

Pulsator, ASDEX und ASDEX Upgrade

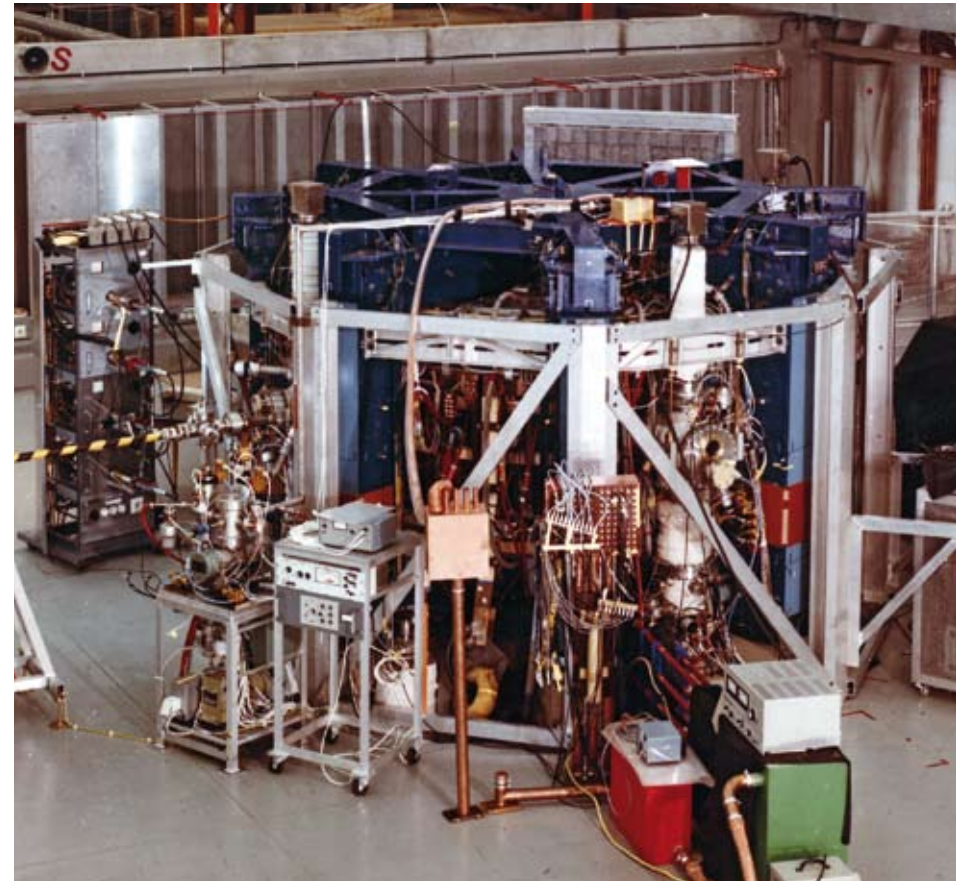
FRIEDRICH WAGNER, HARTMUT ZOHN

Zehn Jahre nach Beginn der Stellaratorforschung wandte sich das IPP 1970 mit der Anlage Pulsator auch der Tokamak-Linie zu. Von nun an wollte man beide Konzepte parallel entwickeln und vom Vergleich profitieren. Schon in die Planung von Pulsator gingen Erfahrungen aus der Stellaratorforschung ein – etwa zur Bedeutung der rotationssymmetrischen Plasmaform oder zur Nutzung helikaler Magnetspulen. In das Plasmagefäß von Pulsator eingebaut, wollte man mit Hilfe solcher Spulen die Entladungen in der Startphase durch ein partielles äußeres Gleichgewicht unterstützen. Ihr eigentlicher Nutzen zeigte sich später bei der Bekämpfung von Instabilitäten des Plasmas – ein Verfahren, das sich heute in den Zusatzspulen wiederfindet, mit denen Randidstabilitäten bei ITER unterdrückt werden sollen.

