

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 Teilchen können um so tiefer in das Plasma eindringen, je schneller sie sind. Da aber mit wachsender Geschwindigkeit der Neutralisationsgrad der positiven Ionen abnimmt, sinkt auch der Wirkungsgrad der Heizung. Für große Plasmaexperimente wie ITER, bei denen große Eindringtiefe erwünscht ist, sind positive Ionenstrahlen daher ungeeignet. Man will deshalb negative Ionen nutzen, deren Neu-

tralisationsgrad energieunabhängig ist. Ihre Herstellung ist allerdings schwieriger als die positiver Ionen, weil das zusätzliche Elektron des negativen Wasserstoff-Ions nur schwach gebunden ist. Injektoren mit negativen Ionen werden an mehreren Laboratorien entwickelt, unter anderem für ITER in einer Zusammenarbeit zwischen CEA Cadarache und IPP.

Experimenttypen

Die Fusionsforschung konzentriert sich gegenwärtig auf zwei verschiedene Experimenttypen, den Tokamak und den Stellarator, die beide im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik untersucht werden.

Der Tokamak

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

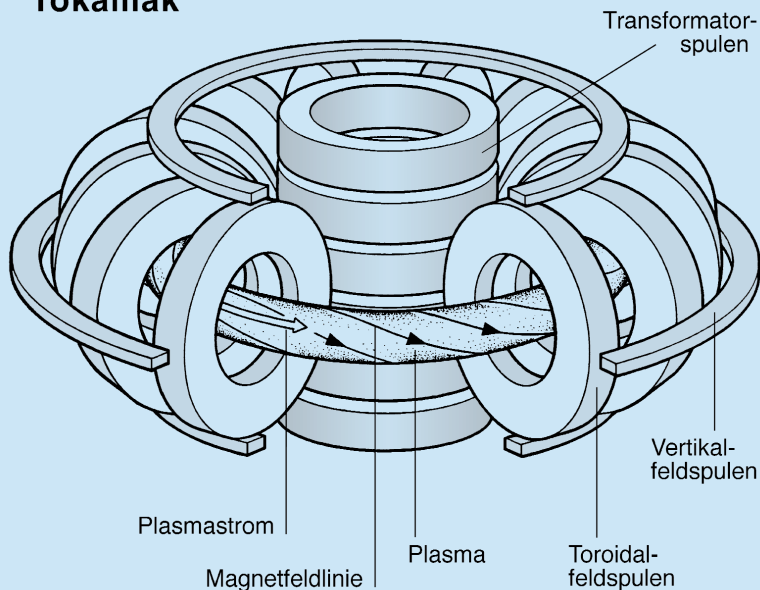
wird die zum Einschluss des Plasmas nötige Verdrillung der Feldlinien und der Aufbau magnetischer Flächen erreicht.

Wenn sich die Feldlinien auf den ineinander geschachtelten 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 (siehe Abbildung Seite 11).

Außer dem Toroidalfeld und dem Feld des Stromes benötigt der Tokamak noch ein drittes, vertikales Feld, das die Lage des Stromes im Plasmagefäß fixiert. Obwohl der Strom im Tokamak vorwiegend benötigt wird, um das einschließende Magnetfeld zu erzeugen, hat er noch eine zweite Funktion: Er sorgt auch für eine wirksame Anfangsheizung des Plasmas (siehe Abschnitt: Stromheizung).

Der Plasmastrom wird durch eine Trans-

Tokamak



Die Skizze eines Tokamaks zeigt die Transformator-, Toroidal-feld- und Vertikal-feldspulen sowie den Plasmaström, die zusammen das Magnetfeldsystem eines Tokamaks erzeugen.

formatorschleife induziert, die in der Achse des Torus angeordnet ist. Wegen des Transformators arbeitet ein Tokamak nicht kontinuierlich, sondern gepulst: In einem Transformator kann nur für eine beschränkte Zeit ein ansteigender Strom in der Primärwicklung erzeugt und damit ein Strom im Plasma getrieben werden. Danach muss der Transformator „entladen“ und der Strom von neuem hochgefahren werden. Bei einem späteren Tokamak-Kraftwerk kann man sich Pulszeiten von etwa

