

Plasmaphysik – eine Kurzeinführung

G. Janeschitz, W. Bahm, FUSION

Der Einschluss des Plasmas

Wie im vorhergehenden Kapitel erwähnt, muss das Plasma eine Temperatur von 100 Millionen Grad erreichen, um eine positive Energiebilanz zu ermöglichen. Solch ein Plasma kann nicht in einem normalen Gefäß eingeschlossen werden. Im Folgenden werden mehrere Möglichkeiten kurz erläutert, wobei das Tokamak-Prinzip, nach dem ITER gebaut werden wird, im Detail erklärt wird.

Der Trägheitseinschluss

Beim Trägheitseinschluss wird ein einige Millimeter großes Kügelchen aus gefrorenem D-T-(Deuterium-Tritium)-Gemisch, das meist von einer gefrorenen Deuterium- oder Kohlenstoffhülle oder von einem durch eine Goldschale gebildeten Hohlraum umgeben ist, durch den Beschuss mit Lasern oder energetischen Teilchen an der Oberfläche sehr rasch aufgeheizt, wodurch ein Teil der Masse explosionsartig verdampft. Durch die entstehende energiereiche, nach innen gerichtete Druckwelle, die durch den Rückstoß der verdampfenden Materie entsteht, wird der Rest des Kügelchens auf mehrere 1000-fache Dichte komprimiert, wodurch die Temperatur auf bis zu 120 Millionen Grad ansteigt. Ist die so hervorgerufene Schockwelle groß genug und sehr homogen, dann werden im Inneren der kleinen D-T-Kugel kurzzeitig die Fusionsbedingungen erfüllt, was zu einer kleinen nuklearen Explosion führt. Wie in einem Automotor, wo bei jeder Kolbenbewe-

gung ein Gasgemisch explodiert, kann man sich vorstellen, dass eine aufeinander folgende Kette von solchen kleinen Nuklearexplosionen (etwa 3-4 pro Sekunde) zur Energieerzeugung genutzt werden kann. Dieser Zweig der Fusionsforschung hat allerdings auch eine militärische Komponente und wird derzeit hauptsächlich in den USA, in Japan und in Frankreich verfolgt.

Der magnetische Einschluss des Plasmas

Beim magnetischen Einschluss macht man sich zu Nutze, dass die Plasmateilchen (Ionen und Elektronen) geladene Teilchen sind und sich daher in einem Magnetfeld aufgrund der Lorentzkraft nur entlang der Feldlinien bewegen können (Abb. 1). Dabei gyrieren die Teilchen je nach ihrer Energie und Masse auf mehr oder weniger großen Spiralbahnen um die Feldlinien. Die erfolgreichsten magnetischen Einschlusskon-

zepte sind jene mit toroidalem Magnetfeld, also ein in einem Torus geschlossenes Feld. Ein solches toroidales Feld alleine kann allerdings das Plasma nicht einschließen und zwar aus folgendem Grund: Da in einem Torus das Magnetfeld von innen nach außen schwächer wird, sehen die Teilchen auf ihren Spiralbahnen stärkere und schwächere Feldstärken, sodass ihre Bahnen nicht mehr kreisförmig sind, sondern im äußeren Teil einen größeren Durchmesser haben als im inneren Teil ihrer Bahn. Weil Elektronen und Ionen mit, beziehungsweise gegen den Uhrzeigersinn um die Feldlinien gyrieren, führt der Gradient im Magnetfeld und die daraus resultierenden nicht kreisförmigen Bahnen zu einem vertikalen Auseinanderdriften der Elektronen und Ionen. Dies führt wiederum zu einem starken vertikalen elektrischen Feld, welches das Auseinanderdriften der Teilchen zu verhindern sucht. Wenn allerdings

