

nisse führen. Skalierungsgesetze, die allein auf Messungen in WENDELSTEIN 7-AS und dem japanischen Experiment LHD beruhen, bestätigen in der Hochrechnung auf den Heliasreaktor die Zündung. Ein Verbesserungsfaktor - wie zum Beispiel im H-Regime der Tokamaks - ist nicht notwendig.

Wegen der speziellen Eigenschaften der Heliaskonfiguration wird sogar noch eine Verminderung des anomalen Transports erwartet. Gewissheit über das Auftreten dieses Effektes kann aber nur das Experiment WENDELSTEIN 7-X liefern.

## Allgemeine Arbeiten zur Fusion

### Plasmaheizung

Die Entwicklung und der Einsatz von Plasmaheizverfahren an den Fusionsexperimenten des IPP - ASDEX Upgrade, WENDELSTEIN 7-AS und WENDELSTEIN 7-X - ist die Aufgabe des Bereichs Technologie. Auch in einem künftigen Fusionskraftwerk wird die richtige Energie- bzw. Leistungseinkopplung in das Fusionsplasma wichtig sein. Zur Zündung des Fusionsfeuers muss zunächst für einige zehn Sekunden die vergleichsweise „geringe“ Leistung von 50 bis 100 Megawatt von außen zugeführt werden, um die Fusionsreaktionen und damit die Selbstheizung des Plasmas einzuleiten. Mit erfolgter Zündung sollte dann die im Plasma frei werdende Heizung durch die Heliumkerne auf ihren Endwert von etwa 500 Megawatt angestiegen sein, um so die hohen Fusionstemperaturen selbständig aufrechtzuerhalten.

Heizsysteme werden jedoch nicht nur zur Heizung des Plasmas sondern auch zum nicht-induktiven Stromtrieb angewandt. So kann das den Energieeinschluss bestimmende Stromprofil kontrolliert werden und ein stationärer Tokamakbetrieb erreicht werden.

Im Gegensatz zum Kraftwerk spielt die innere Fusionsheizung in den derzeitigen Fusionsexperimenten bei der Leistungsbilanz noch keine Rolle. Dementsprechend muss das Plasma in den Tokamak- oder Stellarator-Experimenten durch die äußere Heizung nicht nur gestartet, sondern die noch fehlende, viel höhere innere Heizung durch die Helium-

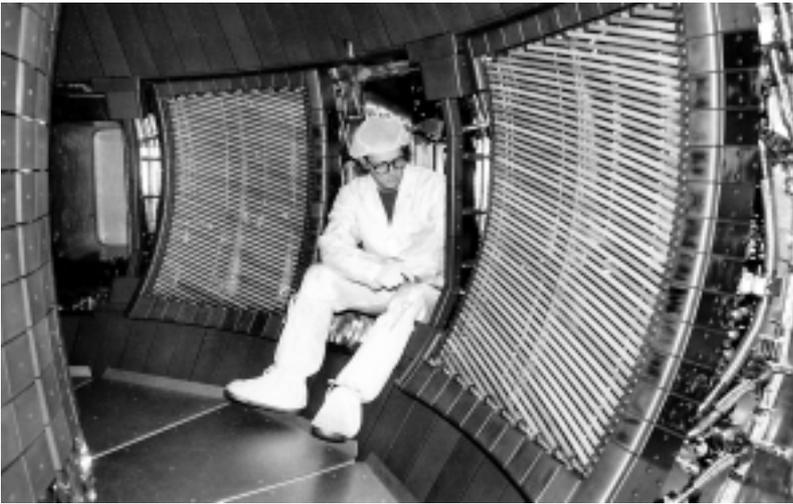
kerne gewissermaßen von außen „simuliert“ werden. Nimmt man die genannten 500 Megawatt als Bezugsgröße, so fällt der in diesen Experimenten nötige Heizungsanfangsbereich bereits erheblich ins Gewicht. Da - je nach physikalischer Fragestellung - Volumen, Oberfläche oder auch Plasmaumfang als Maß genommen werden müssen, erreicht die Heizleistung die Größenordnung von einigen zehn Megawatt.

Der Heizungsanfangsbereich erhöht sich noch weiter dadurch, dass bei den Plasmaexperimenten mehrere unterschiedliche Heizverfahren zugleich einzusetzen sind, um entweder die Plasmaionen oder die Elektronen gezielt zu heizen, oder - wie bei der Neutralteilcheninjektion - zugleich auch neue Teil-



Foto: Simon Ertl

Die Neutralinjektionsbox für ASDEX Upgrade beim Transport.



**Blick auf zwei  
Antennen der  
Ionen-Zyklotron-  
Resonanzheizung im  
Plasmagefäß von  
ASDEX Upgrade**

chen in das Plasmainnere einzufüttern. Da die Frage der optimalen Plasmaheizung für ein Fusionskraftwerk noch nicht beantwortet ist, kommt auch dem Vergleich unterschiedlicher Heizverfahren an ein und derselben Plasmaanlage große Bedeutung zu.

An den zwei großen IPP-Experimenten ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS wurden in den letzten Jahren die Plasmaheizungen weiter ausgebaut und neue Heizsysteme erfolgreich in Betrieb genommen. Die Tabelle gibt einen Überblick über die eingesetzten Heizverfahren - Neutralteilcheninjektion, Elektronen- und Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung.

Die Neutralteilcheninjektion ist ein seit vielen Jahren erprobtes Verfahren, um Energie und Teilchen in Plasmen einzukoppeln. Obwohl das Grundprinzip der Neutralteilcheninjektion einfach ist (siehe Abschnitt "Plasma-

heizung"), ist die Realisierung eines zuverlässig arbeitenden Hochleistungsinjektors dennoch eine Herausforderung. Ein Beispiel ist die Herstellung des Ionenstrahls: Die beiden Injektoren für ASDEX Upgrade besitzen je vier Plasmaquellen, aus denen die positiv geladenen Wasserstoffionen abgesaugt und durch drei hintereinander liegende Elektroden beschleunigt werden. Um die verlangte Heizleistung zu erzielen, ist ein hoher Strahlstrom von 85 Ampere notwendig. Aus einer einzelnen Elektrodenöffnung gezogen, wäre dieser Strom durch die entstehende Raumladung begrenzt. Deshalb werden mehrere 100 Einzelstrahlen aus ebenso vielen Öffnungen einer gemeinsamen Elektrode herausgezogen. Die feinen Einzelstrahlen verschmelzen anschließend zu einem Gesamtstrahl mit etwa teller großem Querschnitt.

Die Gitterelektroden sind ein handwerkliches Meisterstück: Mit höchster Präzision gefertigt, hält eine ausgefeilte Wasserkühlung jede einzelne Öffnung trotz der hohen Wärmebelastung während des Heizpulses auf hundertstel Millimeter relativ zu ihrem Partner im folgenden Gitter in Position. Inzwischen arbeiten diese Injektoren sehr erfolgreich und zuverlässig. Mit 14 (statt 12) Megawatt in Wasserstoff und über 20 (statt 18) Megawatt in Deuterium konnte die vorgesehene Nennleistung sogar deutlich überschritten werden. Die Abbildung auf Seite 67 zeigt die 50 Tonnen schwere Injektorbox auf dem Transport zum Experiment.

Der zweite Injektor ist ausgestattet mit neu entwickelten Hochfrequenz-Ionenquellen - mit maximal je 90 Ampere Strahlstrom und bis zu 100 Kilovolt Extraktionsspannung. Durch Einbau von vier weiteren Ionenquellen wurde inzwischen auch die Leistung der zwei kleineren Neutralstrahlinjektoren am Experiment WENDELSTEIN 7-AS aufgestockt. Zusätzlich wurde die ursprüngliche Anordnung der beiden Injektoren umgestellt: die Injektoren schießen die Neutralteilchen nun nicht mehr gegensinnig sondern im gleichen Drehsinn ein. Mit dieser Maßnahme und der Leistungsverdoppelung auf etwa drei Megawatt kommt die erreichbare Plasmaenergie an die für den Stellarator vorhergesagte Stabilitätsgrenze heran.

Die Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung (ICRH) koppelt Wellenenergie im Bereich der Ionen-Zyklotron-Frequenzen von typisch 30 bis 80 Megahertz in das Plasma ein, um die mit der jeweiligen Frequenz resonanten Ionen gezielt zu beschleunigen. An ASDEX Upgrade stehen vier Hochfrequenz-Generatoren mit

**Schwenkbares  
Spiegelsystem im  
Plasmagefäß von  
ASDEX Upgrade zur  
Einkoppelung von  
Mikrowellen**



je zwei Megawatt maximaler Ausgangsleistung zur Verfügung. Die Hochfrequenzleistung wird über längere Koaxialleitungen bis zum Plasmagefäß übertragen und hier über vier Antennen mit jeweils zwei Dipolschleifen in das Plasma eingestrahlt. Die Abbildung links zeigt zwei dieser Antennen, wobei die Sicht auf die eigentlichen Dipolschleifen durch eine Vielzahl von parallelen Stäben verdeckt ist. Diese sogenannten „Faraday-Stäbe“ wirken als Polarisationsfilter und sorgen für die richtige Ausrichtung, d.h. Polarisation, der abgestrahlten Wellen.

