Die kontrollierte thermonukleare Fusion: aus der Warte der Forschung

Autor(en): **Paris, Pierre Jean**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **106 (1988)**

Heft 50

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85863

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

kann es nicht im Interesse unserer Volkswirtschaft liegen, neben praktisch allen anderen Energieträgern (Treibstoffe, Brennstoffe, Gas) auch noch in grossem Massstab elektrische Energie zu importieren. Hinzu kommt, dass sich die Partner des europäischen Stromverbundes verpflichtet haben, ihr Land primär aus eigener Kraft mit elektrischer Energie zu versorgen. Ständige Netto-Importe oder -Exporte verschieben nicht bloss die wirtschaftspolitischen Gleichgewichte innerhalb der Verbundländer, sondern sie können unter extremen energiewirtschaftlichen oder politischen Bedingungen auch die Versorgungssicherheit der Mitgliedländer – also auch diejenige der Schweiz – beeinträchtigen. So gesehen dürfen diese Stromimporte nicht zu einer tragenden Säule der Elektrizitätsversorgung werden.

Stromsparen ohne Illusionen

Wie so oft in der Politik, sind es weniger die Ziele, über die man sich streitet als vielmehr die Wege, die zu diesen Zielen führen. Für das Postulat «Stromsparen» heisst dies konkret, dass die schweizerische Elektrizitätswirtschaft einen unbürokratischen Weg befürwortet, welcher der Eigenverantwortlichkeit von Wirtschaft und privaten Haushalten genügend Raum lässt für individuelle Lösungen. Die von Bundesrat Adolf Ogi eingleitete Kampagne unter dem Titel «Bravo» geht ebenfalls in diese Richtung, wobei wir annehmen, dass «Bravo» auch auf die anderen Energieträger ausgedehnt wird. Übrigens hat der VSE in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Konsumentenbund ähnliche Wege beschritten: So empfehlen wir unseren Mitgliedwerken, die Stromrechnungen derart zu gestalten, dass eine einfache Verbrauchskontrolle durch die Abonnenten möglich ist.

Ehrlicherweise muss aber auch vor der Illusion gewarnt werden, man könne den Stromzuwachs mit geeigneten, d.h. für die Wirtschaft und unsere Demokratie tragbaren, Massnahmen auf Null oder gar zu einer Bedarfsabnahme bringen. Der Grund dafür liegt nicht im schlechten Willen der Stromproduzenten oder der Stromkonsumenten, sondern er liegt in unserer Lebensform in einer hochtechnisierten und arbeitsteiligen Volkswirtschaft. Es ist auch nicht plausibel, dass ein Land mit einer «unter Dampf» stehenden Wirtschaft – nicht zuletzt auch im Bausektor – und mit einer weltweit beispiellosen Vollbeschäftigung und Preisstabilität ausgerechnet im Bereich der umweltfreundlichen Elektrizität um Milliarden von Kilowattstunden zurückgebunden werden soll.

Für die zukünftige Elektrizitätspolitik ist es entscheidend wichtig, dass die Postulate «sichere Versorgung» und «Sparen» nicht gegeneinander ausgespielt werden. Vielmehr geht es darum, beide Ziele gleichzeitig zu verfolgen. Dabei kommt gerade den Ingenieuren und Architekten eine wichtige Rolle zu, denn es sind speziell diese Berufsgruppen, die in der Herstellung und im Betrieb von Anlagen, Geräten und Gebäudeinstallationen engagiert sind.

Max Breu, dipl. Ing. ETH
Direktor des Verbandes
Schweizerischer
Elektrizitätswerke (VSE)

Die kontrollierte thermonukleare Fusion

Aus der Warte der Forschung

Im Laufe der letzten 5 Jahre wurden drei grosse Forschungsexperimente vom Typ Tokamak in Betrieb genommen: in Europa JET, in den USA TFTR und in Japan JT-60. Nach einer Anlaufsperiode, in der die Kinderkrankheiten ausgemerzt wurden, haben diese Experimente die in sie gesteckten Erwartungen voll erfüllt. Die erreichten Ziele sind vielversprechend, selbst wenn viele der aufgetauchten Probleme noch der Lösungen harren. Die Dichte, die Temperaturen und die Einschlusszeiten, dies die wesentlichen Grössen des eingeschlossenen Plasmas, wurden wesentlich verbessert.
Der Autor verweist die Leser auf die Ausgaben 6/83 und 7/83 des «Ingénieurs et architectes suisses», in denen eine Einführung in das Gebiet der kontrollierten thermonuklearen Fusion und eine Beschreibung des Experimentes JET erschienen ist.

VON PIERRE JEAN PARIS, LAUSANNE

Momente grösster Erfolge und Hoffnungen, aber auch Perioden voll von Zweifeln zeichnen die Geschichte der kontrollierten thermonuklearen Fusion. Die angetroffenen Probleme sind sehr komplex, und um sie zu lösen, braucht es Jahre, oft verbunden mit der zeitraubenden Konstruktion neuer Experimente. Wurden Probleme gelöst, tauchten vielfach oft neue Hindernisse auf. Der Aggregatszustand, in dem man die thermonukleare Fusion im Labor zu erreichen versucht, ist trotz vieler Anstrengungen noch viel zu wenig bekannt. Dieser Aggregatszustand, bei dem die Atome, die Bestandteile der Materie, sich in ihre Bestandteile Ionen und Elektronen aufteilen, heisst Plasma.

Im Laboratorium soll versucht werden, diejenigen physikalischen Prozesse nachzuvollziehen, die in den Sternen ablaufen. Am Ende dieses Jahrzehntes oder Anfang des nächsten Jahrzehntes sollten wir die Bedingungen für die Verschmelzung der leichten Atome (siehe Anhang I) auf eine energetisch durchführbare Art und Weise, in hochkomplizierten Versuchsapparaturen, die man Tokamak nennt, erreichen. Die von einer grossen Anzahl von Fusionsreaktionen freiwerdende Energie soll, in einem ersten Schritt, diejenige Energie decken, die nötig ist, um die Reaktionen ablaufen zu lassen. Dies ist im Grossen und Ganzen der Inhalt des Lawson'schen Kriteriums (Anhang II).

Das «Zückerchen» ... eine Energieform ohne Brennstoffprobleme. Die als Brennstoff benutzten Isotope des Wasserstoffes sind auf unserem Planeten in ausreichender Qualität vorhanden. Im Falle des Gelingens dieses Unternehmens, und dies ist in der Tat nicht einfach, könnte man ohne Probleme die im Jahre 1986 weltweit verbrauchte Energie 100milliardenfach erzeugen. Blenden wir zurück. Es ist im Jahre

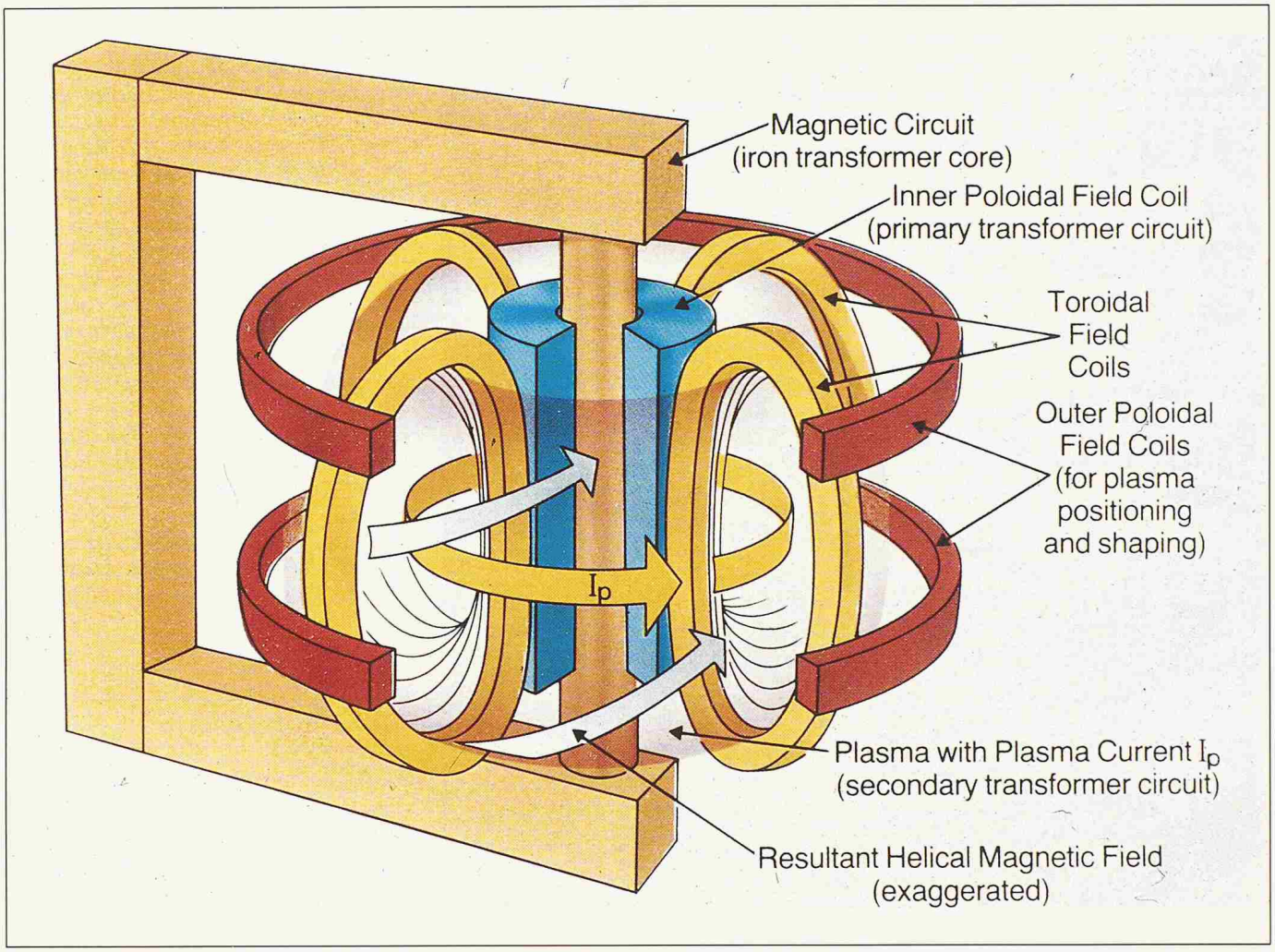

Bild 1. Schematische Darstellung eines Tokamaks I_p: Plasmastrom, B_T: Toroidales Magnetfeld, R: Grosser Radius, a: Kleiner Radius

1957, als der englische Physiker Lawson sein berühmtes Kriterium über den Energiehaushalt eines thermonuklearen Reaktors formuliert.

Rückblick: Ein wenig Geschichte

Am Anfang, zu Beginn der fünfziger Jahre, stehen die Bemühungen dreier Staaten, mit Hilfe von ziviler wie auch militärischer Forschung so schnell wie möglich Atomenergie aus der Verschmelzung der Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium zu gewinnen. Die Ergebnisse der militärischen Forschungen sind wohl bekannt: Die USA verwirklichten die Wasserstoffbombe im Jahre 1951, gefolgt von der Sowjetunion im Jahre 1953 und England im Jahre 1957. Die kontrollierte thermonukleare Fusion, der zivile Teil der Forschunganstrengungen, wird durch die aufgetretenen Schwierigkeiten, nach anfänglichem Enthusiasmus in der ersten Hälfte der fünfziger Jahre, als man glaubte, das gesteckte Ziel schnell zu erreichen, stark gedämpft.

M.A. Leontovich und L.A. Artsimovich vom Kurchatov Institut in Moskau starten im Jahre 1955 das «Tokamak»-Programm (Fig. 1). Der «TMP», eine Art Vorläufer der jetzigen Tokamaks wies schon – selbst für die heutigen Begriffe – beträchtliche Dimensionen auf ($R = 0{,}8$ m; $a = 0{,}13$ m und $B_T = 1{,}5$T). Im Vergleich zu vorhergehenden Experimenten konnte zum ersten Mal eine quasistationäre Entladung in einem starken Magnetfeld unterhalten werden. Die niedrige Plasmatemperatur von ungefähr 100 000 °C war bedingt durch eine hohe Verunreinigung des Plasmas, verursacht durch die Wände des Vakuumgefässes. In dieser Tatsache ist auch der Grund zu suchen, dass dieses Einschlussystem nicht schneller von den Wissenschaftern weiterverfolgt wurde.

