

Forschung
für die Energie
der Zukunft

Die Sonne, ein gewaltiger Plasmaball.
Seit Jahrmillionen verströmt sie Licht
und Wärme.

Fusion – eine neue Energiequelle

Kernverschmelzungen sind wichtige Naturprozesse: Viele chemische Elemente sind ursprünglich per Fusion aus Wasserstoff entstanden. Fusion ist die Energiequelle der Sterne. Auch in der Sonne, einem riesigen Plasmaball, brennt ein beständiges Fusionsfeuer. In ihrem heißen Inneren verschmelzen leichte Wasserstoff-Atomkerne zu Helium.

Trotz hoher Temperatur und extremem Druck – 15 Millionen Grad Celsius und 200 Milliarden Atmosphären – verläuft die Fusion in der Sonne nur langsam. Für ein irdisches Kraftwerk wählt man daher einen anderen Brennstoff: die beiden schweren Wasserstoffsorten Deuterium und Tritium.

Bei 100 Millionen Grad und einem Druck wie in einem Autoreifen verschmelzen sie zu Helium. Außerdem werden Neutronen freigesetzt und große Mengen nutzbarer Energie: Ein Gramm Brennstoff könnte so viel Energie liefern wie elf Tonnen Kohle.

Die nötigen Grundstoffe sind nahezu unbegrenzt vorhanden und über die ganze Welt verteilt: Deuterium ist im Meerwasser enthalten, Tritium kann man aus Lithium gewinnen. Weil ein Fusionskraftwerk zudem günstige Sicherheits- und Umwelteigenschaften verspricht, könnte die Kernfusion einen nachhaltigen Beitrag zur Energieversorgung der Zukunft leisten.

Was ist ein Plasma?

Mit steigender Temperatur gehen Stoffe nacheinander vom festen in den flüssigen und dann in den gasförmigen Zustand über. Bei weiter steigender Temperatur lösen sich die Elektronen von den Kernen der Gas-Atome: Es entsteht ein Plasma – ein Gas aus geladenen Teilchen.

Daher lässt es sich durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen. Dies nutzt man in den Fusionsanlagen, um den heißen Brennstoff in einem „Magnetfeldkäfig“ wärmeisoliert einzuschließen und von materiellen Wänden weitgehend fernzuhalten. Das dünne, heiße Plasma würde sich ansonsten sofort abkühlen.