: Pulsator

Mit Pulsator wurde ab 1973 sechs Jahre lang experimentiert. Mit einem großen Plasmaradius von 70 und einem kleinen Radius von 12 Zentimetern war Pulsator eine vergleichsweise kleine Anlage. Das Magnetfeld hatte eine Stärke von 2,7 Tesla, der Plasmapstrom betrug 125 Kiloampere, die Pulslänge 0,12 Sekunden (Abb. 1). Der Tokamak wurde nur mit Stromheizung und einem reinen Wasserstoffplasma betrieben, dessen Ringform von einem metallischen Limiter nach außen begrenzt wurde.

Mit Pulsator wurden Fragen des Plasmagleichgewichts und der -stabilität untersucht¹. Besonders hervorzuheben ist die Entdeckung des Hochdichtebetriebs bei Tokamaks², die zeitgleich,



▲ Abb. 1

Abb. 1: Der erste Tokamak des IPP, Pulsator.

Abb. 2: Zwei Querschnitte durch das ASDEX-Gefäß und die magnetischen Flächen des Feldes: rechts mit Limiter, links mit Divertor. Der Limiter begrenzt das Plasma und fängt alle Teilchen auf, die über die letzte geschlossene Magnetfläche hinausgehen. Im Divertorbetrieb werden die Teilchen, die die Separatrix nach außen überqueren, in den Divertor geführt und dort auf den Prallplatten neutralisiert.

aber unabhängig auch bei ALCATOR-A am MIT gelang³ – eine bedeutende Erweiterung des Arbeitsbereiches, denn mit der auf das Siebenfache erhöhten Plasma-Dichte stiegen nahezu proportional die Energieeinschlusszeit und damit auch der Energieinhalt. Das Plasma näherte sich damit in einem gewaltigen Schritt den Zündbedingungen: Das ausschlaggebende Dreierprodukt aus Temperatur, Dichte und Einschlusszeit schoss um den Faktor 60 nach oben. Detaillierte Untersuchungen zeigten, dass ein spitzes Dichteprofil bei hoher Dichte nur mit einer nach innen gerichteten Konvektion der Teilchen zu erklären ist⁴, ein Aspekt des Teilchentransports, der auch heute – zum Beispiel für ITER und dessen Erfolgchancen – eine große Rolle spielt.

Es zeigte sich bei Pulsator zum ersten Mal auch die Tendenz des Plasmas zur Selbstorganisation, d.h. seine Fähigkeit, unter gleichen Randbedingungen verschiedene Betriebszustände mit unterschiedlichen Einschlusseigenschaften einzunehmen. Solche Bifurkationen wurden beim Pulsator-Nachfolger ASDEX von entscheidender Bedeutung für den Fortschritt der Forschung.

: ASDEX

Von Anfang an ein Problem war die Verschmutzung des Pulsator-Plasmas durch Kontakt mit dem metallischen Limiter, der die Ringkontur des Plasmas nach außen begrenzte. Schon 1970 wurde daher an der Idee eines nicht-materiellen magnetischen Limiters gearbeitet: Zusätzliche Magnetspulen erzeugen magnetische Felder, die das Randplasma abschälen und auf Prallplatten len-

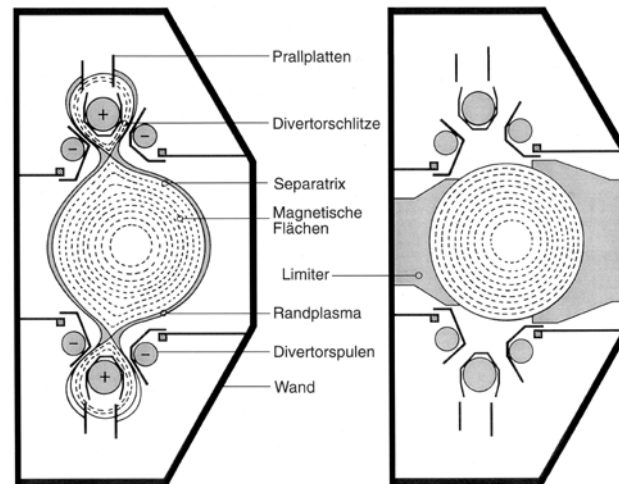
ken. Eine magnetische Grenzfläche, die Separatrix, trennt dieses Randplasma von dem nun komplett berührungsfrei eingeschlossenen inneren Plasma. Nach Klärung grundsätzlicher Gleichgewichts- und Stabilitätsfragen reifte dieses Konzept zur Grundlage des Nachfolge-Experimentes ASDEX (Axialsymmetrisches Divertor-Experiment).