Ausserordentliche Anstrengungen

Während der dritten internationalen Konferenz in Novosibirsk berichteten die Sowjetrussen über neue Resultate im Tokamakexperiment T-3 in Kurchatov. Sie berichteten, dass das Plasma länger als bisher eingeschlossen werden konnte. Im weiteren behaupteten sie, dass eine Elektronentemperatur von 10 000 000 °C und eine Ionentemperatur von 3 000 000 °C während mehrerer Millisekunden erreicht wurde. Die Zweideutigkeit der Messmethoden der Elektronentemperatur war der Grund für eine skeptische Haltung der anwesenden Wissenschafter. Daraufhin lud Artsimovich eine englische Forscherequipe aus Culhalm in die Sowjetunion ein. Die im folgenden Jahr von den Engländern durchgeführten Messungen mit einer auch heute noch anerkannten Technik zur Elektronentemperaturmessung, der sogenannte Thomson-Streuung, zeigten, dass die Temperaturen sogar höher waren, als die von den Russen publizierten Werte. Dieses internationale Zusammenarbeit zeigt sehr schön die Zusammenarbeit in der zivilen Forschung. Aber sie zeigt auch, dass hochmoderne Technologien Einzug in das komplizierte Gebiet der Plasmadiagnostik gehalten haben. Im weiteren kündigten diese Resultate den Untergang der bisherigen Kurzzeitexperimente an. In der Folge blieben auf dem Weg zur Fusion durch magnetischen Einschluss neben dem Tokamak noch die «Stelleratoren» und die durch ihre vor allem im Bereich der Plasmastabilität bekannten «Magnetischen

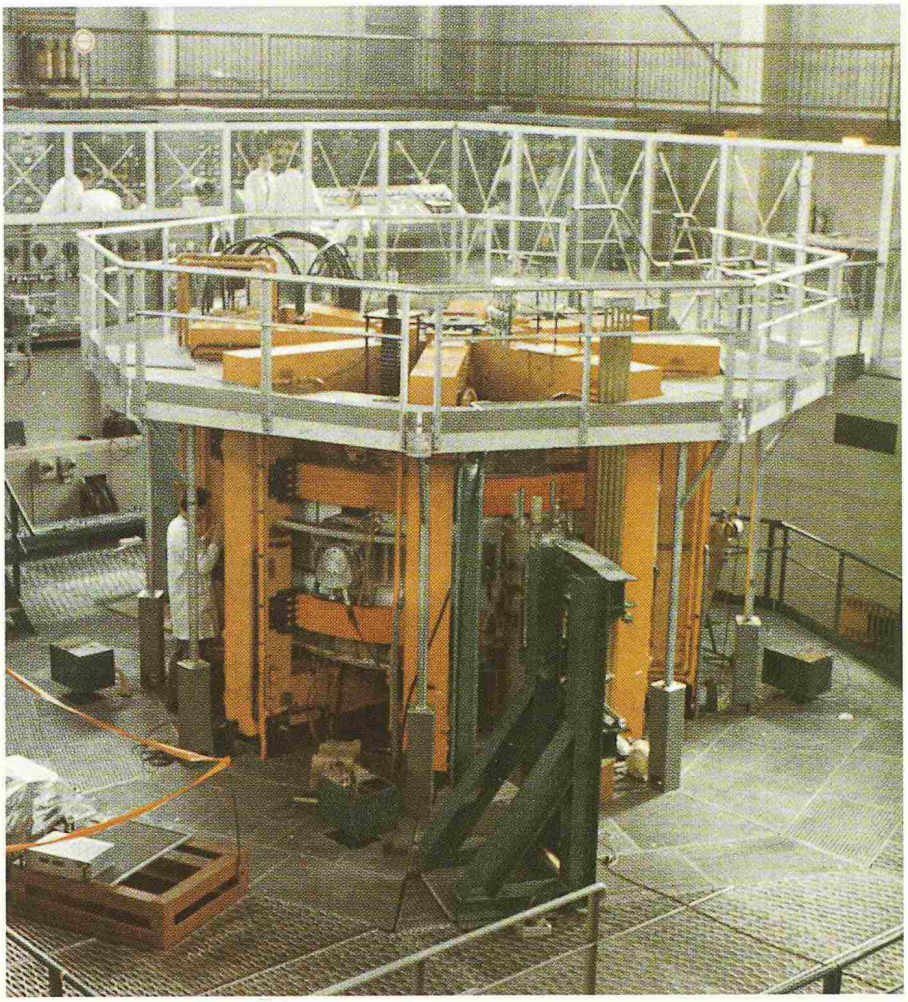

Bild 2. Der TFR (Tokamak Fontenay-aux-Roses) in Frankreich, ein wichtiger Schritt in der Geschichte der Tokamaks

Spiegelmaschinen». Es ist auch in diesem Jahre 1968, dass zum erstenmal Laser eingesetzt werden, um zu versuchen, thermonukleare Plasmen zu erzeugen.

Weiterentwicklung des Tokamak

Verschiedene Programme zum Bau neuer Tokamaks waren die Folge der Bestätigung der Resultate am T-3. In Princeton wurde der existierende Stellerator C in den Tokamak ST umgebaut und in Oak Ridge (USA) ORMAK, in Fontenay-aux-Roses (F) TFR (Fig. 2), in Culham (GB) CLEO, in Garching (D) Pulsator und JFTII am JAERI in Tokai Mura in Japan gebaut. Im Jahre 1958, nach der berühmten Konferenz in Genf, starteten auch die Japaner ein ausgedehntes Forschungsprogramm. Die bemerkenswerten Resultate der folgenden Jahre stellten bald die ersten Experimente am T-3 in den Schatten. Am neuen Tokamak T-4 in Kurchatov wurden 1971 während mehr als 10 Millisekunden Elektronentemperaturen von 20 000 000 °C und Ionentemperaturen von 600 000 °C erreicht. Ähnliche Resultate wurden auch am ST in Princeton registriert. Auf die Probleme der «idealen» Plasmastabiltät machte bald der «Dickwanst» unter den damaligen Takamaks, der ein kleines Aspektverhältnis (R/a) besitzende T-6 in Kurchatov, aufmerksam. In diesem Experiment wurden zum erstenmal die sogenannten Plasmaabrisse oder Disruptionen im Detail studiert. Der Plasmaabriss ist eine Instabilität des Plasmas, das sich sozusagen von seinem magnetischen Käfig befreit und dabei die Wände des Vakuumgefässes berührt. Diese Instabilität kann in der Folge zu schweren Beschädigungen des Vakuumgefässes führen. Eine systematische Untersuchung des Arbeitsbereiches des Tokamaks führte der englische Physiker J. Hugill in den Jahren 1976 bis 79 in Culham durch. Eine andere, von Murakami in Oak Ridge (1976) durchgeführte Studie ergab die berühmt gewordenen empirischen Regeln (scaling laws).

Es ist im Jahre 1974, dass neue Bemühungen in Gang gebracht wurden. Der Strom, der in einem Tokamak die Energie zur Heizung der Teilchen liefert, erwies sich als nicht mehr genügend wirksam, sobald eine bestimmte Temperatur erreicht wurde. Diese Tatsache lässt sich jedoch durch die Eigenschaften des Plasmas leicht erklären. Die Wirksamkeit durch den Joulschen Effekt nimmt mit zunehmender Temperatur ab, da das Plasma bei hohen Temperaturen ein extrem guter Leiter ist (20mal besser als Kupfer bei Raumtemperatur). Dies erklärt auch, warum im TFR nach Überschreiten einer bestimmten Temperatur diese nicht über 25 000 000 °C erhöht werden konnte, was auch später durch Experimente am ST bestätigt wurde. Zuerst jedoch glaubte man, dass eine «Vergiftung» des Plasmas durch Verunreinigungen aus der Gefässwand dafür verantworltich sei. Diese Verunreinigungen können, wenn sie ins Zentrum der Entladung gelangen, die Elektronen sehr stark abkühlen. In den folgenden Experimenten am ST, TFR und ORMAK konnten jedoch keine bedeutsamen Verunreinigungskonzentrationen im Plasmazentrum gefunden werden.

Die Zusatzheizungen

Neue Methoden mussten gesucht werden, um das Plasma auf die für die Fusionsreaktionen notwendigen Temperaturen von rund 100 000 000 °C aufzuheizen. Im wesentlichen werden bei der neuen Generation von Fusionsexperimenten drei verschiedene Typen von Zusatzheizungen mit unterschiedlichem Erfolg eingesetzt (Fig. 3).

- Die erste Methode ist der *Einschuss von sehr energiereichen Neutralteilchen* ins Plasma, die dieses über stattfindende Kollisionsprozesse aufheizen. Warum gerade Neutralteilchen? Die Teilchen müssen durch das starke Magnetfeld in das eingeschlossene Plasma geschossen werden. Geladene Teilchen würden jedoch durch das Magnetfeld so stark abgelenkt werden, dass sie nicht bis ins zu heizende Plasmazentrum vorstossen würden.
- Die zweite Methode benützt *elektromagnetische Wellen*. Verschiedene natürliche Resonanzen des Plasmas erlauben die Einkopplung von Energie ins Plasma. Die Energie der elektromagnetischen Wellen wird anschliessend durch die Teilchen absorbiert. Diese Tatsache lässt sich am besten mit dem Mikrowellenofen vergleichen, bei dem die Energie der ebenfalls elektromagnetischen Welle in den zu wärmenden Speisen absorbiert wird. Je nach der benützten Frequenz tragen die Methoden verschiedene Namen. Die laufenden Forschungen am Tokamak TCA am Centre de recherches en physique des Plasmas der EPEL (CRPP) untersuchen die Plasmaheizung mit Hilfe

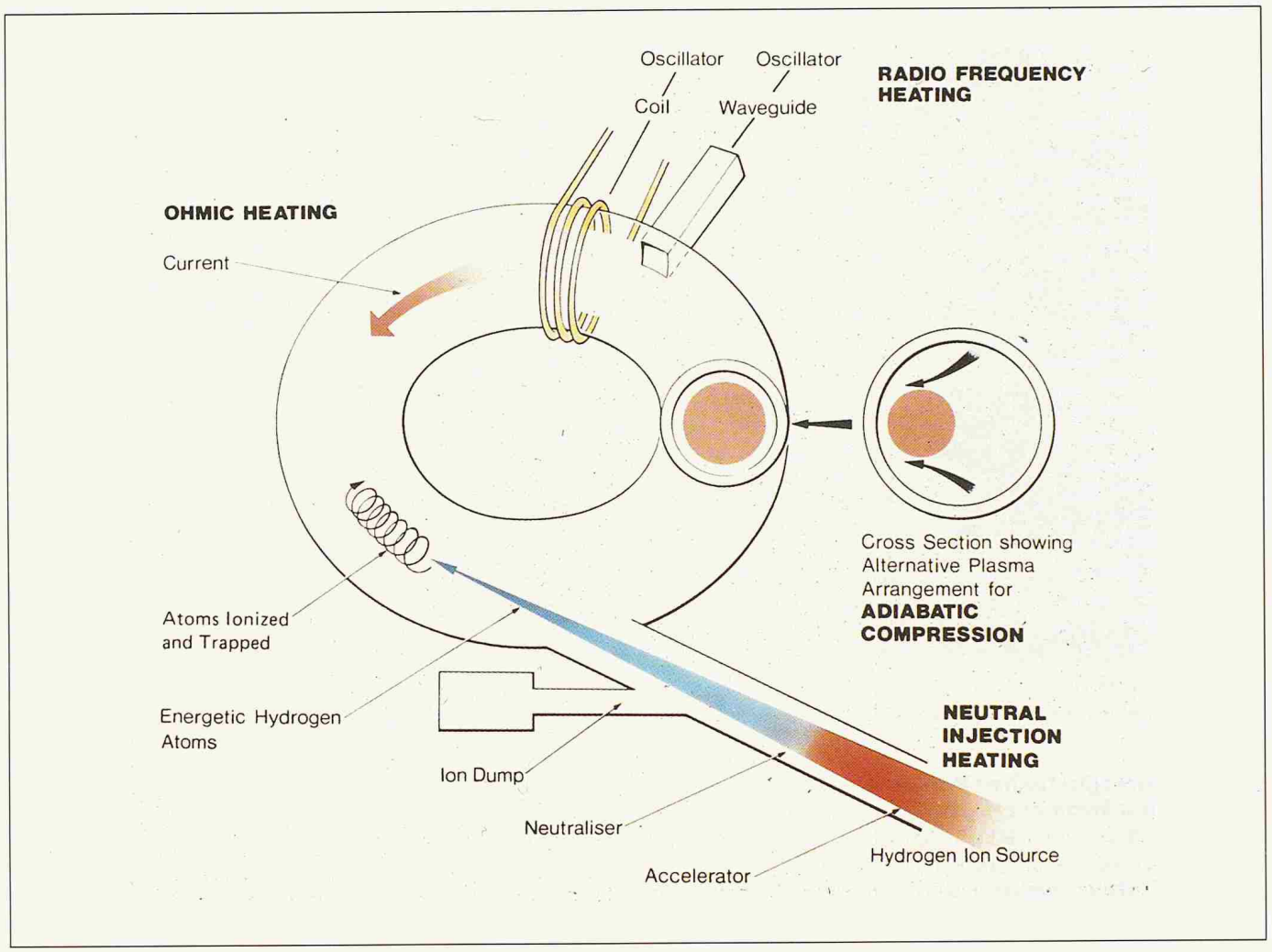

Bild 3. Schematische Darstellung der verschiedenen Heizmethoden

der Absorption der sogenannten Alfvenwellen. (Es hat sich gezeigt, dass diese Methode bezüglich Wirksamkeit durchaus mit den verschiedenen anderen benützten Hochfrequenzheizungen vergleichbar ist.)