Da die Wellenausbreitung stark von den Plasmawerten abhängt, stellt die effiziente Einkopplung der Hochfrequenzleistung ins Plasma ein größeres Problem dar, das durch die vielfach auftretenden Instabilitäten des Plasmarandes, sogenannte „Edge Localized Modes“, noch zusätzlich erschwert wird. Für die ICRH-Antennen bewirken diese Schwankungen des Plasmarandes starke Lastwechsel, die den Volllastbetrieb der Hochfrequenzsysteme bisher unmöglich machten. Aus diesem Grunde konnten auch an ASDEX Upgrade bisher nur zwei Drittel der erwarteten maximalen Heizleistung von sechs Megawatt erreicht werden. Inzwischen wurden jedoch neue, schnell reagierende Last-Anpassungskonzepte entwickelt, so dass in neueren ICRH-Experimenten deutliche Verbesserungen erzielt werden konnten.

Entsprechend dem Verhältnis von Ionen- zu Elektronenmasse liegt die Frequenz der Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung (ECRH) über 1000mal höher im Bereich der Mikrowellen. Dieses Höchsthochfrequenzheizverfahren ist ausschließlich auf die Plasmaelektronen ausgerichtet und wurde schon seit Beginn der 80er Jahre - als Gemeinschaftsvorhaben des Instituts für Plasmaforschung der Universität Stuttgart und des Garching Stellarator-Teams - erfolgreich an den Stellaratoren WENDELSTEIN 7-A und WENDELSTEIN 7-AS eingesetzt. Inzwischen hat in enger Zusammenarbeit dieser Gruppen ein entsprechendes ECRH-Programm auch am Tokamak ASDEX Upgrade begonnen. Beteiligt an diesem Programm sind außerdem das Institute for Applied Physics in Nishni Nowgorod, das auf dem Gebiet der Hochleistungs-Millimeter-Wellenröhren, der so genannten Gyrotrons, weltweit führend ist.

An ASDEX Upgrade ist eine ECRH-Anlage mit viermal 0,5 Megawatt bei 140 Gigahertz und einer Pulslänge von zwei Sekunden in Betrieb; eine größere Anlage mit zehn Sekunden Pulslänge wird vorbereitet. Die Mikrowellen bieten die Möglichkeit, die Plasmaelektronen sehr lokalisiert zu heizen. Damit könnten durch Leistungsmodulation der Gyrotrons Wärmewellen im Plasma angeregt werden, die Aufschluss über die Elektronenwärmeleitfähigkeit geben. Es hat sich gezeigt, dass sie nichtlinear vom Temperaturgradienten abhängt, wie es von Turbulenztheorien vorher gesagt wird - ein wichtiger Beitrag zur Aufklärung des anomalen Wärmetransports.

Durch Einstrahlen von ECRH-Wellen schräg zum Magnetfeld kann außerdem lokal ein Gleichstrom getrieben werden. Damit ist es geglückt, Plasmainstabilitäten zu unterdrücken, die den Energieeinschluss verschlechtern. In gleicher Weise kann durch ECRH-Stromtrieb das globale Stromprofil im Plasma verändert werden und das Plasma in ein anderes Einschlussregime - zum Beispiel das „Advanced Tokamak-Regime“ - gebracht werden.

**Grundparameter der an WENDELSTEIN 7-AS und ASDEX Upgrade eingesetzten Heizverfahren**

		WENDELSTEIN 7-AS	ASDEX Upgrade
Neutralteilchen- heizung	max. Teilchenenergie (Kiloelektronenvolt)	50 (H <sup>0</sup> )	65 (100) (D <sup>0</sup> )
	Leistung (Megawatt)	3	20
	max. Pulslänge (Sekunden)	3	10
Ionen-Zyklotron- Resonanz *	Frequenz (Megahertz)	30 - 80	30 - 80
	Leistung (Megawatt)	1	8
	max. Pulslänge (Sekunden)	1	5
Elektronen-Zyklotron- Resonanz	Frequenz (Gigahertz)	70 und 140	140 (105-140)
	Leistung (Megawatt)	0,5 und 1 (2)	2 (4)
	max. Pulslänge (Sekunden)	3	2 (10)

\*) an WENDELSTEIN 7-AS seit Anfang 2000 außer Betrieb



**Blick in das Plasma-  
gefäß von ASDEX  
Upgrade. Die dunklen  
Graphitziegel sind mit  
Wolfram beschichtet.**

## **Plasma-Wand- Wechselwirkung**

Im Bereich Oberflächenphysik werden die Belastungen untersucht, denen die dem Plasma zugewandten Oberflächen des Plasmagefäßes ausgesetzt sind. Insbesondere treffen fortwährend Teilchen aus dem heißen Wasserstoffplasma auf die umgebenden Wände, wobei sie Atome des Wandmaterials heraus schlagen können. Diese Teilchen können in das Plasma eindringen und führen dort als Verunreinigungen zu Energieverlusten. Sie nehmen nämlich durch Stöße mit den Plasmateilchen Energie auf, die sie in Form von Lichtstrahlung wieder freigeben. Dies führt zu unerwünschter Kühlung des Plasmas. Darüber hinaus führt ein zu großer Anteil an Verun-

reinigungen zur Verdünnung des Fusionsbrennstoffs und damit zum Absinken der Fusionsleistung. Die Wechselwirkungen zwischen Plasma und Wand werden vornehmlich in Laborexperimenten untersucht, um die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse aufzuklären und die zugehörigen atomaren Daten zu bestimmen. Darüber hinaus werden an den Fusionsanlagen direkt die Teilchenflüsse zu den Wandkomponenten und die daraus resultierenden Veränderungen der Wandoberfläche untersucht.

Bei der Auswahl von Materialien für Fusionsmaschinen muss man zwei Bereiche des Plasmagefäßes bezüglich der Art der Belastung durch einfallende Teilchen unterscheiden: In der Plasmahauptkammer handelt es sich bei den einfallenden Teilchen hauptsächlich um neutrale Atome, die im Plasma durch Umladungsprozesse erzeugt werden. Sie besitzen Energien bis zu einigen zehn Kiloelektronenvolt und Flussdichten im Bereich von  $10^{20}$  Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde. Dagegen sind im Divertorbereich, wo die Plasmaionen abgeführt werden, die Targetplatten einem hohen Ionenfluss bis zu einigen  $10^{23}$  Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde ausgesetzt, jedoch wesentlich geringeren Energien unter 100 Elektronenvolt.

In heutigen Fusionsexperimenten wird in der Regel Kohlenstoff als Material für plasmabelastete Wandkomponenten sowohl im Divertor als auch in der Hauptkammer verwendet. Bei diesem Element führen die aus der Materialerosion stammenden Verunreinigungen im Plasma nur zu vergleichsweise geringen Strahlungsverlusten, so dass optimale Plasmabedingungen erreicht werden können. In einem Fusionskraftwerk ist die Verwendung von Kohlenstoff jedoch problematisch, da bei der Wiederablagerung erodierter Kohlenstoffatome das radioaktive Brennstoffisotop Tritium in größeren Mengen fest gebunden wird. Am Tokamak ASDEX Upgrade wird aus diesem Grund Wolfram als alternatives Material für plasmabelastete Komponenten untersucht. Wolfram weist wesentlich niedrigere Abtragungsraten als Kohlenstoff auf. Durch seine hohe Kernladungszahl verursacht es jedoch wesentlich stärkere Strahlungsverluste, so dass die tolerierbare Konzentration um einen Faktor 1000 unter der von Kohlenstoff liegt. Die Eignung von Wolfram als Wandmaterial war deshalb zunächst in Frage gestellt und musste untersucht werden.

Für den Divertorbereich konnte an ASDEX Upgrade die Verwendbarkeit von Wolfram

bereits erfolgreich demonstriert werden. Wünschenswert wäre die Verwendung von Wolfram jedoch auch für Wandkomponenten in der Plasmahauptkammer. Dazu wurde an der Abdeckung der inneren Hauptkammerwand von ASDEX Upgrade in den letzten Experimentierkampagnen Wolfram mit stetig zunehmendem Flächenanteil benutzt. Auf die verwendeten Graphitziegel wurde dafür eine Wolframschicht mit einer Dicke von einem Mikrometer aufgedampft (siehe Abbildung links).