Eine magnetische Separatrix ersetzte hier den materiellen Limiter. Sie wurde durch drei ober- und unterhalb des Plasmas angebrachte axial-symmetrische Spulen erzeugt, deren Magnetfeld die Randschicht des Plasmas in zwei ober- und unterhalb des Plasmas

liegende Kammern führte. Erst hier, weit entfernt von der Plasmaoberfläche, hatte das Plasma an speziell ausgerüsteten Platten Wandkontakt (Abb. 2). ASDEX⁵ in Garching und der 1980 kurz vorher in Betrieb gegangene Tokamak PDX⁶ in Princeton waren die ersten Anlagen, die mit diesem „Divertor“ eine Lösung für die Handhabung der Energie- und Teilchenflüsse in einem späteren Kraftwerk anboten.

Mit Hilfe des Divertors konnte ASDEX saubere Plasmen mit sehr guten Einschlusseigenschaften erzeugen, was den Divertor zum Standardbauteil moderner Tokamaks machte. Entsprechend wurden das große europäische Gemeinschaftsexperiment JET in England sowie Doublet in den USA nachgerüstet, das japanische Experiment JT-60 an die Divertorgeometrie von ASDEX angepasst. Jüngere Experimente wie der Garchinger Nachfolger ASDEX Upgrade, TCV in der Schweiz, KSTAR in Südkorea, EAST in China und nicht zuletzt auch ITER bauen von vorne herein auf den Divertor.

ASDEX wurde ab 1973 konzipiert und ging 1980 in Betrieb. Die Maschinenkenndaten: Ein großer bzw. kleiner Plasmradius von 1,65 bzw. 0,4 Metern, ein Magnetfeld von 2,8 Tesla und ein Plasmastrom von maximal 500 Kiloampere. Erst für ASDEX wurden neben der Stromheizung zusätzliche Heizverfahren entwickelt – Neutralteilchen-, Ionenzyklotron- und Lower Hybrid-Heizung (siehe Kapitel 7). In einer umfassenden Erweiterung wurde 1986 der ASDEX-Divertor schließlich aktiv gekühlt, um längere Plasmapulse zu ermöglichen. Wenn auch nur zehn Sekun-



▲ Abb. 2

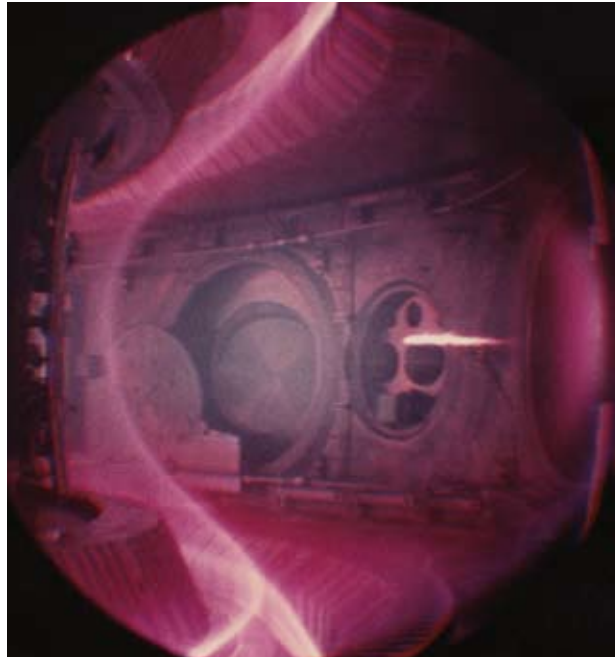
5 TOKAMAKS



▲ Abb. 3

den lang, waren dies doch die ersten Schritte im IPP hin zum Dauerbetrieb von Tokamaks (Abb. 3).