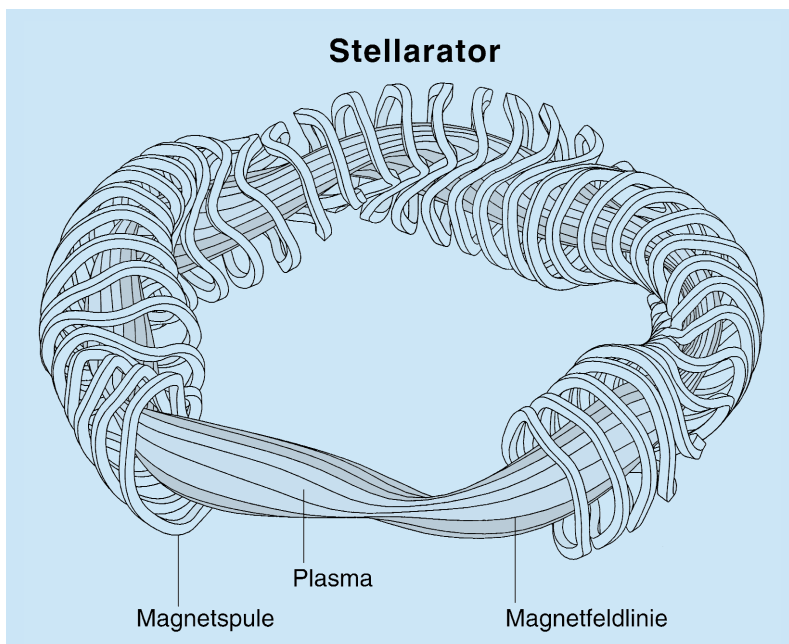
einer Stunde vorstellen. Da jedoch ein Kraftwerk aus technischen Gründen kaum gepulst betrieben werden darf, werden Methoden untersucht, einen kontinuierlichen Strom - zum Beispiel durch Hochfrequenzwellen oder den sogenannten „Bootstrap-Strom“, der durch Druckunterschiede im Plasma entsteht - zu erzeugen.

Der Stellarator

Stellaratoren können - anders als Tokamaks - von vornherein im Dauerbetrieb arbeiten: In einem Stellarator wird die schraubenförmige Verdrillung der Feldlinien um die Torus-Seele ausschließlich durch äußere Spulen erzeugt. Ein Stellarator kommt also ohne einen Längsstrom im Plasma und damit ohne Transformator aus. Er kann daher im Prinzip stationär arbeiten. Stromgetriebene Instabilitäten (Plasmaabbrüche) können nicht auftreten und auch ein Vertikalfeld - wie beim Tokamak - zur Lageregelung des Plasmaströms ist nicht nötig. In einem Stellarator wird der magnetische Käfig durch ein einziges Spulensystem erzeugt. Der Verzicht auf den ringförmigen Plasmaström bedeutet jedoch die Aufgabe der bei den Tokamaks vorhandenen Axialsymmetrie; Plasma und Magnetspulen besitzen eine kompliziertere Form. Durch die Aufgabe der Axialsymmetrie gewinnt man aber auch zusätzliche Freiheiten, das Magnetfeld zu formen und damit seine Eigenschaften zu optimieren. Für ein Fusionskraftwerk könnten Stellaratoren eine technisch einfachere Lösung sein als Tokamaks. Auf theoretischem Wege ist diese Frage nicht zu beantworten, sie experimentell zu entscheiden, ist das Ziel der WENDELSTEIN-Experimente des IPP.

Auch das Magnetfeld des Stellarators besitzt magnetische Flächen und kann mit und ohne Verschönerung erzeugt werden. Die sogenannte „**Rotationstransformation**“ gibt an, wie oft sich eine Feldlinie bei einem Umlauf im Gefäß um die Seele gedreht hat. Ist dies eine rationale Zahl, bedeutet dies, dass die Feldlinie wieder in sich zurückläuft. Beispielsweise bedeutet eine Rotationstransformation von $1/3$, dass die Feldlinie nach drei Umläufen um den Torus in sich zurückläuft. Ist die Rotationstransformation nicht rational, laufen die Feldlinien beliebig oft auf ihrer magnetischen Fläche um, ohne jemals wieder an dieselbe Stelle im Torus zu kommen. In

Stellarator



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.

einem Magnetfeld ohne Verscherung hätten alle Feldlinien die gleiche Rotationstransformation und schlossen 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-Anlagen des IPP. Für Experimente dieser Art ist zum Beispiel der Stellarator WENDELSTEIN 7-AS mit zusätzlichen Toroidalfeldspulen ausgerüstet, mit denen die Feldverdrillung verändert werden kann.

