

ELMs unter Kontrolle

PD Dr. Wolfgang Suttrop

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, D-85740 Garching

e-mail: suttrop@ipp.mpg.de

Neue Experimente an Fusions-Plasmen in Tokamaks demonstrieren die Kontrolle und Vermeidung von Instabilitäten am Plasmarand (“Edge Localised Modes”, ELMs) die aufgrund kurzzeitiger hoher thermischer Belastung die Lebensdauer der ersten Wand im geplanten Fusionsexperiment ITER beeinträchtigen können.

Die technische Nutzung der Fusion von Deuterium und Tritium zu Helium (bzw. Alpha-Teilchen) und Neutronen als Energiequelle erfordert ein heisses Plasma, mit Temperaturen von über 100 Mio. K. Die Herausforderung besteht darin, ein solches Plasma thermisch gut zu isolieren, so daß diese Bedingung für die Fusionsreaktion mit geringer Heizleistung erreicht wird und ein Fusionsreaktor wirtschaftlich arbeiten kann. Außerdem sollte die Abfuhr der Heizleistung durch Wärmeleitung nach außen gleichmäßig und verteilt auf eine möglichst große Fläche erfolgen, damit die umgebende erste materielle Wand nicht schmilzt oder durch übermäßige Erosion zerstört wird. Das Großexperiment ITER [1], dessen Baubeginn nun bei Cadarache in Südfrankreich bevorsteht, soll die Energieerzeugung durch Fusion nun praktisch demonstrieren und mit 50 MW externer Heizleistung 500 MW Fusionsleistung erzeugen. Damit wird sich ITER mit ca. 100 MW Leistung in den Alpha-Teilchen vorwiegend selbst heizen und auch der erste Fusionsreaktor sein, der unter realistischen Bedingungen die Materialien für die erste Wand erproben kann.

Um das Fusionsplasma zu erzeugen, bedient sich ITER des seit fünf Jahrzehnten bekannten Tokamak-Prinzips. Das Plasma wird in einem ringförmigen, axisymmetrischen Magnetfeld eingeschlossen, das teilweise durch außerhalb angebrachte Spulen und teilweise durch einen im Plasma induzierten elektrischen Strom erzeugt wird. Der hohe Druck im Plasmakern wird dabei durch $j \times B$ -Kräfte kompensiert, die das Plasma im Kraftgleichgewicht halten. Wie hoch der Plasmadruck, bzw. die Temperatur im heißen Plasmakern wird, hängt von der Heizleistung und der Wärmeisolation ab. Der Wärmetransport bestimmt letztlich die Abmessungen eines Fusionsreaktors: Je besser das Plasma eingeschlossen ist, desto kleiner kann die Maschine sein. Aufgrund der in sich geschlossenen Feldlinien wird der Einschluß nur durch den Transport senkrecht zum Magnetfeld bestimmt, und dieser wird in heißen Fusionsplasmen durch Turbulenz dominiert.

ITER macht sich zur Verbesserung des Wärmeeinschlusses eine Entdeckung zunutze, die bereits vor mehr als 20 Jahren am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching gemacht wurde: Das "High-confinement"-Regime (H-mode), bei dem die Turbulenz am Plasmarand durch eine verscherte $E \times B$ -Strömung unterdrückt wird. Dies führt zu einer schmalen Zone, in welcher der Druck zum Plasmainternen hin schnell ansteigt. Im Vergleich zur Situation ohne H-mode ist die im Plasma gespeicherte Energie etwa verdoppelt. Ein Fusionsreaktor mit vorgegebener thermischer Leistung kann mit H-mode Einschluß wesentlich kompakter sein als ohne.