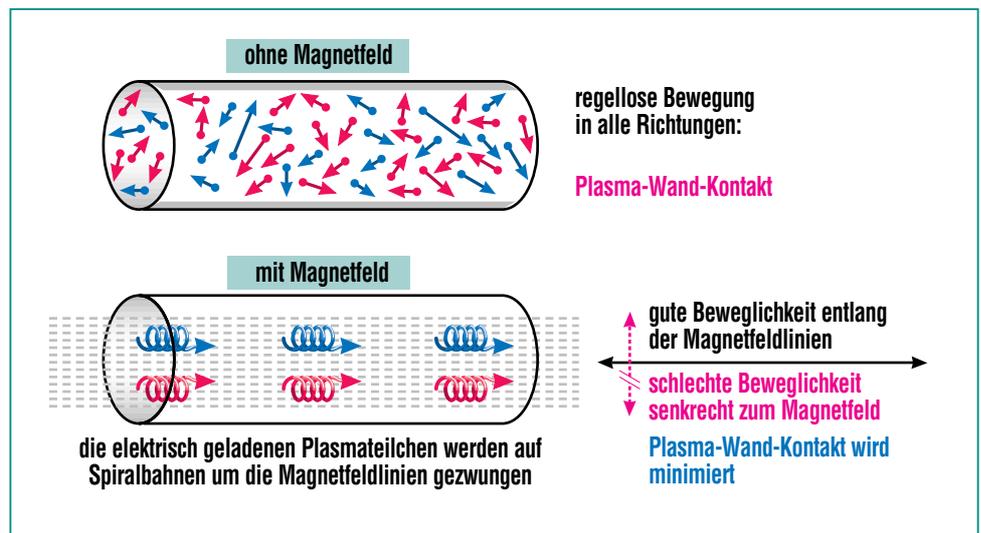


Abb. 1: Magnetischer Einschluss: Durch Anlegen eines Magnetfeldes parallel zur Zylinderachse werden die geladenen Teilchen auf spiralförmige Bahnen längs der Magnetfeldlinien gezwungen. [Quelle: Forschungszentrum Jülich]

ein elektrisches Feld und ein magnetisches Feld rechtwinklig zueinander stehen, entsteht eine Kraft im rechten Winkel zu beiden Feldern, also in diesem Fall radial nach außen gerichtet. Diese Kraft hätte zur Folge, dass die Teilchen innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde aus dem Magnetfeld hinausdriften und so einen kon-

trollierten Einschluss des Plasmas unmöglich machen würden. Dieser Schönheitsfehler des toroidalen magnetischen Einschlusses lässt sich durch ein spiralförmig um den Torus laufendes Magnetfeld beheben, wodurch sich die oben beschriebenen Driften ausmitteln. In solch einem Fall entsteht dann auch kein elektrisches Feld und die Plasmateilchen bleiben im Magnetfeld eingeschlossen.

Wie kann man nun ein solches spiralförmiges magnetisches Feld erzeugen? Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten, von welchen zwei sehr erfolgreich entwickelt wurden.

Das Stellarator-Prinzip

Dieses Prinzip ist gekennzeichnet durch komplex geformte Spulen, die ein spiralförmiges Magnetfeld generieren. Während die ersten Stellarator-Modelle noch mit planaren toroidalen Spulen ausgestattet waren und zusätzlich spiralförmige Spulen um das Vakuumgefäß gewickelt wurden, haben moderne Stellaratoren wie W7X (Abb. 2), der derzeit in Greifswald in Bau ist, nicht-planare Toroidalfeldspulen, die alleine ein helikales Magnetfeld generieren.

Das Tokamak-Prinzip

Bei diesem Prinzip wird das spiralförmige Feld durch zwei Komponenten erzeugt: nämlich aus einem toroidalen Feld B_t , das durch Spulen von außen erzeugt wird und durch ein zur Torusachse konzentrisches, also poloidales Magnetfeld B_p , das durch ein im Plasma induzierten Strom erzeugt wird (Abb. 3). Dieser Plasmastrom wird durch eine Trans-

formatorwindung im Zentrum des Torus erzeugt, für die das Plasma die Sekundärwindung darstellt. Da das Plasma, wenn es vollständig ionisiert ist, einen sehr geringen elektrischen Widerstand hat, können mit einigen Volt Spannung, die durch den Transformator induziert werden, Millionen Ampere Strom im Plasma erzeugt werden. Die Überlagerung dieser beiden Magnetfelder generiert das erforderliche helikale Magnetfeld.