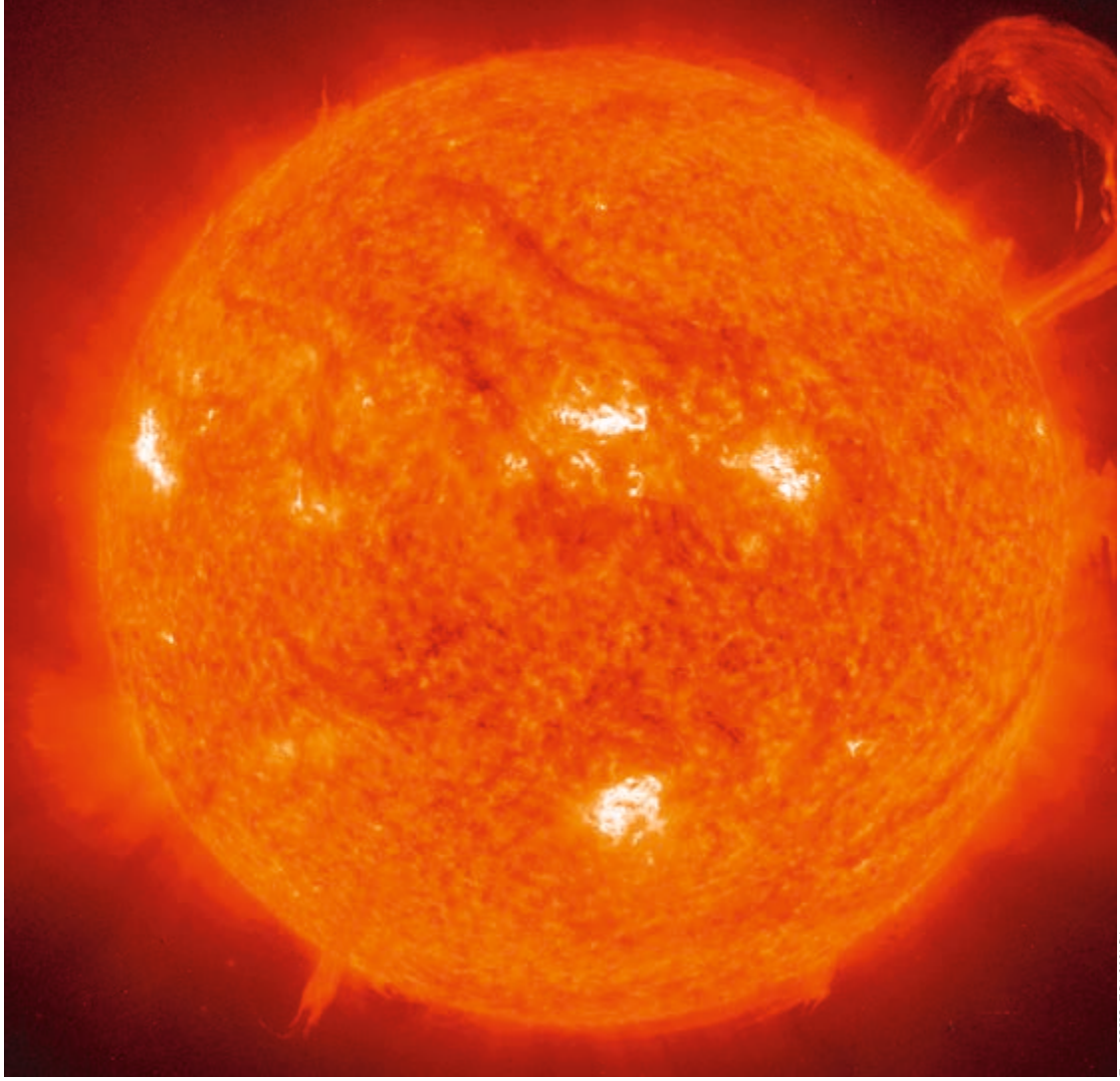


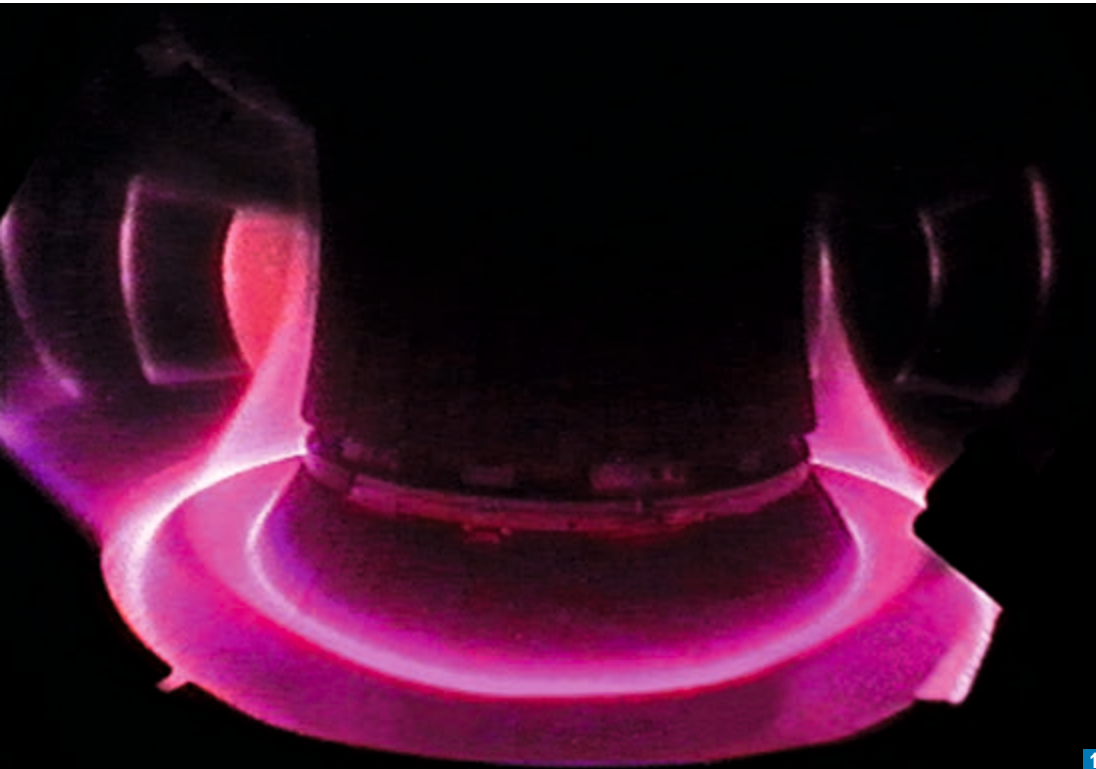
Foto: SOHO, ESA&NASA

Tokamaks und Stellaratoren

Die heutigen Anlagentypen, Tokamak und Stellarator, sind das Ergebnis eines langen Auswahlprozesses. Beide schließen das Plasma in einem ringförmigen Magnetfeld ein. In Tokamaks wird das Feld zum einen Teil von äußeren Magnetspulen aufgebaut, zum anderen Teil von einem im Plasma fließenden elektrischen Strom. Er wird pulsweise von einem Transformator erzeugt. Der Magnetfeldkäfig eines Stellarators dagegen wird ohne Plasmastrom allein durch komplex geformte äußere Spulen aufgebaut. Dies macht den Dauerbetrieb der Stellaratoren möglich.

ASDEX Upgrade

Der Tokamak ASDEX Upgrade, seit 1991 im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching in Betrieb, untersucht alle für Tokamaks wichtigen physikalischen Fragen. Seinen Namen – Axialsymmetrisches Divertorexperiment – verdankt er einer speziellen Magnetfeldanordnung, dem Divertor. Mit seiner Hilfe lässt sich die Wechselwirkung zwischen dem heißen Brennstoff und den umgebenden Wänden steuern. Mit seiner kraftwerkstauglichen Wandverkleidung aus Wolfram und der leistungsstarken, flexiblen Plasmaheizung ist ASDEX Upgrade eine der wichtigsten Tokamak-Anlagen weltweit.