Allerdings hat die Sache einen Haken: Der hohe Druckgradient am Plasmarand liefert freie Energie, die die Konfiguration kurzzeitig instabil machen kann. Es treten in der H-mode sog. "Edge Localised Modes" (ELMs) auf, die schnell anwachsen und für einige 100 Mikrosekunden den Teilchen- und Wärmeverlust aus dem Plasma stark erhöhen. Das Plasma kühlt am Rand schnell ab und wird dadurch wieder stabil. Dichte und Temperatur können sich danach am Plasmarand im Verlauf von mehreren zehn bis 100 ms wieder erholen, bevor ein neuer ELM auftritt und der gesamte Zyklus wieder von vorne beginnt.

Einerseits wird das Plasma durch die ELM-Verluste von Verunreinigungen befreit, zum Beispiel dem Reaktionsprodukt Helium, was durchaus wünschenswert ist. Andererseits führt der kurzzeitige Energieverlust zu problematisch hohen Wärmebelastungen auf die Wand, die in gegenwärtigen Experimenten in der Spitze zwischen 10 und etwa 100 MW/m² betragen können (s. Abbildung 1). Die Vorhersage der Wandbelastung für ITER ist noch unsicher. Für die mit den höchsten Wärmeflüssen beaufschlagten Flächen wird in ITER Graphit sowie Wolfram eingesetzt werden. Es ist im Rahmen der Vorhersagegenauigkeit durchaus möglich, daß die Spitzenbelastung durch ELMs oberhalb der Ablationsschwelle von Graphit bzw. der Schmelzgrenze von Wolfram liegen wird [2]. Das mindert nicht nur die Lebensdauer der ersten Wand, sondern führt auch zur Ko-Deposition von Tritium mit redeponiertem Wandmaterial an unzugänglichen Stellen im Plasmagefäß - eine unnötige Ablagerung von radioaktivem Material. Es ist daher wünschenswert, den Energieverlust durch ELMs zu begrenzen oder sogar einen hinreichenden Verunreinigungstransport aus dem Plasma ganz ohne ELMs zu erreichen.

In einem kürzlich in Nature Physics erschienen Artikel berichten Evans *et al* [3] über Experimente zur Unterdrückung von ELMs mit Hilfe von magnetischen Störfeldern im Experiment DIII-D im kalifornischen San Diego. Dabei wird das eigentlich axisymmetrische Magnetfeld des Tokamaks ($B \approx 2$ T) durch ein kleines, stationäres Radialfeld ($B \approx 1$ mT) mit helikaler Symmetrie als Störung überlagert. Mit eingeschaltetem Störfeld verschwinden

die ELMs fast vollständig, ohne daß der Energieeinschluß merklich abnimmt. Ausserdem nimmt die Plasmadichte leicht ab, was auf einen etwas erhöhten Teilchentransport aus dem Plasma hinweist.

Wie wirkt das radiale magnetische Störfeld? Hat es den gleichen helikalen Verlauf wie das ungestörte axialsymmetrische Magnetfeld am Plasmarand, tritt ein Resonanzeffekt ein: Die Magnetfeldlinien werden radial ausgelenkt und verlaufen bei hinreichend hohem Störfeld stochastisch, d.h. sie füllen ein Volumen aus. Da der Transport entlang Feldlinien erheblich schneller stattfindet als senkrecht zum Magnetfeld, bedeutet dies eine Erhöhung des radialen Teilchen- und Wärmeverlusts gerade im Bereich des hohen Druckgradienten, der dadurch reduziert wird. Aufgrund der unterschiedlichen Feldliniensteigung im Innern und am Rand des Plasmas wirkt sich das Störfeld so gut wie nicht auf den Einschluß im heißen Hauptplasma aus.