Das Tokamak-Prinzip, das in den 60-er Jahren in Russland erfunden wurde, ist derzeit das am weitesten entwickelte Konzept zum magnetischen Einschluss und daher die Basis für den nächsten Schritt in der Fusionsforschung, das ITER-Projekt. Im Folgenden wird daher nur noch der Tokamak, was soviel wie maximaler Strom heißt, behandelt. Der im Plasma induzierte Strom wird allerdings durch magneto-hydrodynamische Instabilitäten begrenzt. Andererseits steigt aber die Plasmaeinschlusszeit praktisch linear mit dem Plasmastrom an, sodass diese Grenze soweit wie möglich ausgenutzt bzw. so weit wie möglich erhöht wird. Dies wird durch eine Elongation des Plasmas mit Hilfe der Vertikalfeldspulen erreicht (Abb. 3 und Abb. 4). Die Elongation erhöht die Plasmaquerschnittsfläche, daher kann nun ein größerer Strom bei gleichem spezifischen Strom pro Einheitsquerschnittsfläche fließen. Die äußerste geschlossene Magnetflussfläche, also jene, die gerade noch nicht in die separate Divertorkammer umgeleitet wird, nennt man Separatrix. Diese trennt also

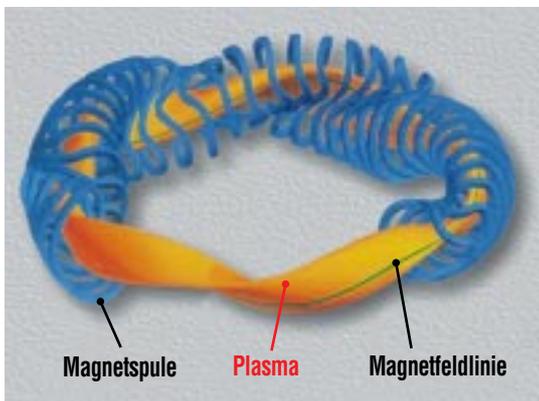


Abb. 2: Das Stellarator-Prinzip: Das helikale Magnetfeld wird durch komplex geformte Magnetspulen erzeugt.

[Quelle: Forschungszentrum Jülich]

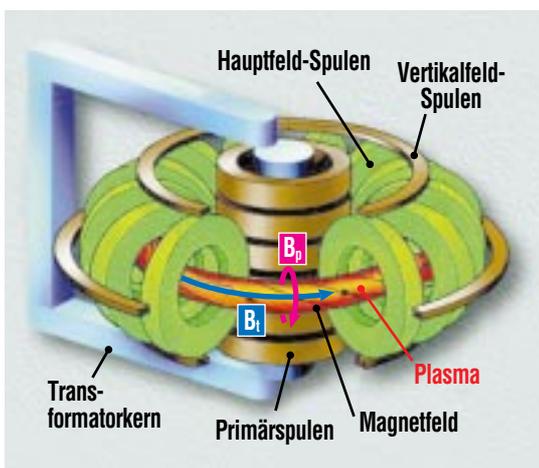


Abb. 3: Das Tokamak-Prinzip: Das helikale Magnetfeld wird durch die Überlagerung des toroidalen Magnetfeldes B_t und des poloidalen Magnetfeldes B_p , das durch den im Plasma fließenden Strom hervorgerufen wird, erzeugt.

[Quelle: Forschungszentrum Jülich]

