmagefäß. Um einen möglichst großen Abstand zwischen Plasma und Wand zu erreichen, wurde das Gefäß mit einem elliptischen Querschnitt der Plasmaform angenähert. Gegenüber WENDELSTEIN VII-A konnte dabei eine Verdopp-

lung des Plasma-Radius auf 0,2 Meter erreicht werden. Das Vakuumgefäß ist mit 125 Stützen für Heizung und Diagnostik ausgestattet. Es ist von dem Spulensystem mechanisch entkoppelt, mit Heiz- und Kühleinrichtungen versehen und kann mit Turbinenpumpen auf einen Enddruck von 10^{-8} Millibar – also Ultrahochvakuum – evakuiert werden. Neben dem modularen Feld aus 45 nicht planaren Einzelspulen ist WENDELSTEIN VII-AS mit zusätzlichen Spulensystemen ausgestattet: Zehn Toroidalfeldspulen sowie ein Vertikalfeldsystem erlauben es, die Modulfeldkonfiguration hinsichtlich Rotationstransformation, Verschönerung, magnetischer Spiegel und Lage der Separatrix zu verändern. Zur Steuerung des Plasmastroms und zur Ohmschen Heizung wurde der Transformator von WENDELSTEIN VII-A übernommen.

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 unmittelbare Heizung der Elektronen sowohl aus einem Neutralgas erzeugt als auch wirksam geheizt werden. Die Ohmsche Heizung ist so nicht mehr nötig. Generatoren ausreichender Leistung stehen bei den nötigen hohen Frequenzen erst seit einigen Jahren zur Verfügung. Angepaßt an die Magnetfeldstärke von 1,25 und 2,5 Tesla wurden für WENDELSTEIN VII-AS Gyrotrons mit einer Betriebsfrequenz bei 70 Gigahertz von der amerikanischen Firma VARIAN entwickelt. Das Experiment ist mit vier Gyrotrons einer Pulsdauer von drei Sekunden und Leistungen von je 200 Kilowatt sowie einem Puls-Gyrotron mit 0,1 Sekunden Pulsdauer ausgerüstet. Wegen der kurzen Wellenlänge von 4 Millimetern können die Mikrowellen direkt über Fenster und Spiegel quasioptisch in das Plasma eingestrahlt werden. Eine Antenne in Plasma-Nähe ist hierfür nicht nötig, was den Verunreinigungsfluß in das Plasma erheblich reduziert.

Radius:	3,6 Meter
Höhe:	4 Meter
Gewicht:	250 Tonnen
Großer Plasma-Radius:	2 Meter
Mittlerer kleiner Plasma-Radius:	0,2 Meter
Anzahl der nicht ebenen Spulen:	45
Strom pro Spulenwindung:	37 Kiloamp.
Feldstärke:	2,5–3 Tesla
Rotations-Transformation:	0,25–0,6
Toroidalfeld:	–0,5–+0,5 Tesla
Vertikalfeld:	0,1 Tesla
Pulsdauer:	3 Sekunden
Heizung:	
Elektronen-Zyklotronheizung:	1 Megawatt
Ionen-Zyklotronheizung:	1,5–4 Megawatt
Neutral-Injektion:	1,6–3,5 Megaw.

Abbildung 2: Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN VII-AS

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. Hochleistungskomponenten wie Modenwandler, Filter, Meßeinrichtungen, Taper, Bögen, Spiegelanordnungen und Steuereinrichtungen wurden dabei auf hohen Wirkungsgrad optimiert, so daß die Gesamtverluste der Übertragung kleiner als 10 Prozent bleiben.

Um die Dichtegrenze anzuheben, ist ein Betrieb mit nochmals höherer Frequenz notwendig. In Zusammenarbeit mit dem **IPF** und dem **Kernforschungszentrum Karlsruhe** wird daher ein Projekt zur Anwendung der Elektronen-Zyklotronheizung bei 140 Gigahertz verfolgt. Die Karlsruher Gruppe hat dabei die Entwicklung eines Gyrotron-Prototyps übernommen, wobei gegen Ende 1989 ein Probetrieb an WENDELSTEIN VII-AS denkbar ist. Wegen der geringen Senderleistung wird das System weniger zur Heizung als für diagnostische Zwecke bei hohem Plasmadruck und hohen Dichten benutzt werden.

Dagegen wird 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.

Die Heizung bei der Ionen-Zyklotronfrequenz wird an WENDELSTEIN VII-AS wegen der besonderen Schwierigkeiten der Hochfrequenz-Einkopplung zunächst mit einem experimentellen Antennensystem betrieben. Mit beschränkter Leistung und Pulszeit soll durch gesteuerte Variation der Einstrahlbedingungen eine Optimierung der Leistungseinkopplung versucht werden. Neben einer Verbesserung der Antennencharakteristik werden Aussagen über die Verunreinigungsproduktion über eine Fortführung dieser Heizmethode entscheiden.

WENDELSTEIN VII-AS ist mit zwei Injektoren für die Neutralteilchenheizung ausgerüstet, die bei einer Strahl-Plasma-Wechselwirkungslänge von rund zwei Metern einen ausreichenden Wirkungsgrad zur Heizung auch bei niedrigen Dichten sicherstellen. Da die beiden Injektoren mit gegenläufiger Strahlrichtung angeordnet sind, kann darüberhinaus über Stromtrieb der Plasmastrom gesteuert werden. Die Erhöhung der Injektorenleistung auf drei Megawatt ist vorbereitet und durch eine Verdopplung der Quellenzahl pro Injektor zu erreichen.

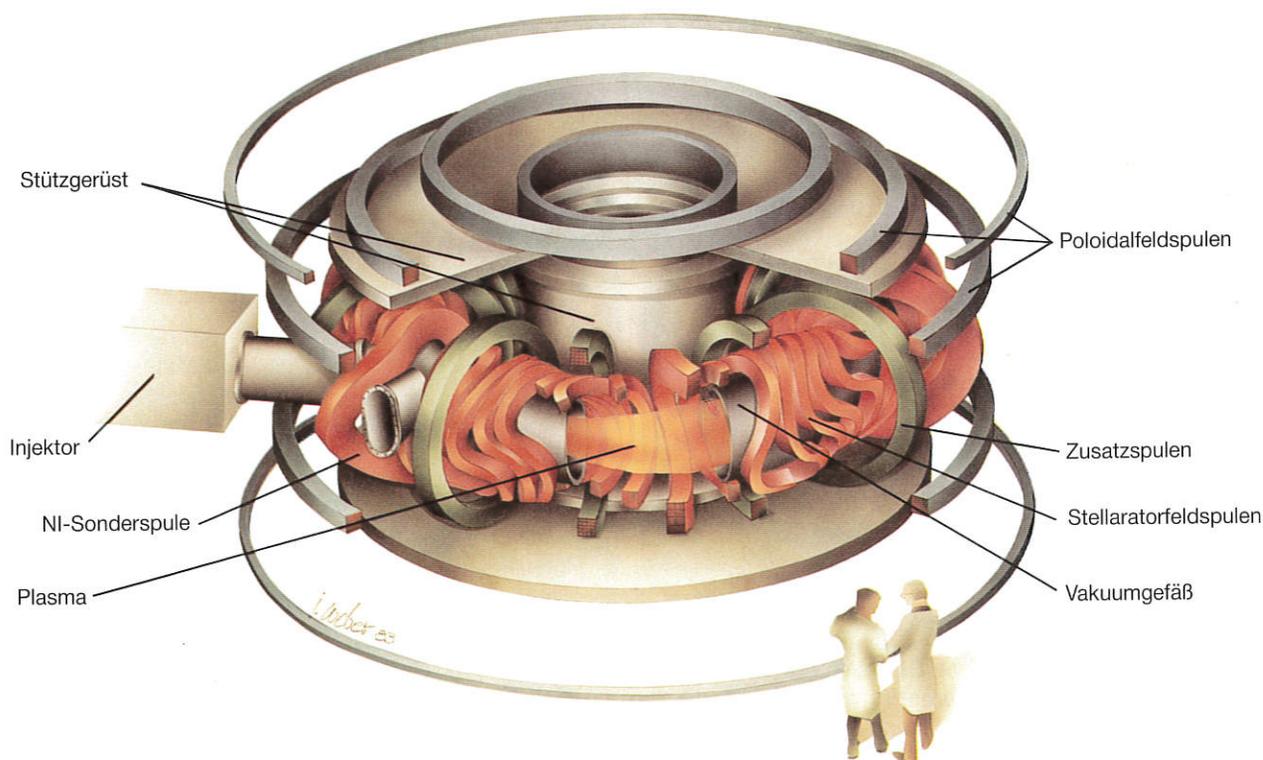


Abbildung 3: Die Spulensysteme des Stellarators WENDELSTEIN VII-AS. Das Experiment besitzt ein Hauptspulensystem aus 45 kompliziert gebauten Einzelspulen. Diesem Feld kann ein Toroidalfeld zur Variation der Rotations-Transformation überlagert werden sowie ein Vertikalfeld zur Verschiebung der Plasmasäule im Gefäß.

Diese drei Heizmethoden sichern – über die unterschiedlichen Leistungsprofile und die getrennte Heizmöglichkeit von Elektronen und Ionen – ein hohes Maß an experimenteller Flexibilität. Da die Elektronen- und Ionen-Temperaturprofile lokal verändert werden können, sind so heizungsspezifische Veränderungen des Plasma-Einschlusses sowie der Einfluß von anisotropen Energieverteilungen auf den Transport zu studieren.

Zur Analyse des Plasmas verfügt WENDELSTEIN VII-AS über umfangreiche diagnostische Einrichtungen. Bereits mit Beginn der Experimente sind über passive und aktive Meßverfahren detaillierte Informationen über die Plasma-Parameter mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu gewinnen. Für die Zukunft ist eine Ergänzung und Weiterentwicklung der Systeme geplant. Für die einzelnen diagnostischen Systeme sind leistungsfähige Subrechnereinheiten bereitgestellt, die lokal für Kalibrierungen, Steuerungen und zur Datenaufnahmekontrolle eingesetzt sind. Vor-Auswertungen der aufgenommenen Informationen und eine Verdichtung auf experimentelle relevante Daten wird von der Übertragung und Archivierung im Rechenzentrum lokal ausgeführt. Bis Januar 1989 waren bereits die Daten von etwa 2000 Entladungen mit rund 2 Megabyte pro Entladung im Rechenzentrum archiviert.

In der ersten Meßperiode an WENDELSTEIN VII-AS von Mai bis Juli 1988 wurde zunächst die Existenz magnetischer Flächen in dem neuen Magnetfeldsystem geprüft. Hierfür wurde ein neuartiges Meßverfahren benutzt, das vom IPF Stuttgart entwickelt worden war: Das Vakuumfeld wird mit einem Elektronenstrahl vermessen, der dem Verlauf der Magnetfeldlinien folgt. Die Durchgänge der Elektronen durch die Meßebe werden an festgelegten toroidalen Positionen mit einem fluoreszierenden Detektor nachgewiesen. In der Meßebe wird dazu ein mit Zinkoxid präparierter Stab bewegt. An den Kontaktstellen mit dem Elektronenstrahl leuchtet der Detektor auf, was mit einer CCD-Kamera aufgezeichnet wird. Aus dieser Bildsequenz erhält man – nach Integration über einen Bildprozessor – das Bild einer der Position der Elektronenkanone zugeordneten magnetischen Fläche. Durch Verschieben der Kanonenposition und Überlagerung der einzelnen Flächenbilder entsteht so ein genaues Bild der gesamten Feldstruktur zusammen mit eventuellen Störungen – etwa durch Inselbildung in Bereichen mit rationalen Werten der Rotations-Transformation. Die Messungen haben gezeigt, daß die vorgegebene Konfiguration und ihre magnetischen Parameter – Rotations-Transformation, Verschierung, magnetische Achse, Lage der Separatrix – im Vakuumfeld von WENDELSTEIN VII-AS innerhalb der Toleranzen von einem Tausendstel exakt verwirklicht sind. Die Baufehler sind so gering, daß ohne Korrekturen mit den Experimenten begonnen werden konnte.

Nach der Vervollständigung der Inneneinbauten im Gefäß mit Limitern, Graphitziegeln und Antennen für die Ionen-Zyklotronheizung konnten nach einer Konditionierungsphase durch Ausheizen und Glimm-Entladungen in Wasserstoff und Helium zum Reinigen des Gefäßes erste Versuche mit Elektronen-Zyklotronheizung bei 1,25 Tesla aufgenommen werden. Nach Experimenten mit Helium als Arbeitsgas wird gegenwärtig mit Deuterium experi-

mentiert. In der ersten Experimentierphase wurde zunächst die Mechanik der Anordnung unter Einfluß der Magnetkräfte beobachtet. Nach etwa 1700 Schuß bei niedrigem Feld wurde Anfang Januar 1989 der Betrieb bei 2,5 Tesla aufgenommen.

Bei einer Feldstärke von 1,25 Tesla gelang mit der Elektronen-Zyklotronheizung bei Leistungen von 400

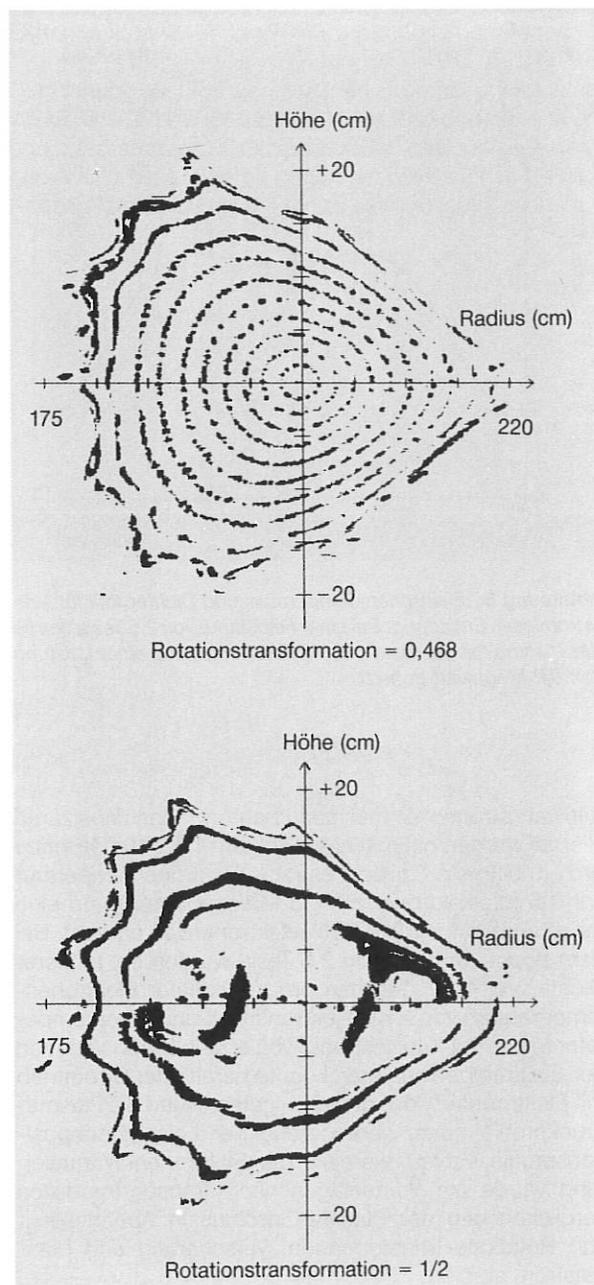


Abbildung 4: Experimentell bestimmte magnetische Flächen des Vakuumfeldes bei verschiedenen Werten der Rotations-Transformation. Bei einer Rotations-Transformation von 0,468 zeigt sich ein ungestörtes Feld, das bis ins Detail mit den Vorausberechnungen übereinstimmt. Bei dem nur wenig höheren, rationalen Wert von 1/2 bilden sich, wie erwartet, »Inseln« im Feld aus.

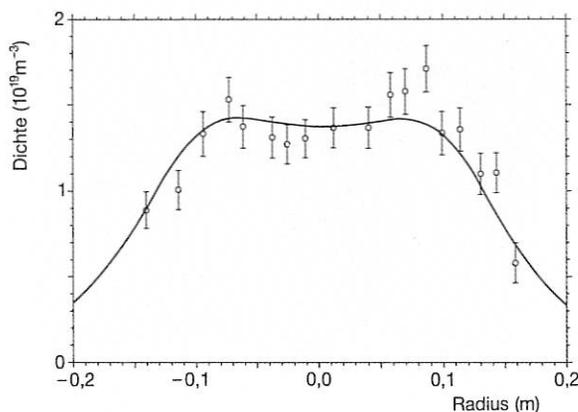
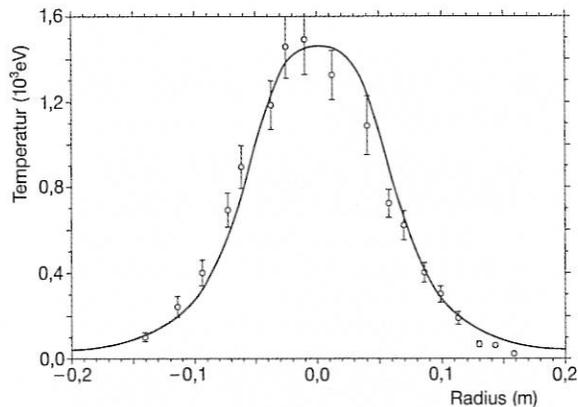


Abbildung 5: Elektronen-Temperatur- und Dichteprofil für eine »stromlose« Entladung: Bei einer Feldstärke von 2,5 Tesla wurde das Plasma mit der Elektronen-Zyklotronheizung einer Leistung von 0,2 Megawatt geheizt.