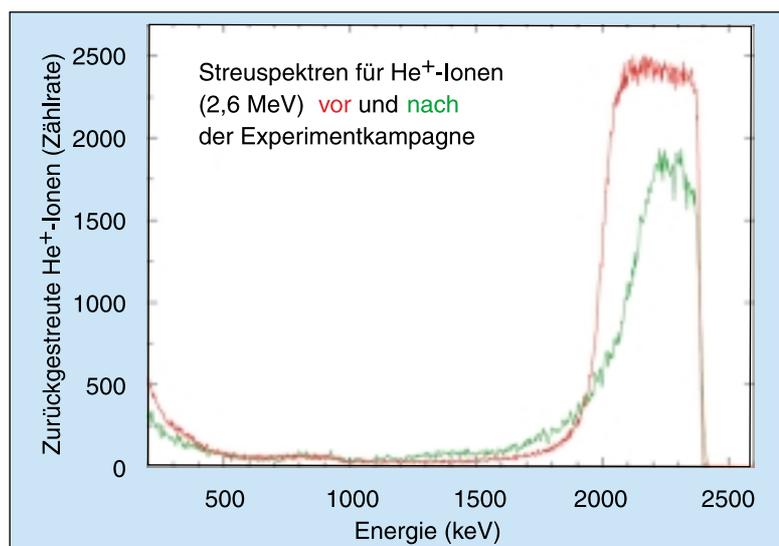
Die bisherigen Experimente haben gezeigt, dass auch in diesem Bereich die Erosion von Wolfram nicht zu Konzentrationen über der Toleranzschwelle im Plasma führt. Allerdings stellte sich heraus, dass die gemessene Erosion wesentlich stärker war als ursprünglich aufgrund des vergleichsweise geringen Flusses von Umladungsatomen angenommen wurde. Zur Quantifizierung der Erosionsrate und zur Erkundung der beteiligten Prozesse wurde die Erosion durch Messung der Wolframschichtdicke vor und nach der Experimentierkampagne mittels Ionenstrahlanalyse bestimmt. Die Abbildung rechts zeigt das Energiespektrum von Heliumionen, die an den beschichteten Ziegeln zurückgestreut wurden. Die Fläche unter dem zur Wolframschicht gehörenden Signalanteil entspricht näherungsweise der Schichtdicke. Bei dem nach der Experimentierkampagne aufgenommenen Spektrum hat sich, wie die Abbildung zeigt, die Wolframmenge deutlich vermindert.

Entsprechende Messungen wurden an einer ganzen Reihe von Ziegeln ausgeführt, um die räumliche Verteilung der Erosionsrate zu bestimmen. Dabei beobachtet man starke Variationen der Erosionsrate selbst auf einzelnen Ziegeln. Daraus kann man schließen, dass die Erosion nicht durch den Einfall neutraler Atome erfolgen kann, da deren räumliche Verteilung sehr homogen ist. Durch Analyse der Magnetfeldlinien, entlang derer sich die eingeschlossenen Plasmateilchen bewegen, kann man zeigen, dass die Oberflächenbereiche mit starker Erosion von Feldlinien geschnitten werden, die aus der Plasmazone kommen, während Bereiche geringer Erosion entlang der Feldlinien abgeschattet sind. Die beobachtete Erosion kann also im wesentlichen auf den Einfall von Ionen aus dem Plasma zurückgeführt werden.

Messungen der Iontemperaturen an den betrachteten Oberflächen deuten jedoch darauf hin, dass die Energie der einfallenden Deuteriumionen nicht ausreicht, um Wolfram

nennenswert abzutragen. Die Erosion kann deshalb nicht durch Deuteriumionen, sondern muss durch Kohlenstoffionen erfolgen, die noch immer als Verunreinigung im Plasma vorhanden sind. Eine ähnliche Beobachtung wurde früher bereits im Wolfram-Divertor gemacht. Für die in Zukunft geplanten Experimente sollen deshalb die noch vorhandenen Kohlenstoffkomponenten durch Wolfram ersetzt werden. Mit dem damit einhergehenden Rückgang der Kohlenstoffkonzentration im Plasma ist zu erwarten, dass sich die Wolframerosionsrate entsprechend weiter vermindern wird.

**Streuspektren von Heliumionen an Wolfram-beschichteten Graphitziegeln der Hauptkammerwand von ASDEX Upgrade vor (rot) und nach (grün) einer Experimentierkampagne. Die Änderung der Fläche unter der Messkurve ist ein Maß für die Abnahme der Wolframbeschichtung.**



## Materialforschung

Plasmabelastete Materialien unterliegen in Fusionsanlagen hohen Belastungen durch die Wärmeabstrahlung aus dem Plasma und durch energiereiche Plasmateilchen wie Elektronen, Ionen und Atome, die auf die Materialoberfläche treffen. Hierdurch entstehen hohe Wärmeflüsse, die von der Materialoberfläche abgeführt werden müssen. Zusätzlich wird das plasmabelastete Material durch die auftreffenden Plasmateilchen abgetragen, was die Lebensdauer der plasmabelasteten Komponenten stark verringern kann. In einem Fusionskraftwerk werden überdies hohe Flüsse von Fusionsneutronen erzeugt, die auf ihrem Weg durch die plasmabelasteten Komponenten Strahlenschäden verursachen. Die Forschungsarbeiten im Bereich Materialforschung befassen sich daher mit der Entwicklung und Untersuchung von möglichst

**Wandverkleidung für  
WENDELSTEIN 7-X mit  
Borcarbid-Beschichtung  
(Prototyp)**



robusten Materialien für die plasmabelasteten Komponenten von Fusionsanlagen.

**Plasmabelastete Materialien:**

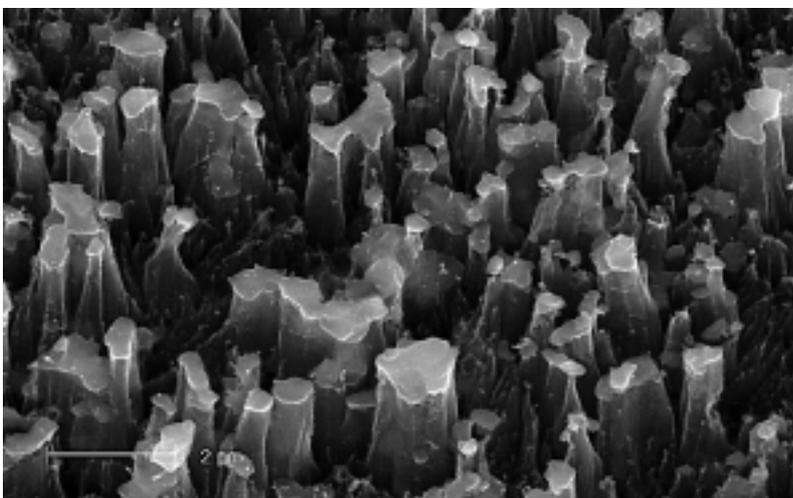
In gegenwärtigen Fusionsanlagen werden vornehmlich Materialien mit niedriger Kernladungszahl  $Z$  wie Kohlenstoff oder Beryllium eingesetzt. Wird die Oberfläche der Materialien bei Plasmakontakt erodiert, so können Atome des Wandmaterials ins Plasma eindringen. Wegen der geringen Kernladungszahl sind bei den hohen Plasmatemperaturen jedoch nur noch wenige bzw. keine Elektronen an die Atomrümpfe gebunden. Daher entsteht nur begrenzter Strahlung am kälteren Plasmarand, die zu einem tolerierbaren Leistungsverlust aus dem Plasma führt. So werden für die Erste Wand von WENDELSTEIN 7-X Borcarbidbeschichtungen entwickelt, die auf großflächigen, dreidimensional geformten Wandbauteilen aus Edelstahl aufgebracht werden können. Für diese Anwen-

dung wurden erstmalig plasmagespritzte Schichten mit einer Schichtstärke bis zu 0,5 Millimeter auf großflächige Wandbauteile aufgebracht. Borcarbid hat gegenüber Kohlenstoff den Vorteil, dass es gegen den chemischen Angriff durch das Wasserstoffplasma resistent ist. Unter zyklischen Wärmebelastungen in einer Testanlage des Forschungszentrums Karlsruhe zeigten die mit Borcarbid beschichteten Bauteile keine Schädigung.

Für Komponenten, deren Oberfläche hohen Wärmelasten ausgesetzt ist - zum Beispiel die Divertorplatten - bieten sich Graphite und kohlefaserverstärkte Kohlenstoffe an. Einen Weg, die Vorteile des Graphits wie hohe thermische Stabilität und gute Wärmeleitfähigkeit zu nutzen und die chemische Erosion durch den Wasserstoffangriff zu reduzieren, weisen dotierte Graphite auf. Karbid-dotierungen bilden durch ihre Anreicherung an der belasteten Oberfläche einen wirkungsvollen Schutz des graphitischen Matrixmaterials. Der Wasserstoff aus dem Plasma trifft vornehmlich auf die an der Oberfläche befindlichen Karbide und kann nicht mit dem freien Kohlenstoff des Graphits zu Methan reagieren. Zusätzlich können, je nach Karbid, chemische Oberflächenprozesse die Reaktivität des Graphits beeinträchtigen, so dass bei erhöhten Temperaturen eine weitere Verringerung der chemischen Erosion erreicht wird.

Trotz seiner hohen Kernladungszahl ist jedoch auch ein Material wie Wolfram von großem Interesse für die Anwendung in Fusionskraftwerken. Als schweres Element ist Wolfram einer wesentlich geringeren Zerstäubungserosion durch Wasserstoff-

**Erodierte Graphit-  
oberfläche nach Belas-  
tung mit Deuterium-  
ionen. Man erkennt  
Titankarbidkörner  
auf den Spitzen der  
Graphitnadeln.**



teilchen unterworfen. Die Lebensdauer von Wolfram-beschichteten Komponenten könnte daher auch für den Betrieb eines Kraftwerks ausreichend sein. Da wegen der hohen Kernladungszahl nur sehr geringe Verunreinigungskonzentrationen im Plasma toleriert werden können, wurde in ASDEX Upgrade die Plasmaverträglichkeit von Wolfram untersucht. Die dazu entwickelten dünnen Wolframschichten hafteten auch unter hohen thermischen Belastungen gut auf Graphit und auf Kohlefaser-verstärktem Kohlenstoff. Weitere Informationen zu Wolfram als Wandmaterial finden sich im Kapitel „Plasma-Wand-Wechselwirkung“.