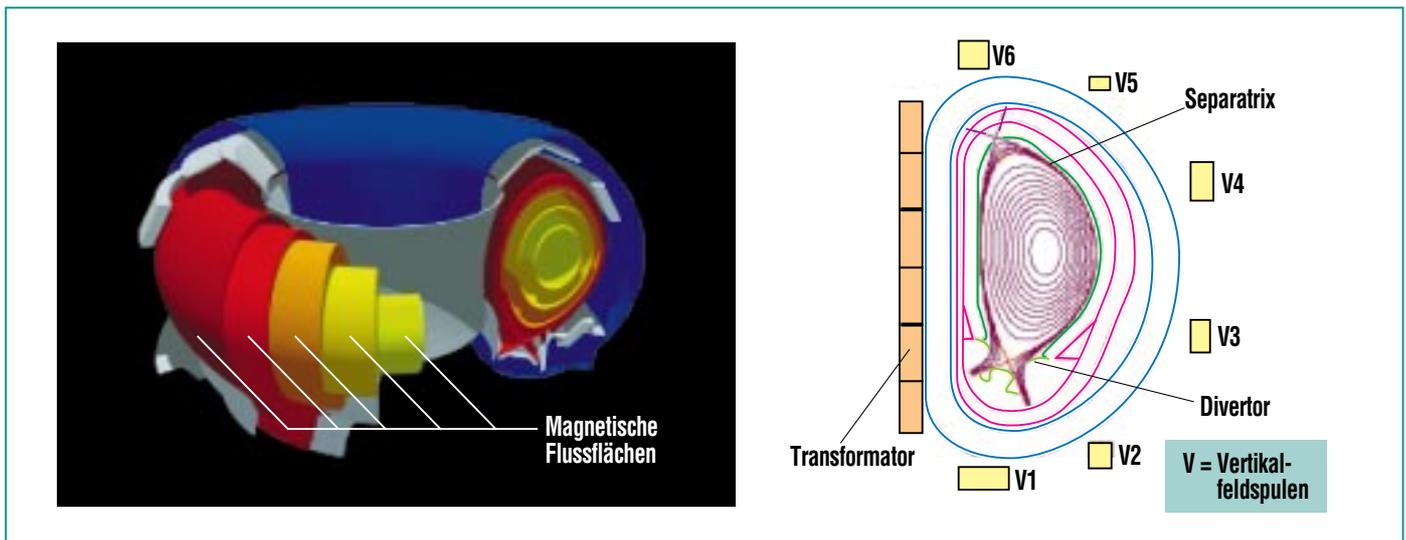


Abb. 4: Das Plasma eines modernen Tokamaks ist elongiert und hat einen Divertor (untere separate Kammer, in der die Plasma-Wand-Wechselwirkung hauptsächlich stattfindet). Die Separatrix (letzte geschlossene Flussfläche) trennt das Hauptplasma von der Scrape-off Layer und dem Divertorplasma. Im linken Bild sind die magnetischen Flussflächen zu sehen, im rechten Bild ein Querschnitt durch einen Tokamak, der die Transformatorspulen und Poloidalfeldspulen zeigt.

[Quelle: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching].

das Hauptplasma von dem so genannten Scrape-off Layer und dem Divertorplasma (Abb. 4). Der Name Divertor gründet sich auf der Tatsache, dass die aus dem Plasma emittierten Energie- und Teilchenströme zum Großteil in die Divertorkammer umgeleitet werden und daher nicht auf die Gefäßwand treffen können. Aber auch der Elongation sind in der Nähe des Faktors 2 Grenzen durch vertikale Plasmastabilitäten gesetzt.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Plasma-Wand-Wechselwirkung (PWW) [1]. Da die Plasmateilchen und die Energie nur für eine bestimmte Zeit (Sekunden) im Plasma verweilen (warum das so ist, wird unten weiter erklärt) gibt es eine permanente Strömung von Teilchen und Energie, die das Plasma verlässt. Dieser Strom energetischer Teilchen

würde unkontrolliert auf alle dem Plasma zugewandten Oberflächen treffen und dort Erosion hervorrufen. Die dadurch erodierten Metall- oder Kohlenstoff Atome würden ins Plasma diffundieren, ionisiert werden und Strahlungsverluste und damit Energieverluste hervorrufen. Zusätzlich würden sie zu einer Verdünnung der für die Fusion relevanten Plasmabestandteile führen, und zwar proportional zu ihrer Ladungszahl. Das heißt, dass zum Beispiel für ein Kohlenstoffatom 6 Deuteronen oder Tritonen das Plasma verlassen müssen, was natürlich sehr schnell zu einer drastischen Reduktion der Fusionsprozesse führen kann.

Ein zusätzlicher negativer Effekt ist das hohe „Recycling“, das in der Nähe des heißen Plasmas stattfindet und das ebenfalls zur Abkühlung des Plasmarandes

führt. Recycling bedeutet, dass energetische Ionen aus dem Plasma auf die Wand treffen, ihre kinetische- und Ionisationsenergie (13,6 eV/Ion) abgeben, dann als neutrale Deuterium- oder Tritiumatome wieder ins Plasma diffundieren, dort ionisiert werden und zum Großteil (90 %) wieder an die Wand gespült werden usw. Ein hohes Recycling bedeutet daher einen zusätzlichen lokalen Energieverlustkanal.