- In der dritten Methode wird eine thermodynamische Eigenschaft ausgenützt: die *adiabatische Kompression*. Indem das Plasma auf ein kleineres Volumen komprimiert wird, erhöht sich seine Dichte aber auch seine Temperatur. In Analogie dazu die Velopumpe. Betätigt man eine verstopfte Velopumpe, so wird die eingeschlossene Luft komprimiert und erwärmt sich dabei. Mit dieser Art Zusatzheizung wurde im Jahre 1974 am ATC Tokamak in Princeton die Dichte von $10^{19} m^{-3}$ auf 10^{20} m^{-3} und die Temperatur der Ionen von 1 000 000 °C auf 6 000 000 °C erhöht. Diese Methode wurde im Westen aufgegeben, da bei dieser Art von Heizung zuviel kostbare magnetische Energie aufgebraucht wird. In der UdSSR wurde jedoch weiterhin an einem Programm festgehalten (TUMAN 2A). Nun zeichnet sich ein Wiederaufleben in den USA ab, wird doch diese Methode am TFTR als Zusatzheizung angewandt (Fig. 4).

Im Folgenden beschränken wir uns auf die zwei zuerst beschriebenen Methoden, sind es doch diese beiden Arten der Zusatzheizung, die den Fortschritt in den letzten 10 Jahren wesentlich geprägt haben.

Die Neutralteilchenheizung

Die Experimente mit Einschuss von Neutralteilchen starteten mit Versuchen am amerikanischen Tokamak ORMAK, gefolgt durch CLEO, TFR und ATC. Die Equipe von Oak Ridge erreichte eine Ionentemperaturerhöhung von 2 000 000 °C auf 6 000 000 °C (und dies mit einer Injektionsleistung von 400 kW). Einen Einfluss auf die Einschlusszeit konnte zu diesem Zeitpunkt wegen der damaligen kleinen Leistung noch nicht festgestellt werden.

Unglücklicherweise wurde später festgestellt, dass die Energieeinschlusszeit des Plasmas mit allen bekannten Zusatzheizmethoden verringert wird. Nichtsdestotrotz wurden mit dieser Zusatzheizung die höchsten Temperaturen in Tokamaks erreicht. Auch heutzutage ist die Entwicklung von Neutralteilcheninjektoren von grösster Aktualität. Zu Beginn der 70iger Jahre verfügte man über Neutralteilcheninjektoren mit einer Strahlenergie in der Grössenordnung von 10 keV, und dies während einer Zeitdauer von ungefähr 0,5s (maximale Leistung einige 100 kW). Zum jetzigen Zeitpunkt stehen Energien von über 150 keV während einer Zeitdauer von etwa 30 s und einer Leistung von 10 MW zur Verfügung. Damit der Neutralteilchenstrahl bis ins Zentrum des thermonuklearen Plasmas vordringen kann, sind Energien zwischen 100–200 keV notwendig. Unglücklicherweise nimmt aber der Wirkungsgrad der Injektoren, wenn von einem positiven Primärstrahl ausgegangen wird, bei diesen hohen Energien rasch (dies wegen der notwendigen Neutralisierung der Ionen) ab. Ein wesentlich besserer Wirkungsgrad könnte erreicht werden, würde ein Primärstrahl aus negativen Ionen benützt. Ein grosser Teil der Arbeiten auf diesem Gebiet wird in der Tat heute auf die Entwicklung solcher neuer, fortschrittlicher Injektoren benutzt.

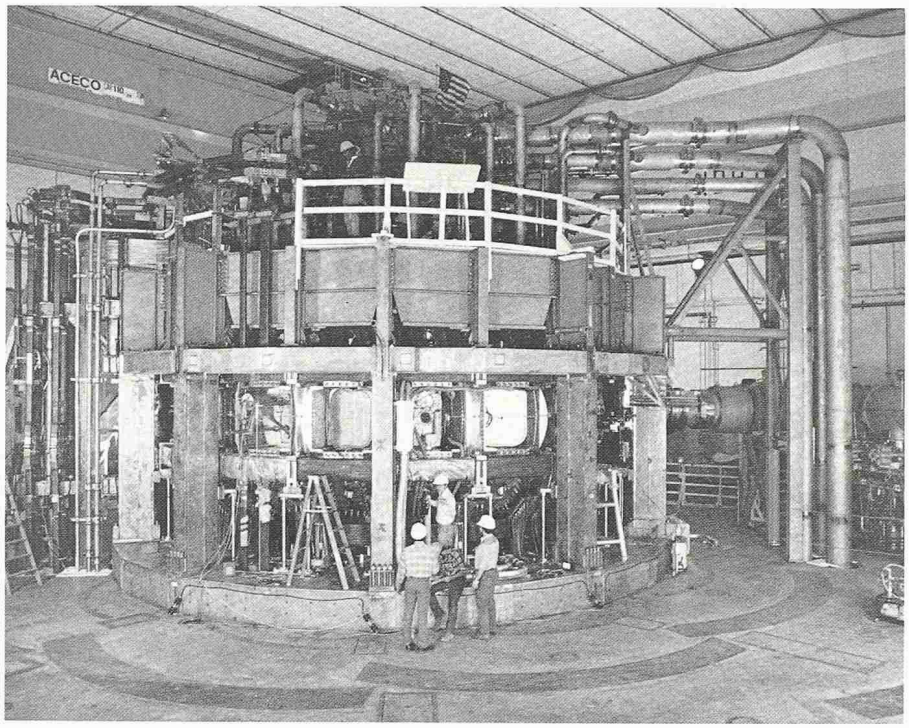

Bild 4. Der TFTR (Tokamak Fusions Test Reaktor) am Princeton Physics Laboratory in den USA. Einer der drei ganz grossen Tokamaks

Die elektromagnetischen Wellen: Heizung und Stromerzeugung

Die Anwendung von elektromagnetischen Wellen zur spezifischen Heizung von verschiedenen Teilchen wurde in den 60iger Jahren in Tokamaks, Stelleratoren und Spiegelmaschinen in Russland und den USA ausgiebig studiert. Trotzdem sind das Verständnis der stattfindenden Heizungsmechanismen und die Fortpflanzung der Wellen im Plasma auch heute noch ein sehr aktuelles Thema in der Fusionsforschung. Eine systematische, experimentelle Unterschung hat gezeigt, dass praktisch alle Plasmawellen (Ionenzyklotronwelle, Elektronenzyklotronwelle, obere hybride Welle, Alfvenwellen . . .) verwendet werden können, um die verschiedenen Teilchen im Plasma aufzuheizen. Ihre Anwendung ist jedoch fast immer mit einer Erhöhung der Verunreinigungen im Plasma verbunden. Im weiteren wurde ebenfalls immer eine Verschlechterung der Einschlusszeiten festgestellt.

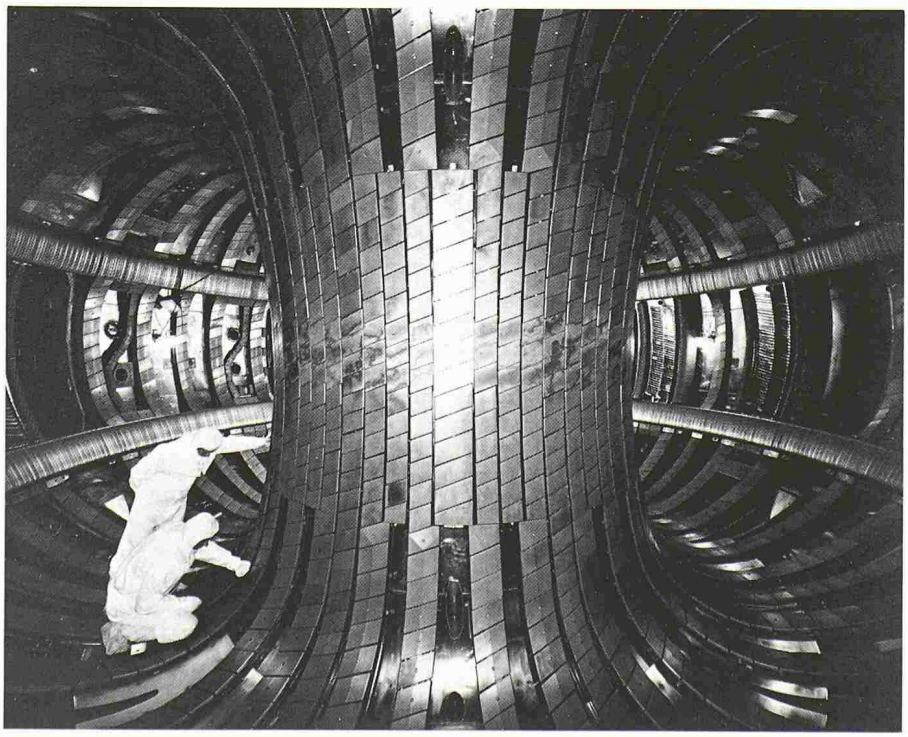

Bild 5. JET (Joint European Torus), der europäische Beitrag zur Fusionforschung, installiert in der Nähe von Oxford (England). Das Bild zeigt das Innere des Vakuumgefässes, das mit Grafit-Ziegel ausgekleidet ist. Im weiteren erkennt man die Gurtellimiter und drei Antennen für die Ionenzyklotronheizung

In den 70er und 80er Jahren wurde die Ionenzyklotronwelle im grossen Stil benutzt (TFR, ST, PLT, Alcator C, Uragan 3, T-10, JFT-2M), und die Resultate unterstützten deren Wahl als zukünftige Zusatzheizmethode in JET (Fig. 5) und JT-60 (Fig. 6).

Die obere hybride Welle, ursprünglich als Zusatzheizung für das Plasma angewandt, wird heutzutage auch zur nicht induktiven Stromerzeugung gebraucht. 1980 wurden am Versator am MIT (USA) die ersten Experimente dieses Typs durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche am Alcator C am MIT wurde mit 1 MW Leistung, bei einer Frequenz von 4.6 GHz, ein Plasmastrom von 230 kA getrieben. Im gleichen Jahr schon wurde mit der gleichen Methode im PLT (Fig. 7) in Princeton ein Strom von 450 kA erzeugt. Auch die gleichzeitigen Versuche an Petula in Grenoble verliefen ermutigend. Die Methode begann sich einzubürgern. Der jetzige Rekord: 1 MA, erzeugt mit 2 MW Leistung, erreicht im japanischen JT-60. Aber auch diese Art der Stromerzeugung hat seine Nachteile. Der Wirkungsgrad fällt mit zunehmender Elektronendichte ab, und oberhalb einer kritischen Elektronendichte kann damit kein Strom mehr getrieben werden. Heutzutage glaubt man, dass auch ein nicht - induktiver Strom mit Hilfe der Elektronenzyklotronwelle, also bei noch höheren Frequenzen (100 GHz), erhalten werden könnte. Ein klarer experimenteller Beweis ist jedoch bis zum jetztigen Zeitpunkt noch nicht erbracht worden. Die ausserordentlich gute Kopplung dieser Wellen ins Plasma erlaubte zudem im Tokamak T-10 nahezu eine Verdreifachung der Elektronentemperatur (von 1,4 keV auf 3,8 keV mit nur 0,9 MW). Auch scheint es so, als dass diese Art der Hochfrequenzheizung das Plasma weniger «stören» würde als die vorhergehenden. Im weiteren könnte diese Technik auch dazu verwendet werden, um das Profil der Elektronentemperatur zu kontrollieren, was nun wiederum die Stromverteilung und damit direkt die Stabilität des Plasmas beeinflussen würde. In Lausanne am CRPP-EPFL läuft gegenwärtig ein Projekt zur Entwicklung eines Gyrotrons mit einer Frequenz von 120 GHz und 200 kW Leistung (siehe Anhang IV). Dieses Projekt, ein Teil der europäischen Anstrengungen, Hochfrequenzröhren so

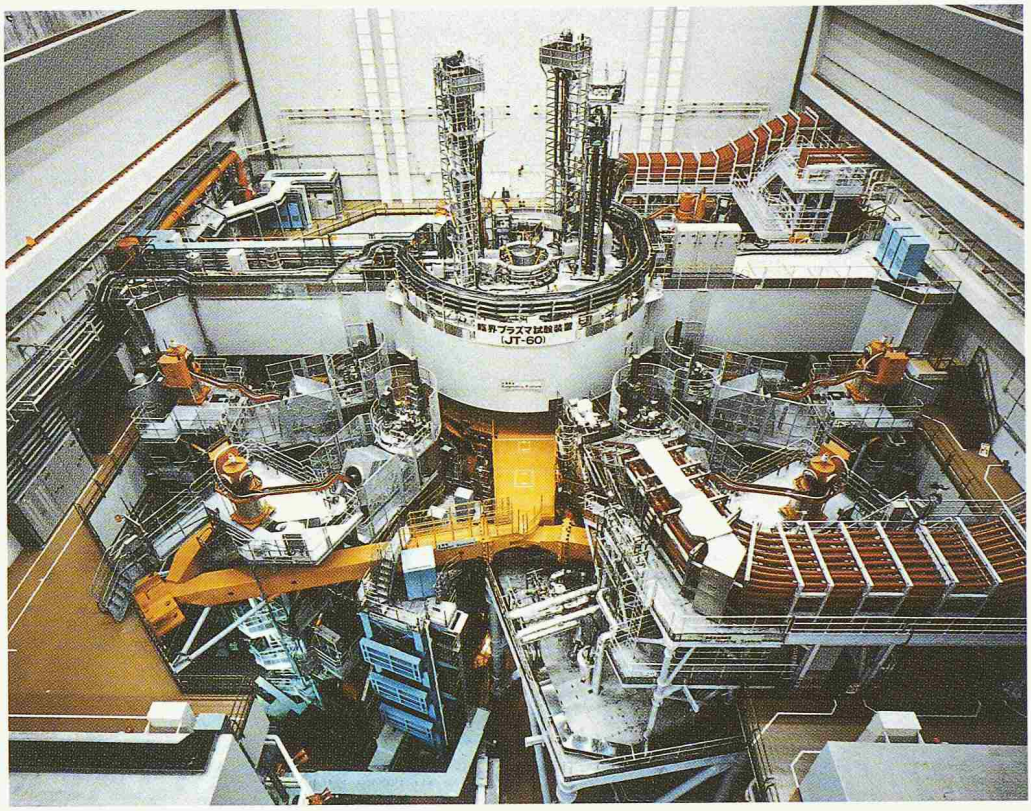

Bild 6. Der JT 60 (Japanese Tokamak), installiert in Tokai-Mura (Japan). Gesamtansicht. An diesem Experiment wurde die Verwendbarkeit der nicht induktiven Stromerzeugung gezeigt