#### Dünne Sperrschichten:

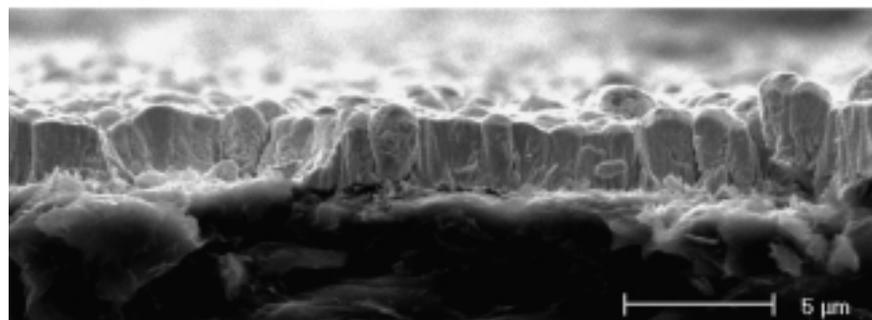
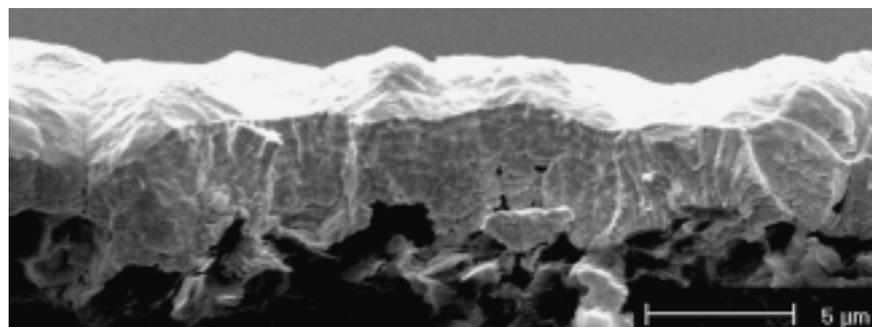
Wasserstoffisotope können sich in vielen metallischen Materialien leicht ansammeln oder auch durch sie hindurch treten. Im Falle von Tritium ist diese Permeation unerwünscht, da in einer Fusionsanlage das Tritiuminventar möglichst begrenzt und lokalisierbar sein muss. Dünne oxidische Beschichtungen auf Metallen können jedoch zu einer sehr starken Absenkung der Wasserstoffpermeation führen. Derartige Sperrschichten aus Aluminiumoxid werden im IPP gezielt durch einen atomaren Plasmaprozess abgeschieden. Durch die Einstellung der Ionenenergie während der Abscheidung konnte dabei eine stabile kristalline Mikrostruktur der Schicht erreicht werden.

#### Metall-Matrix Komposite:

Die Verstärkung von Metallen wie Kupfer oder niedrig-aktivierbarer Stahl durch keramische Fasern, insbesondere aus Silizium-

karbid, könnte zu thermisch hochbelastbaren Werkstoffen mit hoher Festigkeit führen. Grundlagenuntersuchungen sollen zeigen, ob diese Materialklasse, die insbesondere für die Luftfahrt entwickelt wurde, auch für die Anwendung in Fusionsanlagen angepasst werden kann. Dabei ist die Entwicklung der Grenzflächeneigenschaften zwischen der Faserverstärkung und der metallischen Matrix von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften des Verbundmaterials. Entsprechend werden im IPP Modellkomposite synthetisiert, an denen die Phasenbildung an inneren Grenzflächen und die mikromechanischen Eigenschaften untersucht werden können.

**Dünne Wolframschichten, die durch unterschiedliche Verfahren abgeschieden wurden; oben: Verdampfung in einem Lichtbogen, unten: Magnetron-Zerstäubung. Die Mikrostruktur der abgeschiedenen Schichten ist in hohem Maße prozessabhängig.**



## Plasmatechnologie

Die Gruppe „Plasmatechnologie“ verfolgt drei Aufgaben: Mit Hilfe plasmachemischer Verfahren werden Oberflächen vergütet und Beschichtungen hergestellt, die in den Fusionsanlagen des Instituts benötigt werden. Falls notwendig, werden hierfür spezielle Beschichtungsverfahren entwickelt oder verbessert. Da dies ein tieferes Verständnis der zugrundeliegenden chemischen und physikalischen Vorgänge erfordert, werden Plasma- und Schichteigenschaften systematisch analysiert und mikroskopische Prozesse der Plasma-Oberflächen-Wechselwirkung untersucht.

Intensiv beschäftigt man sich zum Beispiel mit amorphen wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschichten, die sowohl kommerziell genutzt als auch in den großen Fusionsexperimenten zum Schutz der metallischen Gefäßwände eingesetzt werden. Das Abtragen und an anderer Stelle wieder Ablagern solcher Schichten in einem Plasma, also Deposition und Erosion, wird mit einem neuartigen, zum Patent angemeldeten Messverfahren untersucht, das auf der spektroskopischen Ellipsometrie beruht. Das hochempfindliche optische Verfahren kann die Eigenschaften eines Schichtsystems sehr genau und in-situ vermessen, d.h. während die Schichten dem Plasma ausgesetzt sind. Damit wurde das Aufwachsen und Abtragen von wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschichten

**Zur Simulation mikroskopischer Vorgänge an der Gefäßwand von Fusionsexperimenten werden in dieser Anlage amorphe Kohlenwasserstoff-Schichten hergestellt und während des Wachstums durch ausgefeilte Messverfahren beobachtet.**

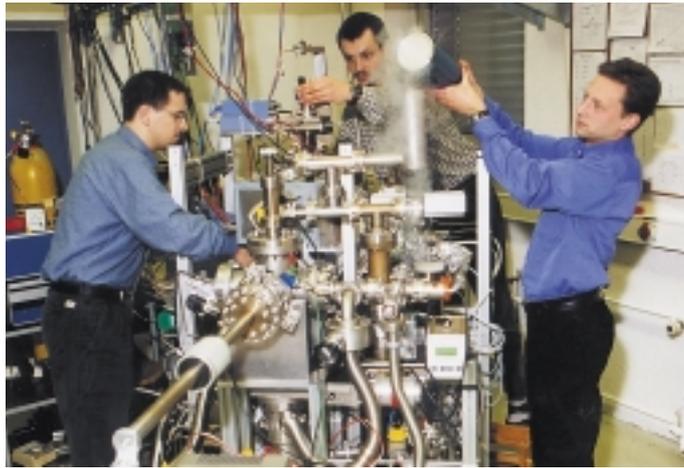
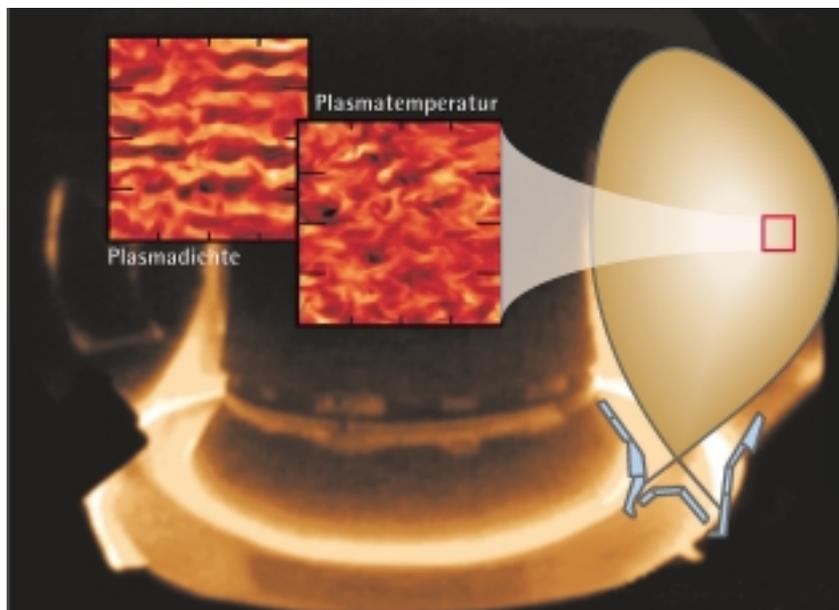


Foto: Doris Beiter

in Abhängigkeit von der Energie der auftretenden Plasmaionen und der Temperatur des Substrats untersucht. Im allgemeinen stieg die Erosionsrate mit zunehmender Ionenenergie und steigender Substrattemperatur, wobei allerdings im Detail überraschende Abweichungen entdeckt wurden.

Insbesondere die Wechselwirkungen von atomarem Wasserstoff und Kohlenwasserstoff-Radikalen mit Kohlenstoff-Oberflächen spielen in der Randschicht und im Divertor von Fusionsexperimenten eine wichtige Rolle und sind bei der Auslegung künftiger Anlagen

zu berücksichtigen. Deshalb werden diese Prozesse in Modellexperimenten intensiv untersucht. Eine ganze Reihe mikroskopischer Prozesse wurde in den letzten Jahren detailliert analysiert und teilweise quantitativ aufgeklärt. Insbesondere konnte das Haftvermögen von Methyl-Radikalen auf der Oberfläche von Kohlenwasserstoffschichten bestimmt werden. Abgesehen von ihrem Nutzen für die Fusionsforschung sind die hierbei gewonnenen Elementardaten ebenso für die Modellierung gleichartiger Prozesse bei der Plasmadeposition technologisch interessanter Schichten - zum Beispiel harter amorpher Kohlenstoff- oder Diamantschichten - von Bedeutung.