Kilowatt stromloser Plasmaaufbau und Plasmaheizung. Hierbei wurden bei mittleren Dichten von $2 \cdot 10^{19}$ Teilchen pro Kubikmeter eine zentrale Elektronentemperatur von 1,5 Kiloelektronenvolt (15 Millionen Grad) und eine Ionentemperatur von 0,2 Kiloelektronenvolt erreicht. Bei dem doppelten Feld von 2,5 Tesla wurden bei mittlerer Dichte von $4 \cdot 10^{19}$ Teilchen pro Kubikmeter Elektronentemperaturen von 2 Kiloelektronenvolt und Ionentemperaturen von 0,4 Kiloelektronenvolt erzielt. Durch Variation der Einstrahlbedingungen konnte bereits der Stromtrieb mit Elektronen-Zyklotronwellen getestet und die Plasma-druckprofile durch Veränderung der Leistungsdepositionsprofile variiert werden. Die Elektronen-Wärmeleitung wurde mit Vorhersagen nach Transportmodellen verglichen und der Plasma-Einschluß in Abhängigkeit von Rotations-Transformation, Verschierung und Plasmatrom studiert.

WENDELSTEIN VII-X

Projektleiter: Dr. Horst Wobig

Das Experiment WENDELSTEIN VII-X hat die Aufgabe, die prinzipielle Reaktoreignung des Stellarators zu demonstrieren. Hierzu sollen die für die Zündung notwendigen Plasma-Parameter erzeugt und untersucht werden, ohne dabei die Zündung selbst zu verwirklichen. Da also auf die Verwendung von Tritium verzichtet wird, wird auch eine hierdurch bedingte radioaktive Kontamination der experimentellen Anlage vermieden.

Zur Demonstration der Reaktortauglichkeit des »Advanced-Stellarators« soll WENDELSTEIN VII-X Magnetfeldkonfigurationen verwenden, die einen stabilen Plasmaeinschluß bei einem hinreichend hohen Druck, Beta-Werte von etwa fünf Prozent, Temperaturen über fünf Kiloelektronenvolt (50 Millionen Grad) und lange Einschlußzeiten gewährleisten. Weiterhin soll das technische Prinzip des modularen Spulensystems, das erstmals an WENDELSTEIN VII-AS mit Erfolg verwirklicht wurde, auch an WENDELSTEIN VII-X zur Anwendung kommen.

Auf der Suche nach derartigen Stellaratorkonfigurationen und den zugehörigen Spulensystemen ergab sich 1988 ein wesentlicher Fortschritt, so daß sich die weitere Planung in verstärktem Maße der technischen Konzipierung zuwenden kann. Umfangreiche theoretische Untersuchungen – insbesondere der Abteilung Theorie 2 – führten zu der Überzeugung, daß eine Helias-Konfiguration mit fünf Feldperioden für die Zielsetzung des WENDELSTEIN VII-X am geeignetsten ist. Diese Helias-Konfigurationen (Helias = **H**elical **A**dvanced **S**tellarator) wurden in den letzten Jahren besonders intensiv bearbeitet. Sie unterscheiden sich von der in WENDELSTEIN VII-AS verwirklichten Konfiguration durch eine helikale magnetische Achse und eine bessere Stabilisierung des Plasmas.

Bei der Optimierung des Magnetfeldes zog man sowohl plasmaphysikalische Gesichtspunkte wie Gleichgewicht, Stabilität und Plasmatransport in Betracht als auch die

Radius:	8,5 Meter
Höhe:	ca. 4 Meter
Gewicht:	550 Tonnen
Großer Plasma-Radius:	6,5 Meter
Mittlerer kleiner Plasma-Radius:	0,65 Meter
Magnetfeldstärke:	3 Tesla
Rotations-Transformation	
(Achse):	0,9–1,2
Verschierung:	0,1–0,14
Anzahl der Spulen:	60
Pulsdauer:	20–30 Sekunden
Heizleistung:	20 Megawatt

Abbildung 6: Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN VII-X (nach dem Stand der Planungen im Januar 1989)

technischen Randbedingungen des modularen Spulensystems. Nach gegenwärtiger Planung sind für WENDELSTEIN VII-X ein Torusradius von 6,5 Metern, ein mittlerer Plasmaradius von 0,65 Metern und eine Magnetfeldstärke von 3 Tesla vorgesehen. Die Auswahl dieser Dimensionen trägt sowohl den physikalischen Zielen von WENDELSTEIN VII-X Rechnung als auch den technischen Anforderungen, wie möglichst geringe Komplexität des Spulensystems, gute Zugänglichkeit des Plasmas für Heizung und Diagnostik sowie ein maximaler Abstand zwischen Plasma und Gefäßwand.

Eine wesentliche Aufgabe von WENDELSTEIN VII-X wird es sein, ein heißes Plasma für etwa 20 bis 30 Sekunden aufrechtzuerhalten und so den stationären Zustand – das Charakteristikum des Stellarators – zu demonstrieren und zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird das Magnetfeld durch ein System von 60 Spulen erzeugt, welche die größte und technisch aufwendigste Komponente des Experiments darstellen. Die physikalisch-technischen Anforderungen sprechen für eine supraleitende Ausführung der Spulen. Ein Studienauftrag, der 1988 an eine Industriefirma vergeben wurde, soll daher die technische Machbarkeit eines supraleitenden Spulensatzes untersu-

chen. Hinsichtlich dieser Komponente besteht ebenfalls eine Zusammenarbeit mit dem **Kernforschungszentrum Karlsruhe**. Die bisherigen Untersuchungen zeigen bereits, daß die Anforderungen an die Supraleitungstechnologie im Rahmen des technisch Möglichen liegen. Zur Aufheizung des Plasmas auf Temperaturen über 50 Millionen Grad benötigt man in WENDELSTEIN VII-X Heizleistungen bis zu 20 Megawatt. Dazu werden alle zur Zeit benutzten Methoden – Elektronen-Zyklotronheizung, Ionen-Zyklotronheizung und Neutralteilcheninjektion – in Betracht gezogen, eine detaillierte Planung liegt aber noch nicht vor. In dieses Heizkonzept sollen die Erfahrungen von WENDELSTEIN VII-AS und anderen Stellarator-Experimenten so umfangreich wie möglich einfließen.

Die Planung für 1989 sieht vor, den Experimentvorschlag WENDELSTEIN VII-X auszuarbeiten und den nationalen und internationalen Gremien zur Entscheidung vorzulegen. Weiterhin soll damit begonnen werden, das Helias-Konzept zum Fusionsreaktor zu extrapolieren.

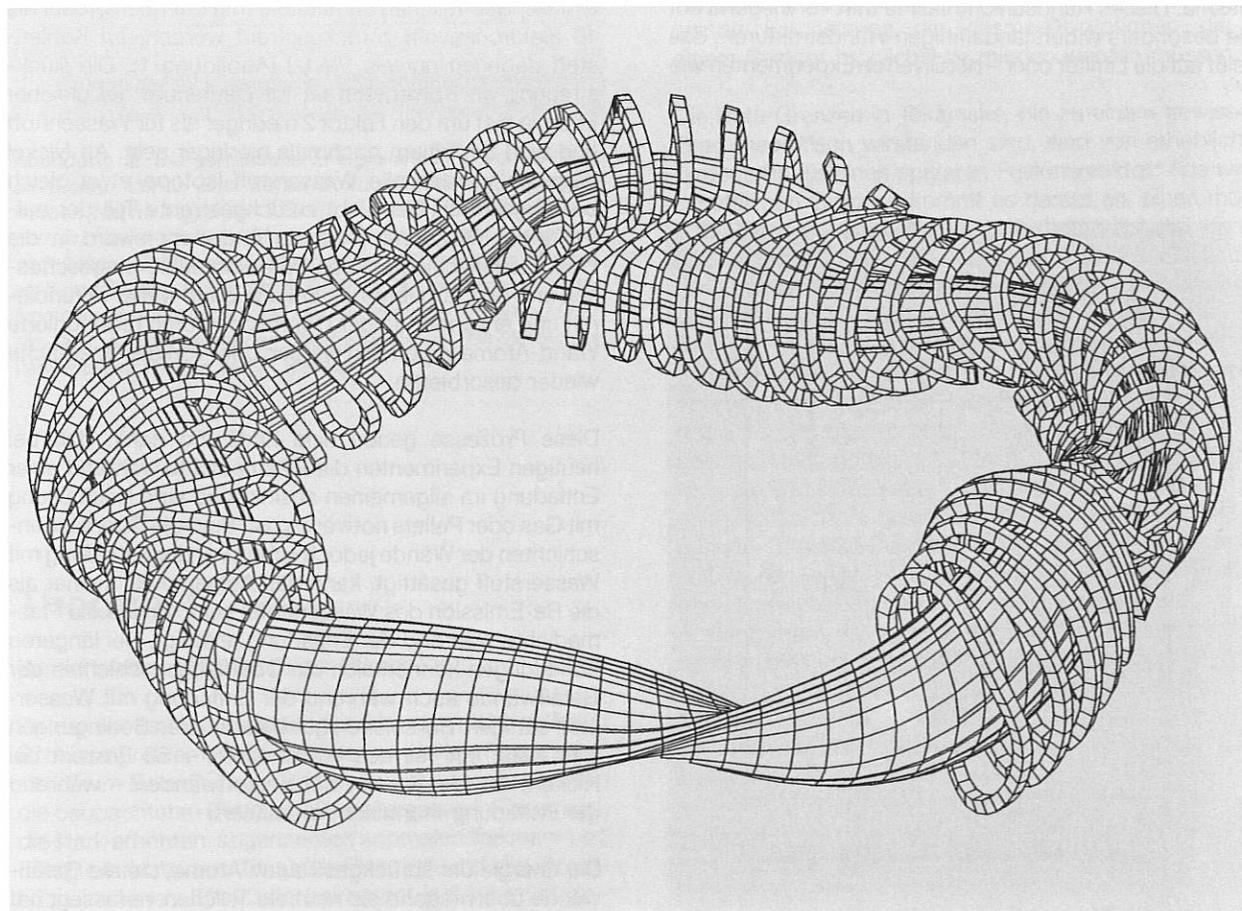


Abbildung 7: Perspektivische Ansicht einer Helias-Konfiguration mit fünf Feldperioden und 60 modularen Spulen. Die dargestellte geschlossene Fläche ist eine der äußeren magnetischen Flächen.

Allgemeine Arbeiten zur Fusion

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

Plasma-Wand-Wechselwirkung

Bereichsleiter: Prof. Dr. Volker Dose

Die Wechselwirkung des Plasmas mit den Wänden des Plasmagefäßes ist ein Problem, das für alle Fusionsanlagen von großer Bedeutung ist. Da das Plasma in den magnetischen Feldern der Fusions-Experimente nur begrenzt eingeschlossen wird, kommt es zu einem kontinuierlichen Verlust von Plasmateilchen durch die letzte geschlossene magnetische Fläche in das Randschichtplasma. Dieses Randschichtplasma trifft vorwiegend auf die besonders widerstandsfähigen Wandstrukturen, das heißt auf die Limiter oder – bei Divertor-Experimenten wie

ASDEX – auf die Divertorplatten auf. Zusätzlich gehen durch Umladungsprozesse heiße Plasma-Ionen als schnelle Neutralteilchen auf die Gefäßwände verloren. Die auftreffenden energiereichen Ionen und Atome verursachen eine Erosion der Wand durch Zerstäubung, was sowohl zur Verunreinigung des Plasmas mit Fremd-Ionen führt als auch die Lebensdauer der Wandstrukturen begrenzt.

Für die Teilchen- und Energiebilanz des Plasmas benötigt man genaue Information darüber, wieviele der auf die Wandstrukturen auftreffenden Wasserstoff-Atome mit welcher Energie wieder zurück ins Plasma gestreut werden und wieviele im Wandmaterial steckenbleiben und dann weiterdiffundieren. Diese Rückstreuung von Ionen und Neutralteilchen wurde – in dem für die Fusion relevanten Energiebereich unter einem Kiloelektronenvolt – mit Hilfe von Laufzeitanalysen zum ersten Mal an Kohlenstoff- und Stahlproben detailliert gemessen. Es zeigte sich, daß für Einschubenergien im Bereich von 100 Elektronenvolt an Nickeloberflächen etwa die Hälfte der einfallenden Teilchen unmittelbar (mit Energien größer als 10 Elektronenvolt) zurückgestreut werden, an Kohlenstoff dagegen nur ein Viertel (Abbildung 1). Die Rückstreuung an Kohlenstoff ist für Deuterium bei gleicher Energie fast um den Faktor 2 niedriger als für Wasserstoff und wird für Tritium nochmals niedriger sein. An Nickel dagegen werden alle Wasserstoff-Isotope etwa gleich zurückgestreut. Der nicht zurückgestreute Teil der auftreffenden Wasserstoff-Atome und -Ionen wird in die Oberflächenschichten des Wandmaterials eingeschossen und dort abgebremst. Er kann dann weiter diffundieren und entweder an der Oberfläche durch redeponierte Wand-Atome zugedeckt werden oder von der Oberfläche wieder desorbieren.

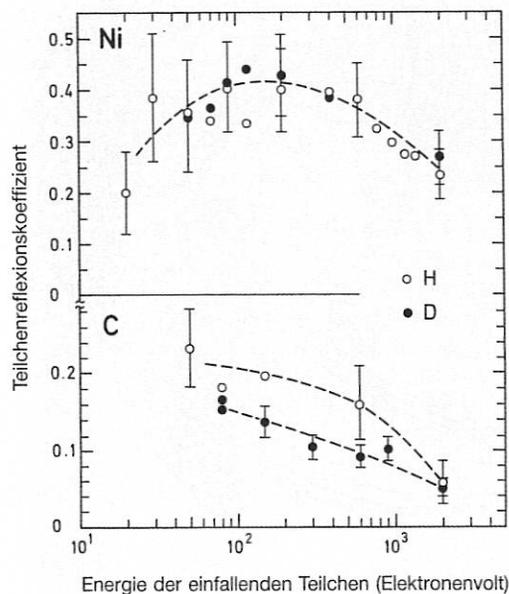


Abbildung 1: Reflexions-Koeffizienten von Wasserstoff und Deuterium an einer Nickel- und einer Kohlenstoffoberfläche für verschiedene Einschubenergien.

Diese Prozesse geben eine Erklärung dafür, daß bei heutigen Experimenten die Plasmadichte während einer Entladung im allgemeinen absinkt und eine Nachfüllung mit Gas oder Pellets notwendig ist. Sind die Oberflächenschichten der Wände jedoch schon vor der Entladung mit Wasserstoff gesättigt, kann das Aufsammeln kleiner als die Re-Emission des Wasserstoffs sein, so daß die Plasmadichte während der Entladung ansteigt. Bei längeren Entladungen können sich die Oberflächenschichten der Gefäßwände auch während der Entladung mit Wasserstoff sättigen. Bei solchen quasistationären Bedingungen wird dann ein Teil des Wasserstoffs – 50 Prozent bei Nickel-, 70 Prozent bei Kohlenstoffwänden – während der Entladung thermisch re-emittiert.

Die Energie der zurückgestreuten Atome, die die Gefäßwände überwiegend als neutrale Teilchen verlassen, hat bei den niedrigen Einschubenergien von 10 bis 100 Elektronenvolt ein Maximum bei etwa 70 bis 80 Prozent der Einschubenergie. Die Kühlung solcher Teilchen an

den Limitern und Divertorplatten ist also begrenzt. Berücksichtigt man die Beschleunigung der Ionen in der Langmuir-Schicht zwischen Plasma und Wand sowie die Ionisation der neutral zurückgestreuten Atome im Plasma, so werden die Teilchen durch den Wandkontakt sogar effektiv geheizt. Die Energie hierfür wird den Elektronen des Plasmas entzogen.

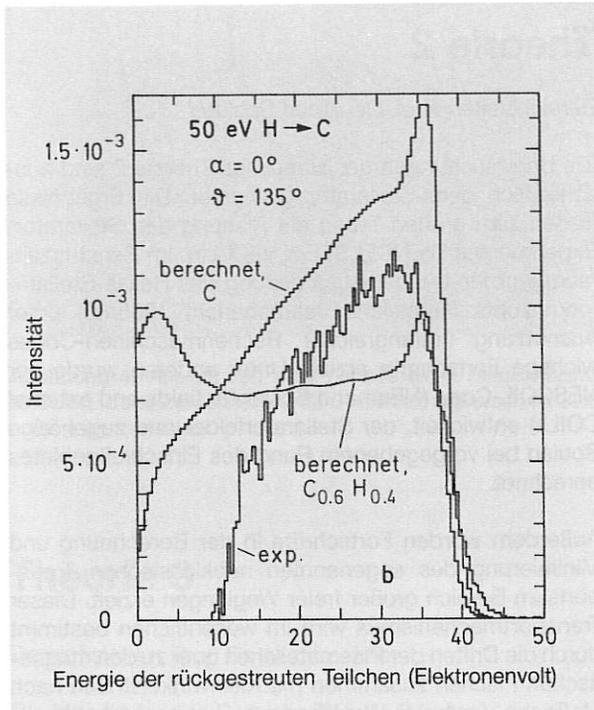


Abbildung 2: Die gemessene Energieverteilung von Wasserstoff-Ionen, die an einer Kohlenstoffoberfläche zurückgestreut werden (Nachweisgrenze 10 Elektronenvolt). Ebenfalls eingetragen sind zwei mit dem Monte-Carlo-Code TRIM berechnete Verteilungen für Rückstreuung an reinem (C) und an mit Wasserstoff gesättigtem Kohlenstoff ($C_{0.6}H_{0.4}$). Die gemessene Verteilung stimmt nur qualitativ mit der berechneten Verteilung überein. Dies kann mit der rauen Oberfläche der bei den Messungen verwendeten Proben erklärt werden.