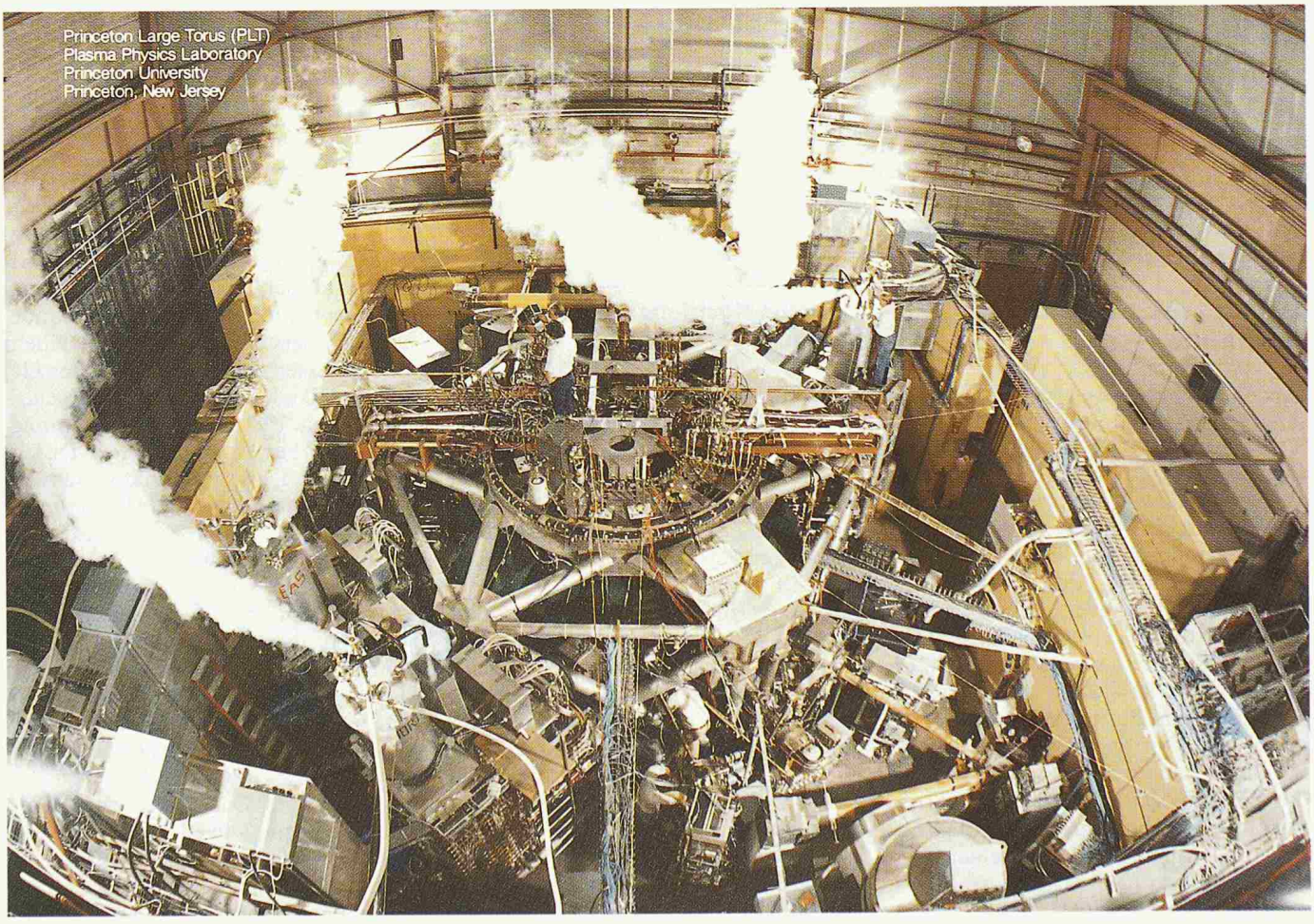

Bild 7. Der PLT (Princeton Large Tokamak). Ein grosses Experiment auf dem langen Weg zur Fusion

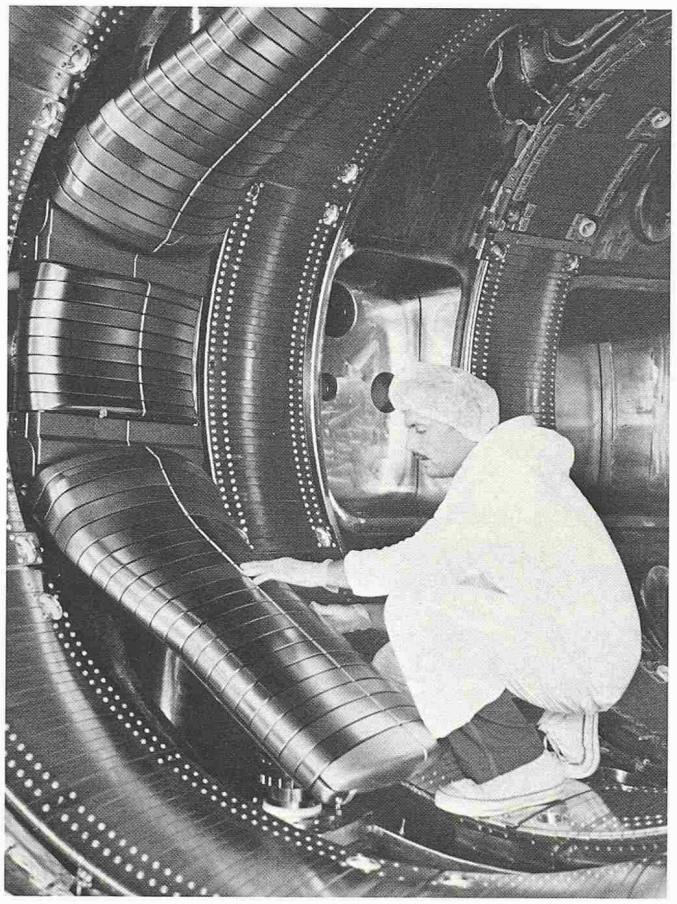

Bild 8. *Installation eines Limiters in TFTR*

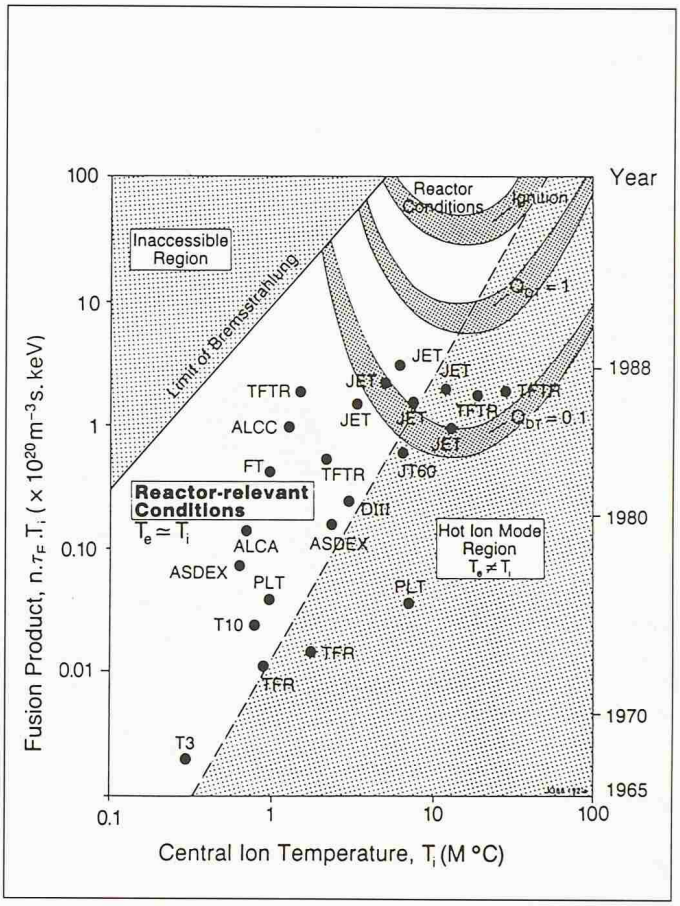

Bild 10. *Die Fortschritte auf dem Weg zum Lawsonschen Kriterium. Die Punkte stellen die besten erhaltenen Resultate der weltweiten Anstrengungen bis 1986 dar*

schnell wie möglich zu entwickeln, wird verwirklicht in Zusammenarbeit mit der schweizerischen Industrie.

Fortschritte mit $n_e\tau_E$

Zu den bemerkenswertesten Fortschritten der letzten Jahre sind die $n_e\tau_E$ Rekorde von Alcator A und Alcator C (MIT; USA) zu nennen. In dem Jahren 1975 und 1978 wurden im Alcator A die folgenden $n_e\tau_E$ Werte gemessen: $n_e\tau_E = 10^{18} m^{-3}$ s und $n_e\tau_E = 3\ 10^{19} m^{-3}$ s. Im Jahre 1983 wurden von Alcator C sogar die Limiten des Breakeven-Kriteriums mit $n_e\tau_E = 8\ 10^{19} m^{-3}$ s überschritten. Das letztere Resultat wurde dank einer neuen, in Oka Ridge entwickelten Technik, dem Einschuss von gefrorenem Wasserstoff ins heisse Plasma verwirklicht. In diesen Experimenten stieg die Einschusszeit τ_E und die Elektronendichte n_e an, während die Elektronen- und Ionentemperatur schlagartig abnahmen, um nach etwa 15–40 Millisekunden wiederum auf den Anfangswert anzusteigen. Die Ionentemperatur nach dem Einschuss erreichte sogar noch höhere Werte.

Über die Nachfuhr von Brennstoff während der Entladung

Zum erstenmal wurde im Jahre 1977 am ORMAK in Oak Ridge der Einschuss von festem Wasserstoff oder Deuterium ins Plasma als Versorgung der Entladung mit Brennstoff benützt. Diese Methode, die auch dazu dient, die Dichte des Plasmas zu erhöhen, wurde von L. Spitzer schon 1954 vorgeschlagen. Bis zu diesem Zeitpunkt sah man vor, die Zufuhr von Wasserstoff mit Hilfe von schnellen piezoelektrischen Einschlussventilen durchzuführen. Diese Art der Wasserstoffnachlieferung hat jedoch den Nachteil, dass Plasma über den äusseren Rand versorgt wird und dabei die Plasmaperipherie abkühlt, was nun wiederum zu Änderungen des Temperatur- und Dichteprofils führen kann. Um das Plasmazentrum, in dem eine hohe Dichte und Temperatur aufrechterhalten werden sollen, zu erreichen, muss der feste Wasserstoff auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt werden. Die enormen Fortschritte dieser neuen Technologie zeigen sich wie folgt: 1977 konnten runde, feste Wasserstoffkügelchen mit einem Durchmesser von 70 µm mit einer Geschwindigkeit von 100 m/s eingeschossen werden. 1980–81 erlaubten umfangreiche Verbesserungen schon Durchmesser von 1 bis 6 mm und Geschwindigkeiten bis 1000 m/s. Heute liegen diese schon bei rund 2600 m/s, die für die heute existierenden grossen Anlagen nötig sind. Für JET möchte man Injektoren von festem Wasserstoff konstruieren, die einen Durchmesser von 6 mm und Geschwindigkeiten von 5000–10 000 m/s erlauben. Dies ergibt eine Beschleunigung des Wasserstoffeis von $10^7 m\,s^{-2}$ (10^6 g!). Das Centre d'Etudes Nucléaires in Grenoble und das Laboratorium in Oak Ridge entwickeln nun die dazu notwendigen Technologien. Diese pneumatischen «Kanonen» sollten zudem noch die Fähigkeit besitzen, mehrere sogenannte «pellets» pro Sekunde ins Plasma einzuschiessen, um