Aufgrund der Reinheit seines Plasmas konnte ASDEX die zugrunde liegende Physik in exemplarischer Form zeigen. Von

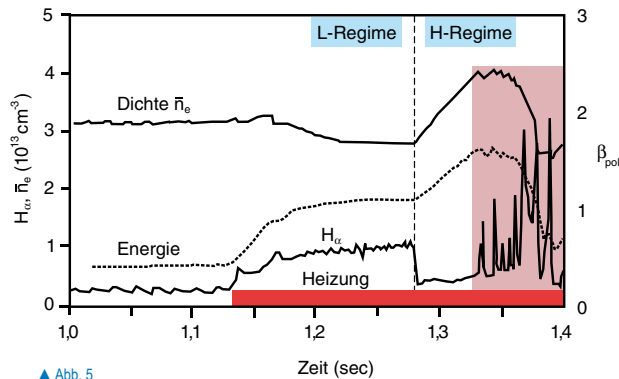


▲ Abb. 4

besonderer Bedeutung waren die vielfachen Bifurkationen in den Einschlusseigenschaften der ASDEX-Plasmen. In ihnen wurde die eigentliche Natur von thermodynamisch offenen, stark getriebenen Systemen sichtbar. Zwei Themenfelder sollen hier genauer dargestellt werden:

1: Der Vorteil von Divertor- gegenüber Limiter-Entladungen konnte an ASDEX überzeugend vorgeführt werden. Die Anlage verfügte über klappbare poloidale Limiter, für spezielle Untersuchungen wurde zudem ein toroidaler Limiter hinzugebaut. So konnte man prüfen, ob sich der höhere Reinheitsgrad des Divertorplasmas, der sich im Vergleich mit dem Poloidal-Limiter ganz deutlich zeigte, mit der geringeren spezifischen Heizleistung beim Kontakt mit der begrenzenden Wand erklären lässt. Tatsächlich erwiesen sich die Vermeidung von Verunreinigungsquellen in der Nähe der Plasmaoberfläche, der Kontakt mit den Targetplatten bei niedrigen Plasmatemperaturen und das Vermögen der Randschicht, Verunreinigungen in den Divertor zu transportieren, als Ursachen für die Leistungsfähigkeit des Divertors. Infolgedessen zeigten sich Plasmen von hoher Qualität und ausgezeichneter Reproduzierbarkeit (Abb. 4).

2: Von großer programmatischer Relevanz waren die mit ASDEX gewonnenen Erkenntnisse zum Energie- und Teilcheneinschluss. Sie kamen in einer kritischen Phase der Tokamakforschung: Der Versuch, die Plasmen zusätzlich zur Stromheizung mit anderen Verfahren zu heizen und damit den Zündbedingungen näherzukommen, hatte Anfang der 1980er Jahre weltweit zu einer fatalen Einsicht geführt: Die Wärmeisolation nahm mit steigender Temperatur ab. Es wurde damit zweifelhaft, ob Tokamaks die Zündung je erreichen können. (Später zeigte sich, dass Stellaratorplasmen unter denselben Symptomen leiden). Die Lösung brachte ein 1982 an ASDEX entdeckter Plasmazustand, das High-Confinement-Regime, kurz H-Regime: Es zeigte sich, dass im Verlauf der Heizphase das dynamische Verhalten des Plasmas plötzlich umschlagen kann. Es springt vom gewohnten schlechten Einschluss, dem Low-Confinement, in das H-Regime. Hier verdoppelt sich die Energieeinschlusszeit, der Energieinhalt steigt und mit der Verbesserung des Teilcheneinschlusses erhöht sich auch die Dichte (Abb. 5). Die Bedeutung dieser Entdeckung zeigt sich beim Blick auf den Testreaktor ITER, dessen Planung das H-Regime zugrunde liegt: Ohne diesen Plasmazustand würde die Fusionsausbeute auf zwanzig bis dreißig Prozent absinken; ein Kraftwerk dieser Betriebsweise müsste deshalb ungleich größer sein.