**Turbulente Plasmastörungen führen zu einem erhöhten Transport von Teilchen und Energie. Die hier für ASDEX Upgrade gezeigten Fluktuationen sind das Resultat einer Computersimulation.**

## Tokamakphysik

Der Bereich Tokamakphysik untersucht grundlegende Fragen der theoretischen Plasmaphysik und unterstützt die experimentellen Tokamak-Aktivitäten des IPP. Der Schwerpunkt liegt bei ASDEX Upgrade, zunehmend werden aber auch JET-Plasmen analysiert. Dabei kommt dem Vergleich der beiden Tokamaks eine besondere Bedeutung zu: Nur wenn die entwickelten Rechenprogramme beide - unterschiedlich großen - Tokamaks gut beschreiben, kann man ihren Vorhersagen für den nochmals größeren ITER oder gar für ein Fusionskraftwerk vertrauen. Zu den untersuchten Fragestellungen gehören die Berechnung von Plasmagleichgewichten und ihrer Stabilität gegenüber makroskopischen und mikroskopischen Störungen, die Ausbreitung und Absorption von Wellen in inhomogenen Plasmen, die Beschreibung der Plasma-Randschicht, Modellierungen zum Teilchen- und Energietransport sowie

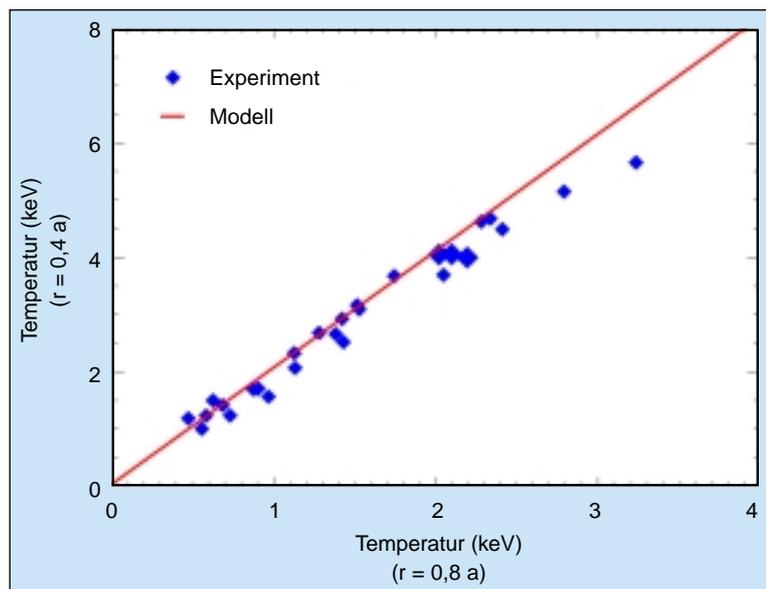
Simulationen des turbulenten Transports.

Makroskopische Plasmainstabilitäten werden meist von Druckunterschieden, aber auch von Stromstärkedifferenzen angeregt. Auch schnelle Plasmateilchen, die durch Mikrowellen- und Neutralteilchenheizung beschleunigt wurden, oder die schnellen Heliumionen in einem brennenden Plasma können solche Instabilitäten hervorrufen. Sie führen zu einem Verlust von Teilchen und Energie und schränken so den Bereich der erzielbaren Plasmawerte ein. Besonders kritisch ist dabei die Begrenzung der erreichbaren Beta-Werte, also des Plasmadrucks im Verhältnis zu dem vom Magnetfeld erzeugten Druck. Da man - um Kosten zu sparen - den zur Fusion erforderlichen Plasmadruck bei möglichst kleinem Magnetfeld erreichen will, werden insbesondere druckgetriebene Instabilitäten intensiv untersucht. Durch gemeinsame theoretische und experimentelle Arbeiten ist es gelungen, solche Instabilitäten gänzlich zu vermeiden oder bereits aufgetretene Instabilitäten aktiv zu unterdrücken.

Den Energie- und Teilchentransport in Tokamak-Plasmen hat man in den vergangenen Jahren deutlich besser verstanden. Zu Beginn der Fusionsforschung wurde angenommen, dass der Transport von Teilchen und Energie senkrecht zum Magnetfeld ausschließlich durch Stöße zwischen den Plasmateilchen hervorgerufen wird. Wäre das richtig, könnte die Zündung des Plasmas schon in einem sehr kleinen Tokamak erreicht werden. Experimente haben jedoch gezeigt, dass der tatsächliche Transport senkrecht zum Magnetfeld bis zu drei Größenordnungen größer sein kann, als durch bloße Teilchenstöße erklärt werden könnte. Intensive theoretische und experimentelle Arbeiten konnten den Grund für diesen zusätzlichen, „anormalen“ Transportmechanismus klären: Mikroskopische Instabilitäten, getrieben durch Druckdifferenzen im Plasma, führen zu turbulenten Strömungen und damit zu einem Transport von Teilchen und Energie. Das theoretische Verständnis dieses zusätzlichen Transportmechanismus ist von großer Bedeutung für die Planung künftiger Fusionsanlagen, denn bis heute ist man dabei noch auf Hochrechnungen mittels empirischer Skalierungsgesetze angewiesen, die man aus bisherigen Fusionsexperimenten gewonnen hat.

Einfache Modelle können dieses nichtlineare Phänomen allerdings nicht beschreiben; hierzu sind aufwendige numerische Simulationen nötig. Entscheidende Fortschritte konnte man daher erst in den letzten Jahren -

nach der Entwicklung schneller Hochleistungsrechner - erzielen. So gelang es beispielsweise, den grundlegenden Charakter der experimentell beobachteten Plasmafluktuationen in numerischen Simulationen zu reproduzieren (links unten). Insbesondere für die etwas kühlere und daher für Sondenmessungen zugängliche Plasmarandschicht wurden Theorie und Experiment vielfach detailliert verglichen, mit größtenteils guter qualitativer Übereinstimmung. Weiterhin wurde gezeigt, dass der numerisch berechnete turbulente Transport in der Tat groß genug ist, um die zusätzlichen Verluste in den Plasmen zu



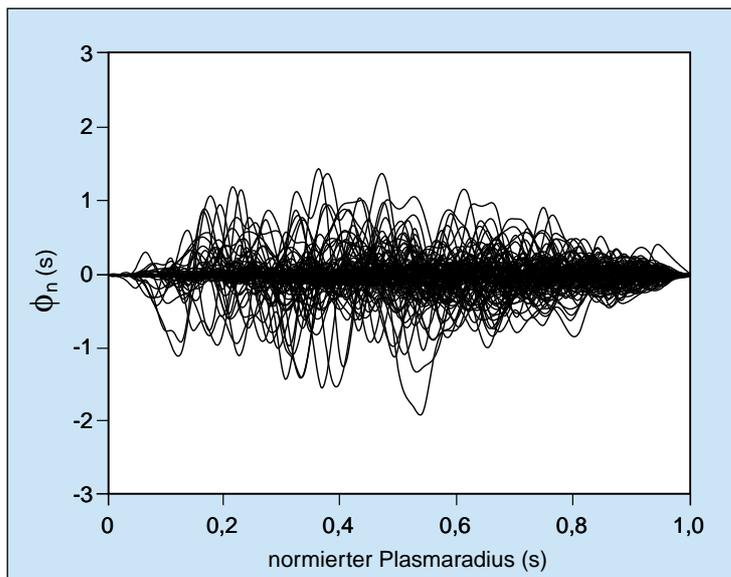
erklären. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die Turbulenz im Plasmazentrum überwiegend von Ionen-Temperatur-Unterschieden verursacht wird. Da diese Art von Turbulenz erst beim Überschreiten eines kritischen Temperaturgradienten einsetzt, dann aber mit wachsendem Gradienten rasch zunimmt, erwartete man, dass die experimentellen Werte für den Temperaturgradienten nahe an den von der Theorie vorhergesagten kritischen Werten liegen. Diese Vermutung konnte in zahlreichen Experimenten bestätigt werden. Eine Konsequenz dieses Verhaltens ist, dass der Temperaturverlauf im Plasmazentrum wesentlich von der Temperatur am Plasmarand bestimmt wird (siehe oben).

Die Arbeiten zur Randschicht- und Divertorphysik führten zur Entwicklung eines Rechenprogramms, mit dem das Verhalten der Randschicht eines Fusionsplasmas berechnet werden kann. Das Programm wurde gemeinsam mit Wissenschaftlern aus Jülich und New York entwickelt. Für eine

**Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Ionentemperaturen im Plasmazentrum und am Plasmarand.**

vorgegebene Heizleistung und Geometrie der Fusionsanlage gibt es Antwort auf die Fragen: Wie groß sind die Leistungsflüsse auf die Divertorplatten? Welche Dichte und Temperatur hat das Randplasma, das auf die Divertorplatten gelenkt wird? Gelingt es, die Verunreinigungen aus dem Divertor vom Eindringen in das Hauptplasma abzuhalten? Ist die Energieabfuhr durch Verunreinigungsstrahlung hoch genug? Kann das bei der Fusion entstehende Helium genügend gut abgepumpt

werden? Um diese und andere Fragen zu beantworten, müssen sowohl das Verhalten der geladenen Plasmateilchen und der Verunreinigungen im Magnetfeld korrekt erfasst als auch die Bahnen der Neutralteilchen verfolgt werden, die aus den Plasmaionen beim Kontakt mit den Divertorplatten entstehen. Zugleich sind atomphysikalische Vorgänge wie das Ablösen von Teilchen aus den Divertorplatten oder die Aussendung von Strahlung durch die Verunreinigungen zu beschreiben.