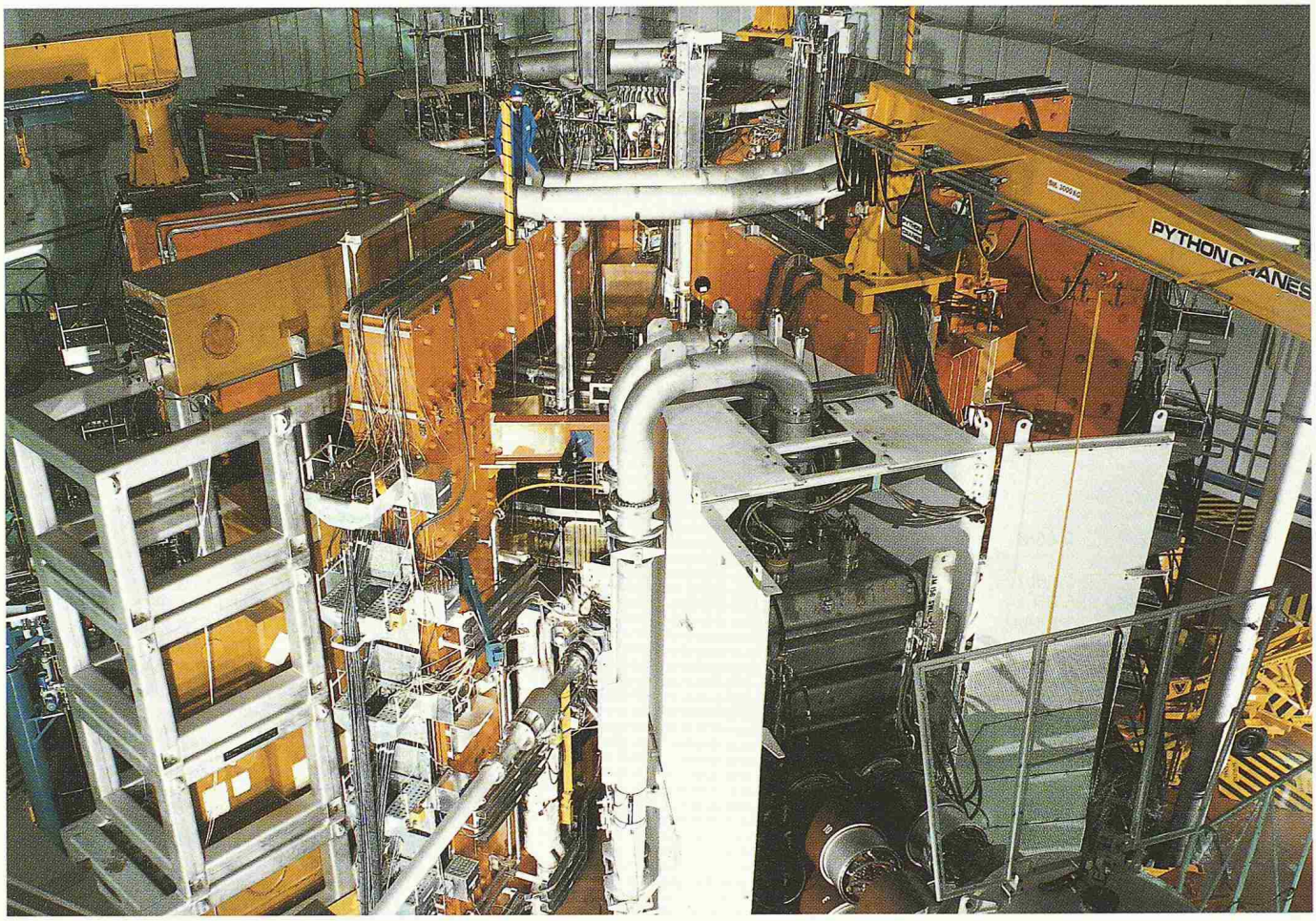

Bild 9. JET Gesamtansicht. Im Vordergrund erkennt man einen der Neutralteilcheninjektoren

so die Dichte im Zentrum konstant zu halten.

Erhöhung der Temperaturen, die Situation Anfang der 80iger Jahre

Hier möchten wir beifügen, dass 1980 die Methoden und Technologien Ionentemperaturen von ungefähr 80 000 000 °C und Dichten von 3-4 $10^{19}m^{-3}$ erlaubten. Diese Leistungen wurden an den Tokamaks PLT und PDX mit Hilfe der Neutralteilchenheizung (Deuterium) als Zusatzheizung erreicht (40 keV).

Verschiedene Einschlussregime

Im Februar 1982 wurde am ASDEX-Experiment ein von der Theorie nicht vorhergesagter Effekt entdeckt. Diese Anlage besitzt einen sogenannten magnetischen Divertor, wie er auch an den Experimenten Doublet III (G.A., USA), DITE (GB), PDX (USA) benützt wird. Während der Entladungen mit Neutralteilchenheizung wurde oberhalb einer bestimmten minimalen Energie die Existenz zweier verschiedener Regimes der Einschlusszeit entdeckt: das Regim L, ähnlich wie es auch in Limitern-Entladungen (Fig. 8) beobachtet wird, und ein H-Regime, welches einen besseren Einschluss des Plasmas zeigt. Während einer ersten Periode konnte kein Auslöser für die Bifurkation zwischen diesen beiden Einschlussregimen L und H gefunden werden. Jetzt scheint es, dass der Übergang zum Bereich besseren Einschlusses praktisch in allen Tokamaks mit magenetischen Divertoren möglich ist, wie es auch in D III und PDX gezeigt wurde. In diesen Experimenten sinkt die Elektronentemperatur am Rand sehr schnell ab, und damit werden die Instabilitäten an der Oberfläche stark reduziert. Kurz kann dies dadurch ausgedrückt werden, dass die thermische Isolation des Plasmas erhöht wird. Kürzlich wurden am JET (Fig. 9) Änderungen an der magnetischen Konfiguration vorgenommen, und 1986 wurden dort auch die ersten sogenannten H-Entladungen erhalten. Auch hier wurde keine Verminderung des Einschlusses während der Zusatzheizung beobachtet.

Es scheint, dass einige Zusatzheizungen, allen voran diejenigen, die Plasmawellen ausnutzen, deren Resonanzen in den inneren oder äusseren Bereich des Plasmas gelegt werden können, Zugriff zu «quasi-H» Entladungen haben. Die Alfven Wellen, die am Tokamak TCA in Lausanne als Zusatzheizung erprobt und studiert werden, könnte auch zu diesem Zwecke dienen.

Die Entwicklung der letzten zwei Jahre

Die Konferenz im Lande der aufgehenden Sonne: ein heisser Sommer in Princeton und ein angenehm warmer Herbst am JET (1986)

Die im Laufe des Jahres 1986 am JET erhaltenen Resultate verdienen hier erwähnt zu werden. In der ohmschen Phase wurde bei «nur» 3 MA (B_T = 3.4 Tesla) - der maximale Plasmastrom zu diesem Zeitpunkt betrug 5.1 MA - eine maximale Einschlusszeit τ_E von 0.8s erreicht («absoluter» Weltrekord). Die Ionentemperatur und die Elektronentonentemperatur erreichte Werte von 3 keV* und 4 keV und dies bei mittleren Elektronendichten von 4 $10^{19}m^{-3}$.

Die Temperaturen konnten mit Hilfe der Zusatzheizungen noch weiter er-

*) 1 keV = 11 000 000 °C

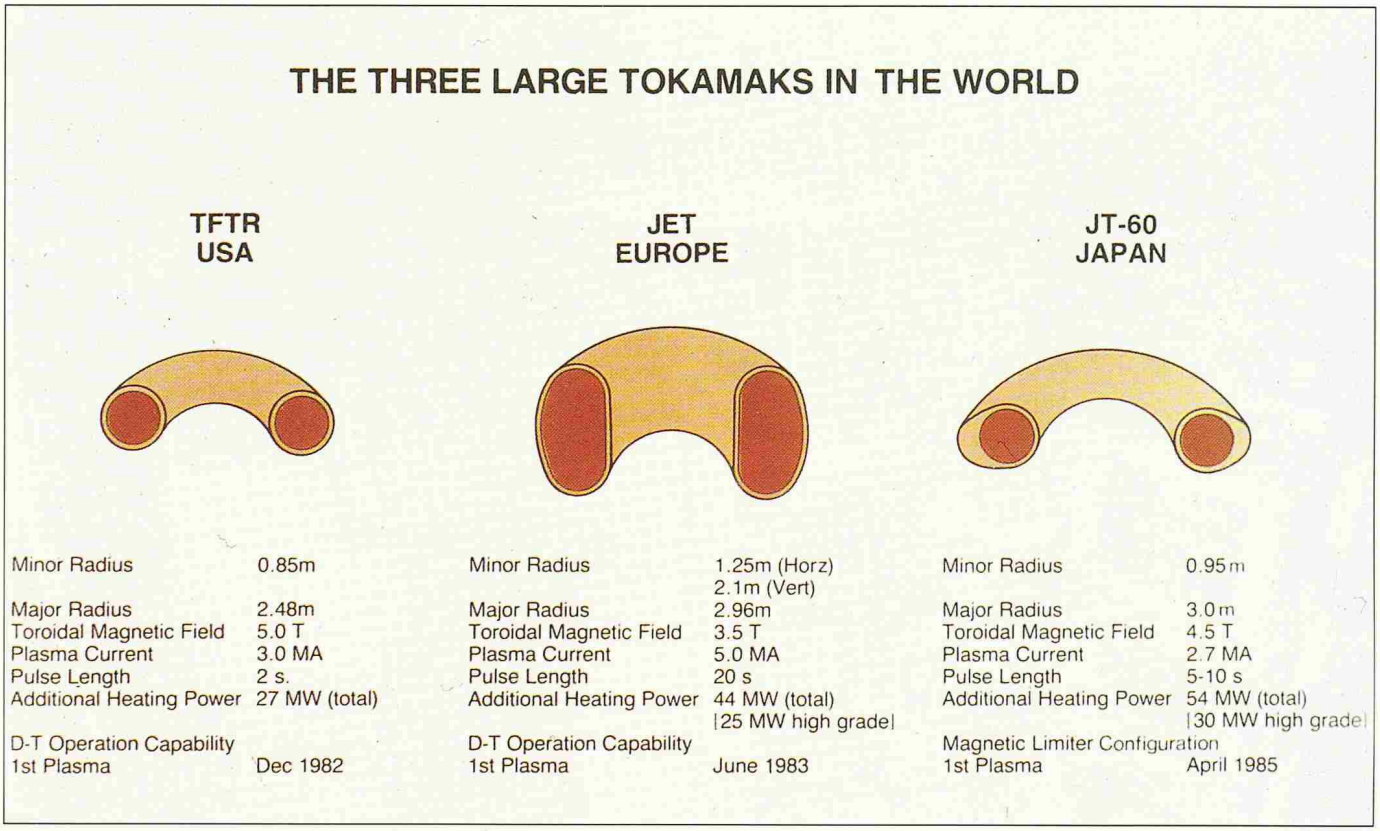

Bild 11. Ein Vergleich der drei zurzeit grössten existierenden Experimente

höht werden. Anfang 1986 wurden drei Antennen für die Hochfrequenzheizung (Ionenzyklotronwelle) installiert. Der Frequenzbereich zwischen 25–50 MHz erlaubte die Heizung eines Deuteriumplasmas mit Hilfe der Resonanzen der Minderheitsteilchen H^+ und $^3He^{++}$, die in kleinen Mengen (10%) dem Plasma beigegeben wurden. Mit einer eingekoppelten Leistung von 7 MW wurde im Zentrum der Entladung eine Elektronenenergie von 7.5 keV gemessen.

Die zweite verwendete Methode der Zusatzheizung ist der Einschuss von schnellen Neutralteilchen. Anfang 1986 war ein erster Injektor betriebsbereit. Dieser Injektor erlaubte den Einschluss von H^0 Atomen mit rund 80 keV und einer totalen Leistung von 6 MW, oder auch von D^0 Atomen mit 80 keV und sogar 9 MW. Bei dieser Methode ist die maximal erreichbare Temperatur im Plasma von der Plasmadichte abhängig. Bei mittleren und höheren Plasmadichten konnten die Ionen bis auf 6.5 keV und die Elektronen auf 4.8 keV aufgeheizt werden (dies mit 5,5 MW). In den Entladungen mit kleinen Dichten wurden extrem hohe Ionentemperaturen von bis zu 14 keV erreicht.

Diese Resultate erreichen beinahe diejenigen, die im Sommer 1986 am TFTR in Princeton erreicht wurden. In Plasmen kleiner Dichte wurden dort im Juli 1986 Ionentemperaturen von 20 keV erzielt, und die $n\tau_E$-Werte waren in der Grössenordnung von $1.10^{19} m^{-3}s$. Diese Resultate wurden, auch hier bei kleinen Elektronendichten, durch den Einschuss von schnellen Deuteriumatomen erhalten. Unter diesen Bedingungen wird ein 20 keV heisses Plasma praktisch allein durch die Abbremsung der Strahlatome erreicht. Bei diesen Temperaturen und bei Gebrauch eines D-T-Gemisches hätte die Leistung aus dem Plasma ausgereicht, um ein Viertel der aufgewendeten Leistung zu decken.

Unter anderen Versuchsbedingungen wurde am TFTR ein neuer $n_e \tau_E$-Rekord in bezug auf das Breakeven-Kriterium erhalten. Bei einer Ionentemperatur von 1.2 keV wurde mit einem $n\tau_E$ von $1.5\ 10^{20}\ m^{-3}s$ die Schwelle des Breakevens überschritten (Fig. 10). Einige Elemente in diesen Experimenten scheinen darauf hinzudeuten, dass in diesen Plasmen Ströme erzeugt wurden (wahrscheinlich durch sehr schnelle im Magnetfeld gefangene Teilchen), und dass diese von der Theorie vorhergesagten Ströme dazu ausgenützt werden könnten, um die Energie des Transformators sparsamer einzusetzen.