Plasmaentladungen

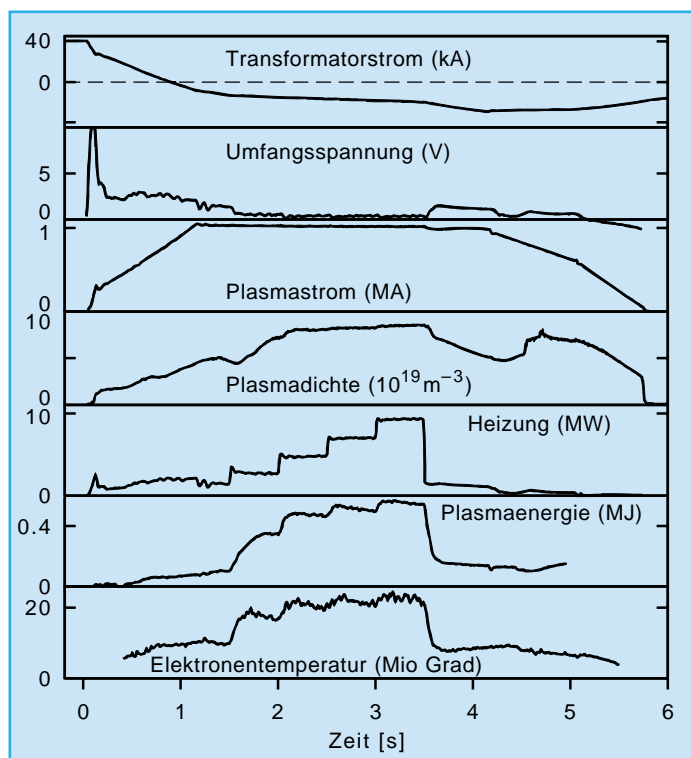
Die Fusionsexperimente in der gegenwärtigen Phase der plasmaphysikalischen Grundlagenforschung arbeiten mit kurzen Plasmaentladungen von 1 bis 20 Sekunden Dauer. Während dieser Zeit haben sich die wesentlichen Vorgänge im Plasma eingependelt, so dass ein weitgehend unveränderlicher Zustand erreicht ist. Längere Entladungen würden - wegen des hohen Stromverbrauchs der Magnetspulen - die Experimente unnötig verteuern. In einem späteren Tokamakkraftwerk rechnet man jedoch mit Entladungsdauern bis zu einer Stunde, ein Tokamak mit nicht-induktivem Stromtrieb bzw. ein Stellaratorkraftwerk würden im Dauerbetrieb arbeiten. Diese Anlagen werden dann aber supraleitende Magnetspulen besitzen, die wesentlich weniger Leistung verbrauchen als die heute überwiegend genutzten normalleitenden Kupferspulen.

Der Ablauf eines Experimentiertages orientiert sich an einem vorher festgelegten wissenschaftlichen Programm. Experimentleiter und technische Mannschaft sorgen zusammen mit den zurarbeitenden Gruppen für die Stromver-

sorgung, Plasmaheizung und Datenaufnahme dafür, dass die geplante Folge von Plasmaentladungen abgearbeitet wird. Die zahlreichen Physiker, die die Plasmadiagnostiken betreuen, sind für das Sammeln möglichst umfangreicher Daten verantwortlich, die zunächst zwischengespeichert werden. Die endgültige Archivierung und vor allem die Auswertung geschieht erst im Anschluss an die experimentelle Arbeit.

Ablauf einer Tokamakentladung

Der typische Ablauf einer Tokamakentladung im Experiment ASDEX Upgrade ist in der Abbildung unten dargestellt. Sie zeigt die zeitliche Entwicklung wichtiger physikalischer Größen - Transformatorstrom, Umfangsspannung, Plasmastrom, Plasmadichte, Plasmaheizung, Energieinhalt des Plasmas und Plasmatemperatur: Vor der Entladung herrscht im Plasmagefäß ein Hochvakuum von 10^{-8} Millibar. Durch Einschalten der Stromversorgungen wird zunächst das äußere Magnetfeld aufgebaut sowie der Strom in der Transformatorspule hochgefahren, die später im Plasma den Plasmastrom induzieren soll. Kurz vor Beginn der Entladung wird Wasserstoffgas in das Gefäß eingelassen, der Druck steigt auf einige 10^{-5} Millibar. Anschließend wird der Transformator entladen, d.h. der Strom langsam heruntergefahren. Die damit verbundene magnetische Flussänderung induziert eine Umfangsspannung von etwa zehn Volt, die



Ablauf einer typischen Entladung in einem Tokamak: Gezeigt ist die zeitliche Entwicklung von Transformatorstrom, Umfangsspannung, Plasmastrom, Plasmadichte, Plasmaheizung, Energieinhalt und Plasmatemperatur.