Theorie 1

Bereichsleiter: Prof. Dr. Dieter Pfirsch

Zu den weiterhin unvollständig oder gar nicht gelösten Schlüsselproblemen der fusionsorientierten Plasmaphysik, die im Bereich Theorie 1 bearbeitet werden, gehören die beobachteten Beta- und Dichtegrenzen in Tokamaks, die stark erhöhten, sogenannten anomalen Teilchen- und Energieverluste aus Tokamak-Plasmen und die Bemühung um höhere Effektivität beim nicht-induktiven Stromtreiben. Von letzterem abgesehen handelt es sich um Stabilitätsprobleme verschiedener Art. Hierzu wurden sowohl analytische als auch numerische Untersuchun-

gen angestellt, die Auskunft über das lineare und nicht-lineare, gegebenenfalls turbulente Verhalten einer Vielzahl linear instabiler Störungen geben. Daneben wurden in Zusammenarbeit mit der **Universität von Texas in Austin** Verfahren entwickelt, die es erlauben herauszufinden, ob gewisse linear stabile Störungen nicht-linear instabil sein können. Dies hängt mit der Existenz sogenannter Wellen negativer Energie zusammen. Es zeigte sich, daß letztere in allen magnetisch eingeschlossenen Plasmen möglich sind, die deshalb wahrscheinlich sämtlich nicht-linear instabil sind. Das bedeutet zum Beispiel, daß zur Erklärung des anomalen Transports eine viel größere Mannigfaltigkeit von Störungen in Frage kommt, als bisher betrachtet, was die Lösung des Problems erheblich erschweren könnte. Ein anderer Lösungsansatz für das Problem des anomalen Transports wurde mit Hilfe gewisser Energie- und Entropie-Prinzipien für Plasmaprofile versucht. Insbesondere bei dem Entropie-Prinzip, das auch mit den häufig diskutierten temperaturgradient-getriebenen Drift-Instabilitäten in Beziehung zu stehen scheint, fällt der Vergleich mit den Experimenten für die »Standardfälle« positiv aus.

Energie- und Teilcheneinschluß, insbesondere die mögliche Ansammlung von Verunreinigungen im Plasma-Inneren, werden stark durch sogenannte »Sägezahn-Instabilitäten« beeinflusst. Die gängige Erklärung für dieses Phänomen stellte sich in Großexperimenten wie JET als nicht zutreffend heraus. Mit großem numerischen Aufwand wird im Bereich Theorie 1 versucht, zu einem neuen Verständnis zu gelangen. Dies betrifft auch eine verwandte Erscheinung, die Plasma-Disruptionen, die in einem Reaktor möglichst vermieden werden müssen.

Die Beta-Grenzen in Tokamaks, die zu einem gewissen Grad theoretisch verstanden sind, sind von erheblicher Bedeutung für einen späteren Fusionsreaktor: Aus wirtschaftlichen Gründen kommt es darauf an, einen möglichst hohen Plasmadruck – mit entsprechend hoher Fusionsleistungsdichte – mit einem hinreichend niedrigen Magnetfeld aufrechtzuerhalten. Beta – das Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfelddruck – muß daher mindestens einige Prozent betragen. Für unendlich leitfähige Plasmen findet man theoretisch für hohe Beta-Werte erst oberhalb eines instabilen Bereichs wieder stabile Verhältnisse. Es gibt experimentelle Anzeichen dafür, daß man über starke Elongation des Plasmaquerschnitts in dieses »zweite Stabilitätsgebiet« gelangen kann. Theoretisch noch nicht sicher ist es jedoch, ob auch bei Berücksichtigung der tatsächlichen, endlichen elektrischen Leitfähigkeit hinreichende Stabilität besteht, die einen Betrieb ohne zu starke Energie- und Teilchenverluste erlaubt. Ein Ausweg wäre, im gegenwärtigen ersten Stabilitätsbereich zu bleiben, aber dennoch mit sehr starken Elongationen des Plasmaquerschnitts zu arbeiten. Im Bereich Theorie 1 konnte erstmals eine vollständige Theorie damit zusammenhängender axial-symmetrischer Instabilitäten erarbeitet werden. Danach müßten die Querschnitte nahezu kreisförmig sein, um stabile Verhältnisse zu garantieren. Wie schon jetzt in den Tokamak-Experimenten, muß man also auch bei Reaktoren mit nicht kreisförmigen Plasmaquerschnitten diesen Instabilitäten ständig von außen entgegenwirken, wobei die Schwierigkeiten mit wachsender Elongation ansteigen. Bei Stellaratoren tritt dieses Verhalten nicht auf.

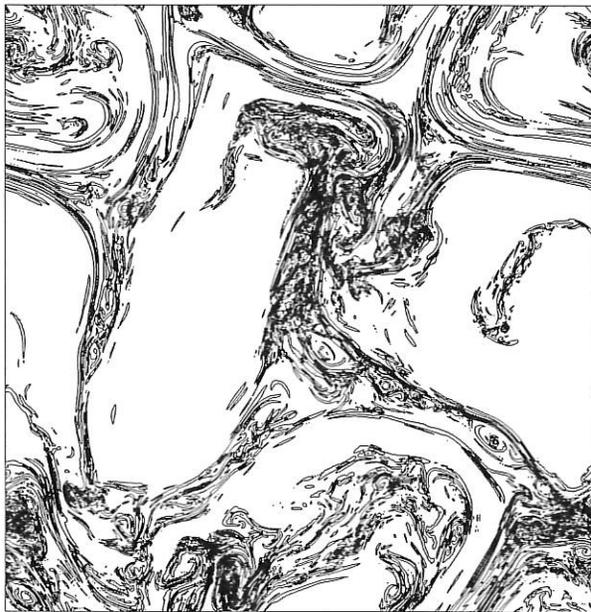
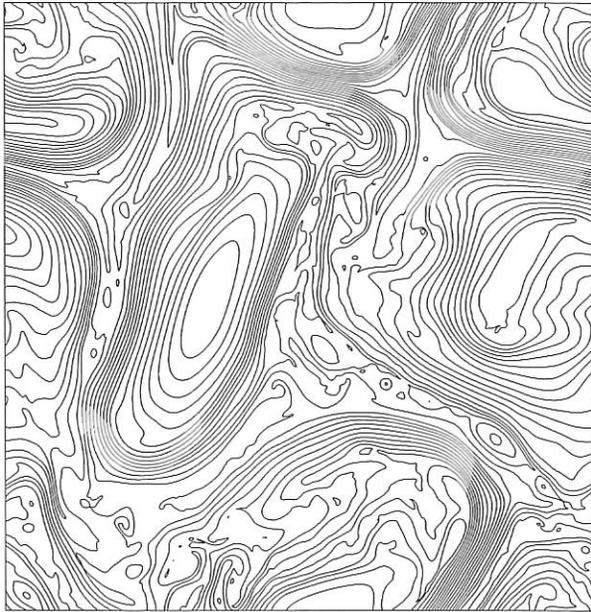


Abbildung 3: Die Abbildung zeigt die räumliche Koexistenz von Gebieten mit laminaren und turbulenten magnetischen Feldern, oben: magnetische Feldlinien, unten: Fluktuationen der elektrischen Stromdichte, die im wesentlichen in den turbulenten Gebieten konzentriert sind.

Die seit Jahren bestehende Zusammenarbeit mit der **Königlich-Technischen Universität** in **Stockholm** wurde fortgesetzt. Hier werden die Gründe für das stabile Verhalten des Plasmas im dortigen Extrap-Experiment untersucht. Mit dem **Courant-Institut** in **New York** besteht eine Zusammenarbeit mit dem Ziel, den Energie- und Teilchentransport, soweit Turbulenzen keine Rolle spielen, im Rahmen makroskopischer Theorien zu bestimmen. Entgegen üblichen Flüssigkeits-Theorien könnten diese Theorien auch bei großen freien Weglängen gültig sein, wie sie in Fusionsexperimenten üblicherweise auftreten. Diese Berechnungsart sollte gegenüber

den bisher verwendeten kinetischen, also mikroskopischen Gleichungen eine wesentliche Vereinfachung bringen. Sie sollten es erlauben, auch kompliziertere Verhältnisse als bisher zu betrachten, zum Beispiel Plasmen mit Strömungen.

Theorie 2

Bereichsleiter: Prof. Dr. Arnulf Schlüter

Die Untersuchungen des Bereiches Theorie 2 sind ausschließlich dem Stellarator gewidmet. Die Ergebnisse fließen zum großen Teil in die Planung des Stellarator-Experimentes WENDELSTEIN VII-X ein. Im Berichtszeitraum wurden bei der Ausarbeitung des Helias-Stellartorkonzepts (vergleiche Jahresbericht 1985/86) unter Ausnutzung umfangreicher Rechenmaschinen-Codes wichtige Fortschritte erzielt. Unter anderen wurde der NESCOIL-Code (NEumann Solver for fields and external COILs) entwickelt, der Stellaratorfelder und zugehörige Spulen bei vorgegebenem Rand des Einschlußgebietes berechnet.

Außerdem wurden Fortschritte in der Berechnung und Minimierung des sogenannten neoklassischen Transports im Bereich großer freier Weglängen erzielt. Dieser Transportmechanismus wird im wesentlichen bestimmt durch die Driften der Plasmateilchen quer zu den magnetischen Flächen zusammen mit Kleinwinkelstößen nach Maßgabe der freien Weglänge.

Als ein wirksames Mittel zu Transportoptimierung – das heißt zur Verbesserung des Teilchen-Einschlusses – wurde das Prinzip des quasi-helikalsymmetrischen Stellarators gefunden. Quasi-helikalsymmetrische Stellaratoren können im Rahmen des Helias-Konzeptes verwirklicht werden und sind dadurch charakterisiert, daß der Betrag des Magnetfeldes – nicht aber die reale Geometrie – in sogenannten magnetischen Koordinaten helikalsymmetrisch ist. Dies führt zum strikten Einschluß stoßfreier Teilchenbahnen. Die Existenz quasi-helikalsymmetrischer Stellaratoren bedeutet einen weiteren Beweis für die Stichhaltigkeit des Konzeptes des »äußeren« Einschlusses, wie er in Stellaratoren verwirklicht ist.

Die Monte-Carlo-Berechnungen neoklassischer Transportvorgänge wurden vervollständigt: Es gibt jetzt eine vollständige Code-Kette, die ausgehend von den Spulen einer beliebigen Stellarator-Konfiguration bis zur näherungsweise Bestimmung von Teilchen- und Energie-Einschlußzeiten eines Plasmas mit Maxwell'scher Energieverteilung führt. Solche Rechnungen zeigen einerseits, daß Stellaratoren, deren Transporteigenschaften nicht optimiert sind, im Gebiet großer freier Weglängen durch niedrige Energie-Einschlußzeiten behindert sind, und andererseits, daß die Optimierung der Magnetfeldstruktur – mit Nebenbedingungen, die aus Stabilitäts- und Realisierbarkeits-Überlegungen folgen – die Energie-Einschlußzeit im Gebiet großer freier Weglängen deutlich verbessert.

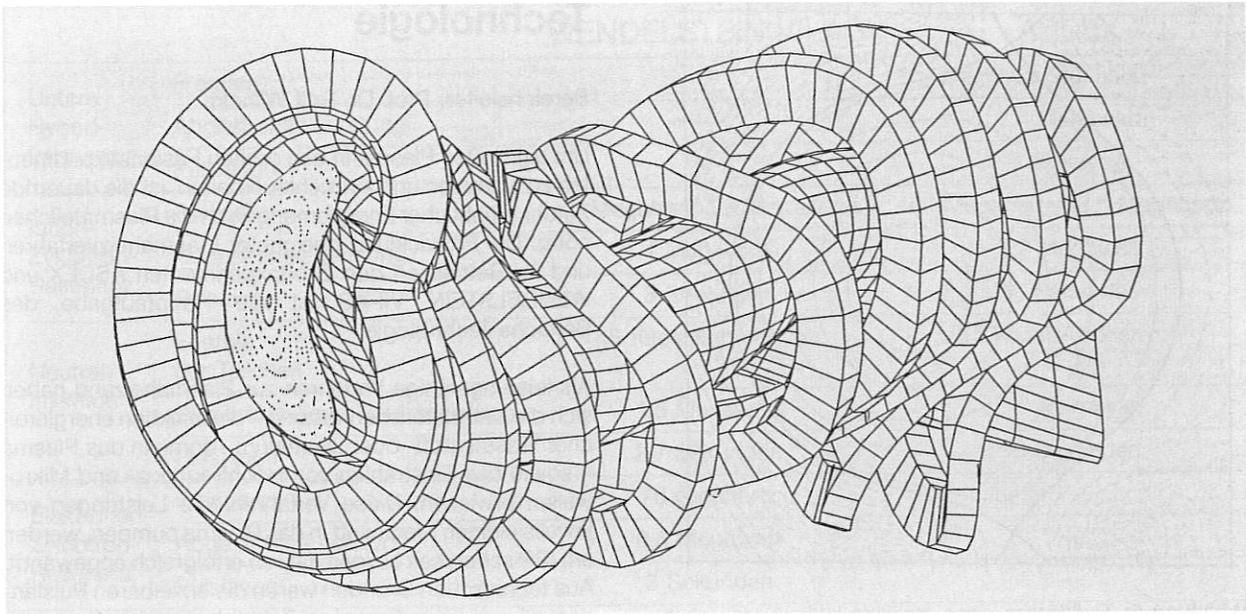


Abbildung 4: Ansicht von einer Periode eines Helias-Plasmarandes zusammen mit den zugehörigen Magnetspulen, die mit dem NESCOIL-Code berechnet wurden. Im Plasmaquerschnitt sind die magnetischen Flächen sichtbar, die von den berechneten Spulen aufgespannt werden.

Theorie 3

Bereichsleiter: Prof. Dr. Karl Lackner

Die Mitarbeiter des Bereichs Theorie 3 betreiben anwendungsorientierte Plasmatheorie im Hinblick auf die Experiment-Interpretation und das Design axial-symmetrischer Anordnungen, insbesondere von Tokamaks. Im Vordergrund stehen die physikalische Analyse sowie die Entwicklung und der Einsatz leistungsfähiger numerischer Algorithmen zur Auswertung theoretischer Ansätze. Neben der Modellierung der Plasmadynamik in wandnahen Zonen, der Plasmaheizung und der Aufbereitung der experimentellen Meßdaten in einer physikalisch interpretierbaren Form betrifft eines der wichtigsten Arbeitsgebiete das Gleichgewichts- und Stabilitätsverhalten von Tokamak-Plasmen.

Als typisches Beispiel kann die theoretische Untersuchung des toroidalen Einschlusses im Experiment ASDEX gelten. Abbildung 5 zeigt einen Querschnitt durch die Konfiguration: Das mit Plasma-Materie erfüllte Volumen ergibt sich durch Rotation der punktierten Fläche um die links der Zeichenebene gelegene Symmetrieachse in z-Richtung. Die Rotationsflächen, die den geschlossenen Konturen innerhalb des Plasmas entsprechen, werden von den Magnetfeldlinien, die von der Plasmaplastik und den Strömen in den äußeren Leitern erzeugt werden, nicht verlassen. Sie repräsentieren die Flußflächen des Magnetfeldes. Eine auf einer solchen Fläche liegende Feldlinie kann näherungsweise als nach m Umläufen auf dem großen Weg (d. h. um die z-Achse) und nach n Umläufen auf dem kleinen Weg (um die mit einem $+$ markierte sogenannte magnetische Achse) geschlossen angesehen werden. m und n können dabei – bei

moderatem Wert des Quotienten $q = m/n$ – sehr groß werden. Die wiedergegebene Flußflächenstruktur entspricht einem sehr genau berechneten magneto-hydrodynamischen Gleichgewichtszustand des Plasmas, dessen Eigenschaften ganz wesentlich von den lokalen Werten des Plasmadrucks und der Kenngröße q bestimmt werden.

Wie nun die Stabilitätsanalyse dieser Konfiguration ergibt, sind besonders solche Störungen des Gleichgewichtszustandes gefährlich, deren Variation längs der Magnetfeldlinien klein, senkrecht dazu aber sehr groß ist. Unter Berücksichtigung des endlichen elektrischen Widerstandes des Plasmas handelt es sich dabei für große Werte von n um sogenannte resistive Ballon-Instabilitäten. Für sie hat sich auch im Deutschen das englische Attribut »ballooning« eingebürgert. Sie treten bei genügend hohen Werten des Plasmadruckes auf und beziehen ihren Namen von dem nicht unähnlichen instabilen Verhalten eines elastischen Ballons mit lokalen Schwachstellen, deren Rolle im Plasma von Gebieten ungünstiger Feldlinienkrümmung gespielt wird. Während sich ein ideales Plasma bei gegebenem Druck entweder als stabil oder instabil mit reellem Inkrement verhält, haben resistive Instabilitäten im allgemeinen komplexe Anwachsrate, deren Bestimmung sich als wesentlich schwieriger erweist. Im Falle resistiver Ballooning-Moden hat man dazu ein Randwertproblem für ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen zu lösen, dessen Koeffizienten nicht linear von der Anwachsrate abhängen. Es konnte gezeigt werden, daß ein dazu äquivalentes Variationsproblem formuliert werden kann. Es wurde ein numerisch effektives Verfahren zur Behandlung dieses Variationsproblems entwickelt. Abbildung 6 zeigt die sich ergebenden Anwachsrate resistiver Ballooning-Instabilitäten auf einer in der Nähe des Plasmarandes

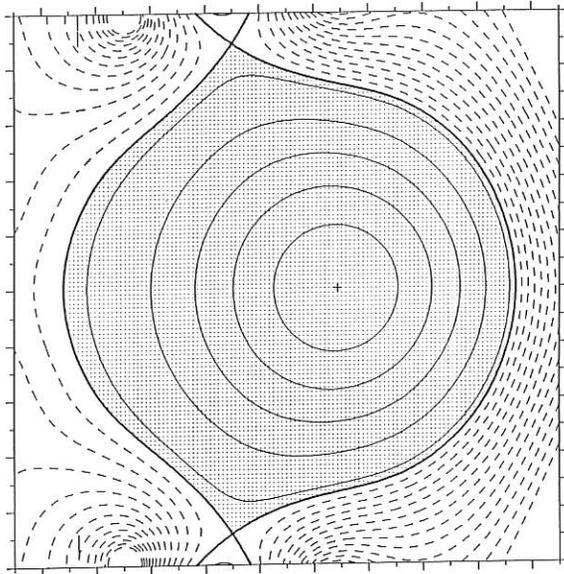


Abbildung 5: Flußflächen eines magneto-hydrodynamischen Plasma-Gleichgewichtes von ASDEX. Der punktierte Bereich enthält das Plasma.

gelegenen Flußfläche als Funktion eines Druck-Multiplikationsfaktors C_p : Die durchgezogene Kurve (mit $\gamma_T = 5/3$ als dem Verhältnis der spezifischen Wärmen) ist die wichtigste. Für $C_p = 1$ liefert sie die Anwachsrate γ resistiver Ballooning-Moden für ein reales Hoch-Beta-Gleichgewicht von ASDEX. Jenseits von $C_p = 1$ wächst $\text{Re}\{\gamma\}$ massiv an. Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, daß ASDEX, was resistive Ballooning-Moden angeht, dicht an der Grenze zum maximal erreichbaren Wert für Beta liegt. Die Vergleichskurven $\gamma_T \rightarrow 0$ und $\gamma_T \rightarrow \infty$ illustrieren virtuelle Effekte der Kompressibilität: ein kompressibleres Plasma zeigt größere, ein inkompressibles kleinere Anwachsrate mit Schwellwertcharakter.