Hier noch zwei weitere Resultate von JT-60 aus dem Jahre 1986, die positive Konsequenzen auf die zukünftigen Forschungen haben könnten. Mit Hilfe der oberen hybriden Wellen (2 GHz und 2 MW) gelang es nicht nur, einen nicht induktiven Strom von 1,7 MA zu erzeugen, sondern es gelang auch, mit dem installierten magnetischen Divertor die vom Plasma ausgestrahlte Leistung um einen Faktor 10 zu reduzieren, was bedeutet, dass die an der Peripherie des Plasmas erzeugten Verunreinigungen weniger ins Plasma eindringen, ja dass ein grosser Teil davon durch den magnetischen Divertor abgeführt werden kann.

Schlusspunkt 1987

Anfang 1987 wurde eine Verlangsamung der experimentellen Tätigkeit der grösseren Versuchsanlagen festgestellt, dies bedingt durch verschiedene Änderungen und vor allem durch den nachträglichen Einbau leistungsfähiger Zusatzheizungen. TFTR erhielt neue, am Lawrence Berkeley Laboratory entwickelte Neutralteilcheninjektoren, die eine Leistung von 25 MW während rund 2 s erbringen können. Im weiteren wurde noch zusätzlich 4 MW ICRH Heizung installiert. TFTR benützte in der Folge 4 Injektoren. Mit diesem Arrangement konnten die Betriebsgrenzen der sogenannten «Super-Schüsse» (kleine Dichten, hohe Leistung der Neutralteilchenheizung) erleuchtet werden. Man kann heute diese «Super-Schüsse» bei konstantem Plasmastrom bis zu einer bestimmten Leistung der Neutralteilchenheizung aufrechterhalten. So wurden die höchsten bis jetzt erreichten Temperaturen von 30 keV erzielt.

Was JET betrifft, so erhöhte die Installation eines zusätzlichen Injektors die

Leistung auf 20 MW (für D^0 mit 80 keV). Bis 1988 wird die Hochfrequenzheizung progressiv auf totale 32 MW (während 20 s) gesteigert werden.

Der Plasmastrom wurde auf 6 MA erhöht, und es ist vorgesehen, diesen in Zukunft auf 7 MA zu erhöhen (Limiterentladungen). Im weiteren wird ins Auge gefasst, den Plasmastrom während des Divertorenbetriebs auf 4 MA zu erweitern. Auch ist geplant, wie in JT-60, einen nicht induktiven Strom mit Hilfe der oberen hybriden Welle zu erzeugen.

Alle diese Anstrengungen sollen dazu dienen, ein möglichst hohe $n_i T_i \tau_E$-Produkt zu erhalten.* Der beste bis jetzt am JET erreichte Wert ist $n_i T_i \tau_E = 2\ 10^{20}\ m^{-3}$ keV s. Dies muss, um einen gewichtigen Teil von α-Teilchenheizung (Helium = Bedingung für Breakeven) zu erhalten, mit $7\ 10^{20}\ m^{-3}$ keV s verglichen werden. Dieser Wert kann nun wiederum mit $3\ 10^{21}\ m^{-3}$ keV s verglichen werden, der im JET nötig wäre, dass die α-Teilchenheizung das thermonukleare Plasma selbst unterhalten könnte (Zündungsbedingung).

Hohe Temperaturen wurden auch am JT-60 mit 20 MW Neutralteilchenheizung erhalten. Die Ionentemperaturen waren 11 keV in Limiterentladungen und 6 keV in Divertorenentladungen. Der seitlich angebrachte Divertor im JT-60 erwies sich jedoch als nicht optimal, und deshalb werden (der Divertor oben und unten scheint die beste Anordnung zu sein) zur Zeit umfangreiche Änderungen am Vakuumgefäss unternommen. Zur gleichen Zeit wird eine Plasmastromerhöhung auf 7 MA (Limiterplasma) und 6 MA (Divertorenplasma) vorgenommen. Diese Arbeiten verschieben weitere experimentelle Aktivitäten ins Jahr 1990.

Im weiteren lassen einige der letzten Resultate den Schluss zu, dass die verschiedenen Moden des Einschlusses (H und L-Entladung) verstanden werden könnten. Am JFT-2 M konnte schliesslich mit Limitern, die in der Hochfeldzone aktiv waren, H-Entladung erzeugt werden, die mit denjenigen in Divertorenplasmen durchaus vergleichbar waren. Kürzliche Experimente am ASDEX und Doublet IIID haben erbracht, dass die Einschlusszeit τ_E erhalten bleibt, wenn die total, aufgebrachte Leistung (ohmsche und Neutralteilchen-Heizung) einige Megawatts beträgt.

*) Häufig wird das Produkt $n_i \tau_E$ durch das Produkt $n_i T_i \tau_E$ ersetzt, das dem Lawsonschen Kriterium näher steht

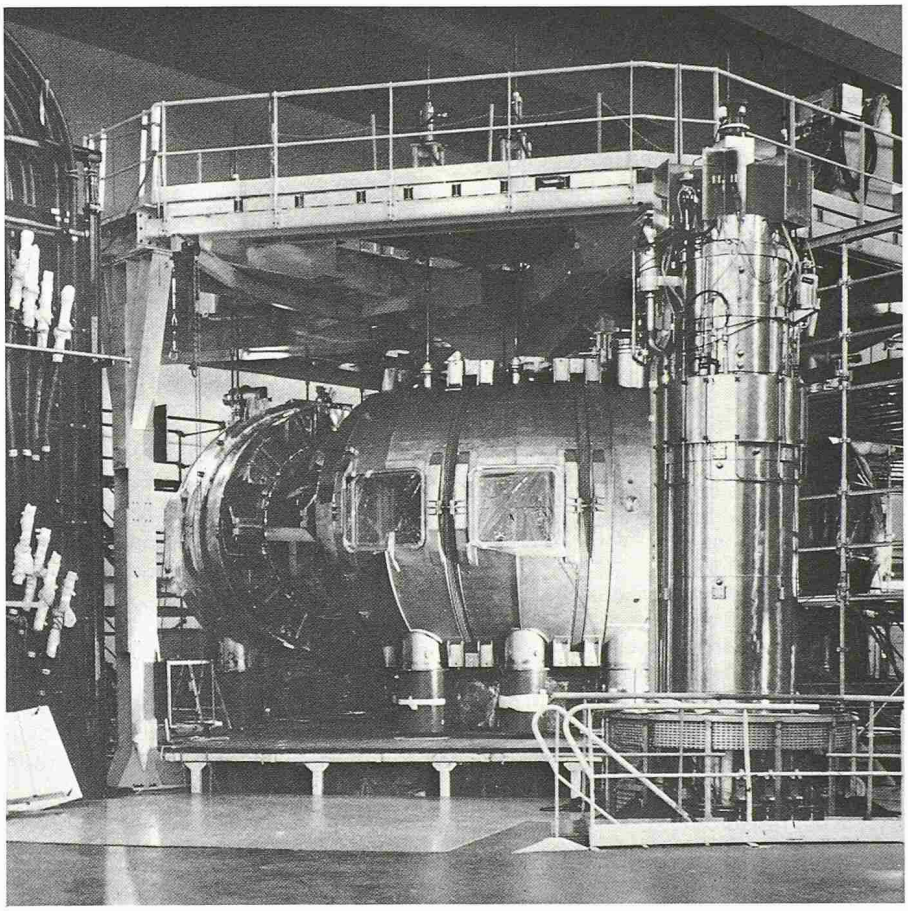

Bild 12. Der Tore Supra (Cadarache in Frankreich). Diese Anlage wurde Anfang April in Betrieb genommen. Es ist der grösste Tokamak mit supraleitenden Spulen

Perspektiven

Je nach den von JET und TFTR erhaltenen Resultaten wird gegen 1990–91 eine neue Etappe eingeläutet werden, wenn Entladungen in einem D-T-Gemisch ausgeführt werden. Solche Art Entladungen sind jedoch nicht im japanischen JT-60 vorgesehen (Fig. 11).

Doch schon jetzt sind neue Projekte in der Planungsphase, CIT in den USA, NET in Europa und FER in Japan. In diesen Experimenten soll, ohne dass das primäre Ziel einer Wiederverwendung der erzeugten Energie geplant ist, ein thermonukleares Plasma während längerer Zeit (1 bis mehrere 10 Minuten) unterhalten werden. Damit soll ermöglicht werden, neue Forschungsgebiete sowohl in physikalischer wie auch in technologischer Richtung zu eröffnen. Anlässlich der letzten Gipfeltreffen haben die industrialisierten Staaten bestätigt, dass die internationale Zusammenarbeit verstärkt werden soll, und dass die weltweiten Programme, wie in der Vergangeheit INTOR, neu angekurbelt werden sollten. Als direkte Konsequenz dieser Politik ergab sich anlässlich der letzthin durchgeführten Verhandlungen zwischen der EG, Japan, UdSSR und den USA die Gründung des Projektes ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Als Standort, an dem anfänglich etwa 40 Physiker arbeiten werden, wurde Garching in der Nähe von München gewählt, um gleichzeitig noch von der Nähe des europäischen NET-Teams zu profitieren.

Dieses Programm soll bis Ende 1991 zu einem Konzept für einen experimentellen thermonuklearen Reaktor führen. Das Ziel dieser Zusammenarbeit ist, die vier «Hauptdarsteller» in einem – sei es in deren Land oder in einem international verwirklichbaren Projekt – zusammenzufassen.

In der Zwischenzeit werden, so wird es ebenfalls erhofft, neue Experimente (Tore Supra [Fig. 12] und T-15) die neue Technologie, wie die Supraleitung, einführen, in Betrieb gesetzt. Tore Supra, dessen aus NbTi gefertigte supraleitende Spulen nach einem neuen Konzept mit suprafluidem He bei $1{,}8^0$K betrieben werden, nahm seinen Betrieb Anfang April 1988 auf. Was T-15 betrifft, so ist seine Inbetriebnahme – die Verzögerung ist auf Schwierigkeiten bei der Herstellung der Spulen aus dem Supraleiter Nb_3Sn zurückzuführen – für Ende 1988/Anfang 1989 vorgesehen.

Die mögliche schnelle Entwicklung in der Herstellung und Technologie der

Hochtemperatursupraleiter könnte für die sogenannten Experimente mit niedrigem β (Verhältnis der Energie im Plasma zur magnetischen Energie) neue Aspekte setzen. Eine bestimmte Vorsicht ist jedoch hier angebracht, ist es doch ein langer Weg von der Herstellung kleiner Muster im Labor bis zur Verwirklichung grosser Spulensysteme.

Adresse des Verfassers: *P. J. Paris*, Centre de recherches en physique des plasmas, EPFL, 21., av. des Bains, 1007 Lausanne.

Literatur

- «Plasma physics and the problem of controlled thermonuclear reactions», ed. M.A. Leontovich, Vol. 1, Pergamon Press, 1961
  - *I.E. Tamm:* Arbeiten aus dem Jahre 1951, Seite 1 bis 20
  - *A.D. Sakharov:* Arbeiten aus dem Jahre 1951, Seite 21 bis 34
- *R. Gross:* «Fusion energy», John Wiley, 1984
- *K. Miyamot:* «Plasma physics for nuclear fusion», MIT Press, 1980
- Nuclear Fusion: «25th anniversary of nuclear fusion», Vol. 25,9, 1985
- 14. SOFT-Konferenz: «Fusion technology», herausgegeben durch Commission des Communautés Européennes, Pergamon, 1986
- 11. Internationale IAEA-Konferenz: «Plasma physics and nuclear fusion research», herausgegeben durch IAEA, 1986
- 4.EPS-Konferenz: «Plasma physics and controlled fusion», herausgegeben durch F. Engelmann, Institute of Physics und Pergamon Press, 1987

Anhang I

Die Kernverschmelzung

$D^2+T^3 \rightarrow He^4+n+17{,}6$ MeV
$D^2+D^2 \rightarrow T^3+p+4{,}00$ MeV zu 50%
$\rightarrow He^3+n+3{,}2$ MeV zu 50%
$D^2+He^3 \rightarrow He^4+p+18{,}8$ MeV
$B^{11}+H \rightarrow 3He^4+8{,}7$ MeV

Das Tritium ist ein radioaktives Isotop mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Es ist ein sogenanter β-Strahler aus dem auch das Isotop He^3 erhalten werden kann.

$$T \rightarrow He^3+e+5{,}7\ keV$$

Es ist eine Kernspaltungsreaktion des Lithiums aus dem das notwendige Tritium gewonnen werden kann. Eine exotherme Reaktion des Isotopes Li^6 kann im Falle eines Auffangens des Tritiums im «Mantel des Reaktors» die Ausbeute noch erhöhen.

$$Li^6+n \rightarrow He^4+T+4{,}8\ MeV$$

Was das Isotop Li^7 betrifft, so erhöht seine endotherme Reaktion mit einem Sekundärneutron noch die Tritium Ausbeute.

$$Li^7+n \rightarrow He^4+T+n-2{,}5\ MeV$$

Im natürlichen Lithium sind 7,4% Li^6 enthalten. Sollte jedoch eine höhere Li^6-Konzentration notwendig sein, so ist eine solche relativ kostengünstig zu erzielen.