Um dieses Problem in den Griff zu bekommen wird das Magnetfeld des Tokamaks durch zusätzliche Poloidalfeldspulen, also Spulen die toroidal angeordnet sind (siehe Abb. 3 und Abb. 4), in der Weise verändert, dass Feldlinien, die in der Nähe des Vakuumgefäßes verlaufen, nicht mehr helikal um den Torus herumführen sondern nach etwa $1\frac{1}{2}$ toroidalen Umdrehungen in die

Divertorkammer geleitet werden. Neben der nun stark reduzierten Wahrscheinlichkeit für erodierte Atome, das Plasma zu erreichen, entsteht in dieser separaten Divertorkammer durch Recycling eine höhere Plasmadichte und dadurch eine niedrigere Temperatur [2]. Dadurch können die dort anfallenden neutralisierten Gase (D, T, He, usw.), zu denen auch die Heliumasche des Fusionsprozesses gehört, effizient abgepumpt werden. Ein zweiter wichtiger Vorteil, vor allem für den Plasmaeinschluss (siehe unten), ist eine höhere Temperatur des Hauptplasmarmandes, die durch die Reduktion von Verunreinigungen sowie die Reduktion des Recyclings am Hauptplasmarand hervorgerufen wird.

In einem Tokamak ist also neben den Toridalfeldspulen und den Transformatorspulen auch ein Satz von Poiloidalfeldspulen zur Elongation des Plasmas, zur vertikalen und horizontalen Stabilisierung des Plasmas sowie zur Erzeugung des Divertors notwendig.

Die Tokamak-Physik

Die Tokamak Physik ist ein sehr kompliziertes Problem, das allerdings inzwischen im Großen und Ganzen verstanden ist, und für das es auch Modelle gibt, mit denen man relativ genaue Vorhersagen zu treffen vermag. Eines der Hauptprobleme ist, zu verstehen, weshalb der Einschluss der Teilchen und der Energie in einem

toroidalen Magnetfeld nicht klassisch durch Stöße, oder zumindest neo-klassisch unter Einbeziehung toroidaler Effekte, (z.B. Feldlinienkrümmung) beschrieben werden kann. Dafür gibt es eine Reihe von Gründen: Durch die elektromagnetischen Eigenschaften des Plasmas gibt es elektrostatische und elektromagnetische Fluktuationen, sowie Ausgleichsströme, die entlang der magnetischen Feldlinien und da insbesondere entlang rationaler Flussflächen fließen. Rationale magnetische Flussflächen oder Feldlinien sind solche, die sich nach einem bis einigen toroidalen Umläufen wieder in sich selbst treffen und daher prädestiniert für elektrische Ströme sind, die wiederum durch den kleinen Widerstand entlang von Feldlinien nur geringfügige treibende Kräfte benötigen. Solche Ströme erzeugen Störungen in der Magnetfeldtopologie und führen daher zu einer Verschlechterung des Plasmaeinschlusses, oder im Extremfall zum völligen Zusammenbruch des Plasmas (Disruption). Zusätzlich zu den oben angeführten Effekten rotiert das Plasma in toroidaler und poloidaler Richtung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die abhängig vom Radius und von den treibenden Kräften sind.

Vor allem die elektrostatischen und elektromagnetischen Fluktuationen führen zu Turbulenzerscheinungen die eine Art radiale Jets, so genannte „Avelanges“ bilden und daher Energie und Teilchen recht effizient vom Plasma-Zentrum zum Plasma-Rand transportieren. Toroidale und poloidale Rotationsprofile, die im