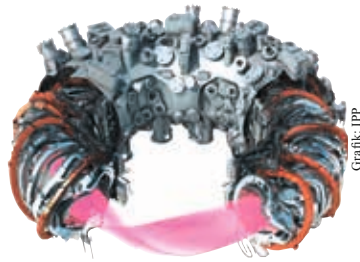


Fotos: IPP



2

1



Grafik: IPP

Wendelstein 7-X

3

2015 ging im IPP-Teilinstitut Greifswald Wendelstein 7-X in Betrieb, die weltweit größte Fusionsanlage vom Typ Stellarator. 50 speziell geformte, supraleitende Magnetspulen erzeugen ein Magnetfeld, das den Kraftwerkserfordernissen entsprechend optimiert wurde. Damit soll die Qualität des Plasmaeinschlusses in einem Stellarator erstmals das Niveau eines Tokamak erreichen. Die bisherigen Experimente brachten bereits Rekordwerte für ein Stellaratorplasma. Ziel sind 30 Minuten lange Entladungen, die das wesentliche Plus der Stellaratoren vorführen, die Fähigkeit zum Dauerbetrieb. Wendelstein 7-X soll zeigen, dass auch Stellaratoren Kraftwerkspotential besitzen.

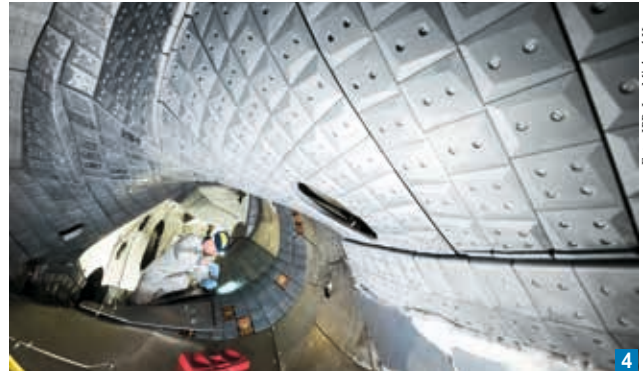


Foto: IPP, Jan Michael Hosan

4

- 1 Tokamak ASDEX Upgrade: Blick in das 100 Millionen Grad heiße Plasma
- 2 Das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade. Es ist mit Wolfram ausgekleidet, dem Metall mit dem höchsten Schmelzpunkt.
- 3 Der Stellarator Wendelstein 7-X im Schema
- 4 Das Plasmagefäß von Wendelstein 7-X. Kacheln aus Grafit schützen die Gefäßwände.
- 5 Wendelstein 7-X: das erste Wasserstoff-Plasma