**Vollentwickelte Turbulenz in einem zylindrischen Plasma. Ursache sind von Temperaturunterschieden getriebene Instabilitäten. Der Abbildung liegt eine sogenannte Particle-in-Cell-Simulation mit etwa 100.000.000 Teilchen zugrunde. Gezeigt wird der Verlauf von etwa tausend Fourierkomponenten des fluktuierenden elektrischen Potentials über dem Plasmaradius.**

## Stellaratortheorie

Aufgabe des Bereichs Stellaratortheorie im IPP-Teilinstitut Greifswald ist es, kraftwerkstaugliche Magnetfelder in der toroidalen dreidimensionalen Geometrie der Stellaratoren zu finden und das Verhalten des Plasmas in ihnen zu beschreiben. Die für ein Kraftwerk notwendigen Plasmaeigenschaften werden dabei durch zwei sich ergänzende theoretische Beschreibungen erfasst: Dies ist zum einen die Magnetohydrodynamik, in deren Rahmen dreidimensionale Plasmagleichgewichte und deren Stabilität beschrieben werden. Der sie charakterisierende Beta-Wert (siehe Seite 11) muss ein ausreichend gutes Verhältnis von Plasma- zu Magnetfelddruck garantieren. Zum anderen muss die driftkinetische Beschreibung der Ionen und Elektronen zu einem guten

stoßbestimmten Einschlussverhalten des thermischen Plasmas und der ein Kraftwerksplasma heizenden Helium-Teilchen führen.

Das gegenwärtig in Greifswald entstehende Experiment WENDELSTEIN 7-X ist ein wesentlicher Schritt hin zu einem Stellarator-Kraftwerk, da es hinsichtlich dieser Eigenschaften theoretisch optimiert wurde. Bestandteil der Optimierung waren auch die das Magnetfeld erzeugenden Spulen. Im Bereich Stellaratortheorie werden diese Theorien weiter vertieft, so dass die für WENDELSTEIN 7-X vorhergesagten Eigenschaften detailliert und quantitativ beschrieben werden können. Wesentlich für den Betrieb von WENDELSTEIN 7-X sind ebenso der nicht durch die Stöße der Plasmateilchen bestimmte, sondern turbulente bzw. anomale Plasmatransport (siehe Abbildung links) und die Eigenschaften der Plasmarandschicht, in der ein Inseldivertor den Teilchen- und Energiefluss kontrollieren soll. Entsprechend beschäftigt sich die aktuelle Forschung auch mit der Entwicklung stellaratorspezifischer Theorien des turbulenten Transports und der Plasmarandschicht.

Darüber hinaus trägt der Bereich zur Fortentwicklung des Stellarator-Konzepts im allgemeinen bei. Sie verläuft bisher im wesentlichen entlang dreier Entwicklungslinien, die alle einen zu großen stoßbestimmten Transport vermeiden. Sie werden charakterisiert durch sogenannte Quasisymmetrien: erstens axiale, das heißt tokamakartige Symmetrie, zweitens helikale, das heißt lineare schraubenartige und drittens poloidale Symmetrie. Dabei bezieht sich der Symmetriebegriff nicht auf die räumliche Geometrie sondern auf die funktionale Form der Magnetfeldstärke. WENDELSTEIN 7-X gehört zum dritten Typus, der im Unterschied zu den beiden ersten nicht in reiner Form existiert. Er kann jedoch in einem verallgemeinerten Konzept, das die Konturen der sogenannten „zweiten

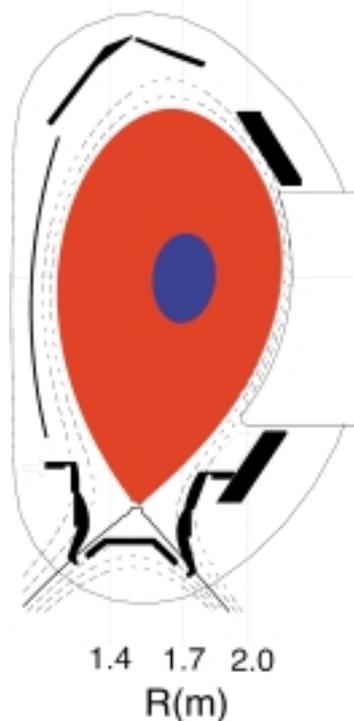
adiabatischen Invarianten“ betrifft, sehr gut angenähert werden.

Die Forschungen in diesen Arbeitsgebieten gehören zur Sparte der Physik mit dem Computer, der „Computational Physics“, da eine realistische Beschreibung der dreidimensionalen Stellaratorplasmen nur numerisch möglich ist. Aktuelle Forschungsthemen sind hierbei die Weiterentwicklung der Rechenverfahren für Gleichgewicht (PIES) und Spulen (NESCOIL), die Weiterentwicklung des dreidimensionalen magnetohydrodynamischen Stabilitätscodes CAS3D für leitende, das Plasma einschließende Wände, dessen kinetische Erweiterung CAS3D-K sowie die Weiterentwicklung linearer und nichtlinearer gyrokinetischer Codes, GYGLES und TORB. Hinzu kommt die Entwicklung eines dreidimensionalen Codes BoRiS für Turbulenz am Plasmarand, die Berechnung von Stellarator-konfigurationen mit niedrigem Verhältnis von großem zu kleinem Plasmaradius sowie die Analyse von Stellaratoren vom allgemeinen Typ der poloidalen Quasisymmetrie, die möglichst perfekten stoßfreien Einschluss der Helium-Teilchen zeigen. Diese Untersuchungen werden in vielfältigen internationalen Kollaborationen und Projekten betrieben.

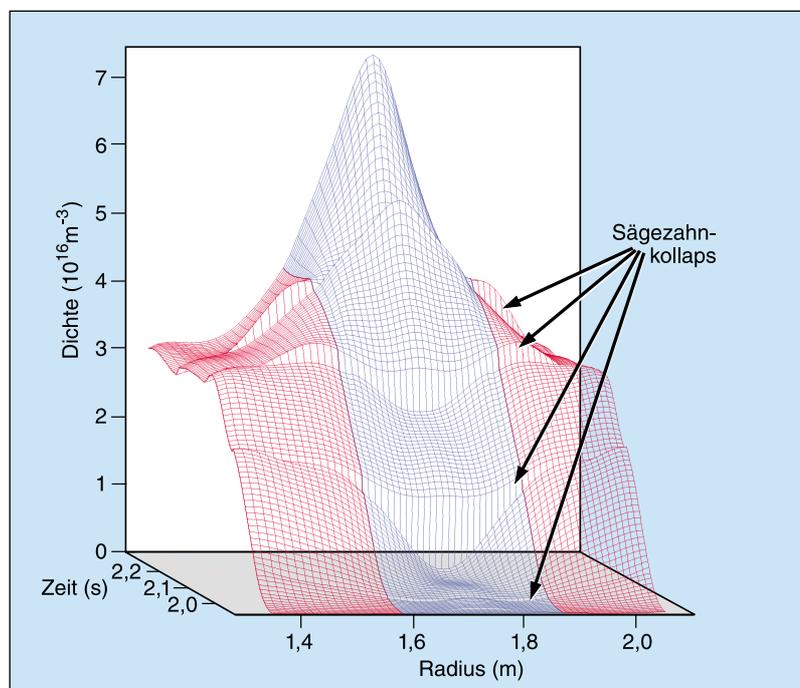
## Plasmadiagnostik

Ziele des Bereichs „Experimentelle Plasmaphysik 4“ sind vor allem das Verständnis der Randschichtphysik des Plasmas, des Teilchentransports, der Energieabfuhr durch Ultraviolett- oder Röntgenstrahlung aus dem Plasma und der Verunreinigungserzeugung auf chemischem Wege. Zur Lösung dieser Fragen hat der Bereich übergreifende Diagnostikaufgaben übernommen. Hierfür wurden hauptsächlich die Spektroskopiegruppen an den Experimenten ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS zusammengefasst, die das Plasma mit Hilfe des charakteristischen Lichts analysieren, das die Plasmateilchen aussenden.