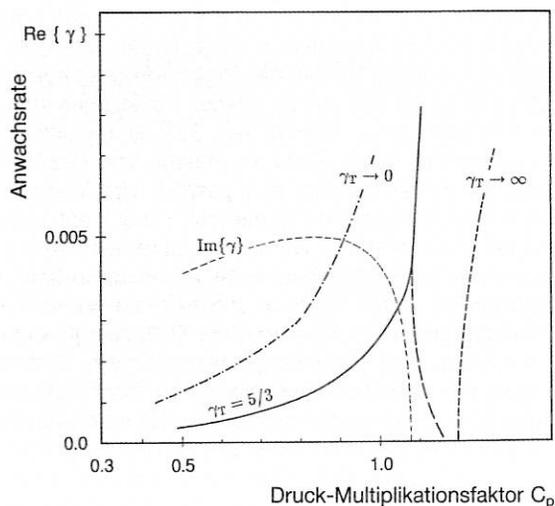


Abbildung 6: Anwachsrate resistiver Ballooning-Moden in ASDEX.

Technologie

Bereichsleiter: Prof. Dr. Rolf Wilhelm

Um ein heißes Plasma in den großen Fusionsexperimenten zu erzeugen und aufrechtzuerhalten, ist die dauernde Zufuhr erheblicher Energiemengen an die Plasmateilchen nötig. Die Entwicklung geeigneter Plasmaheizverfahren und ihr Betrieb an den Großexperimenten ASDEX und WENDELSTEIN VII-AS ist die Hauptaufgabe des Bereichs Technologie.

Als leistungsfähige Verfahren zur Plasmaheizung haben sich die Neutralteilchenheizung – die Injektion energiereicher Wasserstoff- oder Deuterium-Atome in das Plasma – sowie das Einstrahlen von Hochfrequenz- und Mikrowellen erwiesen. Diese Verfahren, die Leistungen von jeweils einigen Megawatt in das Plasma pumpen, werden am IPP schon seit einigen Jahren erfolgreich angewandt. Aus technischen Gründen waren die erzielbaren Puls-längen allerdings auf wenige Zehntelsekunden begrenzt. Nach umfangreichen technischen Entwicklungs- und Umbaumaßnahmen konnte nun der von den Experimentatoren gewünschte Langpulsbetrieb erreicht werden.

Im Fall der Neutral-Injektion mußten vor allem die filigranen Beschleunigungsgitter mit einer internen Hochdruck-Wasserkühlung versehen werden. Mit weiteren technischen Modifikationen gelang es, die Injektionsdauer bei etwa konstanter Injektionsleistung – an ASDEX typisch 1,5 Megawatt – bis auf etwa zehn Sekunden auszudehnen. Parallel dazu wurde ein großer Injektor mit einer Strahlleistung bis zu neun Megawatt für das künftige Experiment ASDEX Upgrade entwickelt. Wesentliche Teile befinden sich bereits in der Fertigung.

Ein vergleichbarer Fortschritt wurde auch auf dem Gebiet der Hochfrequenzheizung erreicht. Die Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung im Frequenzbereich von 30 bis 80 Megahertz ließ sich mit wassergekühlten Antennen und weiterentwickelten Übertragungskomponenten gleichfalls für einen Langpulsbetrieb von mehreren Sekunden ausrüsten. Der Aufbau von vier weiteren Hochfrequenzanlagen für ASDEX Upgrade mit zusammen acht Megawatt bei 30 bis 120 Megahertz steht kurz vor dem Abschluß.

Gleichfalls neu aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen wurde eine Mikrowellenanlage, die zur Plasmaheizung und speziell zum »nicht-induktiven« Stromtrieb an ASDEX dienen soll. Die Anlage arbeitet im Bereich der »unteren Hybridfrequenz«, einer Resonanzfrequenz des Plasmas bei 2,45 Gigahertz. Leistungen bis zu drei Megawatt werden mit 48 Einzel-Hohlleitern, die zu einem sogenannten »Grill« zusammengefaßt sind, in das Plasma eingestrahlt. Durch individuelle Phasensteuerung der Einzel-Hohlleiter kann dabei die Strahlungscharakteristik optimal für den Antrieb des Tokamak-Stromes angepaßt werden. Dieses Projekt wird in internationaler Zusammenarbeit ausgeführt. So wurden je drei der insgesamt sechs Hochleistungs-Elektronenröhren – sogenannte Klystrons – von dem **Princeton Institut für Plasmaphysik (PPPL)** in den USA und von dem italienischen **Fusionsforschungsinstitut in Frascati (ENEA)**

		WENDELSTEIN VII-AS	ASDEX
Untere Hybridfrequenz	Frequenz	—	2,45 Gigahertz
	Abgestrahlte Leistung	—	2,4 Megawatt
	Pulslänge	—	1 Sekunde
Ionen-Zyklotron-Resonanz	Frequenz	76 Megahertz/38 Megahertz	67 Megahertz/38,5 Megahertz
	Abgestrahlte Leistung	1 Megawatt	3,7 Megawatt
	Pulslänge	3 Sekunden	10 Sekunden
Neutral-Injektion	Energie der Teilchen	45 Kiloelektronenvolt	55 Kiloelektronenvolt H ⁰ (D ⁰)
	Eingeschossene Neutralleistung	1,5 Megawatt	3,0 Megawatt
	Pulslänge	2,7 Sekunden	10 Sekunden
Elektronen-Zyklotron-Resonanz	Frequenz	70 Gigahertz	—
	Abgestrahlte Leistung	0,8 Megawatt	—
	Pulslänge	3 Sekunden	—

Abbildung 7: Grundparameter der an WENDELSTEIN VII-AS und ASDEX eingesetzten Heizverfahren.

zur Verfügung gestellt. Aus Italien kommt auch die komplizierte Grillstruktur. Italienische und demnächst auch amerikanische Kollegen nehmen an den inzwischen begonnenen Experimenten teil.

An die Experimente zum Stromtrieb anknüpfend, beschäftigten sich kleinere theoretische Arbeiten mit den grundsätzlichen Möglichkeiten eines stromgetriebenen und damit stationären Tokamak-Reaktors. Danach sollte für die geplanten Großexperimente NET oder ITER ein nicht-induktiver Stromtrieb realisierbar sein. Für einen ökonomisch arbeitenden Tokamak-Reaktor müßten jedoch wesentlich effizientere Stromtriebmethoden gefunden werden. Als eine möglicherweise geeignete Lösung wurde der Plasmastromtrieb mit langsamen Wellen – kinetischen Alfvénwellen – näher analysiert.

Neben der Plasmaheizung an den Fusionsexperimenten wurde ein weiteres Arbeitsgebiet – die »Plasmatechnologie« – gemeinsam mit dem Bereich Plasma-Wand-Wechselwirkung aufgenommen.

Plasmatechnologie

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

Plasma-Anwendungen für technische Prozesse haben in letzter Zeit erheblich an Bedeutung gewonnen. Bekannte Beispiele sind die Plasmaverfahren in der Mikroelektronik – zum Beispiel das Plasma-Ätzen – und in der Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie – zum Beispiel »Plasma enhanced chemical vapour deposition« (PCVD).

Das neu in das Institutsprogramm aufgenommene Vorhaben »Plasmatechnologie« hat die Nutzung und Weiterentwicklung von plasmatechnologischen Beschichtungsverfahren zum Ziel. Dabei steht die unmittelbare Anwendung derartiger Verfahren für Oberflächen- und Wandprobleme der Fusionsforschung im Vordergrund. Beispiele sind Kohlenstoff-, Borkohlenstoff- und Keramikschichten auf Gefäßwänden oder auf besonders bela-

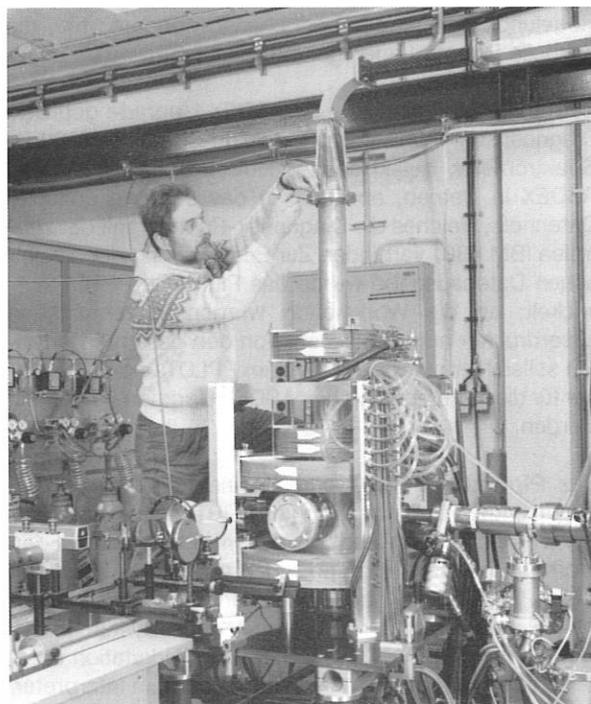


Abbildung 8: Plasmakammer für Beschichtungsversuche. Die Mikrowellen zur Erzeugung des Plasmas werden über einen Wellenleiter (oben) in die Kammer eingespeist.

steten Komponenten der Fusionsexperimente, wie Hochfrequenz-Antennen und Beschleunigungsgitter für Neutral-Injektoren. Als erfolgversprechendes Konzept für viele Dünnschichtanwendungen wurde die Plasma-Erzeugung mittels Mikrowellen bei der Elektronen-Gyroresonanz aufgegriffen. Hierfür wurden zwei Apparaturen inzwischen in Betrieb genommen. Als Mikrowellenfrequenz wurde die auch industriell gebräuchliche Standardfrequenz von 2,45 Gigahertz gewählt mit einer Dauerstrichleistung von maximal fünf Kilowatt. Speziell geformte Magnetfelder erlauben zugleich die Steuerung wichtiger Plasma-Kenngrößen: So können gerichtete Ionen-Flüsse verschiedener Energie hergestellt werden oder ein gewünschtes Spektrum der Elektronen-Energieverteilung für Stoßreaktionen.

Insgesamt kommt diesen Arbeiten, die neben ihrer praktischen Anwendbarkeit vor allem auch grundlagenorientierten Charakter besitzen, die langjährige Erfahrung des Instituts auf den verschiedenen Gebieten der Plasma- und Oberflächenphysik zugute. Hervorzuheben sind hier die Plasma-Erzeugung durch Hochfrequenz- oder Mikrowellen, die Plasma-Wand-Wechselwirkung, die Plasmdiagnostik sowie die Analyse dünner Schichten und die Oberflächendiagnostik.

Informatik

Bereichsleiter: Prof. Dr. Friedrich Hertweck

Die Aktivitäten des Bereichs Informatik sind zur Zeit vollständig auf das Datenerfassungs- und Analysesystem für das Experiment ASDEX Upgrade ausgerichtet. Neu hinzugekommen sind Arbeiten für die Steuerung und Regelung des Experiments, insbesondere für die schnelle Plasma-Lageregelung.

Seit Ende 1987 sind drei für ASDEX Upgrade geplante Diagnostiken – YAG-Laser-Thomson-Streuung, SPRED-Spektrometer, Elektronen-Zyklotron-Emission – an ASDEX in Betrieb, ebenso wie das schnelle optische Datennetz, welches die Diagnostik-Rechner mit der zentralen IBM 4381 verbindet. Zur Erleichterung der graphischen Datenausgabe wurde das Plotpaket PLOT entwickelt; an die Workstation wurden kostengünstige Laserdrucker angeschlossen. Von den gesamten Arbeiten sollen hier nur das Plotsystem PLOT und der Rechner für die Lageregelung des ASDEX Upgrade vorgestellt werden.

Das **Plotpaket PLOT** enthält eine Reihe einfach zu benutzender Funktionen, die von FORTRAN aus aufgerufen werden können und mit denen der Anwender den größten Teil seiner graphischen Probleme erledigen kann. PLOT besteht aus zwei Teilen, und zwar dem run-time Paket, welches auf verschiedenen Systemen zur Verfügung steht (AMOS/D OPTIMUM Workstation unter UNIX, CMS, AMOS/2, CRAY-XMP), und dem Interpreter, der nur auf der Workstation verfügbar ist. Beide Programme sind in C geschrieben und deshalb leicht auf andere UNIX-Systeme portierbar. Für das run-time-Paket existiert im AMOS/2 eine PLX-Version, die von

allen Benutzern gemeinsam verwendbar ist, so daß im Benutzer-Job nur etwa 4 Kilobyte zur Verfügung gestellt werden müssen. Das PLOT-Metafile ist so strukturiert, daß es auch nachträglich, d.h. ohne Kenntnis des erzeugenden Programms, editiert werden kann. Es enthält deshalb verschiedene zusätzliche Informationen, die für die eigentliche Plotausgabe nicht relevant sind, wie die Abbildung von Benutzerkoordinaten auf abstrakte Gerätekoordinaten. Die Genauigkeit der Information im Metafile ist um eine Größenordnung besser als die der üblichen Ausgabegeräte. Die höhere Genauigkeit läßt sich jederzeit nachträglich durch Vergrößern (zoom) ausnutzen.

Für die schnelle **Lageregelung** des Plasmas im Experiment ASDEX Upgrade wurde der Prototyp eines Parallelrechners fertiggestellt (siehe Abbildung), der aus 12 Transputer-Mikroprozessoren besteht, die in Hypercube-Topologie miteinander verknüpft sind.

Während des Experimentablaufes werden in Echtzeit Magnetfelddaten gemessen, die Aufschluß geben über die Art des Plasma-Gleichgewichts. Zunächst müssen hierzu die Lageparameter des Plasmas berechnet werden. Anhand von Sollwerten bestimmt man daraus

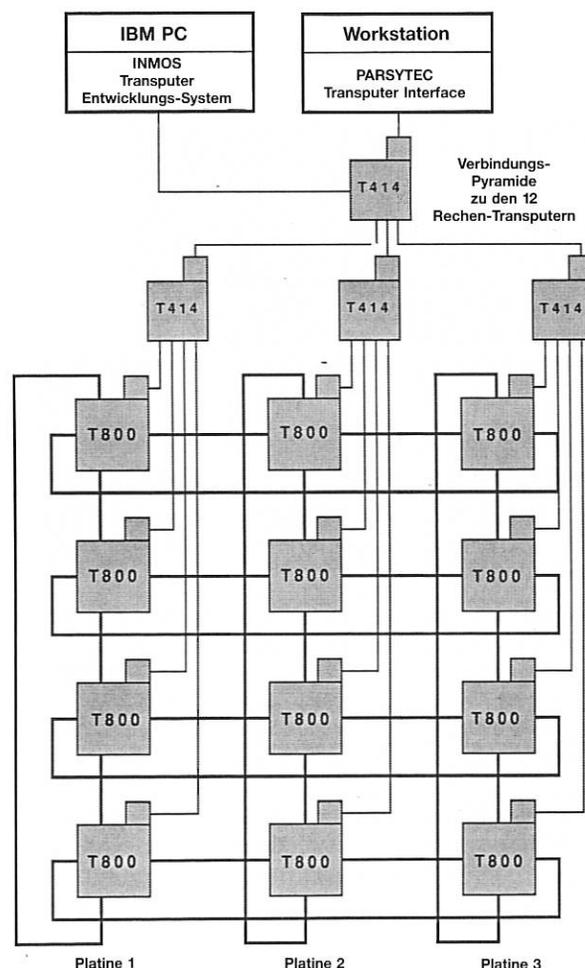


Abbildung 9: Der Rechner MULTITOP/12, der für die Plasma-Lageregelung des Experimentes ASDEX Upgrade entwickelt wurde.

Regelgrößen für neun der Spulen. Insgesamt umfaßt der Algorithmus etwa 3000 Gleitpunktoperationen. Unter Berücksichtigung dieser Größen werden die Ströme in den Spulen und damit die Lage des Plasmas verändert. Zwischen der Messung der Magnetfelddaten und der Regelung der Spulen dürfen höchstens 1,4 Millisekunden liegen, da sonst die berechneten Regelgrößen veraltet sind und keine Aussagekraft mehr besitzen. Ein stabiler Plasma-Einschluß wäre dann nicht mehr gewährleistet.