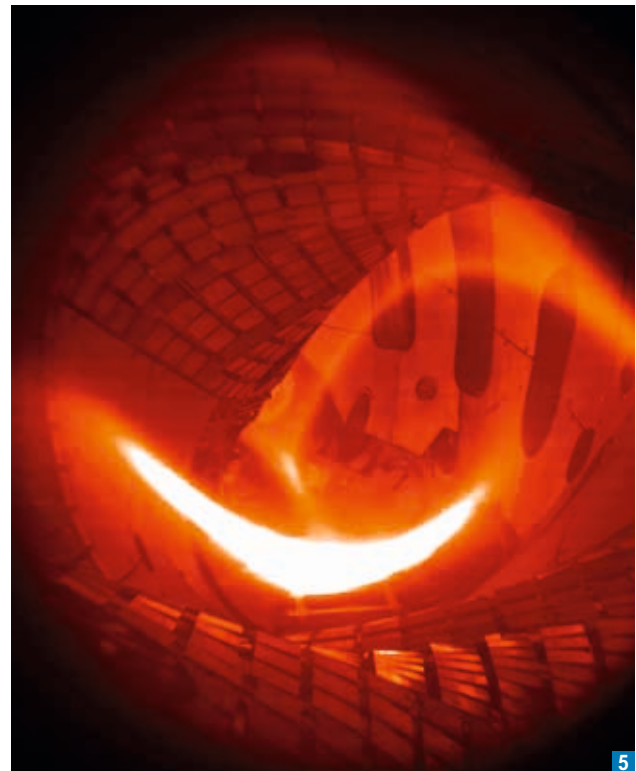


Foto: IPP

5

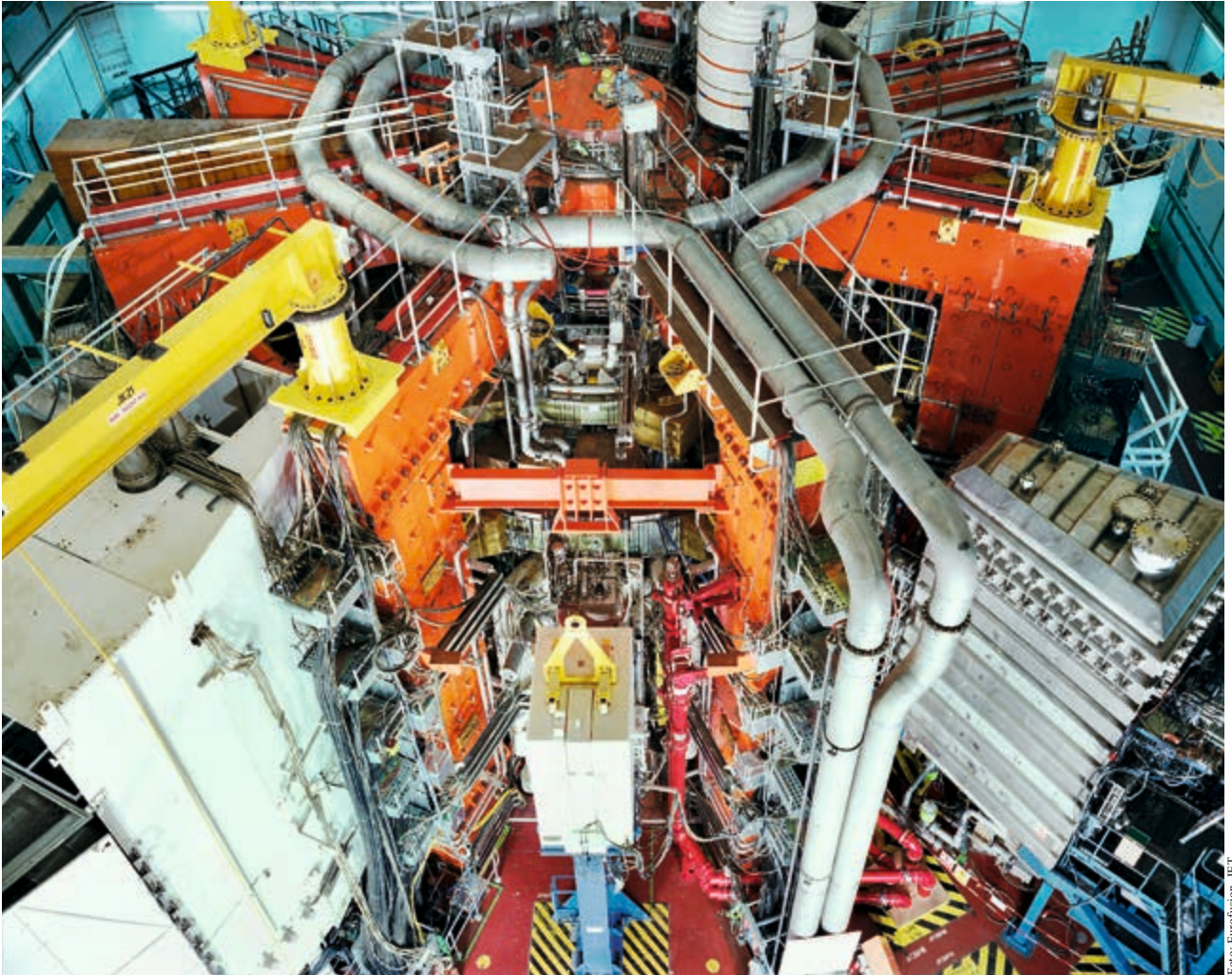


Foto: Eurofusion, JET

Das europäische Gemeinschaftsexperiment Joint European Torus (JET) in Culham/England, die zurzeit größte Fusionsanlage weltweit

JET und ITER

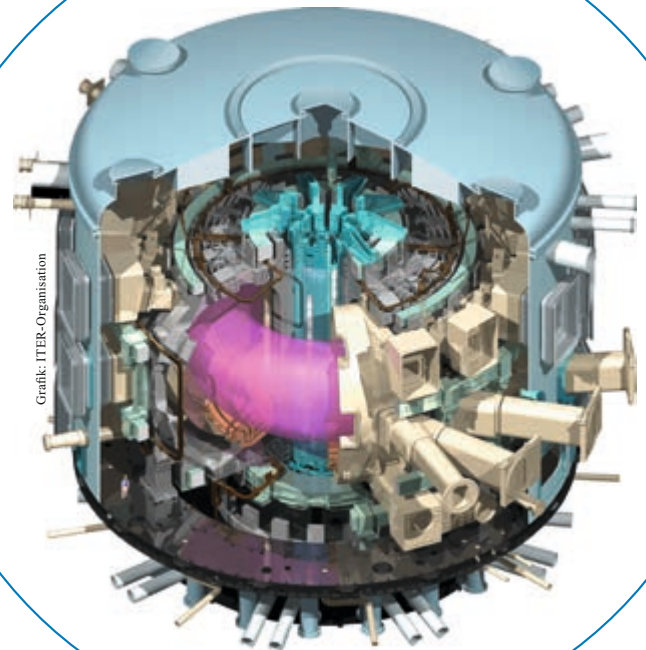
Im Rahmen des europäischen Fusionsprogramms ist das IPP an der weltweit größten Fusionsanlage beteiligt, dem europäischen Gemeinschaftsexperiment Joint European Torus (JET) in England. Im Deuterium-Tritium-Betrieb hat der Tokamak 1997 kurzzeitig eine Fusionsleistung von 16 Megawatt erzeugt – rund 65 Prozent der Leistung, mit der das Plasma zuvor aufgeheizt wurde.

Auch an dem nächsten Schritt auf dem Weg zu einem Kraftwerk, dem internationalen Experimentalreaktor ITER (lateinisch „der Weg“), wirken Wissenschaftler des IPP mit. Der Tokamak wird in weltweiter Zusammenarbeit in Cadarache in Südfrankreich aufgebaut. ITER soll 500 Megawatt Fusionsleistung erzeugen – zehnmal mehr als zum Aufheizen des Plasmas verbraucht wird.