Eine Hypothese zur Erklärung der ELM-Unterdrückung ist, daß der zusätzliche radiale Transport gerade ausreicht, um den Plasmadruck am Rand unterhalb der kritischen Schwelle für ELMs zu halten. Allerdings bleiben noch Fragen offen: Warum sinkt nur die Plasmadichte, nicht aber die Temperatur, obwohl gerade auch die Wärmeleitung entlang Feldlinien besonders hoch ist? Warum hält der zusätzliche Transport den Plasmadruck immer gerade unterhalb der kritischen Schwelle und variiert nicht kontinuierlich mit der Störfeldstärke, was eine variable ELM-Frequenz zur Folge hätte? Diese und andere Fragen müssen noch in weiteren Experimenten in DIII-D sowie in anderen Tokamaks untersucht werden.

Es gibt allerdings auch andere aussichtsreiche Verfahren zur Beeinflussung von ELMs. Der beobachtete ELM-Verlust hängt stark von der Plasmaform ab. Im Garching Tokamak ASDEX Upgrade, im europäischen Gemeinschaftsexperiment JET in Culham, England (dem z. Zt. größten Tokamak der Welt) und im japanischen Tokamak JT-60U wird beobachtet, daß sich bei geeigneter Plasmaform das Verhalten der ELMs stark ändert und anstelle des regulären ELM-Zyklus kleinskalige irreguläre ELM-Ereignisse auftreten, die wegen ihres veränderten Charakters "Typ II" bzw. "grassy" ELMs genannt werden und kaum mehr meßbare Leistungsspitzen auf der Wand produzieren [4]. Aber auch das Verhalten von gewöhnlichen ("Typ I") ELMs kann beeinflußt werden. Durch schnelle Plasmabewegungen oder auch durch Einschießen von gefrorenen Deuterium-Pellets in das Plasma werden ELMs ausgelöst, so daß die ELM-Frequenz in gewissen Grenzen frei eingestellt werden kann [5]. Es zeigt sich in Experimenten im Lausanner Tokamak TCV und in ASDEX Upgrade, daß mit steigender ELM-Frequenz der Energieverlust pro ELM abnimmt. Mit aktiver ELM-Kontrolle kann so möglicherweise die Wärmebelastung unter die Ablationsschwelle gedrückt und ei-

ne schnelle Erosion der Wand vermieden werden, falls aus anderen Gründen die komplette Unterdrückung von ELMs nicht möglich sein sollte.

Eine bislang noch offene Frage ist die Anwendbarkeit dieser Möglichkeiten zur ELM-Beeinflussung in ITER. Es ist wahrscheinlich möglich, die notwendigen technischen Einrichtungen noch ohne grundsätzliche Entwurfsänderungen in den Bauplan aufzunehmen. Der Einbau eines Satzes von Störfeldspulen innerhalb oder ausserhalb des Plasmagefäßes wird derzeit geprüft und stellt wahrscheinlich aufgrund des Platzbedarfs eine größere Herausforderung dar als z.B. ein Injektor für Deuterium- oder Tritium-Pellets, der ohnehin zur Plasmanachfüllung benötigt wird. Ob allerdings und mit welchen Methoden ELMs in ITER unterdrückt werden können, kann zur Zeit wohl nur durch ein besseres Verständnis ihrer Wirkungsweise beantwortet werden. Dazu bedarf es noch weiteren experimentellen Untersuchungen an den gegenwärtigen Maschinen sowie Fortschritte in der Theorie, die eine bessere numerische Modellierung des Transports während ELMs ermöglichen.

Literatur

- [1] www.iter.org
- [2] G. Federici *et al*, J. Nucl. Mat. **313** (2003) 11
- [3] T. Evans *et al*, Nature Physics, **2** (2006) 335
- [4] J. Stober *et al*, Nuclear Fusion, **45** (2005) 1213
- [5] P. T. Lang *et al*, Nuclear Fusion, **45** (2005) 502