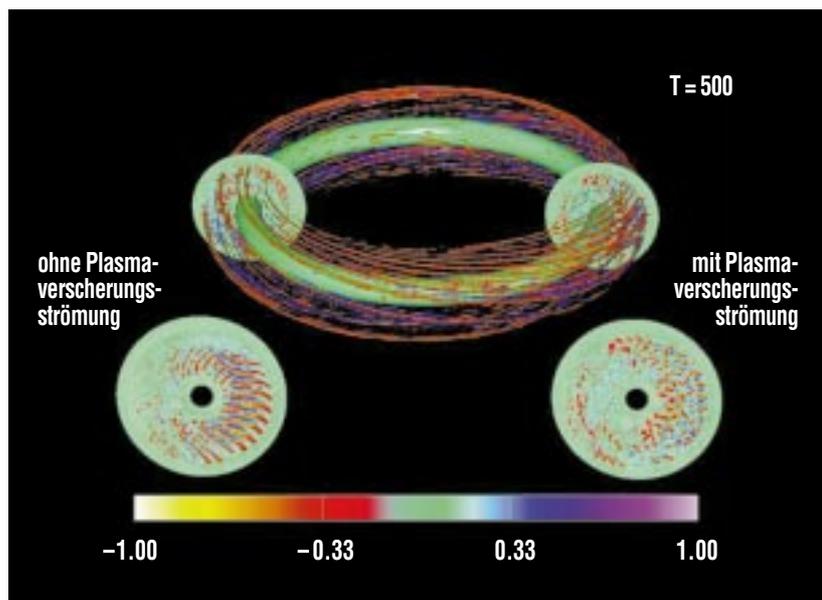


Abb. 5: Turbulenzstrukturen können durch Verscherung poloidaler Flüsse, die wiederum durch Impulszuführung, radiale elektrische Felder oder durch die Turbulenz selbst erzeugt werden, aufgelöst werden. Auf der linken Seite sind die durch die Turbulenz erzeugten Avelanges zu sehen, die rechte Seite zeigt weitgehend aufgelöste Turbulenzstrukturen, was zu einer starken Verbesserung des Energie- und Teilchen-Einschlusses führt.

[Quelle: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching]

Plasma aufgrund von Impulszuführung (z.B. Neutralteilchen-Injektion), oder aufgrund radialer elektrischer Felder existieren, oder durch die Turbulenz selbst hervorgerufen werden, können diese Turbulenzstrukturen zerstören und so den Energie- und Teilchen-Einschluss wieder verbessern (Abb. 5). Allerdings bleibt auch der beste zu erzielende Energieeinschluss bei stark reduzierter Turbulenz weit hinter dem neo-klassisch zu erwartenden Einschluss zurück. Eine Ausnahme bilden so genannten Transportbarrieren, die nur in einem kleinen Teil des Plasmas existieren, wo durch die Kombination von magnetischer Feldlinienverschönerung mit einem radialen elektrischen Feldgradienten, die zu einem poloidalen Rotationsgradienten führt, eine vollständige Stabilisierung der Turbulenz erzielt wird.

Die Turbulenzerscheinungen selbst, die den Plasmatransport bestimmen, hängen wiederum vom Plasmazustand ab. Zum Beispiel die dominierende Turbulenz der Ionen („Ion Temperature Gradient Modes“: ITG) zeigt ein Schwellenverhalten, wobei die Turbulenz bei einem bestimmten Temperaturgradienten einsetzt, der wiederum von der Temperatur selbst abhängt [3]. Oberhalb dieses kritischen Gradienten wird der Plasma Einschluss schlecht. Daher versucht man, den kritischen Gradienten so hoch wie möglich zu machen, was vor allem durch eine hohe Temperatur am Plasmarand erzielt werden kann. Diese hohe Randtemperatur stellt sich ein, wenn die Turbulenz in einem Bereich von etwa

5% des Plasmaradius innerhalb der letzten geschlossenen Flussfläche (Divertorfläche oder „Separatrix“) durch ein radiales elektrisches Feld und durch das an dieser Stelle stark verscherte Magnetfeld stabilisiert wird, wobei das elektrische Feld durch den Druckgradienten selbst entsteht. Dieses Regime, das man „H-mode“ nennt, stellt sich ein, wenn eine gewisse Plasmaheizleistung überschritten wird, wenn also der Druckgradient am Plasmarand eine gewisse Größe erreicht und der dann sich selbst verstärkende Prozess – höherer Druckgradient – höheres elektrisches Feld –

Turbulenz Stabilisierung – höherer Druckgradient – usw. einsetzt. In Abb. 6 kann man eine empirische Skalierung der Energieeinschlusszeit im H-mode sehen, bei der die Hauptparameter des Plasmas (z.B.: Strom, Magnetfeld, Elongation, Aspektverhältnis – Maschinenradius / Plasmaradius – usw.) anhand experimenteller Ergebnisse skaliert werden. Diese Skalierungen wurden und werden verwendet um neue experimentelle Maschinen auszulegen wobei sie heute bereits von komplexen Turbulenzmodellen, wie in Abb. 5 zu sehen, zunehmend verdrängt werden [4].