Der Weg zum Kraftwerk

Die Forschungen an Tokamaks und Stellaratoren liefern die physikalischen Grundlagen für ein Kraftwerk. Darüber hinaus beteiligt sich das IPP an Untersuchungen zur Auslegung eines Fusionskraftwerks und zu seiner Funktion in einer künftigen Energielandschaft. Gemeinsam mit europäischen Partnern wird im IPP der ITER-Nachfolger DEMO vorbereitet, ein Demonstrationskraftwerk, das alle Funktionen eines Kraftwerks erfüllen soll. Danach könnte das erste kommerzielle Fusionskraftwerk folgen.

Der internationale Experimentalreaktor ITER im Entwurf. Sein Ziel: ein brennendes und für längere Zeit energielieferndes Plasma.

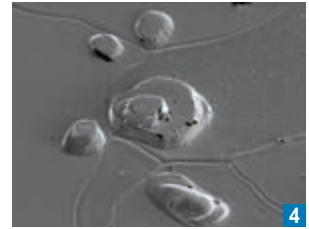
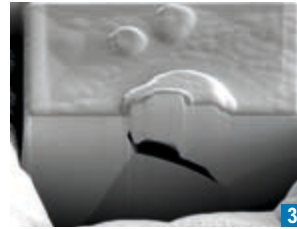
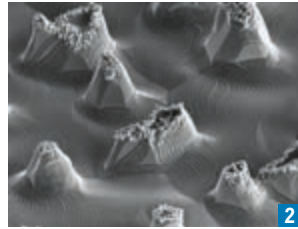
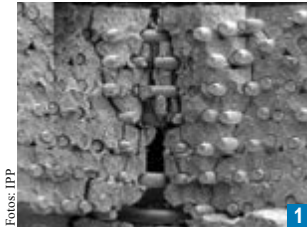


Grafik: ITER-Organisation

Wandmaterialien

Die Belastungen, denen die innere Oberfläche des Plasmagefäßes ausgesetzt ist, werden im IPP im Detail erforscht. Zum Beispiel können energiereiche Plasmateilchen aus den Gefäßwänden Partikel herausschlagen, die das Plasma verunreinigen. Dabei kann das Wandmaterial erodieren und seine Eigenschaften ändern. Besonderes Interesse gilt dabei dem Wandmaterial Wolfram, das für ein Kraftwerk vorgesehen ist.

Für besonders beanspruchte Stellen werden im IPP neue Materialien und Beschichtungen entwickelt und unter Plasmabelastung getestet, die – wie etwa mit Wolfram-Draht verstärkte Wolfram-Komposite – hitzebeständig sind, wärmeleitfähig und widerstandsfähig gegen Erosion.



Plasmaheizung

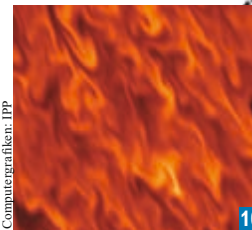
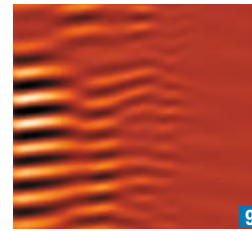
Die Heizung des Plasmas auf viele Millionen Grad wird durch den Einschuss energiereicher neutraler Wasserstoffatome erreicht. Injektoren mit einigen Megawatt Leistung schießen die Teilchen in das Plasma, wo sie ihre Energie durch Stöße weitergeben. Ebenso werden Hochfrequenzwellen zur Heizung benutzt: Wellenleiter oder Sendeantennen am Plasmarand strahlen Mikro- oder Radiowellen großer Leistung in das Plasma.

Plasmadiagnostik

Um die Eigenschaften des Plasmas optimieren zu können, werden viele Plasmagrößen – wie Temperatur, Teilchendichte oder Magnetfeldstärke – mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung bestimmt. Dazu werden im IPP innovative Messmethoden entwickelt, die das Plasma nicht stören und unter extremen Bedingungen funktionieren.