Diese Zeitvorgabe stellt hohe Anforderungen an den Computer, der für die Plasma-Lageregelung verwendet wird. Die üblicherweise am IPP benutzten Rechner – zum Beispiel IBM 4381 – arbeiten zu langsam oder benötigen – wie IBM 3090 und CRAY-XMP – zu viel Zeit für die Aufnahme und Rückgabe der Daten. Die einzige Möglichkeit, die Aufgabe zu lösen, liegt im Einsatz eines Parallelrechners mit schneller Ein- und Ausgabe.

Hierfür soll der Rechner MULTITOP/12 verwendet werden. Dies ist ein am IPP entwickeltes Multiprozessorsystem, das aus insgesamt 16 32-bit-Mikroprozessoren – sogenannten Transputern – der britischen Firma INMOS besteht. Der hier verwendete Transputertyp T800 läuft mit einer Taktfrequenz von 20 Megahertz, also 50 Nanosekunden Zykluszeit, und leistet etwa zwei bis drei Millionen Befehle pro Sekunde. Der auf dem Chip integrierte Gleitkomma-Koprozessor, der parallel zur Zentraleinheit arbeiten kann, erreicht rund 1,5 Millionen Gleitpunktoperationen pro Sekunde. Ebenfalls auf dem Chip befindet sich ein schneller Arbeitsspeicher von 4 Kilobytes und 50

Nanosekunden Zugriffszeit. MULTITOP/12 hat zusätzlich pro Transputer 128 Kilobytes externen Speicher (Zugriffszeit 250 Nanosekunden). Da jeder Transputer nur seinen eigenen Speicher adressieren kann, ist er für die Kommunikation zwischen den Prozessoren mit vier schnellen Datenkanälen, den Links, ausgerüstet, die miteinander verbunden werden. Diese Links können parallel mit einer Übertragungsrate von etwa 1,6 Megabytes pro Sekunde benutzt werden.

Die 16 Transputer von MULTITOP/12 zerfallen in zwei Gruppen: zwölf Transputer T800 stehen als eigentliche Rechentransputer für das Anwenderprogramm zur Verfügung, die restlichen vier (T414) bilden als Kommunikations-Transputer die Schnittstelle zum Host-Rechner, einem IBM-Personal Computer. Hierüber werden hauptsächlich Eingaben von der Tastatur und Ausgaben auf den Bildschirm weitergeleitet. Die zwölf Rechentransputer sind zur Zeit in einer festen Topologie doppelt, d. h. horizontal und vertikal, ringförmig miteinander verbunden. Die Verbindungen zu den Kommunikations-Transputern sind durch Link-Adapter realisiert. Über den Speicherbus angesprochen, konvertiert der Link-Adapter 8 bit parallele Daten in serielle Link-Daten. Damit können alle Links der Rechentransputer für das Benutzerprogramm verwendet werden. Es ist geplant, den Rechner mit einem Koppelnetz auszustatten, so daß die Topologie per Software gewählt und auch während des Programmablaufs verändert werden kann. Ein Multiprozessorsystem mit variabler Topologie existiert am IPP als Prototyp mit acht Transputern.

Zusammenarbeit

Zusammenarbeit mit Hochschulen

Zur Lösung einiger grundlegender physikalischer Probleme im Zusammenhang mit der Plasmaheizung, der Entwicklung und Anwendung spezieller Diagnostikmethoden und der Bestimmung von Daten für die Spektroskopie und die Plasma-Wand-Wechselwirkung arbeitet das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik eng mit mehreren Universitätsinstituten zusammen. Die im allgemeinen zeitlich begrenzten Aufgabenstellungen geben mit ihrer finanziellen Förderung den Hochschulinstituten Gelegenheit, ihre detaillierten Kenntnisse am IPP anzuwenden und zu erweitern, wodurch das IPP um die Erfahrung und das Fachwissen der Universitäten bereichert wird.

Den Großteil der Hochschul-Zusammenarbeit trägt das **Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart** mit seinen Beiträgen zur Plasmaheizung im Bereich der Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung am Stellarator WENDELSTEIN VII-AS und zur Plasmadiagnostik mit der Fern-Infrarot-Lichtstreuung am Tokamak ASDEX und der LIDAR-Streuung am europäischen Gemeinschaftsprojekt JET.

Zum Plasmaaufbau, zur Hochfrequenzheizung des Plasmas und zum Stromtrieb im Stellarator WENDELSTEIN VII-AS wurde ein Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizungssystem von 70 Gigahertz aufgebaut. Etwa 85 Prozent der Ausgangsleistung von einem Megawatt werden hier für eine Pulsdauer von drei Sekunden über eine 60 Meter lange Transmissionsleitung geführt und dann von Antennen in das Stellarator-Plasma eingestrahlt. Dieses Ergebnis beruht vor allem auf der sorgfältigen und detaillierten Entwicklung, Optimierung und erfolgreichen Erprobung von Wellenleiter-Elementen und speziellen Hochfrequenz-Komponenten (Modenwandler und -filter, Krümmer und Taper). Das Heizsystem führte bereits bei den ersten Experimenten im Stellarator WENDELSTEIN VII-AS zu günstigen Werten für die Plasma-Parameter. In einer Zusammenarbeit des IPF mit dem **Kernforschungszentrum Karlsruhe** und dem IPP werden Vorbereitungen für ECRH-Experimente bei der zweiten Harmonischen an WENDELSTEIN VII-AS mit einer Frequenz von 140 Gigahertz, 200 Kilowatt Leistung und 200 Millisekunden Pulsdauer getroffen. Die experimentellen und technischen Arbeiten werden von theoretischen Untersuchungen zur Wellenausbreitung im Plasma und numerischen Plasma-Simulationen begleitet.

Mit einem am IPF entwickelten und getesteten Streusystem im Fern-Infrarot wird die kollektive Streuung an

Elektronendichte-Fluktuationen verwendet, um die physikalische Natur der Turbulenz des Plasmas sowie deren möglichen Zusammenhang mit dem Einschlußverhalten des Plasmas zu untersuchen. Die Streu-Experimente an ASDEX deuten auf eine Driftwellennatur der beobachteten Dichteturbulenz. Intensive Entwicklungsarbeiten des IPF für die spezielle Laserstreuadiagnostik LIDAR haben am europäischen Tokamak JET seit Sommer 1987 die Möglichkeit eröffnet, während einer Entladung routinemäßig räumliche Profile der Elektronentemperatur und -dichte alle zwei Sekunden zu erhalten.

Im Isotopentrenn-Laboratorium des **Physik-Departments der Technischen Universität München** werden Zerstäubungsausbeuten fester Oberflächen bei Beschuß mit schnellen, schweren Ionen gemessen, die für das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Plasma und Wand von großer Bedeutung sind. Deren Kenntnis ist eine wichtige Voraussetzung für die Auswahl von geeigneten Wandmaterialien in Fusionsanlagen.

Am **Institut für Angewandte Physik der Universität Frankfurt** wurde eine Elektronenstoß-Ionisieranordnung gebaut, die durch einen speziell geformten, intensiven Elektronenstrahl gekennzeichnet ist. Sie dient dazu, die Massen- und Energieverteilung des von der Wand zerstäubten Materials zu analysieren.

In Zusammenarbeit mit dem **Institut für Experimentalphysik AG VI der Ruhr-Universität Bochum** werden die thermophysikalischen Eigenschaften von technischem Graphit, wie er für Limiter-Anordnungen in heutigen Plasma-Anlagen – wie ASDEX Upgrade – von Interesse ist, mit akustischem und radiometrischem Nachweis thermischer Wellen bestimmt.

Mit der **Oberflächenphysik-Gruppe der Universität Kassel** arbeitet das Institut eng zusammen bei der Bestimmung der geometrischen und elektronischen Struktur chemisorbierter Systeme.

Zur Bestimmung von Ionisierungsquerschnitten vielfach geladener Ionen, die für die spektroskopischen Messungen des IPP benötigt werden, wurde am **Institut für Kernphysik und Strahlencentrum der Justus-Liebig-Universität Gießen** eine Elektronen-Zyklotronresonanz-Ionenquelle aufgebaut und erheblich weiterentwickelt. Mit den damit erzeugten Ionenstrahlen werden wichtige Daten und neue Mechanismen der Elektronenstoß-Ionisation und -Wechselwirkung untersucht.

Mit dem **Institut für Angewandte Physik II der Universität Heidelberg** pflegt das IPP eine enge Zusammenarbeit bei der Diagnostikentwicklung und -anwendung für die Messung von Flüssen und Spektren von Fusions-Neutronen. Mit deren Hilfe werden Kenntnisse über die Orts- und Energieverteilung sowie die Temperatur der Ionen gewonnen, die im Plasma des Tokamak ASDEX in Fusionsprozessen reagieren.

Mit dem **Institut für Experimentalphysik II der Ruhr-Universität Bochum** arbeitet das Institut auf dem Gebiet der Fluktationsmessungen an ASDEX zusammen.

Mit der **Universität Bayreuth** ist eine enge Zusammenarbeit im Forschungsschwerpunkt Oberflächenphysik geplant. Die gemeinsamen Verfahren zur Berufung der leitenden Forscher des Schwerpunktes stehen kurz vor dem Abschluß.

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

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 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.

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 Eur-

atom-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 Plasmadiagnostiken.

Die zur Vorbereitung des Nachfolge-Experiments NET (Next European Torus) gebildete NET-Studiengruppe hat ihren Sitz auf dem Garching Institutsgelände und wird durch das IPP 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:

Die Anwendung der Alfvénwellenheizung an ASDEX wurde zusammen mit dem **Centre de Recherches en Physique des Plasmas** in Lausanne (Schweiz) erprobt. Weiterhin laufen gemeinsame Untersuchungen zur Plasmatheorie mit diesem Institut. Das **FOM-Institut voor Plasmaphysika** in Rijnhuizen (Holland) liefert numerische Beiträge zur Interpretation magnetischer Diagnostiken. Auf dem Gebiet der Oberflächenphysik untersucht die **Europäische Forschungsanstalt Ispra** geeignete Schutzschichten, zum Beispiel für die Erste Wand. Die **Universität 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 Demokritos** in Griechenland. Mit dem portugiesischen **Instituto Superior Técnico** in Lissabon ist die Lieferung eines reflektometrischen Diagnostiksystems für ASDEX und später 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. Zusammen mit dem **Laboratorium für Plasmaphysik ERM/KMS** in Brüssel wird die Wechselwirkung zwischen Wellen der Ionen-Zyklotronfrequenz und der Plasma-Randschicht untersucht. Ein Vertrag mit der **Königlich-Technischen Hochschule Stockholm** in Schweden sieht die gegenseitige Unterstützung bei den Experimenten »Extrap« (Stockholm) sowie ASDEX und ASDEX Upgrade vor. Das **Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare e le Energie Alternative** in Frascati/Italien baut wesentliche Teile für die Lower-Hybrid-Heizung an ASDEX bei 2,45 Gigahertz. Zu diesem Experiment tritt als dritter, internationaler Kooperationspartner das amerikanische **Princeton Plasma Physics Laboratory** hinzu, das drei Klystrons als Leihgabe zur Verfügung stellt. Mit der **Katholischen Universität Leuven** in Belgien sind Untersuchungen zu Problemen der Magneto-Hydrodynamik vereinbart. Die Thematik der MHD-Instabilitäten und die Rückkopplungsstabilisierung in toroidaler Geometrie umfaßt ein Zusammenarbeitsvertrag mit dem **Culham Laboratory** in Abingdon, Großbritannien.

Das **Joffe-Institut** in Leningrad entwickelt Neutralteilchen-Analysatoren für ASDEX, ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN. Darüber hinaus bestehen nach Rußland Kontakte über Personalaustausch mit dem **Lebedev-**

Institut 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, ASDEX Upgrade und Doublet III-D sowie auf dem Gebiet der Stellarator-Entwicklung, denen sich mittlerweile auch Japan angeschlossen hat. 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 erarbeiten Europäer, Japaner, Sowjets und Amerikaner gemeinsam das Konzept für einen »Internationalen thermonuklearen Experimentalreaktor« (ITER).

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 durch die Auftragsabwicklung eingeleitete wechselseitige Informationsaustausch geht über den konkreten Vertragsgegenstand weit hinaus und gibt befruchtende Impulse für die weitere Zusammenarbeit.

Auch der Personalaustausch mit Industriebetrieben hat sich als wirksame Form des Technologietransfers erwiesen. Angestellte von Industrieunternehmen sind daher an Entwicklungsprojekten des IPP auch unmittelbar beteiligt.

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 voraussetzen – 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.

Wissenschaftliche Infrastruktur

Rechenzentrum Garching

Leiter: Dr. Johann Gaßmann

Das »Rechenzentrum Garching« wird als gemeinsame Einrichtung des Max-Planck-Institutes für Plasmaphysik und der Max-Planck-Institute für Physik, Astrophysik und extraterrestrische Physik betrieben. Mittels Datenübertragung sind weitere Benutzer angeschlossen.

Die Arbeiten des Rechenzentrums waren das IPP betreffend hauptsächlich ausgerichtet auf die Datenauswertung zum Experimentbeginn von WENDELSTEIN VII-AS, auf den Ausbau des lokalen Rechnernetzes und der internationalen Datenverbindungen für die Projektgruppe ITER. Den höheren Leistungsanforderungen wurde Rechnung getragen durch die Beschaffung eines Rechners IBM 3090-15E und zusätzlicher Plattenspeicher.

Die Rechanlage besteht aus einem Rechnerverbund, nämlich einem Vektorrechner CRAY XMP-24 für rechenintensive, zu vektorisierende Programme, einem System IBM 3090-15E und zwei Rechnern IBM 4381 für Experimentdatenverarbeitung, interaktive Programmierung und Batch-Verarbeitung. Die zusätzliche Installation des neuen Rechners IBM 3090-15E mit schnellen Datenkanälen, größerem Hauptspeicher und Paging-Speicher ermöglicht eine für den Benutzer transparente Kopplung sämtlicher IBM-Systeme und deren Peripheriegeräte unter dem Betriebssystem VM/HPO. Bei Experimentbetrieb werden die Rechner IBM 4381 nur von den Experimentatoren genutzt. Diese Reduzierung der Rechnerleistung für den allgemeinen Benutzer ist nahezu unmerklich, da sämtliche Funktionen durch das zur Verfügung stehende System IBM 3090 mit ausreichender Leistung bereitgestellt werden. Der größere Hauptspeicher und Paging-Speicher beschleunigen dabei wesentlich den Betrieb mit bis zu 200 aktiven Benutzern.

Die Datenauswertung für das Experiment WENDELSTEIN VII-AS wurde auf der Basis des für ASDEX verwendeten Systems neu konzipiert. In Erwartung der größeren Datenmengen wurde der Datentransfer zwischen VAX-Rechner und IBM-Rechner durch Einsatz einer schnellen Kopplung (High Speed Communication) auf effektiv 400 Kilobytes pro Sekunde erhöht. Die Speicherung der Experimentdaten erfolgt gleichzeitig im Hauptspeicher, auf Plattenspeicher und im Archivsystem HADES. Die Auswertprogramme sind für den Betrieb im IBM- und VAX-Rechner ausgelegt, insbesondere auch durch Verwendung des graphischen Systems GKS. Die Speicherung ausgewerteter Daten in einer Datenbank SPIRES wurde eingerichtet.

Das bereits rudimentär vorhandene Rechnernetz wurde ausgebaut und auf der Grundlage der Ethernet-Technik weitere Segmente mit Glasfaser- und Koaxialanschlüssen eingerichtet. Für die speziellen Bedürfnisse des Bereichs Oberflächenphysik wurde ein Verbund von Rechnern in Form eines Token-Rings aufgebaut. Alle heterogenen Rechnersysteme (IBM, DEC, etc.) mit unterschiedlichen Betriebssystemen (VM, VMS, UNIX,

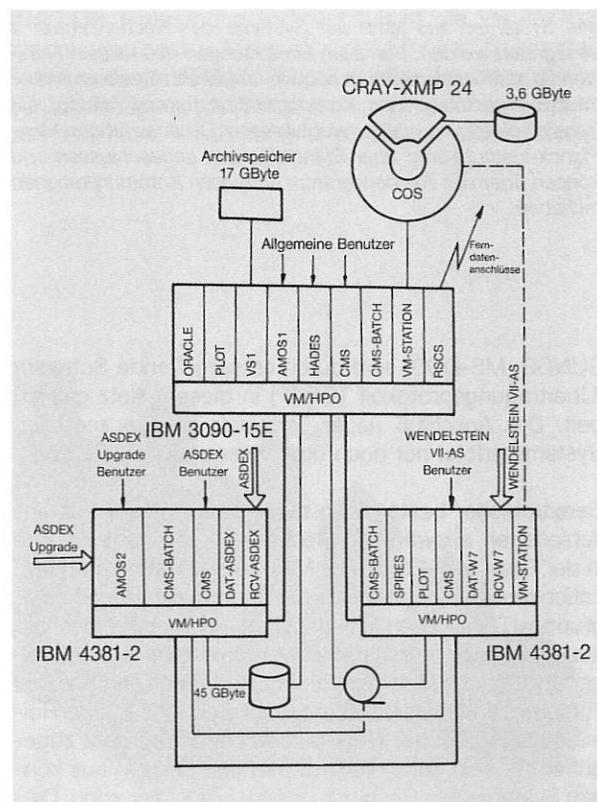


Abbildung 1: Der Rechnerverbund des Rechenzentrums verfügt über ein Doppelprozessorsystem CRAY XMP-24 (Betriebssystem COS) und die Vorrechner IBM 3090-15E und IBM 4381-2. Diese untereinander gekoppelten Vorrechner werden als ein logisches System unter dem Betriebssystem VM/HPO betrieben. Während des Experiment-Betriebes wird je ein Rechner IBM-4381 für die Tokamak-Experimente ASDEX und ASDEX Upgrade sowie für den Stellarator WENDELSTEIN VII-AS reserviert. Die Entwicklung von Rechenprogrammen und der Zugang zum CRAY-System erfolgt durch den Rechner IBM 3090.