Die D-T Reaktion scheint zum jetzigen Zeitpunkt am leichtesten realisierbar zu sein. Doch werden schon heute weitere Reaktionen, die jedoch bei weit höheren Temperaturen ablaufen ins Auge gefasst.

- D-D die Brennstoffreserven sind die grössten
- D-He^3 das in der Natur nicht existierende He^4 könnte aus dem Zerfall des Tritiums oder durch die D-D Reaktion hergestellt werden.
- H-B^{11}, produziert keine Neutronen.

Anhang II

Das Freisetzen der Fusionsenergie: Breakeven und Lawson'sches Kriterium und die Zündbedingung

Die Wirkungsquerschnitte zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Fusionsreaktion gross ist, wenn die einzelnen Komponenten des Plasmas eine hohe Temperatur besitzen. Die thermische Bewegung der Atome bei diesen Temperaturen ist so gross, dass sie in ihre «Bestandteile» auseinanderfliegen und damit eine Mischung von Elektronen und Ionen bilden, das Plasma. Eine der Haupteigenschaften des Plasmas ist es, auf elektrische und magnetische Felder sehr ausgeprägt zu reagieren. Diese Eigenschaft wird wesentlich zur Verwirklichung der Fusion mit Hilfe des magnetischen Einschlusses benützt.

Es ist in der Tat einleuchtend, dass es unmöglich ist, ein Plasma von 100 Millionen Grad in Kontakt mit einer Wand aufrecht erhalten zu wollen, das heisst, das Plasma muss eingeschlossen werden. Dies ist der Grund für das mehrfach angesprochene Problem der Isolation des Plasmas oder des Energieeinschlusses. Die Qualität der Isolation kann mit Hilfe einer Analogie, der Thermosflasche erklärt werden. Je länger die Flüssigkeit im Thermos warm bleibt, desto besser die Isolation. Sollen die Teilchen ihre hohe Temperatur beibehalten, so muss deren Energieverlust durch Strahlung und Konvektion ersetzt werden.

Geht man von der Voraussetzung eines reinen Deuterium-Tritium Gemisches aus (das heisst ein Plasma ohne jegwelche Verunreinigungen), so kann die Energiebilanz in verschiedenen Formen ausgedrückt werden. Ein primäres Ziel ist sicherlich, dass die ausgebrachte Energie durch die im Reaktor erzeugte Energie gedeckt wird. Diese Forderung führt zur sogenannten Breakeven-Bedingung, die für ein D-T Gemisch (50%–50%) einen $n\tau_E$ Wert von $7\ 10^{19}\ m^{-3}s$ bei einer Temperatur von 100 000 000 °C ergibt.

Eine zweite Bedingung, die die «Betriebsbedingungen» eines Fusionsreaktors einbezieht, ist bekannt unter dem Namen: Lawson'sches Kriterium (Fig. 13).

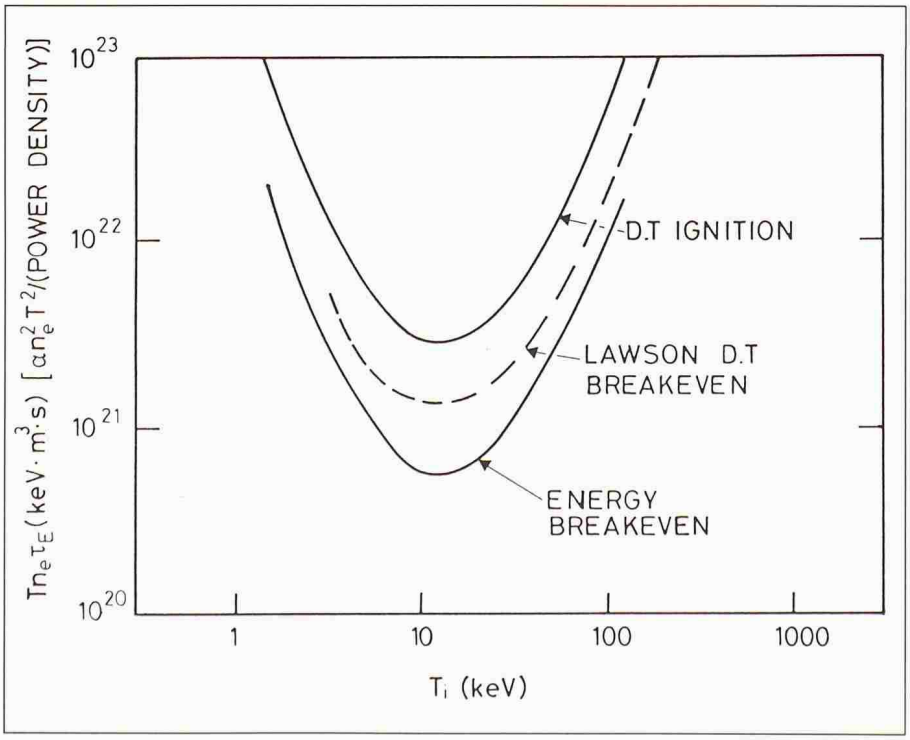

Bild 13. Das Lawsonsche Kriterium und seine drei «Grenzen»

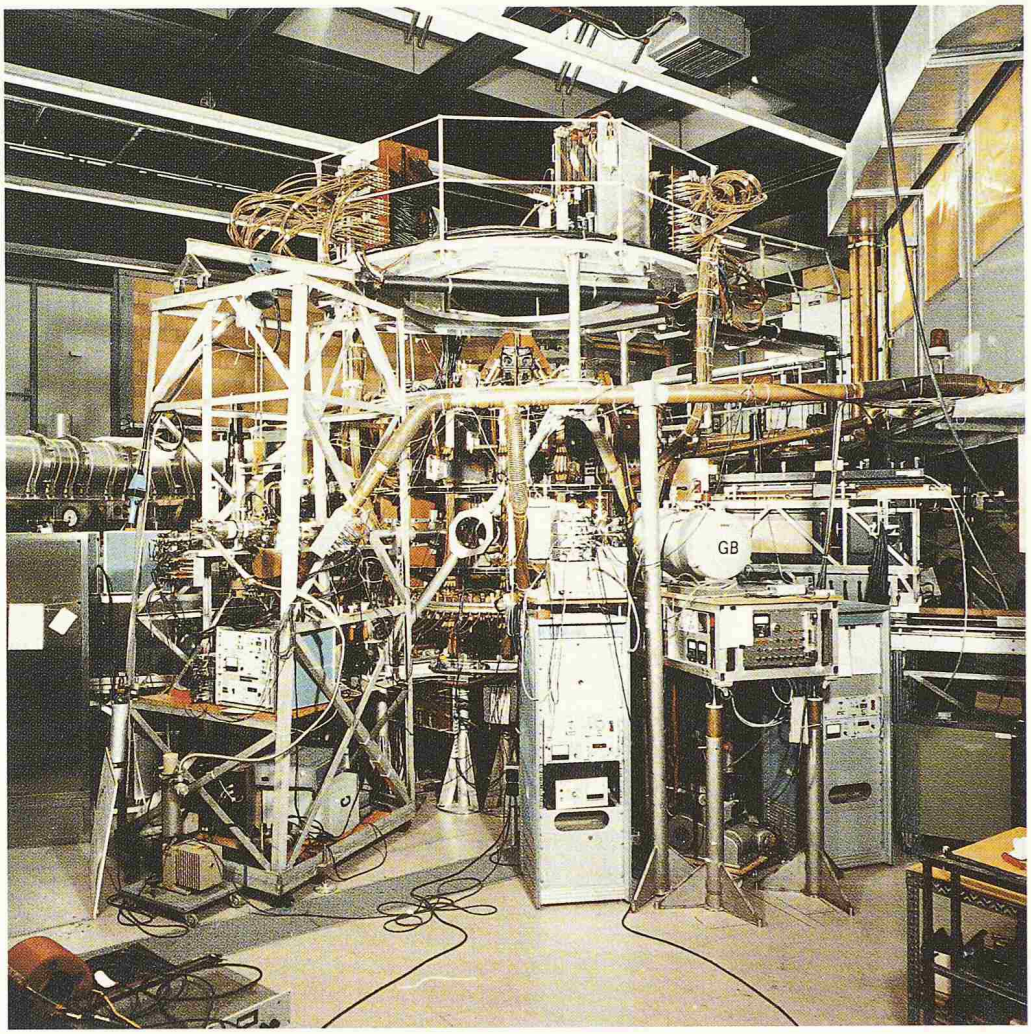

Bild 14. Der TCA (Tokamak pour l'étude du chauffage par ondes d'Alfvén) am Centre de Recherches en Physique des Plasmas – EPF Lausanne

John D. Lawson war der Erste, der die Wichtigkeit der Energieeinschlusszeit erkannte. In seine Betrachtungen eines D-T Plasmas bei 100 000 000 °C bezog er ein, dass ein Teil der Energie des Fusionsreaktors aufgefangen, umgewandelt ($\eta = 0{,}33$) und dann schlussendlich dem Plasma wieder zugeführt werden kann, um so die hohen Bremsstrahlungsverluste zu decken. Diese Bedingung ist schon wesentlich schwieriger zu erfüllen, beträgt der $n_i\tau_E$-Wert doch schon $1{,}4\ 10^{20} m^{-3}s$.

Schlussendlich existiert noch eine dritte Bedingung, die sogenannte Zündbedingung. Diese beinhaltet, dass ein thermonukleares Plasma «brennt», ohne Zuführung von äusserer Energie. Die Energie der α-Teilchen (Helium), bei denen Reaktionen entstehen, soll alle Energieverluste decken und so die für die Fusionsreaktionen notwendigen Bedingungen aufrecht erhalten. Diese Bedingung ist noch viel schwieriger zu erreichen: $n\tau_E = 2\ 10^{20} m^{-3}s$.

Diese erwähnten Bedingungen gelten jedoch nur für ein verunreinigungsfreies Plasma. Sind Verunreinigungen vorhanden, so werden wegen der hohen Emissionsstrahlungen (diese sind grösser als die Brems- und Rekombinationsstrahlungsverluste) der Verunreinigungen, die notwendigen Schwellenwerte stark nach oben verschoben. Überschreitet der Anteil der Verunreinigungen im Plasma die Grenzen zwischen 0,1% und 2%, so können je nach Bedingungen die angesprochenen Schwellenwerte nicht mehr überschritten werden.

Anhang III

Ein neuer Tokamak in der Schweiz: Ein neues Projekt am CRPP.

Der Tokamak TCV (Tokamak mit variabler Konfiguration)

Am CRPP wurde im Laufe der letzten Jahre eine grosse Erfahrung im Betrieb eines Tokamaks als Versuchsstation für die thermonukleare Fusion erworben. Der Tokamak TCA (Fig. 14), der als erste Zielsetzung das Studium der Zusatzheizung mit Hilfe der Alfven-Wellen hat, wurde 1980 in Betrieb gesetzt. Die erhaltenen Resultate zeigen, dass diese Art der Hochfrequenzheizung mit den anderen Arten durchaus vergleichbar ist. Es sei hier nochmals erwähnt, dass eine zusätzliche Heizung zur ohmschen Heizung nötig ist, um die Teilchentemperatur im Plasma auf die für die Fusionsreaktionen nötige Temperatur von rund 100 000 000 °C anzuheben. Der Grund dafür ist, dass das Plasma bei diesen hohen Temperaturen ein ausgezeichneter elektrischer Leiter ist und deshalb die Joule'sche Heizung verringert wird.

Auf der anderen Seite ist die Gruppe, die sich mit den theoretischen Seiten der Plasmaphysik befasst, spezialisiert in der Untersuchung der Probleme der Stabilität und des Gleichgewichtes von Tokamakplasmen. Mit Hilfe von umfangreichen, numerischen Berechnungen, in denen die charakteristischen Parameter und Resultate der verschiedensten grossen Versuchsapparaturen berücksichtigt wurden, wurde ein semiempirisches Gesetz gefunden, das den maximalen Plasmadruck beschreibt, bei dem ein Tokamakplasma eingeschlossen werden kann.

In den letzten Jahren wurde am CRPP, im Rahmen seiner Forschungsprogramme an Projekten wie NET und INTOR gearbeitet, die die Nachfolge von JET antreten sollten. Diese Arbeiten sind notwendig, damit ein Fusionsreaktor vom Typ Tokamak gebaut werden kann.