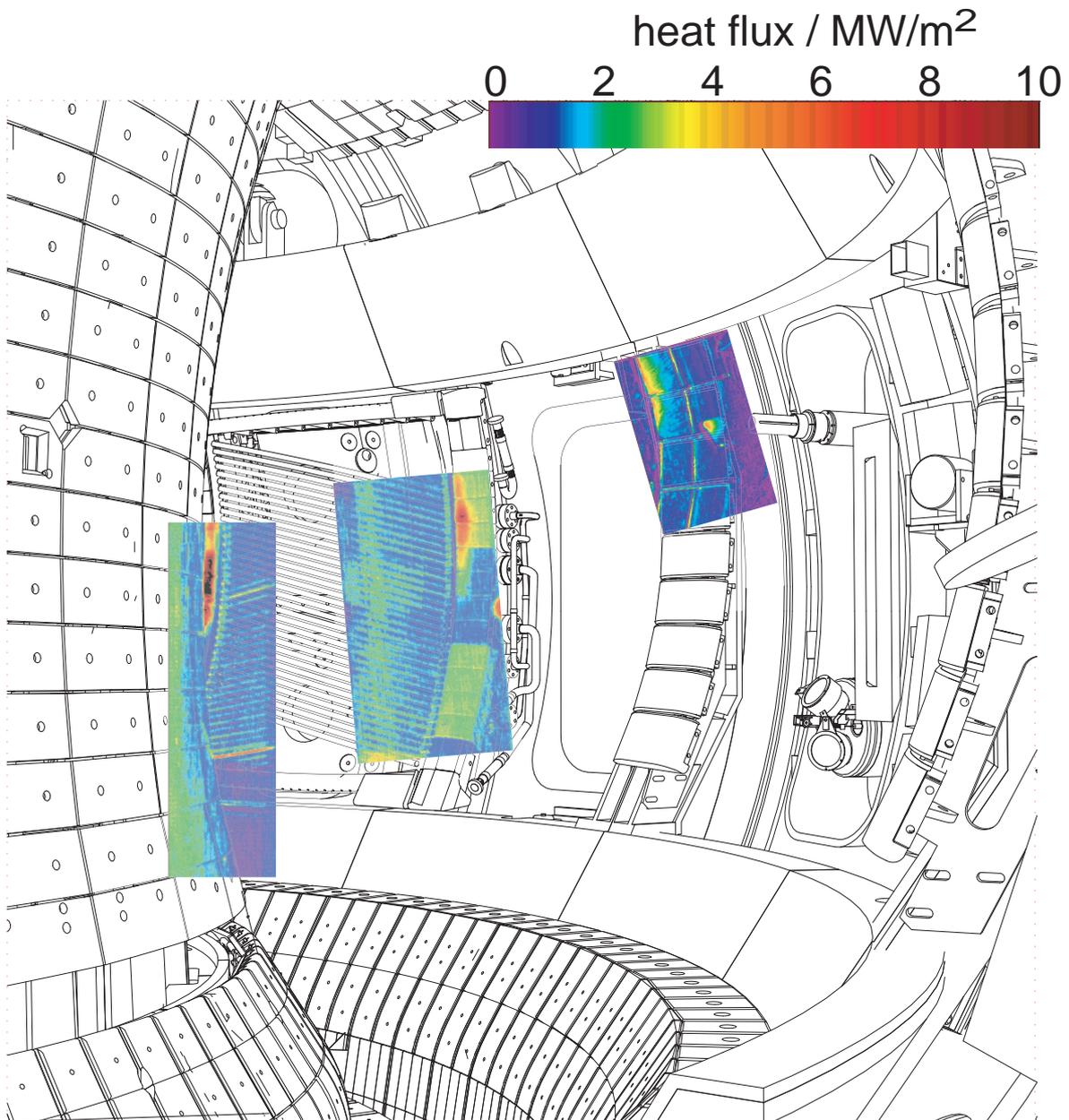


Abbildung 1: Blick in das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade. Die eingeblendeten Thermographiaufnahmen zeigen die ungleichmäßige Wärmebelastung (bis zu 10 MW/m^2) während eines ELMs auf plasmanahen Einbauten. (Abbildung: A. Herrmann, IPP Garching)