Der Leiter des Bereichs hat gleichzeitig den Lehrstuhl für Experimentelle Plasmaphysik an der Universität Augsburg inne. Entsprechend finden die Forschungsarbeiten des Lehrstuhls zum Teil in Augsburg, zum größeren Teil in Garching statt. Gemeinsame Themen sind die Diagnostik und das Verständnis von Nichtgleichgewichtsplasmen,



1,95 Sekunden nach Entladungsbeginn wird kontinuierlich Argon in das Plasma von ASDEX Upgrade eingeblasen. Die gemessene Entwicklung der Argon-Dichte ist über der Zeit und dem Plasmaradius R aufgetragen.



wie sie sowohl in der - vor allem in Augsburg betriebenen - Plasmatechnologie als auch in der Fusionsforschung an den Großexperimenten des IPP Verwendung finden. Auch in Augsburg werden zur Diagnostik hauptsächlich spektroskopische Methoden genutzt, die auf dem Eigenleuchten der Plasmen oder auf aktiver Anregung mit Laserlicht oder Teilchenstrahlen beruhen. Während die Messungen dort auf den sichtbaren Spektralbereich und das nahe Vakuum-Ultraviolettlicht beschränkt sind, stehen in Garching umfangreiche Diagnostiken vom Infrarot- bis zum Röntgengebiet zur Verfügung. Über das engerere Forschungsgebiet des Lehrstuhls hinaus

**Der zentrale Plasmabereich ist blau, der äußere rot gekennzeichnet (siehe oben). Das Plasmazentrum befindet sich bei  $R_0 = 1,72$  Metern.**

werden den Studenten der Universität Augsburg in Garching ebenso Arbeitsmöglichkeiten auf dem ganzen Feld der Fusionsforschung angeboten.

Foto: Ulrich Schwemm

Durch spektroskopische Messungen lässt sich eine Vielzahl von Informationen über das Plasma gewinnen: Die Messungen haben einerseits die Bestimmung der Plasmawerte zum Ziel, also der verschiedenen Teilchendichten und Temperaturen, die für eine rechnerische Modellierung der Vorgänge im Plasma unerlässlich sind. Andererseits wird die Wechselwirkung der Plasmen mit den Gefäßwänden studiert, d.h. die Ablagerung oder Abtragung von Material an der Wand. Insbesondere untersucht werden dabei chemische Vorgänge wie die Bildung von Methan, Borwasserstoff, Kohlenmonoxyd und anderen Gasen, über die man aus der Interpretation der gemessenen Molekülspektren Informationen gewinnt. Spektroskopische Messungen dienen auch dem Studium des noch weitgehend ungeklärten Teilchentransports sowie der Untersuchung lokaler Phänomene, die zu einer theoretischen Erklärung des Transports führen könnten.



**Vakuumpipen, die an das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade angebaut sind, führen weiche Röntgenstrahlung aus dem Plasma zu verschiedenen Spektrometern.**

Für den Einsatz der Spektroskopie müssen zunächst die Spektren als solche bekannt sein oder berechnet werden, d.h. die Atom- und Ionenlinien, die Kontinua und die Molekülbanden der entsprechenden Teilchensorten. Zur Auswertung der gemessenen Strahlungsintensitäten braucht man spezielle Anregungsmodelle, für die experimentell gemessene oder theoretisch berechnete atomphysikalische Eigenschaften bekannt sein müssen. Dazu gehören Ratenkoeffizienten für Elektronenstoßanregung, Übergangswahrscheinlichkeiten, Linienverbreiterungsmechanismen sowie Querschnitte für Ladungsaustausch und andere Stoßprozesse. Auf diesem Gebiet wird intensiv mit Atom- und Astrophysikern zusammengearbeitet. Die grundlegenden Atomdaten werden dann in sogenannten Stoß-Strahlungs-Modellen für die Analyse der gemessenen Spektren aufbereitet.

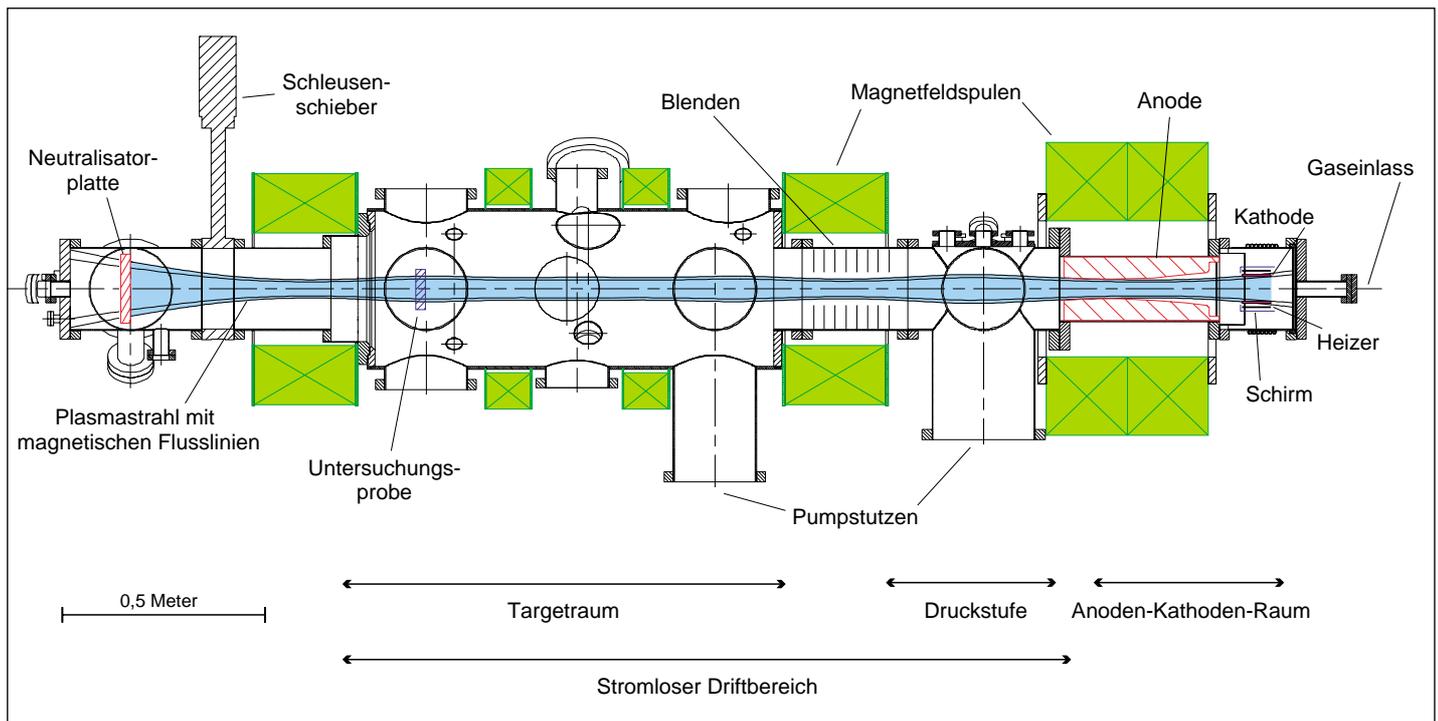
Ein Beispiel für die Aufgaben der Spektroskopie ist die Untersuchung des Verunreinigungstransports im Plasma. Von besonderem Interesse ist hier die Frage, inwieweit der Teilchentransport durch die unvermeidbaren Stöße zwischen den geladenen Ionen oder zusätzlich durch makroskopische Plasmainstabilitäten bzw. durch

mikroskopische Plasmaturbulenz verursacht wird. Der Transport durch Stöße kann unter ungünstigen Bedingungen zu einer Anhäufung von Verunreinigungen im Plasmazentrum führen. Die beiden anderen Transportprozesse hingegen arbeiten dieser Anhäufungstendenz entgegen, indem sie die sich einstellenden Dichteunterschiede wieder abbauen.

Da der stoßbestimmte Transport von der Ladungszahl der Verunreinigung abhängt, müssen die Untersuchungen für verschiedene Elemente ausgeführt werden. Dabei werden die gasförmigen Stoffe durch Ventile eingebracht. Feste Stoffe werden zunächst auf eine Glasplatte aufgetragen, von wo sie im Plasmagefäß mit einem Laserstrahl wieder abgedampft werden können. Als Beispiel zeigt die Abb. auf Seite 77 die Dichtentwicklung von Argon nach einer Injektion von einer Sekunde Dauer. Argon dringt zunächst sehr schnell zum Rand des zentralen Plasmabereichs vor, wo jedoch der weitere Transport in Richtung Zentrum sehr klein ist und schließlich von einer makroskopischen Plasmainstabilität, der sogenannten Sägezahn-Instabilität, bewerkstelligt wird. Im weiteren Verlauf erkennt man den Beginn einer sich aufbauenden Zuspitzung der Argondichte auf der Plasmaachse, die jeweils durch erneut auftretende Sägezahn-Instabilitäten periodisch abgebaut wird. Rechnungen zeigen, dass hierbei der Transport im äußeren Bereich hauptsächlich durch Turbulenz erfolgt, während der geringe Transport im Zentrum nur durch Stoßprozesse verursacht wird. Das Verständnis dieser Fragen und die damit einhergehende Entwicklung theoretischer Transportmodelle dient dazu, den Verunreinigungsgehalt in einem Fusionskraftwerk vorherzusagen.

## Bereich Berlin

Nach einer Empfehlung des Wissenschaftsrates, die fusionsorientierten Arbeiten des aufgelösten Zentralinstituts für Elektronenphysik der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR weiterzuführen, gründete die Max-Planck-Gesellschaft zusammen mit dem Land Berlin 1992 den IPP-Bereich Berlin. Als „Bereich Plasmadiagnostik“ wurde er 1999 organisatorisch dem Teilinstitut Greifswald zugeordnet. Die Mitarbeiter des Bereiches arbeiten bis Ende



2003 in Berlin; anschließend wird der größte Teil nach Greifswald umziehen. Forschungsschwerpunkt des Berliner Bereichs sind Plasmaverunreinigungen, deren Diagnostik und die Physik der Plasma-Randschicht in Fusionsanlagen.