Zentrale Technische Einrichtungen

Leiter: Dr. Harald Rapp

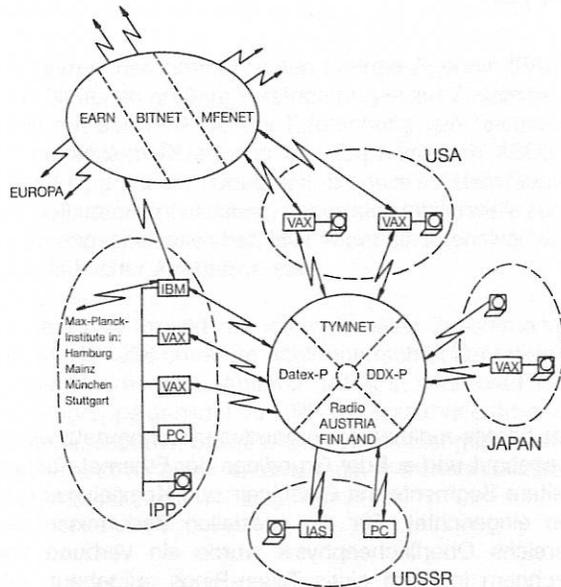


Abbildung 2: Ausgelöst durch die Bedürfnisse der Projektgruppe ITER wurden die Datenverbindungen nach USA, UdSSR und Japan wesentlich ausgebaut und automatisiert. Von beliebigen Systemen aus kann auf Systeme des Rechenzentrums zugegriffen werden. Von allen Einrichtungen des lokalen Netzwerkes am Rechenzentrum können umgekehrt Rechner in aller Welt mit verschiedenen Kommunikationsformen (dialog, file transfer, electronic mail) erreicht werden. Die auswärtigen Max-Planck-Institute sind über Standleitungen angeschlossen und können über das Rechenzentrum an diesen Kommunikationen teilhaben.

SUNOS, MS-DOS) sind durch entsprechende Software (Übertragungsprotokoll TCP/IP) in diesem Netz gekoppelt. Der Anschluß neuer Terminals an die zentralen Systeme erfolgt nur noch über dieses lokale Netzwerk.

Bereits bisher bestand ein reger Datenverkehr mit verschiedenen auswärtigen Rechenzentren, insbesondere in der Form von »Electronic Mail«. Diese Datenkommunikation wurde jedoch durch die Bedürfnisse der Projektgruppe ITER wesentlich erweitert und mußte deshalb ausgebaut und automatisiert werden. Von einem beliebigen System am Netz des Rechenzentrums kann nun (bei entsprechender Berechtigung) auf Systeme in den Heimatinstitutionen der ITER-Mitarbeiter transparent zugegriffen werden. Auch von auswärtigen Zentren aus können Systeme des Rechenzentrums erreicht werden. Dieser Betrieb läuft erfreulich problemlos und wird durch Einrichtung einer Satellitenverbindung nach den USA weiter beschleunigt werden.

Zur Unterstützung der wissenschaftlichen Bereiche bei Entwurf, Aufbau und Betrieb der Experimente und ihrer vielfältigen Diagnostik-Apparaturen sind in den »Zentralen Technischen Einrichtungen« (ZTE) technische Dienste zusammengefaßt, die von Ingenieurleistungen bis zur handwerklichen Ausführung reichen. Soweit technische Gründe oder Kapazitäts-Engpässe es nahelegen, werden Industrie und Gewerbe bei Konstruktion, Fertigung und Montage mittels Werkverträgen hinzugezogen. Die Fachkräfte der ZTE konzentrieren ihre Arbeit auf Aufgabenstellungen, die neben speziellem Fachwissen eine gute Kenntnis der experimentellen Gegebenheiten verlangen. Außerdem stellen sie die technische Infrastruktur zur Versorgung des IPP und der Großexperimente mit Strom und Wasser bereit. Ein wesentlicher Effekt zentraler technischer Dienste ist es, daß hier Kenntnisse und Erfahrungen aus den verschiedensten Projekten zusammenkommen, die so allen wissenschaftlichen Bereichen zur Verfügung stehen.

Die Abteilung Elektrotechnik konnte 1988 einen vierten Schwungradgenerator mit 220 Megawatt Stoßleistung in Betrieb nehmen. Mit seinen vier Schwungradgeneratoren verfügt das IPP nunmehr über 580 Megawatt Stoßleistung und 2600 Megajoule Nutzenergie. Die Leistung der zehn Stromrichter-Module erreicht 460 Megawatt mit Gleichströmen bis 90 Kiloampere und bis zu 13 verschiedenen Spannungen. Einige der Module können als Umkehrstromrichter geschaltet werden. Damit ist eine optimale Anpassung an die verschiedenen Lastfälle der Großexperimente und sogar der Parallelbetrieb zweier Experimente möglich geworden.

Die Abteilung Material-, Vakuum- und Chemische Technologien deckt ein breites Aufgabenspektrum ab. Die

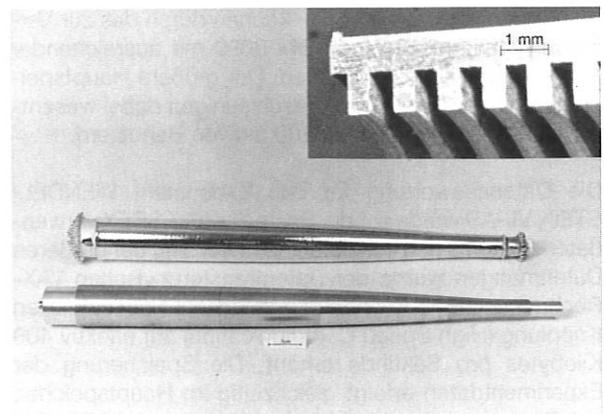


Abbildung 3: Galvanoplastisch hergestellter Mikrowellenleiter vor der Endbearbeitung. Im Vordergrund der Aluminiumkern, der nach dem Aufgalvanisieren einer Kupferschicht durch chemisches Ätzen wieder entfernt wird. Der Wellenleiter besitzt im Innern schmale Rillen, wie im Bildausschnitt erkennbar.

Materialprüfung von zugelieferten Werkstücken für hohe Beanspruchung ist eine der wesentlichen Aufgaben. Hierbei konnten für das Projekt ASDEX Upgrade finanzielle Belastungen und technische Risiken in erheblichem Umfang abgewendet werden. In entsprechender Weise leisteten die Kunststoffwerkstatt und die Gruppe Chemie Hilfestellung bei Qualitätssicherung und Aufbau der Hauptfeldspulen von ASDEX Upgrade. Für die Heizverfahren im Hochfrequenzbereich hat die Galvanotechnik und insbesondere die Galvanoplastik in den letzten Jahren große Bedeutung gewonnen. Beispiele sind die Raugoldbeschichtung für die neue Antenne der Lower-Hybrid-Heizung an ASDEX zur Verhinderung von Multipactor-Entladungen, ebenso die Oberflächenvergütung von Hochleistungs-UKW-Bauteilen für die Ionen-Zyklotronheizung. Neu hinzugekommen ist die galvanoplastische Herstellung von Mikrowellenbauteilen für die Elektronen-Zyklotronheizung, die sich auf andere Weise kaum fertigen lassen (Abbildung 3).

In der Abteilung Elektronik werden schnelle Hochleistungsschalter für die Stromversorgung der Neutral-Injektoren und der Hochfrequenzsender entwickelt. Die Zuverlässigkeit der Schalter ist Voraussetzung dafür, daß die Heizsysteme sicher und mit hoher Verfügbarkeit arbeiten. Eine andere Gruppe widmet sich der Meßtechnik einschließlich der Steuerung und Rechneranbindung, wobei anwenderspezifische Lösungen im Vordergrund stehen. Unter anderem wurde ein mikroprozessorgestützter Datenmultiplexer für 576 Kanäle entwickelt, der sich durch große Vielseitigkeit und einfache Hardware auszeichnet.

Der hohe Störpegel an den Großexperimenten, der durch die Stromrichter der Magnetspulen und durch Hochfrequenzsender für die Plasmaheizung hervorgerufen wird, erfordert Übertragungssysteme mit hoher Stördämpfung. Hierfür wurden preisgünstige und kompakte Geräte entwickelt und in größerer Zahl im praktischen Betrieb erprobt. Für die zügige Bearbeitung der Aufgaben steht seit 1988 ein automatisches Leiterplatten-Entflechtungssystem zur Verfügung. Der Elektronik-Service hat sein Leistungsangebot erfolgreich auf die Regenerierung von Bildschirmröhren und die Reparatur von Geräten der Datenverarbeitung erweitert. Insgesamt wurden 690 Reparaturaufträge abgeschlossen.

Bereits seit einigen Jahren wurden in der Abteilung Konstruktion und Berechnung in enger Zusammenarbeit mit dem Projekt WENDELSTEIN VII-AS Rechenprogramme geprüft, die Aussagen über die Festigkeit räumlich gekrümmter Magnetspulen erlauben. Die Programme werden beim Entwurf der Spulensätze für das geplante große Stellarator-Experiment WENDELSTEIN VII-X angewendet. Hierbei gehen die plasmaphysikalischen Untersuchungen der Magnetfeldkonfiguration und die Prüfung der technischen Aspekte Hand in Hand. In der Abbildung 4 ist das Ergebnis einer Finite-element-Berechnung mit Hilfe des Programmes ADINA dargestellt. Die Farbgebung veranschaulicht die Vergleichsspannungen nach v. Mises für einen 90-Grad-Sektor der Spulenvariante HELIAS 4V12. Zentrales Problem ist die Berücksichtigung des Kraftschlusses zwischen Spule und Gehäuse. In Zusammenarbeit mit dem Projekt

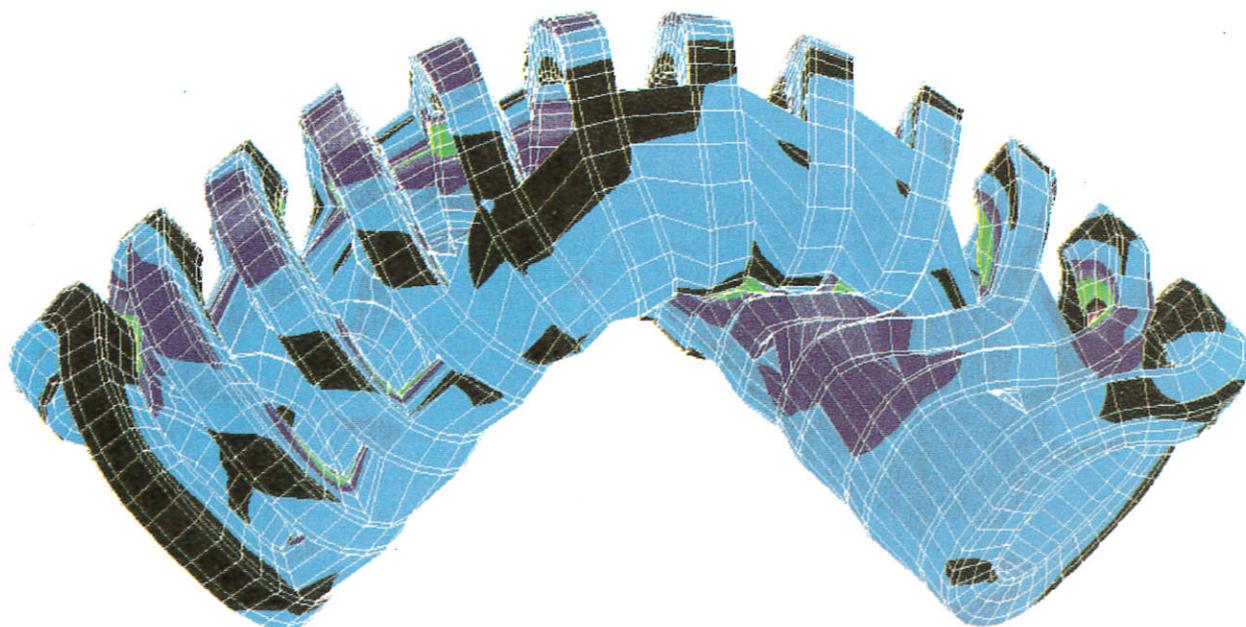


Abbildung 4: Spannungsdarstellung eines Spulenpaketes für die Stellarator-Konfiguration HELIAS 4 mit fester Einbettung in ein geschlossenes Stahlgehäuse.

ASDEX Upgrade wurde eine dreidimensionale Belastungsanalyse der Toroidal-Feldspulen mit befriedigendem Ergebnis bezüglich der verschiedenen Beanspruchungen durchgeführt. Ferner konnte mit Hilfe thermomechanischer Finite-element-Rechnungen ein neues Konzept für die Struktur von Wärmeschutzschilden entwickelt werden, das die Belastung der tragenden Wand und des hochtemperaturfesten Schutzelements deutlich herabsetzt. Für die Konstruktion war die Einführung des »Computer Aided Design« (CAD) ein bedeutender Einschnitt. Bei den toroidalen Strukturen der Fusionsexperimente mit ihren vielfachen Unterteilungen und Verschneidungen ist das CAD ein leistungsstarkes Werkzeug, das bereits beim Entwurf von WENDELSTEIN VII-AS und ASDEX Upgrade gewinnbringend eingesetzt wurde. Sein weiterer Ausbau und die Koppelung mit den Berechnungsprogrammen und gegebenenfalls mit den Fertigungsmaschinen ist für zukünftige große Experimente unverzichtbar.

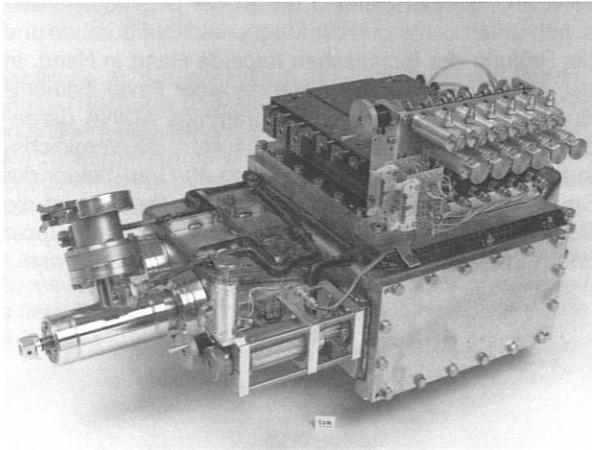


Abbildung 5: Röntgenkamera mit Wechselnfiltern für die räumliche und zeitliche Messung der Elektronentemperatur am Experiment WENDELSTEIN VII-AS.

Im Jahre 1987 ging der bisher größte Einzelauftrag für mechanische Fertigung und Montage im IPP mit über 50 000 Stunden für die ASDEX-Härtung zu Ende. In enger Verzahnung zwischen Zulieferfirmen, interner Fertigung und Qualitätskontrolle sowie den Projektmitarbeitern gelang ein schwieriger Umbau, an dessen Ende ein neu ausgerüstetes Vakuumgefäß für die ASDEX-Langpulsheizung mit über tausend zusätzlichen Vakuumflanschen übergeben werden konnte. Für den Stellarator WENDELSTEIN VII-AS und Zusatzheizsysteme wurden eine Reihe von Apparaturen gebaut, die in wachsendem Umfang kinematische Elemente enthalten (Abbildung 5).

Die Neustrukturierung der ZTE im Jahre 1988 führte für die Werkstätten zu einer fachübergreifenden Zusammenfassung unter gemeinsamer Leitung. Gleichzeitig erhielten die 13 Gruppenleiter und Meister einen Status, der ihnen mehr Selbständigkeit und Handlungsfreiheit einräumt. Ziel war, die Werkstätten der ZTE wie Laborwerk-

stätten zu lenken und die direkte Zusammenarbeit mit den Auftraggebern aus den experimentellen Bereichen zu stärken. Die bisherigen Fachabteilungen aus Ingenieur- und Werkstattgruppen wurden aufgelöst. Alle Werkstätten sind nunmehr zusammen mit Arbeitsvorbereitung, Lager und Ausbildung in einer eigenen Abteilung zusammengefaßt, die sich um die Fertigung und Betriebsinstandhaltung kümmert. Die verbleibenden Ingenieurabteilungen können sich auf Ingenieuraufgaben konzentrieren.

Da der Personalabbau im technischen Bereich mit dem Aufbau bzw. Betrieb von drei großen Experimenten zusammentraf, stieg der Anteil von Fremdleistungen, der über die ZTE bezogen wird, im abgelaufenen Jahr an. Einem entsprechend dem Personalabbau auf etwa 60 000 gesunkenen Umfang an internen Fertigungsstunden für die Sparte Mechanik stehen nunmehr etwa 48 000 externe Fertigungsstunden im abgelaufenen Jahr gegenüber. Ähnlich verhält es sich in der Sparte Elektrik, wo 15 000 internen Fertigungsstunden 10 000 externe Fertigungsstunden gegenüberstehen. Die Fertigungsstunden aller Fachgebiete verteilen sich etwa gleichmäßig auf die neuen Experimente WENDELSTEIN VII-AS, ASDEX Upgrade und die Heizsysteme, wobei ASDEX Upgrade einen stetig wachsenden Anteil beansprucht. Eine Besonderheit für die ZTE stellt die technische Betreuung von Aufträgen beim Lieferanten dar, wie sie sich für die Fertigung der Hauptfeldspulen für ASDEX Upgrade als notwendig erwies.

Die Zahl der insgesamt 52 Ausbildungsplätze für fünf Berufe blieb unverändert. Das Ergebnis der Abschlußprüfungen war wie stets überdurchschnittlich gut. Im abgelaufenen Jahr konnten erstmals wieder sechs Jungfacharbeiter auf feste Arbeitsplätze übernommen werden.