▲ Abb. 5

An ASDEX wurden eine Reihe wichtiger Merkmale des H-Regimes identifiziert: Am Plasmarand baut sich eine Transportbarriere auf, in der die – für die schlechte Wärmeisolation verantwortliche – Turbulenz nahezu verschwindet. Randinstabilitäten des Plasmas, so genannte Edge-Localised-Modes, entstehen infolge des guten Einschlusses, weil die Druckgradienten am Plasmarand an eine Stabilitätsgrenze laufen. Das H-Regime entwickelt sich unabhängig von der Heizmethode, aber nur oberhalb einer kritischen Heizleistung.

Bald konnte man den Weg ins H-Regime geradezu rezeptartig beschreiben: Der Zugang erleichtert sich durch die richtige Divertorkonfiguration, durch vorsichtige Handhabung des Gaseinlasses und die erreichte hohe Plasmareinheit. Mit dieser Anleitung kann

ten bald darauf auch andere Anlagen das H-Regime einstellen – zunächst PDX, dann DIII-D (vormals Doublet), danach JET. Die höchste bislang erreichte Fusionsausbeute bei JET – 65 Prozent der Heizleistung wurden als Fusionsleistung zurückgewonnen – wurde in Deuterium-Tritium-Entladungen im H-Regime erzielt.

Inzwischen versteht man den Übergang in das H-Regime recht gut⁷: Offensichtlich bildet sich mit Einsetzen des H-Regimes am Rand des turbulenten Plasmas eine Scherströmung um den kleinen Umfang, in der turbulente Wirbel zerrissen werden – und damit zugleich der mit den Wirbeln verbundene schnelle Energietransport nach außen verschwindet. Das Plasma zieht sich quasi am eigenen Schopf aus dem hohen Turbulenzniveau des L-Regimes heraus. Teile dieses Mechanismus lassen sich auch in ganz andersartigen turbulenten Systemen finden, zum Beispiel den farbigen Bändern in der Atmosphäre des Jupiter.

Mit ASDEX wurde im IPP bis 1990 geforscht. Heute wird die Anlage unter dem neuen Namen HL-2A im South-Western-Institute for Plasma Physics in Chengdu betrieben. Die Schenkung hat die chinesische Fusionsforschung beflügelt und zur Entwicklung einer wissenschaftlichen Basis beigetragen, mit der China einer der Partner in der ITER-Kooperation werden konnte.

: ASDEX Upgrade

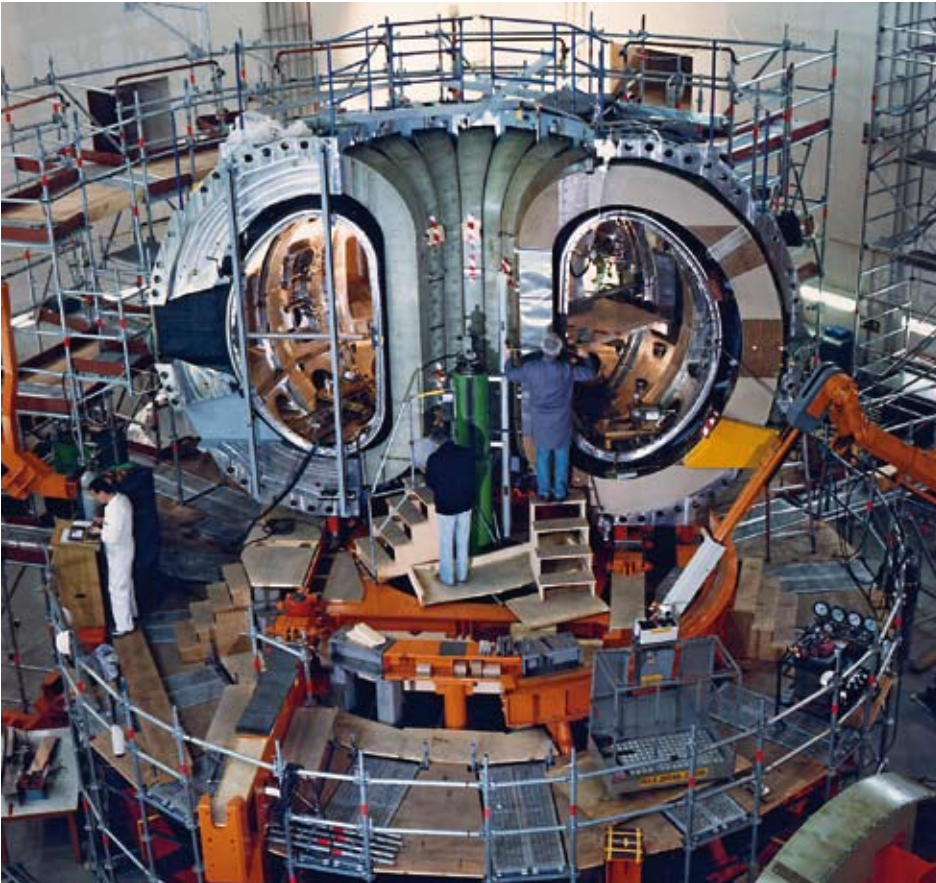
Mit dem 1991 in Betrieb gegangenen Nachfolger ASDEX Upgrade werden die an ASDEX gefundenen Erkenntnisse auf ihre