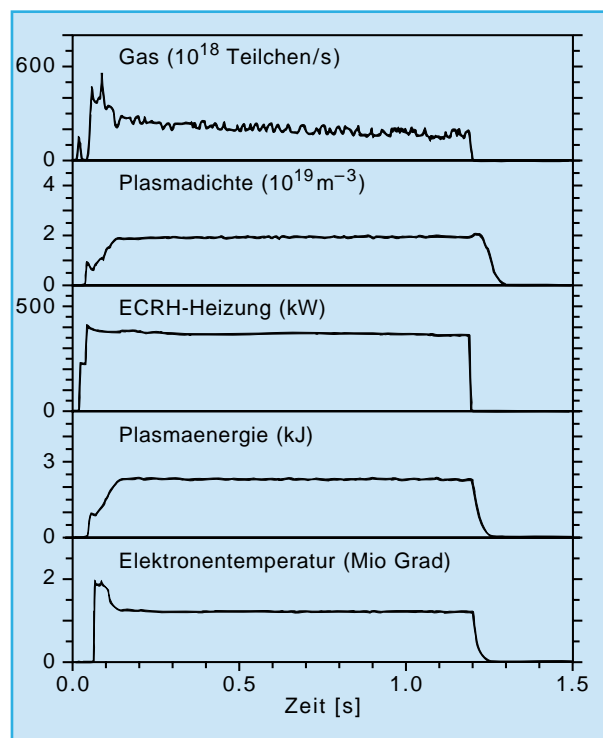


Kontrollraum der Fusionsanlage WENDELSTEIN 7-AS. Von hier aus wird der Ablauf der Experimente gesteuert.

die Entladung startet: Das Wasserstoffgas wird ionisiert und verwandelt sich in ein Plasma, das durch feedback-kontrollierte Regelung der Plasmalage, des Plasmaquerschnitts und des Plasmastromes aufgebaut wird. Der Stromaufbau geschieht langsam, um Instabilitäten zu vermeiden. Angepasst an den Stromanstieg wird auch die Plasmadichte durch Gaseinlass von außen auf den gewünschten Wert gebracht. An die Phase des Stromaufbaus schließt sich die Plateauphase mit konstantem Plasmastrom an, in der mit Beginn der Plasmaheizung die eigentlichen Experimente ablaufen.

Das Ende der Entladung ist i.a. bestimmt

Typische Stellarator-Entladung: Gezeigt ist die zeitliche Entwicklung von Gasfüllung, Plasmadichte, Plasmaheizung, Energieinhalt und Plasmatemperatur. Ein Plasmastrom ist nicht notwendig.



durch den Transformator, der den Plasmastrom erzeugt. Ist dort das Stromminimum erreicht - in der Abbildung nach vier Sekunden - dann ist keine weitere Flussänderung mehr möglich: der Strom im Plasma wird heruntergefahren. In der Wartezeit zwischen zwei Entladungen - rund zehn Minuten - werden die stromliefernden Generatoren wieder aufgeladen.

Ablauf einer Stellaratorentladung

In einer Stellaratorentladung (siehe Abbildung unten) wird zunächst - durch Einschalten des Spulenstroms - das Magnetfeld aufgebaut, das seine Einschlusseigenschaften bereits ohne Plasma besitzt. Wie beim Tokamak wird kurz vor der Entladung Wasserstoffgas in das leere Gefäß eingelassen. Das Plasma wird jedoch nicht durch Induktion einer Umfangsspannung und daraus folgendem Plasmastrom erzeugt, sondern durch Einstrahlung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen. Die Hochfrequenzwellen beschleunigen und heizen die Elektronen im Wasserstoffgas bzw. im entstehenden Plasma, die dann durch Stöße das Gas vollständig ionisieren.

Da im Unterschied zum Tokamak der langsame und kontrollierte Stromaufbau entfällt, bestimmt nur der Dichteaufbau die Anfangsphase der Entladung, so dass rasch die für die Plasmaexperimente entscheidende Plateauphase erreicht wird. Zur Regelung ist lediglich auf die richtige Gas-Nachfüllrate zu achten, um die Plasmadichte stabil zu halten. Um kleine, vom Plasma selbst erzeugte Ströme - den sogenannten „Bootstrap-Strom“ - zu kompensieren, benutzen einige Stellaratoren, zum Beispiel auch WENDELSTEIN 7-AS, noch einen Transformator. Vollständig optimierte Anlagen wie WENDELSTEIN 7-X können jedoch auf diese Steuerung verzichten. Allein die Dauer der Heizung bestimmt das Ende der Entladung, was im Prinzip den Dauerbetrieb möglich macht.