An den gegenwärtig betriebenen Tokamaks hat es sich gezeigt, dass der maxi-

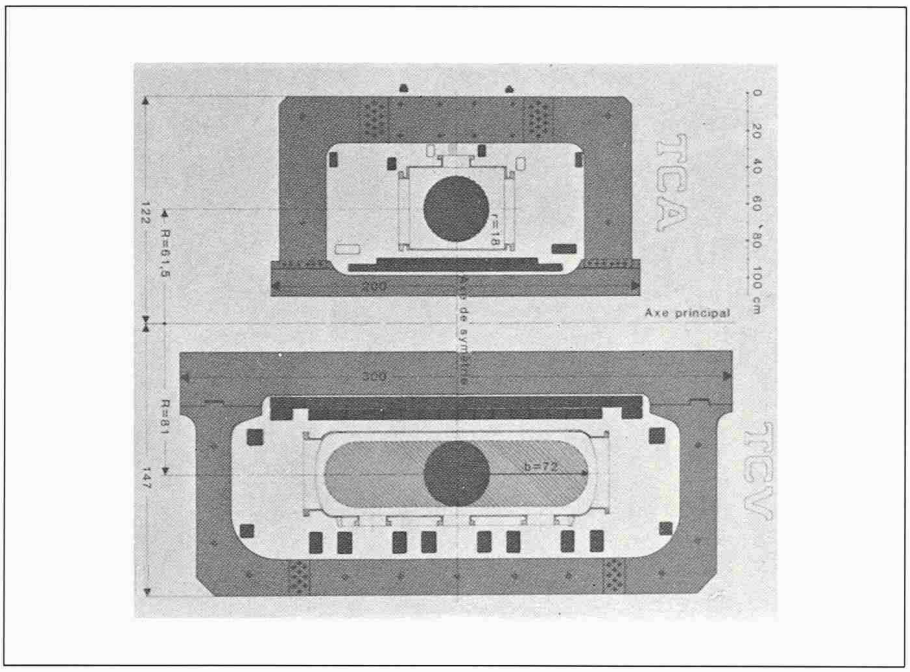

Bild 15. Vergleich zwischen TCV (Tokamak à Configuration Variable) und TCA. Das neue Projekt TCV unterscheidet sich vom TCA darin, dass im TCV die Form und die Dimension des Plasmaquerschnittes wesentlich geändert werden kann

mal erreichbare Plasmadruck zu klein ist, als dass eine solche Installation als Modell für einen Fusionsreaktor dienen könnte. Im gegenwärtigen Stand der Dinge scheint es zwei Wege zu geben, um diese Druckbegrenzung gegen höhere Werte hinzuschieben: Der erste besteht darin, die theoretisch vorhergesagte, aber noch nicht experimentell gefundene zweite Stabilitätszone zu erreichen, oder zweitens den Plasmastrom zu erhöhen.

Nach den meisten bekannten empirischen Gesetzen sollte es möglich sein, den maximalen Plasmastrom und damit auch den Plasmadruck zu erhöhen, indem das Plasma «gestreckt» wird. Dies ist in der Tat der Weg, den das Projekt TCV (Fig. 15) einzuschlagen versucht.

Der TCV, so wie er sich heute vorstellt, ist ein Tokamak mit einem toroidalen Entladungsgefäss von nahezu rechtekkigem Querschnitt mit einem mittleren Radius von 87 cm, einer Breite von 56 cm und einer Höhe von 154 cm. Die Vakuumkammer wird von einer Magnetfeldspule, bestehend aus 16 Sektionen mit je 6 Windungen umgeben, die ein Magnetfeld von 1.5 Tesla erzeugen. Sechzehn nahe an der Innen- und Aussenwand des Gefässes angebrachte, unabhängig von einander gespiesene Magnetfeldspulen dienen dazu, die für die Formgebung und zum Gleichgewicht notwendigen Felder zu erzeugen. Eine grosse Vielflt von Querschnittsformen kann mit Hilfe dieses Spulensystemes hergestellt und stabil gehalten werden. Die verschiedenen Formen variieren von der «Pferderennbahn» (race track) über D- oder bohnenähnliche Formen bis zu mehr exotischen wie S-Formen, dem Doublet oder Triplet, dies mit oder ohne magnetischen Divertor. Die Strekkung des Plasmas kann kontinuierlich verändert werden, vom einfachen Kreis bis zu Entladungen, die das gesamte Entladungsgefäss füllen.

Die Untersuchung von solch gestreckten Plasmen wird ohne Zweifel zur Entdeckung neuer physikalischer Erkenntnisse führen, die nicht durch die existierenden empirischen Gesetze vorherzusehen sind.

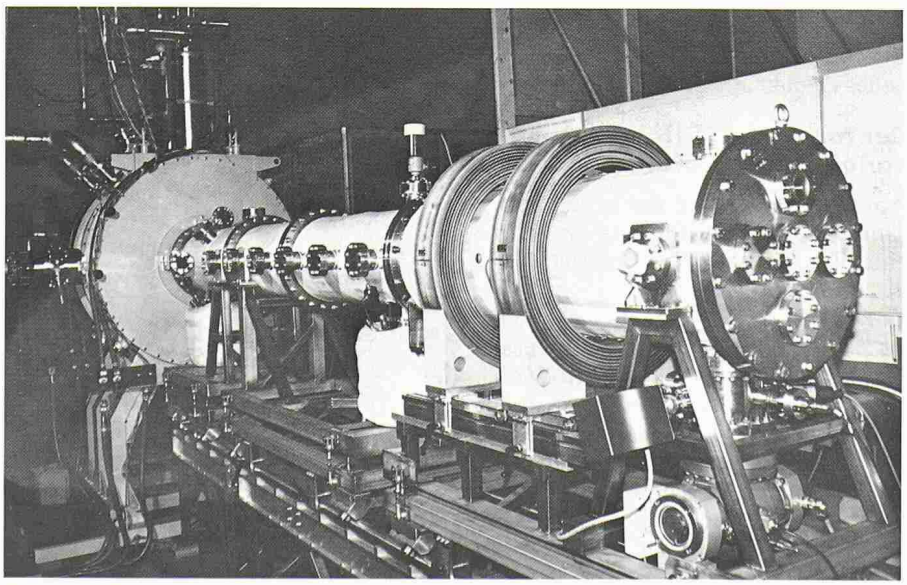

Bild 16. Gesamtansicht der Versuchsanlage des 120GHz Gyrotrons am Centre de Recherches en Physique des Plasmas

Anhang IV

Das Gyrotron: Entwicklung einer Quelle hochfrequenter, elektromagnetischer Wellen

Unter den verschiedenen Hochfrequenzheizmethoden scheint zum jetzigen Zeitpunkt die Heizung der Elektronen durch die Absorbtion der Elektronenzyklotronwelle die erfolgs- versprechendste und wirkungsvollste zu sein. In der Vergangenheit wurde diese Art der Heizung nicht voll ausgeschöpft, da zu jener Zeit noch keine genügend leistungsstarken Sender (200 kW bis zu mehreren Megawatt) bei den verlangten hohen Frequenzen (60–150 GHz) vorhanden waren. Deshalb entschieden die wesentlich an der Fusionsforschung beteiligten Länder und Organisationen, die Entwicklung von neuen hochfrequenten Sendern voranzutreiben. Diese neuen Quellen für hochfrequente elektromagnetische Wellen heissen Gyrotrons.

In den heutigen konventionellen Mikrowellenoszillatoren ist die Frequenz der elektromagnetischen Welle durch die Dimensionen des Resonators gegeben. Die kleinen geometrischen Dimensionen des Resonators sind der Grund für zahlreiche technologische Probleme, die auftauchen, sobald höhere Frequenzen und damit kleinere Wellenlängen verlangt werden. Der eigentliche Grund liegt darin, dass die hohen Energiedichten, die durch die ohmschen Verluste in den Resonatorenwänden entstehen, den Schritt zu sehr hohen Ausgangsleistungen verhindern.

Im Gyrotron ist die Situation grundlegend verschieden, hängt doch die Frequenz der elektromagnetischen Welle nicht mehr von den Dimensionen des Resonators ab. Im Gyrotron wird die

Frequenz der Wellen durch die Intensität des Magnetfeldes bestimmt, die dazu dient, den Strahl der relativistischen Elektronen zu «führen» und dessen Energie in elektromagnetische Energie umgewandelt wird. Der Resonator kann dementsprechend wesentlich grösser dimensioniert werden und die Auskoppelung grösserer Energien ist damit durchaus möglich. Auf dem aktuellen Markt findet man heute Gyrotrons im 70 GHz-Bereich mit Leistungen in der Grössenordnung von 200 kW. Die gegenwärtigen Fusionsexperimente verlangen jedoch Frequenzen von 120–150 GHz und Leistungen von einigen Megawatts. Das gegenwärtig beste Resultat (erreicht am Naval Research Laboratorium, USA) liegt bei 80 kW bei einer Frequenz von 110 GHz und dies während 1 ms. Diese Resultate zeigen, dass diese Hochfrequenzröhre noch weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der Physik wie auch auf technologischer Ebene nötig hat. Am CRPP wird, als Bestandteil des europäischen EURATOM-Programmes und in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire d'Electromagnétiques et d'Acoustique der EPFL und der Elektronenröhrenabteilung ERR der Firma ABB, die Entwicklung eines Gyrotrons (120–150 GHz, λ=2,5 mm) durchgeführt, das ein dem Laser verwandtes Prinzip verwendet (Fig. 16). Bei dieser Methode findet die Wechselwirkung zwischen den relativistischen Elektronen und der elektromagnetischen Welle, eine Wechselwirkung, bei der die Energie des Elektronenstrahles auf die Welle übertragen wird, in einem aus zwei Spiegeln bestehendem quasi-optischen Resonator statt. Dies hat den Vorteil, dass selbst bei hohen Frequenzen, also bei kleinen Wellenlängen, die Gesetze der Optik anwendbar sind, deshalb auch der Name quasi-optisch.

Das soeben beschriebene Gyrotron besteht im wesentlichen aus drei Hauptkomponenten: einer «Kanone» zur Erzeugung der relativistischen Elektronen, dem quasi-optischen Resonator und einem System von supraleitenden Spulen zur Erzeugung des die Frequenz bestimmenden Magnetfeldes. Die Elektronenkanone liefert einen ringförmigen Strahl (Durchmesser 4 mm, Ringdicke 0,2 mm). Die im Strahl enthaltene Energie beläuft sich auf 700 kW. Das Magnetfeld ist 50 kG. Der Elektronenstrahl gelangt zu dem aus zwei Spiegeln bestehenden Resonator, wo er einen Teil (40%) seiner Energie in Form von elektromagnetischer Energie abgibt. Anschliessend wird der Elektronenstrahl am Gefässende auf eine gekühlte «Wand» gelenkt.

Auf dem Gebiet des quasi-optischen Resonators wurden 1985–86 grosse theoretische und auch experimentelle Anstrengungen unternommen. Die Beugungsverluste und die Energiekopplung ausserhalb des Resonators wurde durch numerische Simulationen studiert und mit Experimenten verglichen. Die gute Übereinkunft Theorie-Experiment erlaubte die Festlegung der Parameter von verschiedenen zu installierenden Resonatoren. Wie in allen Systemen, die nicht in ihrer Grundschwingung arbeiten, ist das Problem der sogenannten Modentrennung entscheidend. Ein System von verschiedenen Spiegeln im quasi-optischen Resonator ist notwendig, um eine genügende Frequenzselektion zu erreichen.

Numerische Simulationen, in denen die Entwicklung und die Zusammensetzung der verschiedenen Moden zeitabhängig simuliert wurden, zeigten, dass nur ein einziger Mode in einem solchen Resonator erhalten werden kann. Die Entwicklung eines solchen Gyrotrons benötigt eine umfangreiche Infrastruktur, wie sie grösseren Versuchanlagen eigen ist. Ein Versuchsstand, der dazu dienen soll verschiedenste Resonatorensysteme zu testen und um deren physikalische Eigenschaften zu verstehen, ist gegenwärtig in Entstehung in Ecublens. Die notwendigen Einrichtungen sind neben den elektrischen Stromversorgungen (1 MW bei 100 kV) auch eine umfangreiche kryotechnische Installation für die supraleitenden Spulen.

Tensoren

Es soll hier eine kurze Erläuterung des Begriffs Tensor gegeben werden. Anschliessend wird anhand eines Beispiels (den Differentialgleichungen für die Bewegung eines beliebigen Kontinuums) gezeigt, wo Tensoren vorkommen können und wie aus diesen sehr allgemein geltenden Gleichungen, die Gleichungen für einen einfach Fall (der eindimensionalen, reibungs- und schwerkraftfreien Strömung mit Wärmezufuhr) erhalten werden. Dies soll zeigen, wie die Gleichungen für konkrete Fälle durch Vereinfachung aus den allgemein geltenden Gleichungen abgeleitet werden können.

VON BENNO ARBENZ, ZOLLIKON

Die meisten Ingenieure haben den Begriff Tensor im Zusammenhang mit der Beschreibung des Spannungszustandes in einem Körper, wo vom Spannungstensor die Rede ist, kennengelernt. Der Name Tensor kommt auch von der Spannungslehre. Dort wird jedem Flächenelement durch einen festen Punkt eines Kontinuums ein in diesem Element übertragener Spannungsvektor zugeordnet (Bild 1). Im rechtwinkligen, cartesischen Koordinatensystem x_1, x_2, x_3 werden den positiven Koordinatenrichtungen die Vektoren T_1, T_2, T_3 zugeordnet, welche den «Tensor» T bilden. Der «Tensor» T kann in der allgemein bekannten Matrizenform

$$(1) \quad T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}.$$

oder in der Form

$$(2) \quad T = T_{ij}$$

wobei i und j die Werte 1 bis 3 durchlaufen, geschrieben werden.

Der Begriff Tensor kann jedoch auch allgemeiner definiert werden. So wie ein Vektor aus Skalaren und ein «Tensor» aus Vektoren gebildet werden kann, kann ein höherer Tensor aus einem oben beschriebenen «Tensor» gebildet werden, indem jeder Koordinatenrichtung ein solcher «Tensor» zugeordnet wird. Es ist daher zweckmäs-