Abb. 3: Das Plasmagefäß von ASDEX nach der Härtung.

Abb. 4: Blick in das ASDEX-Plasma. Man erkennt die scharfe, von der Separatrix erzeugte Plasmakontur und die Ablenkung in die Divertorkammern an Boden und Decke des Gefäßes.

Abb. 5: Übergang vom L- in das H-Regime: Obwohl sich die Heizleistung nicht ändert, springt die Energieeinschlusszeit auf das Doppelte, steigt der Energieinhalt und erhöht sich – mit der Verbesserung des Teilcheneinschlusses – die Dichte.



▲ Abb. 6

Kraftwerkstauglichkeit hin untersucht. Dazu erhielt das Experiment eine Spulenordnung (Abb. 6), die in einer Divertorkonfiguration toroidale Plasmen mit D-förmigem Plasmaquerschnitt erzeugen kann⁸. In solchen Plasmen lassen sich Strom und Energieinhalt im Vergleich zu Plasmen mit kreisrundem Querschnitt deutlich erhöhen. Obwohl ASDEX Upgrade mit 1,65 Metern den selben großen Radius wie der Vorgänger besitzt, kann der Strom bis auf 1,4 Megaampere erhöht werden – im Vergleich zu 500 Kiloampere bei ASDEX. Die Anordnung der Spulen wäre auch für ein Kraftwerk geeignet; tatsächlich ist die für das ITER-Experiment (siehe Kapitel 9) gewählte Spulenkonfiguration der von ASDEX Upgrade sehr ähnlich.