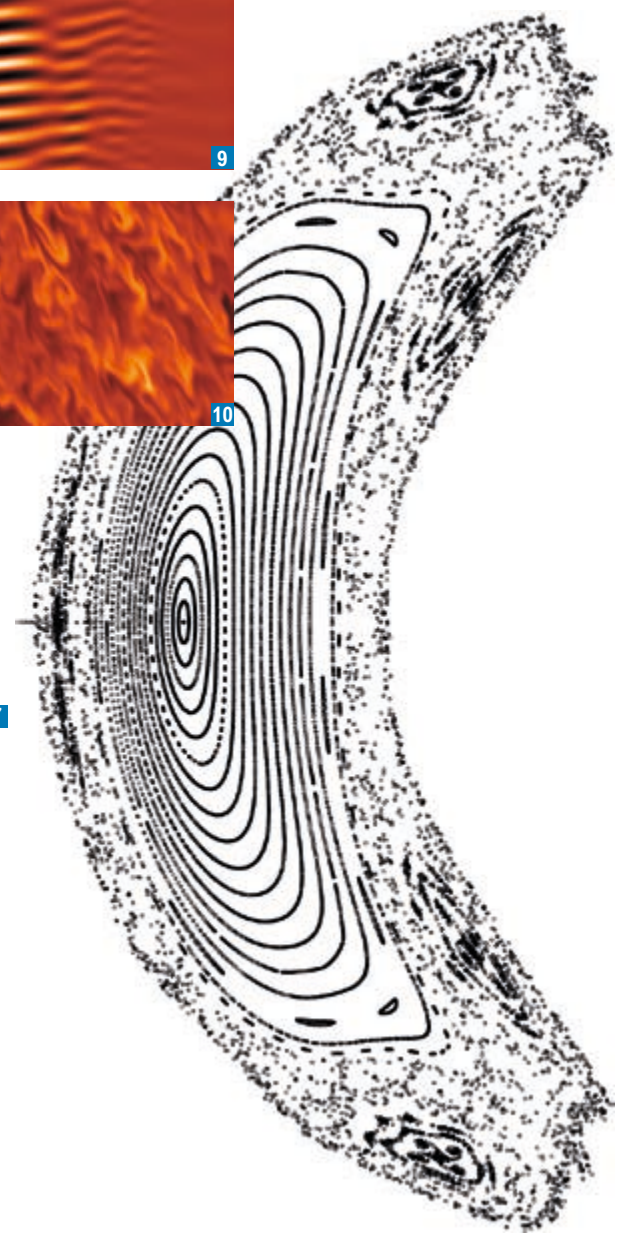
Theorie

Ein wichtiges Werkzeug, um diese Messergebnisse auszuwerten und die Mikro-Prozesse im Plasma besser zu verstehen, ist die Simulation plasmaphysikalischer Vorgänge mit dem Computer: In den Theorie-Bereichen des IPP entwickeln Mathematiker und Physiker neue Rechenmethoden und berechnen die Bewegung der Plasmateilchen im Magnetfeld, ihr Einschlussverhalten, Gleichgewichtszustände der heißen Plasmen oder die Entstehung von Instabilitäten.



Computergrafiken: IPP

7



- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Materialuntersuchung für die Gefäßwand: Probe aus wolframfaserverstärktem Wolfram nach Bruchtest | 5 Übertragungsstrecke für die Mikrowellenheizung von Wendelstein 7-X. Mit Metallspiegeln werden die Mikrowellen in das Plasma gelenkt. |
| 2 Unter dem Rasterelektronenmikroskop: Stahlprobe nach Plasmaerosion | 6 Testanlage ELISE zur Entwicklung der Neutralteilchenheizung für ITER |
| 3 Schnitt durch eine Wolframprobe nach Belastung durch ein Wasserstoff-Plasma | 7 Berechnetes Stellarator-Plasmagleichgewicht: Schnitt durch die magnetischen Flächen |
| 4 Wolframprobe nach Belastung (Draufsicht) | 8 bis 10 Turbulenz im Plasma, modelliert mit dem Computer |

1994 gegründet:
Das IPP-Teilinstitut Greifswald



Foto: IPP, Matthias Gottschewsky

Zusammenarbeit

Zahlreiche Kooperationsprojekte bringen das IPP in Kontakt mit den deutschen Hochschulen: Zum Beispiel wurden an der Universität Stuttgart die Übertragungsleitungen für die Mikrowellenheizung von Wendelstein 7-X entwickelt. Zusammen mit der Universität Augsburg entwickelt das Institut eine Ionenquelle für die Heizung des ITER-Plasmas. Gemeinsame Berufungen verbinden das IPP mit der Universität Greifswald sowie den Technischen Universitäten in Berlin und München. Darüber hinaus tragen IPP-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler an rund zehn weiteren Hochschulen als Lehrbeauftragte zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses bei.