Verwaltung und Allgemeine Dienste

Leiter: Adolf Ilse (bis 31. Dezember 1988)
Dr.-Ing. Karl Tichmann (ab 1. Januar 1989)

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

Personalabteilung

Leiter: Dr. jur. Carl-Heinz Duisberg
(bis 31. Oktober 1988)
Dr. jur. Eric R. Hirsch (ab 1. November 1988)

1. Vom 1.1.1987 bis 31.12.1988 ist die Gesamtzahl der Beschäftigten von 1052 um 26 auf 1078 angestiegen. Die Ursache für diese Steigerung bei gleichzeitigem Stellenabbau ergibt sich aus einem Aufwuchs von Stellen außerhalb des Stellenplans. So ist zum Beispiel die Zahl der Doktoranden um 13, die der Gastforscher um 10 und die der Postdocs um 6 angestiegen. Für Zusatzaufgaben des IPP bei den Projekten ITER/NET sind unter Berücksichtigung der Zeithilfen 18 Stellen geschaffen worden. Die Zahl der Diplomanden erhöhte sich um 3.

Der Personalstand zu den Jahresenden 1987 und 1988 stellt sich wie folgt dar:

	Stand: 31.12.1987	Stand: 31.12.1988
Wissenschaftler (einschließlich Gastforscher)	286	288
Technisches Personal	467	462
Direktorium und Betriebsrat	17	18
Allgemeine Dienste	122	119
Verwaltung	67	67
	<hr/> 959	<hr/> 954
Auszubildende und Praktikanten	51	54
Doktoranden und Diplomanden	30	33
Zeithilfen	15	22
Zusatzpersonal ITER/NET	8	15
	<hr/> 1063	<hr/> 1078

Das Institut hat aufgrund der Forderung des BMFT und gesetzlicher Sparmaßnahmen bis zum 31.12.1988 von 981 Stellen 96 Stellen abgebaut. Hingegen wurden 3 Fiebig-Stellen befristet bis 31.12.1996 genehmigt, so daß derzeit das Planstellen-Soll 888 Stellen beträgt. Der Stellenabbau erfolgte aus der Fluktuation.

2. Die Austrittsfluktuation der Mitarbeiter auf Planstellen in den Jahren 1987 und 1988 ist in der nachstehenden Übersicht dargestellt:

	Zahlenstand 1987	Zahlenstand 1988
Gruppe 1 Angestellte C4-BAT IIa	3,1% (7)	3,9% (9)
Gruppe 2 Angestellte BAT IIaT-BATX	7,1% (30)	4,1% (17)
Gruppe 3 Lohnempfänger	4,5% (11)	4,6% (12)
Gesamtfluktuation	<hr/> 5,4% (48)	<hr/> 4,3% (38)

3. Die Zahl der schwerbehinderten Beschäftigten betrug zum Jahresende 1988 70 (Vorjahr 72). Die durch das Schwerbehindertengesetz vorgeschriebene Quote von 6 Prozent wurde somit um 11 Mitarbeiter überschritten.

4. Zu JET waren zum Jahresende 1988 7 Mitarbeiter für einen mehrjährigen Aufenthalt nach England beurlaubt. 11 Mitarbeiter waren 1988 zeitweise zu JET abgeordnet.

5. Zum NET-Team waren zum Jahresende 1988 5 Wissenschaftler abgeordnet, 11 weitere Mitarbeiter wurden zur zusätzlichen Unterstützung des Teams beschäftigt, davon 9 außerhalb des Stellenplans. Für die Unterstützung des ITER-Teams wurden zum Jahresende 1988 6 Mitarbeiter außerhalb des Stellenplans beschäftigt. Unabhängig davon beteiligen sich die Wissenschaftler des IPP mit einem erheblichen Teil ihrer Arbeitszeit an NET/ITER-Aufgaben.

6. Zum Jahresende 1988 waren im IPP insgesamt 51 Mitarbeiter mit Ausbildungsverträgen beschäftigt (Vorjahr 51), davon 17 Feinmechaniker, 6 Industriemechaniker, 6 Elektrogerätemechaniker, 6 Industrie-Elektroniker, 6 Energiegeräte-Elektroniker, 2 Schreiner, 1 Technische Zeichnerin und 3 Bürokaufleute.

7. Das Durchschnittsalter der wissenschaftlichen Mitarbeiter auf Planstellen betrug 1988 48,0 Jahre (Vorjahr 48,1 Jahre). Bezieht man die außerhalb des Stellenplans mit 3-Jahres-Verträgen angestellten Nachwuchs-Wissenschaftler mit ein, so ergibt sich ein Durchschnittsalter von 46,3 Jahren (1987 46,2 Jahre).

8. Durch Tarifverträge wurden die Löhne und Gehälter zum 1.1.1987 um 3,4 Prozent und ab 1.3.1988 um weitere 2,4 Prozent angehoben.

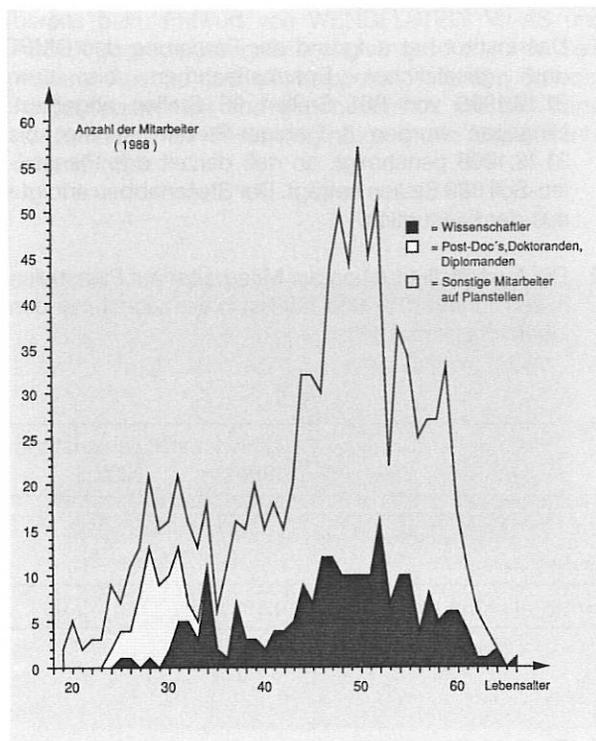


Abbildung 1: Altersstruktur der Mitarbeiter des Instituts

Beschaffungsabteilung

Leiter: Dr. jur. Heinz-Georg Sundermann
(bis 31. Dezember 1988)
Dr. jur. Christoph Halfmann (ab 1. Januar 1989)

Die Beschaffungsabteilung hat im Berichtszeitraum 1557 Aufträge erteilt (1987: 8363, 1988: 7194). Der einzelne Auftragswert lag bei 231 über 50000 DM (1987: 108, 1988: 123) und bei 1556 Aufträgen zwischen 5000 und 50000 DM (1987: 885, 1988: 671).

Die Verteilung der Aufträge nach Art und Umfang entsprach weitgehend dem Vorjahr. Nachdem die Großaufträge für WENDELSTEIN VII-AS abgeschlossen waren, lag das Schwergewicht der Bestellungen im Berichtszeitraum in der Beschaffung der Großkomponenten für ASDEX Upgrade.

Finanzabteilung

Leiter: Dr. Ing. Karl Tichmann (bis 31. Dezember 1988)
Dr. jur. Heinz-Georg Sundermann
(ab 1. Januar 1989)

Im Jahre 1988 stand ein Haushaltsvolumen von 161,7 MDM zur Verfügung. Die Ausgaben setzten sich verglichen mit den Vorjahren wie folgt zusammen:

	Ist 1986 MDM	Ist 1987 MDM	Ist 1988*) MDM
Personalausgaben	61,5	64,1	66,5
Sachausgaben	29,7	34,1	34,0
Beteiligung am JET-Projekt	5,0	5,2	5,6
Durchlaufende Mittel für fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	1,7	1,3	1,3
Betriebsausgaben	97,9	104,7	107,4
Laufende Investitionen	8,4	12,8	
Investitionen nach Ausbauprogramm	58,9	43,4	54,3
Investitionsausgaben	67,3	56,2	54,3
Gesamtausgaben	165,2	160,9	161,7

Die Finanzierung wurde wie folgt vorgenommen:

Eigene Erträge	26,8	22,4	20,6
EURATOM-Zuschüsse für IPP	41,0	43,4	40,0
Fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	1,7	1,3	1,3
Zuschuß Bund	86,1	84,4	89,8
Zuschuß Bayern	9,6	9,4	10,0
	165,2	160,9	161,7

*) 1988 vorläufiges IST-Ergebnis

Rechts- und Patentabteilung

Leiter: Dr. jur. Eric H. Hirsch (bis 31. Oktober 1988)
Dr. jur. Thomas Köstlin (ab 1. November 1989)

Die Arbeitsschwerpunkte der Rechts- und Patentabteilung lagen in der Betreuung der Gremien und Organe des Instituts sowie in der Gestaltung von Verträgen. Hervorzuheben sind hierbei Kooperationsverträge mit deutschen und europäischen Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie die Implementing Agreements für ASDEX Upgrade und die Stellaratoren, die im Rahmen der Internationalen Energie-Agentur (IEA) zwischen EURATOM und dem Department of Energy/USA geschlossen wurden; ferner Personal Assignment Agreements mit den am ITER-Projekt beteiligten Nationen.

Des Weiteren wurden die gewerblichen Schutzrechte des IPP verwaltet und auf ihre Verwertbarkeit untersucht. In den Jahren 1987 und 1988 wurden insgesamt 191 (1987) bzw. 185 (1988) Schutzrechte und Schutzrechtsanmel-

dungen betreut. In dieser Zahl sind 16 (1987) bzw. 15 (1988) europäische Patente und Patentanmeldungen enthalten, die in insgesamt 198 (1987) bzw. 99 (1988) 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 1988 bestanden 13 Lizenzverträge über Schutzrechte und technisches Know-how des IPP.

Bauabteilung

Leiter: Bauingenieur Martin Mahl

Die Energiezentrale 4 und die Versorgungskanäle für die Kabelverbindungen nach der Gleichrichterzentrale L5E sind fertiggestellt. Außerdem wurde eine Halle zum Test und zur Vormontage von Komponenten für die IPP-Experimente geplant, gebaut und abgerechnet.

Für ITER wurde ein Gebäude mit 40 Arbeitsplätzen für Wissenschaftler und mit Seminarräumen geplant, gebaut und abgerechnet. Für NET wurde zur vorläufigen Unterbringung von Wissenschaftlern eine Baracke mit 10 Arbeitsräumen aufgestellt; außerdem wurde ein Neubau mit 40 Arbeitsplätzen geplant und bis Ende 1988 der Rohbau errichtet.

In Garching wurde der zweite Bauteil des Wohnheimes mit 16 Wohnungen und einem Internationalen Begeg-

nungszentrum fertiggestellt sowie für das ITER-Personal ein Gästehaus mit 20 Wohnungen geplant und bis Ende 1988 im Rohbau fertiggestellt. Bezugsfertig ist der Neubau im April 1989.

Sozialabteilung

Leiter: Berthold Appel

Im Jahr 1988 wurden vom Institut 11 Eigenheime (1987: 3) durch Familienheimdarlehen gefördert. Da am 31.8.88 die Belegungsrechte des Instituts für 26 Wohnungen abgelaufen sind, schrumpft der Wohnungsbestand auf 270 Werkwohnungen, die dem Belegungsrecht des Instituts unterliegen.

Im Rahmen einer gemeinsamen Fahrbereitschaft wird vom Institut für die auf dem Forschungsgelände ansässigen Einrichtungen ein Buszubringerdienst organisiert. Für die Benutzung der Busse wird ein Fahrpreis erhoben, der an dem vergleichbaren öffentlichen Entgelt des Münchener Verkehrsverbundes ausgerichtet ist. Die Fahrbereitschaft des Instituts verfügt über 13 Fahrzeuge. Es wurden 1988 223873 Kilometer (1987: 208258 Kilometer) gefahren.

Von der Kantine wurden 165820 Essensportionen ausgegeben (Vorjahr: 160846).

Geschäftsführung und Wissenschaftlich-Technisches Büro

Organisation

Leitung: Dipl.-Ökonom Wolfgang Weidinger

Die Organisation der Datenverarbeitung stand im Berichtszeitraum im wesentlichen unter dem Zeichen der Neuorientierung. Aufgrund einer gutachtlichen Stellungnahme wurde 1987 mit der Suche nach geeigneter Standardsoftware für die Verwaltung begonnen, da die Reorganisation der Datenverarbeitung mit eigenen Kräften zu lange dauern würde.

Im Bestellwesen wurde in 1988 ein Informationssystem installiert, das den Anforderern Auskunft über den Bearbeitungsstand einer Bestellung gibt sowie eine Überwachung der durch Bestellanforderung gebundenen Mittel ermöglicht, die noch nicht in Bestellobligo oder Buchhaltung aufgenommen sind.

Auf dem Gebiet der allgemeinen Organisation wurde schwerpunktmäßig der Einsatz der Fahrbereitschaft neu geregelt sowie eine Zeichnungs- und Entscheidungsregelung für das IPP erarbeitet.

Revision

Leitung: Dr. jur. Georg Frischmann

Neben den routinemäßigen Prüfungen der Kassen und Verwendungsnachweise der vom IPP geförderten Hochschulprojekte stellte die Innenrevision verschiedene Ordnungsmäßigkeits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an. Hervorzuheben sind die Dienstreisen-Analyse, die Prüfungen des Wohnungswesens, der Fahrbereitschaft und der Personaleingruppierung, die sämtlich ohne schwerwiegende Beanstandungen blieben.

Betriebsärztlicher Dienst

Leitung: Dr. med. Peter Münchhoff

Seit 1. April 1986 wird der Betriebsärztliche Dienst für das IPP getragen vom Berufsgenossenschaftlichen Arbeitsmedizinischen Dienst (BAD) und der Unfallstation des IPP. Beide Einrichtungen arbeiten für die Belange des IPP aufs engste zusammen, so daß die getrennt genannten Zahlen gemeinsam betrachtet werden müssen.

Im Berichtszeitraum 1987/88 suchten den BAD wegen Notfällen oder akuten Erkrankungen 551 Personen auf,

für persönliche Beratung 227, anlässlich arbeitsschutzrechtlich vorgeschriebener Untersuchungen 321. Hiermit verbunden waren 2568 Labor-Einzelleistungen. Ferner nahm der BAD in diesen zwei Jahren teil an 91 Betriebsbegehungen und 64 Sitzungen unterschiedlichster Art.

Die Unfallstation wurde in dieser Zeit insgesamt 7706mal aufgesucht. Anlaß hierfür waren unter anderem 175 Betriebsunfälle sowie 1000 physikalische Behandlungen.

Wissenschaftlich- Technisches Büro

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

Sicherheit

Leiter: Dr.-Ing. Manfred Hüls

1988 erhöhte sich die Gesamtunfallzahl von 79 im Jahr 1987 auf 95. Darin enthalten sind 17 meldepflichtige Unfälle (Vorjahr: 13). Diese Zahl enthält 10 meldepflichtige Arbeitsunfälle. Für das Jahr 1988 ergibt sich daraus eine Gesamtunfallquote von 8,8 Prozent und eine Quote meldepflichtiger Wege- und Betriebsunfälle von zusammen 1,6 Prozent. Der durch die meldepflichtigen Unfälle bedingte Arbeitszeitverlust erhöhte sich gegenüber dem Vorjahr insbesondere auch wegen der durch Wegeunfälle außerhalb des Instituts bedingten Ausfälle (211 Tage) im Jahr 1988 auf insgesamt 435 Fehltage. Damit ergibt sich über alle meldepflichtigen Unfälle gemittelt ein spezifischer Arbeitszeitverlust von 26 Arbeitsausfalltagen je Unfall.

Aufgrund gesetzlicher Vorschriften und behördlicher Auflagen sind verschiedene Experimente, Plasmaanlagen und Beschleuniger im IPP auf die Produktion radioaktiver Strahlung und Röntgenbremsstrahlung sowie 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 Jahr 1988 wurden von der Tritiumaktivität, die dem Institut für Lagerung und Umgang im Tritiumlabor genehmigt ist, insgesamt $2,2 \cdot 10^9$ Bequerel Tritium mit $3,6 \cdot 10^7$ Kubikmetern Luft emittiert, was 61 Bequerel pro Kubikmeter oder weniger als 17 Prozent des im Mittel Zulässigen entspricht. Auch der Mittelwert der mit dem Abwasser abgegebenen Tritiumkonzentration lag weit unterhalb der erlaubten Abgabe.

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.

Öffentlichkeitsarbeit

Leiter: 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 durch Betreuung von Presse-, Rundfunk- und Fernsehjournalisten, Pressemitteilungen und Besucherbetreuung. 1988 haben etwa 2000 Personen – sowohl Einzelbesucher als auch Gruppen – das IPP besucht. Unter den Gästen aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, die sich über die Institutsarbeit unterrichteten, waren die Mitglieder des Deutschen Bundestages B. Kalb, N. Eimer sowie W.-M. Catenhusen, der Vorsitzende des Bundestagsausschusses für Forschung und Technologie. Im Institut informierten sich außerdem eine Delegation der Grünen aus dem Bayerischen Landtag, eine Abordnung des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, W. Oran und F. Tathwell vom House Committee for Science, Space and Technology des Amerikanischen Kongresses, der Wissenschaftsattaché der britischen Botschaft in Bonn, D. Duxbury, der Wissenschaftsreferent der Deutschen Botschaft in London, D. Greineder, sowie Delegationen aus Belgien, Bulgarien, China, Dänemark, Frankreich, Japan, Kanada, Kuba, Österreich, der Schweiz, der Sowjetunion und Spanien.