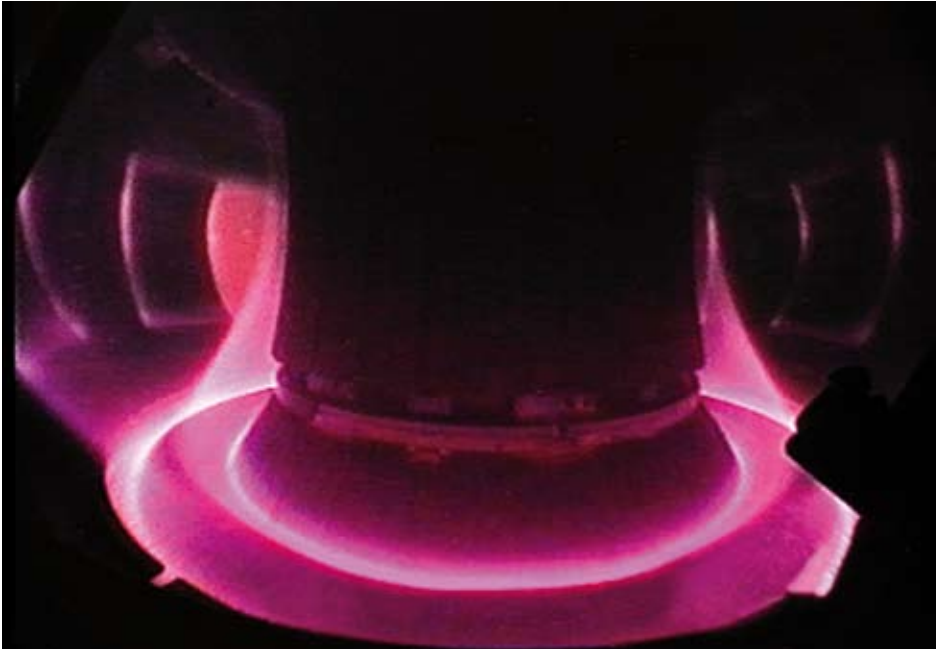
Zur Untersuchung der Leistungs- und Teilchenabfuhr ist ASDEX Upgrade mit starken Zusatzheizsystemen ausgestattet. Die installierte Heizleistung von 28 Megawatt erzeugt Wärmeflüsse, die denen in einem künftigen Kraftwerk entsprechen. ASDEX Upgrade konnte zeigen, dass man – durch gezielte Zugabe von Verunreinigungsatomen am Plasmarand und im Divertor – die abgeführte Leistung effizient über die ganze Wand verteilen kann, ohne dabei die Reinheit des Zentralplasmas zu gefährden⁹. Mit diesen vorteilhaften Eigenschaften konnte man an ASDEX Upgrade erstmalig kraftwerksrelevanten Betrieb mit einer vollständig mit Wolfram bedeckten Gefäßwand demonstrieren, ohne dass das Plasma zu stark durch Wolframatome verunreinigt wird¹⁰. Dies ist wichtig, da Wolfram als aussichtsreichster Kandidat für die innere Verkleidung der Gefäßwand eines Fusionskraftwerks gilt.

Abb. 6: ASDEX Upgrade während des Aufbaus.

Abb. 7: Blick in das 100 Millionen Grad Celsius heiße Plasma von ASDEX Upgrade. Der D-förmige Querschnitt und die Ablenkung auf die Divertorplatten am Boden sind gut zu erkennen.

Abb. 8: Das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade. Die Wände sind vollständig mit Wolfram bedeckt.

Abb. 9: Kontrollraum. Von hier aus wird der Ablauf der Experimente an ASDEX Upgrade gesteuert.



▲ Abb. 7



(Foto: IPP, Peter Günter)

▲ Abb. 8

Mit seiner hohen Heizleistung kann ASDEX Upgrade nicht nur die Leistungsabfuhr besonders gut untersuchen, sondern auch den Einschluss des Zentralplasmas. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Entwicklung von Betriebsszenarien, die den Ansprüchen eines Fusionskraftwerks genügen. Pionierarbeit wurde dazu bei der aktiven Kontrolle von Instabilitäten geleistet, die den Plasmadruck begrenzen¹¹. Das entwickelte Verfahren, die störenden Instabilitäten zu beseitigen, soll auch in ITER zur Anwendung kommen. Einen weiteren Durchbruch brachte die Entdeckung eines Betriebszustands, in dem die Wärmeisolation gegenüber dem an ASDEX gefundenen H-Regime noch einmal verbessert ist¹². Mit dieser so genannten ‚Improved H-Mode‘ könnten Fusionsleistung und Pulsdauer künftiger Anlagen entscheidend erhöht werden.

Diese Rolle von ASDEX Upgrade als Wegbereiter für ein Fusionskraftwerk zieht Wissenschaftler aus aller Welt an, die heute an der Anlage mitarbeiten. Das experimentelle Programm wird inzwischen von einem Gremium verabschiedet, das paritätisch mit Mitgliedern des IPP und der Europäischen Fusionslaboratorien besetzt ist. Damit sollte gewährleistet sein, dass im IPP noch auf Jahre hinaus internationale Spitzenforschung in der Tokamakphysik geleistet werden kann.



(Foto: IPP, Volker Steger)

▲ Abb. 9