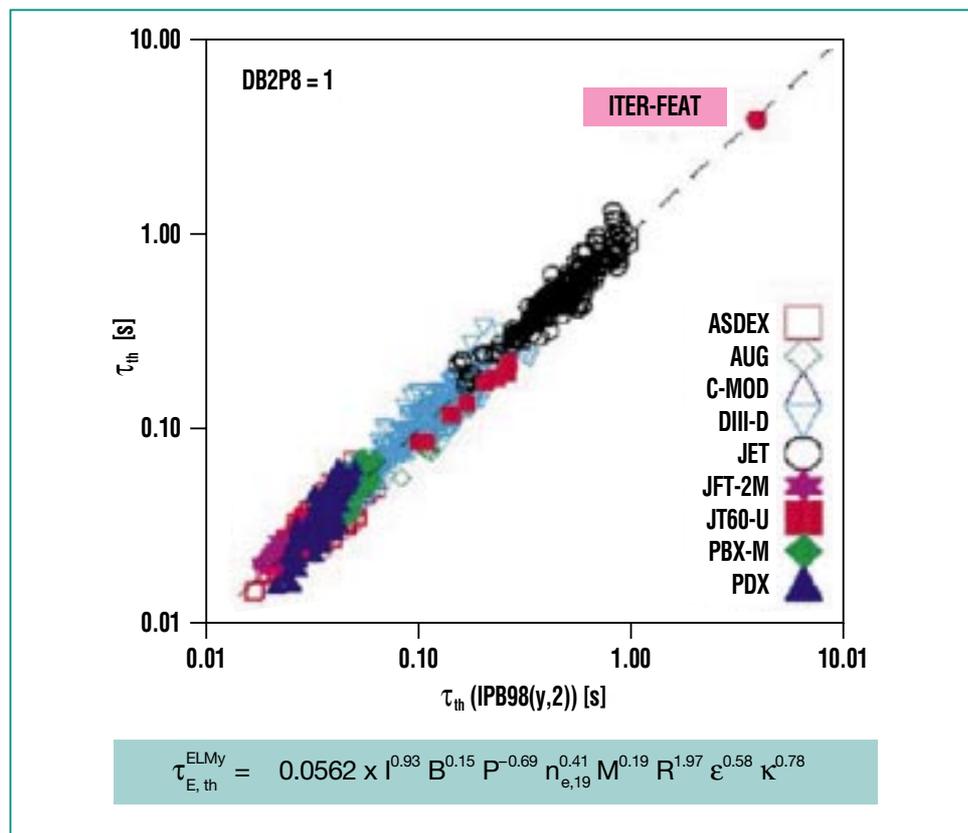


Abb. 6: Empirische Skalierung der Energieeinschlusszeit im H-mode (Formel), aufgetragen gegen die experimentell gemessene Energieeinschlusszeit für alle in der Welt existierenden Tokamaks. Man kann erkennen, dass die Extrapolation zu ITER etwa einen Faktor 4 bis 5 beträgt. [Quelle: ITPA (International Tokamak Physics Activity)-Confinement Group]

Eine neue Herausforderung sind die sogenannten „Advance Tokamak“-Plasmen bei denen durch Manipulation des Stromprofils eine höhere Energieeinschlusszeit sowie ein Druckprofil erzeugt werden, welches zu hohen Anteilen selbst generierten Stroms („Bootstrap Current“) führt. Dies kann zusammen mit externem nicht-induktiven Stromtrieb durch Plasma-Heizsysteme zu einem stationären Betrieb führen.

Die zukünftige Forschung an den existierenden Tokamaks und an dem demnächst in Bau gehenden Großexperiment ITER wird zeigen ob diese neuen Regime eine ökonomische Energieerzeugung in einem zukünftigen Fusionsreaktor ermöglichen werden. Eine ausführliche Darstellung der hier kurz erläuterten Plasmaphysik findet sich in [5]. Es ist anzunehmen, dass eine Entscheidung über den ITER-Stand-

ort innerhalb der ersten Hälfte des Jahres 2004 fallen wird, so dass ITER etwa im Jahr 2015 den Plasmabetrieb aufnehmen könnte. Das Forschungszentrum wird sich federführend an der Konstruktion und der Herstellung einiger Komponenten beteiligen und den Einbau und die Inbetriebnahme begleiten.

Literatur

- [1] G. Janeschitz, et.al.
Journal of Nucl. Materials 290 – 293
(2001) 1-11
- [2] P.C. Stangeby, G.M. McCracken,
Nucl. Fusion 30 (1990) 1225
- [3] M. Kotschenreuter, et.al.
Phys. Plasmas 2 2381 (1995)
- [4] G. Janeschitz, et.al.
Plasma Phys. Control. Fusion 44
(2002) A459-A471
- [5] M. Kaufmann,
Plasmaphysik und Fusionsforschung,
Teubner Verlag, 2003