Am 22. Oktober 1988 veranstaltete das IPP zusammen mit den Nachbar-Instituten auf dem Garching Forschungsgelände einen »Tag der Offenen Tür«. In das IPP kamen etwa 4500 Besucher, die in den Experimentier- und Werkhallen, durch regelmäßige Filmvorführungen und einen Informationsstand mit den Arbeiten des Instituts bekanntgemacht wurden. Eine Posterausstellung informierte über die europäischen Experimente JET und NET sowie über das internationale Projekt ITER und über die zu erwartenden Umwelt- und Sicherheitseigenschaften eines Fusionsreaktors.

Wie in den vergangenen Jahren war das IPP 1988 auf der Hannover-Messe am Stand der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen vertreten. Das IPP stellte

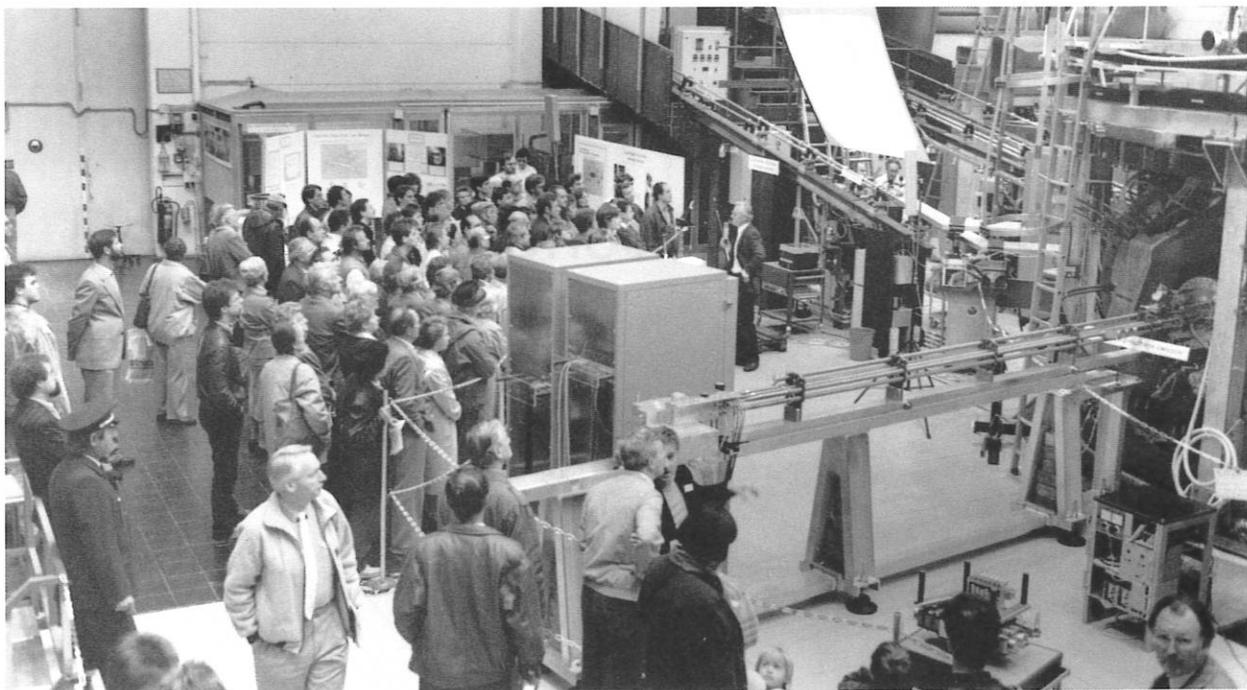


Abbildung 1: »Tag der Offenen Tür« 1988 im Institut für Plasmaphysik.

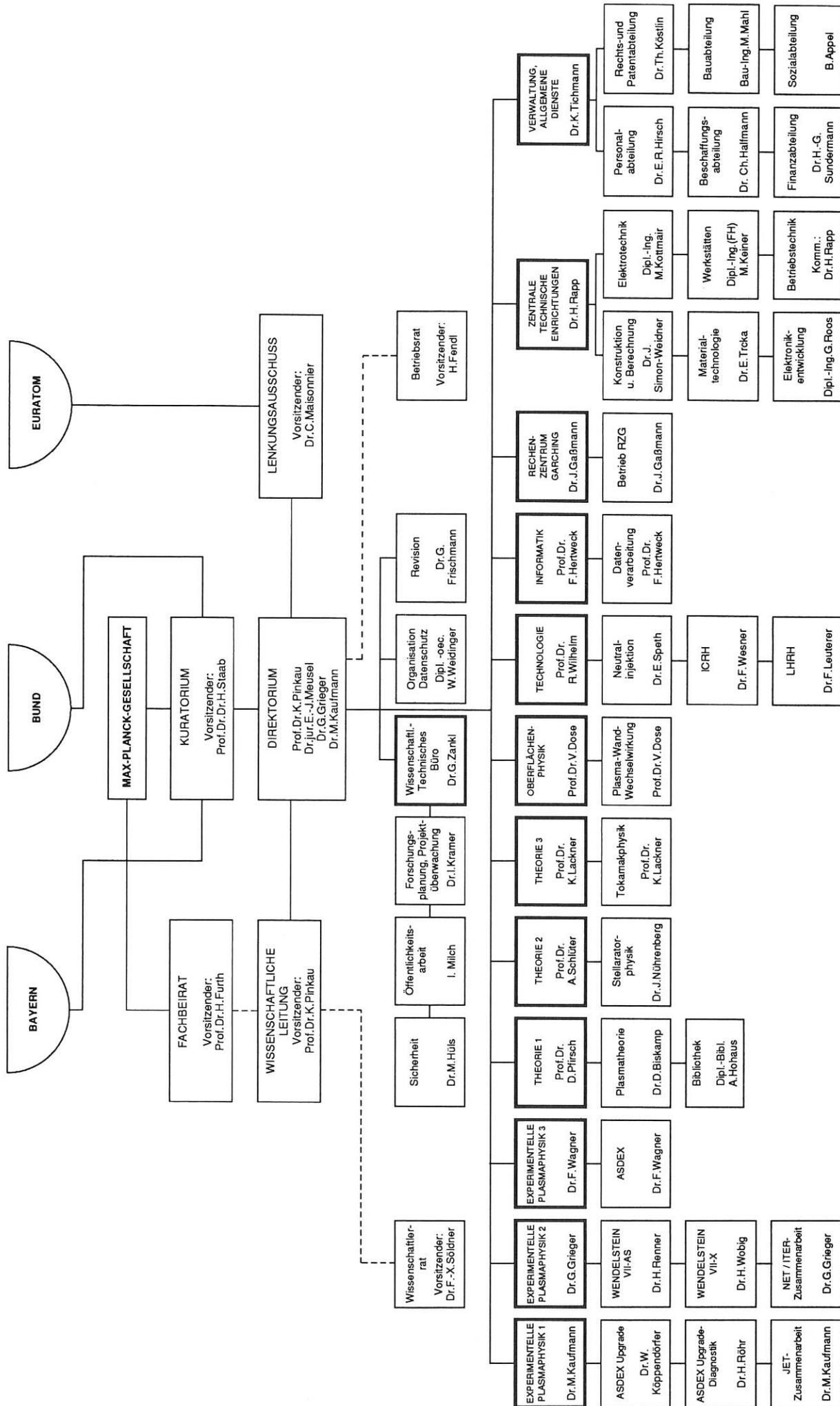
das Fusionsexperiment WENDELSTEIN VII-AS vor, eine Apparatur zur plasmachemischen Silberreinigung sowie die Exponate Massenspektrometer und Metallionenquelle.

In der Ausstellung »Großforschung – Partner der Hochschulen«, die im Bonner Wissenschaftszentrum und anschließend in der Ludwig-Maximilians-Universität in München gezeigt wurde, demonstrierte das IPP mit einem Modell von WENDELSTEIN VII-AS die Zusammenarbeit mit dem Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart auf dem Gebiet der Mikrowellenheizung.

In Karlsruhe wurde im Frühjahr 1988 die Ausstellung »100 Jahre Radiowellen« anlässlich des experimentellen Nachweises der elektromagnetischen Wellen durch den Physiker Heinrich Hertz veranstaltet. Das IPP beteiligte sich mit dem Modell der Anlage WENDELSTEIN VII-AS, an der Radiowellenheizungen zum Einsatz kommen.

Zum Informationsaustausch der Institutsmitglieder untereinander wurden die wissenschaftlichen »Monatlichen Mitteilungen« und die Hauszeitschrift »Impulse« herausgegeben. Eine interne Presse-Information wurde regelmäßig zur Verfügung gestellt.

Der organisatorische Aufbau des IPP



Organigramm des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (Stand: 1. 3. 1989)

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

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

Finanzierungsträger des Instituts sind:

- die Bundesrepublik, die 1988 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 daraus sich ergebenden Folgen für den Haushaltsplan. Nach Abschluß der Haushaltsverhandlungen mit den Finanzierungsträgern stellt das Kuratorium den Haushaltsplan fest und tritt insoweit an die Stelle des Senats der Max-Planck-Gesellschaft.

Mitglieder des Kuratoriums waren im Jahre 1988:

Professor Dr. Dr. Heinz Staab, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (Vorsitzender);
Generaldirektor a.D. Dr. Alexander Hocker (Ehrenkurator);
Ministerialdirektor Dr. Walter Borst, vom Bundesministerium für Forschung und Technologie entsandter Vertreter;
Ministerialdirektor Herbert Kießling, Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, vom Freistaat Bayern entsandter Vertreter;
Dr.-Ing. E.h. Eberhard von Kuenheim, Vorsitzender des Vorstands der Bayerischen Motoren-Werke AG;
Ministerialdirektor Dr. Günter Lehr, vom Bundesministerium für Forschung und Technologie entsandter Vertreter (bis 25.5.1988);
N.N., vom Bundesminister der Finanzen entsandter Vertreter;
Dipl.-Volksw. Wolfgang Oehme, Vorstandsvorsitzender der Esso AG;
Prof. Dr. Wolfgang Wild, Bayerischer Staatsminister für Wissenschaft und Kunst.

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 1988:

Prof. Dr. Harold P. Furth (Vorsitzender), Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, USA;
Prof. Dr. Bo Lehnert (stellvertretender Vorsitzender), 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, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart;
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, Generaldirektor der European Space Agency (ESA), Paris;
Prof. Dr. Hans Schlüter, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik, Bochum;
Prof. Dr. Gerd Wolf, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich.

Die **Wissenschaftliche Leitung** des IPP, die aus den ständig im Institut tätigen Wissenschaftlichen Mitgliedern mit Leitungsfunktion besteht, stellt das Forschungsprogramm auf und beschließt den Zeit-, Personal- und Finanzrahmen der durchzuführenden Forschungsaufgaben, die Organisationsstruktur des wissenschaftlichen Bereiches, die Beauftragung von Wissenschaftlern mit Leitungsaufgaben und im Zusammenwirken mit dem Direktorium die Anstellung, Eingruppierung und Entlassung des wissenschaftlichen Personals. Ihr gehörten 1988 an:

Prof. Dr. Klaus Pinkau, Vorsitzender und Wissenschaftlicher Direktor;
Prof. Dr. Arnulf Schlüter, stellvertretender Vorsitzender;
Prof. Dr. Volker Dose;
Dr. Günter Grieger;
Prof. Dr. Friedrich Hertweck;
Dr. Michael Kaufmann;
Prof. Dr. Karl Lackner;
Prof. Dr. Dieter Pfirsch;
Dr. Friedrich Wagner;
Prof. Dr. Rolf Wilhelm.

Ferner:

Prof. Dr. Ewald Fünfer, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied;
Dr. Gerhard von Gierke, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied;
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied;

Prof. Dr. James McCune, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied;
Prof. Dr. Rudolf Wienecke, 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 1988 folgende Mitglieder an:

für den wissenschaftlich-technischen Geschäftsbereich:

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

für den kaufmännisch-administrativen Geschäftsbereich:

Dr. jur. Ernst-Joachim Meusel.

Der nach dem Assoziationsvertrag mit EURATOM gebildete **Lenkungsausschuß**, dem Vertreter der Kommission und des IPP angehören, legt das gemeinsame Programm fest, leitet dessen Durchführung, überwacht die Arbeiten, beschließt über Aufbau und Zusammensetzung der Forschungsgruppe und entscheidet über Einzelausgaben ab 100000,- ECU.

Der **Lenkungsausschuß** setzte sich 1988 wie folgt zusammen:

seitens der Kommission der Europäischen Gemeinschaften in Brüssel:

Dr. Charles Maisonnier (Vorsitz),
Dr. Umberto Finzi,
Karl Melchinger;

seitens des Instituts:

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

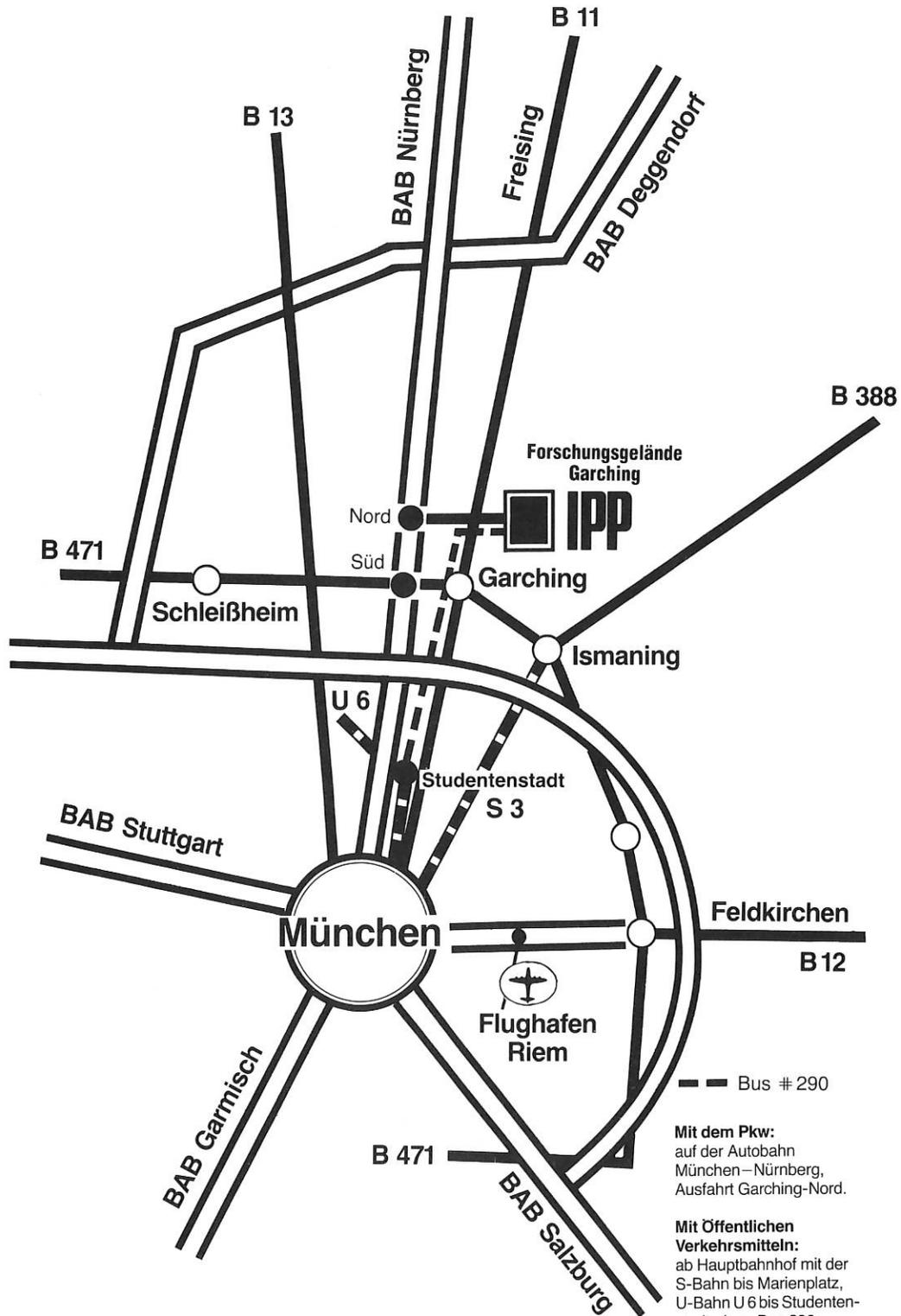
Der aus gewählten Vertretern der wissenschaftlichen Mitarbeiter bestehende **Wissenschaftlerrat** berät die Wissenschaftliche Leitung in allen Angelegenheiten ihres Entscheidungsbereiches, insbesondere in Fragen des wissenschaftlichen Programms, bei Struktur- und Personalfragen. Der Wissenschaftlerrat setzte sich 1988 wie folgt zusammen:

Dr. Franz-Xaver Söldner (Vorsitzender),
Dr. Bernhard Scherzer (stellvertretender Vorsitzender),
Dr. Volker Erckmann,
Dr. Kai Grassie,
Dr. Irmtraud Kramer,
Dr. Rita Meyer-Spasche,
Dr. Franz-Peter Penningsfeld,
Dr. Ingeborg Weidl,
Helmut Welter.

Dem **Betriebsrat** gehörten 1988 folgende Mitglieder an:

Heinz Fendl (Vorsitzender; freigestellt),
Fritz Lehnert (stellvertretender Vorsitzender; freigestellt),
Anton Albrecht (freigestellt),
Dieter Eichner,
Helmut Gillhuber,
Roswitha Hiebl,
Richard Hüttinger,
Michael Karpfinger,
Richard Hirth,
Dr. Werner Ott,
Ursula Rang,
Dr. Gerhard Venus,
Uwe Weber,
Barbara Wörle.

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



JAHRESBERICHT 1987/88

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) · 8046 Garching bei München
Telefon (089) 3299-1, Telex 05215 808, Telefax (089) 3299-9200

Redaktion und Gestaltung:
Isabella Milch

Gesamtherstellung: Kastner & Callwey, München

1989 Copyright by IPP Garching

Printed in Germany

ISSN 0172-8482

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

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