Die Arbeiten des Instituts sind in das europäische Fusionsforschungsprogramm, das Konsortium EUROfusion, eingebunden. Das IPP koordiniert dieses Konsortium, dessen Mitglieder alle großen Fusionsanlagen in Europa, so auch die des IPP, für ihre Experimente nutzen können. Enge Kooperationen verbinden das IPP überdies mit Fusionslaboratorien in aller Welt.

Entwicklung und Organisation

Mit rund 1100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern – davon etwa 400 in Greifswald – ist das IPP eines der größten Zentren für Fusionsforschung in Europa. Es wurde 1960 als „Institut für Plasmaphysik GmbH“ gegründet. Gesellschafter waren die Max-Planck-Gesellschaft und Professor Werner Heisenberg. 1971 wurde das IPP in das „Max-Planck-Institut für Plasmaphysik“ überführt. Von 1992 bis 2003 wurde der Bereich Plasmadiagnostik in Berlin betrieben, 1994 das Teilinstitut Greifswald gegründet.

Die Forschungsarbeiten des IPP sind seit 1961 in ein europäisches Gesamtprogramm zur Kernfusion eingebettet. Die Zuwendungen des Instituts belaufen sich auf jährlich rund 130 Millionen Euro. Finanzierungsträger sind der Bund, die Länder Bayern und Mecklenburg-Vorpommern sowie die Europäische Union.



Foto: IPP, Peter Bonnemann

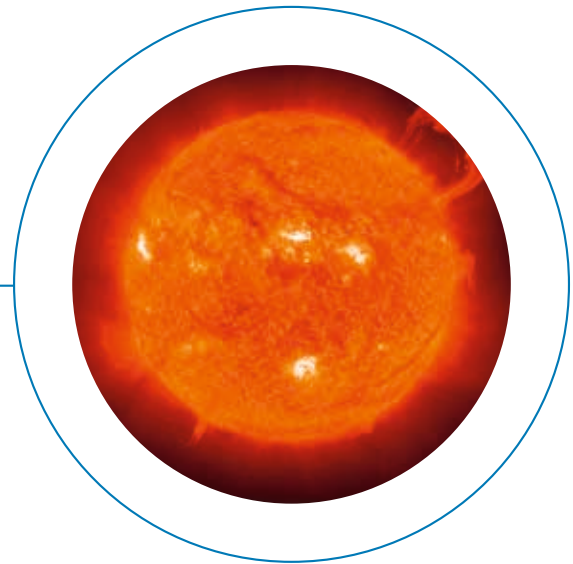
Das Besucherzentrum in Garching

Besuchen Sie uns!

Besucher sind nach vorheriger Terminabsprache im IPP in Garching und Greifswald herzlich willkommen. Es sind sowohl Gruppenführungen möglich als auch Besuche von Einzelpersonen, die sich einer Gruppe anschließen. Bitte melden Sie Ihren Besuchswunsch frühzeitig an:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Besucher-Service
Boltzmannstraße 2 | 85748 Garching
Telefon 089 3299-2233 | besucher.garching@ipp.mpg.de

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Teilinstitut Greifswald
Besucher-Service
Wendelsteinstraße 1 | 17491 Greifswald
Tel.: 03834 88-2614 | besucher.greifswald@ipp.mpg.de



Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Boltzmannstraße 2 | 85748 Garching | Telefon 089 3299-01

Teilinstitut Greifswald
Wendelsteinstraße 1 | 17491 Greifswald | Telefon 03834 88-1000

www.ipp.mpg.de | info@ipp.mpg.de

Das IPP finden Sie auch auf Facebook, Twitter, Instagram und YouTube.