Im Gegensatz zu der im heißen Zentrum des Plasmas geltenden Hochtemperatur-Plasmaphysik, die bis in die Strukturen der Atomkerne eingreift, beschäftigt sich die Physik des kälteren Plasmarandes auch mit Vorgängen, die sich in der Atomhülle abspielen. Hier kommt es zu vielfältigen Strahlungsprozessen sowie zu Recycling- und Transportvorgängen, für die insbesondere die durch Erosion freigesetzten Verunreinigungen verantwortlich sind.

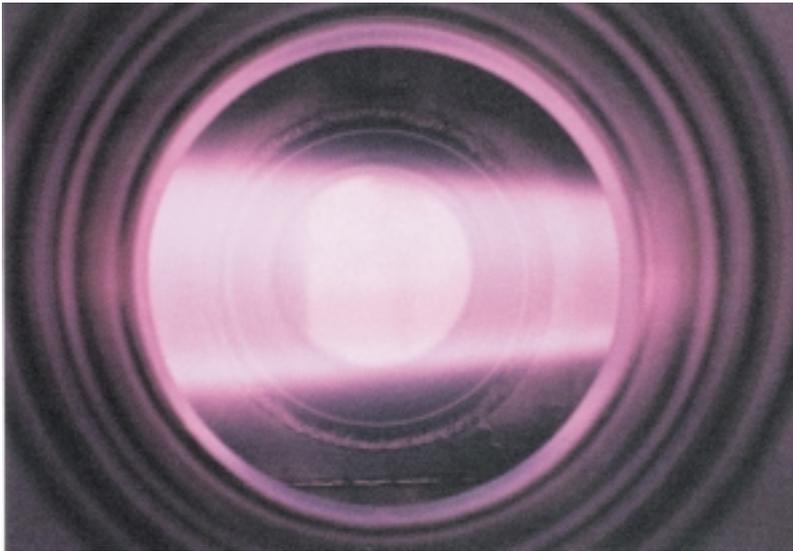
Ein Teil der Forschungskapazität des Bereichs Berlin ist direkt in die Garching Forschungsprogramme an den Experimenten ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS eingebunden, teilweise in Zusammenarbeit mit den dort ansässigen Gruppen, teilweise mit eigenen Messapparaturen. So betreibt der Bereich an ASDEX Upgrade einen Randschichtmanipulator und ein Randschichtspektrometer. Mit dem Manipulator werden kurzzeitig Sonden in die Randschicht hineingefahren, so dass hier Temperatur und Dichte mit hoher Ortsauflösung gemessen werden können. Mit dem Randschichtspektrometer können Verunreinigungen im Plasma nachgewiesen und deren Transport- und Strahlungseigenschaften untersucht werden. Auch

die Infrarot-Thermografie - ein Verfahren, das die Wärmebelastung besonders exponierter Bauteile bestimmt - wird vom Bereich Plasma-diagnostik an WENDELSTEIN 7-AS betreut. Neben dieser Teilnahme an den Garching Projekten ist der Bereich wesentlich an der Vorbereitung des neuen Stellarators WENDELSTEIN 7-X in Greifswald beteiligt.

Darüber hinaus hat der Bereich in Berlin eigene Aktivitäten auf experimentellem und theoretischem Gebiet aufzuweisen. Hierzu gehören der Plasmagenerator PSI-2, das EBIT-Experiment (Electron Beam Ion Trap) zur Erzeugung und Untersuchung hochgeladener Ionen und das Ultrahochvakuum-Labor zur Analyse von Materialien für Fusionsanlagen. Auch theoretische Untersuchungen des Plasmas im Randbereich von Fusionsanlagen werden ausgeführt.

Der Plasmagenerator PSI-2 erzeugt stationäre Plasmen, die dem Randplasma der Fusionsanlagen ähnlich sind. Im Gegensatz zu Fusionsexperimenten, die jeweils nur für wenige Sekunden ein Plasma erzeugen, lässt sich das Plasma im Plasmagenerator unter definierten Bedingungen für viele Stunden aufrechterhalten. Dies erlaubt wichtige experimentelle Beiträge zur Physik der Plasma-Wand-Wechselwirkung; zudem wird die Anlage für die Entwicklung und Erprobung neuer Diagnostiken eingesetzt. Wegen der vergleichsweise hohen Teilchenflüsse und Temperaturen können Materialien bei hoher thermischer Belastung erprobt werden. Die

**Schematische Ansicht des Plasmagenerators PSI-2. Das zylindersymmetrische Plasma erstreckt sich von der Kathode bis zur Neutralisator-Platte.**



**Molybdänprobe im Plasmastrahl des Plasmagenerators.**

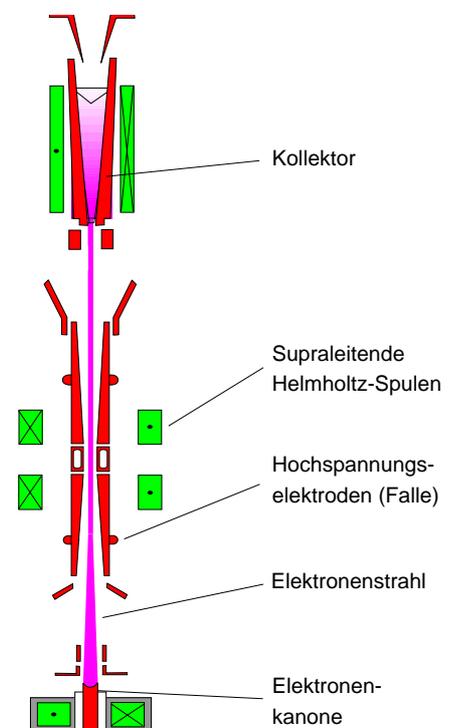
Anlage ist dabei deutlich kleiner als ein Fusionsexperiment, erfordert weniger Betriebspersonal und ist auch für die Untersuchung neuer Fragestellungen in der Grundlagenforschung geeignet.

Die Abbildung auf Seite 79 zeigt schematisch den Aufbau des Plasmagenerators PSI-2. Durch ein Ventil strömt das Arbeitsgas - zum Beispiel Wasserstoff - in den Entladungsraum, in den eine geheizte Kathode und eine ringförmige Anode ragen. Eine Hochstrom-Bogenentladung zwischen Anode und Kathode ionisiert das Arbeitsgas - es entsteht ein Plasma. Mit Hilfe von ringförmig angeordneten Magnetspulen wird ein axiales Magnetfeld einer Stärke von 0,1 bis 0,2 Tesla erzeugt. Es sorgt - ähnlich wie das Magnetfeld in Fusionsexperimenten - für den radialen Einschluss der Plasmateilchen. Hinter der Anode schließlich befindet sich ein System von Vakuumpumpen, um das durch Wandkontakt entstehende Neutralgas abzupumpen. Im sogenannten Target-Raum hat die Plasmasäule einen Durchmesser von etwa acht Zentimetern und kann für Plasma-Wand-Wechselwirkungsexperimente auf entsprechende Proben gerichtet werden.

Mit der Inbetriebnahme des Plasmagenerators wurden zunächst verschiedene diagnostische Methoden zur Bestimmung der Betriebs- und Plasmaparameter erprobt. Hierzu zählen aktive und passive spektroskopische Verfahren, elektrische Sonden und die Laserstreuung. Die Ergebnisse zeigten übereinstimmend, dass die mit dem Generator erreichbaren Plasmawerte im fusionsrelevanten Bereich liegen. Die Temperatur der Elektronen beispielsweise kann über etwa eine Größenordnung von 50.000 bis zu 350.000

Grad variiert werden. Am Plasmagenerator wurden auch neue Diagnostikverfahren für die Randschicht von Fusionsexperimenten entwickelt und erprobt. In Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin wurde ein neuartiges Zwei-Photonen-Spektrometer zur Bestimmung der Wasserstoff-Isotopendichte aufgebaut und erfolgreich getestet. Diese Messungen sind für die Fusionsforschung von großer Bedeutung, da in einem brennenden Fusionsplasma die Dichten der Deuteronen und Tritonen möglichst gleich sein sollten, um eine maximale Leistungsausbeute zu erhalten. Ein anderes Verfahren, das am Plasmagenerator erprobt wurde, nutzt die Anregung und nachfolgende Emission eines neutralen Heliumstrahls, um Dichte und Temperatur des umgebenden Plasmas zu bestimmen.

Schwerpunkt der künftigen Forschung sind Plasma-Target-Experimente, mit denen der Bereich zur Suche nach alternativen Wandmaterialien für Fusionsexperimente beitragen will. Hervorzuheben sind Untersuchungen zur chemischen Erosion von unterschiedlichen kohlefaser-verstärkten Kohlenstoffmaterialien. Hier hat es sich als sehr vorteilhaft erwiesen, dass Elektronen- und Targettemperatur sowie die Auftreffenergie der Ionen weitgehend unabhängig voneinander eingestellt werden können. Weitere Schwer-



**Schematische Anordnung der wesentlichen Bauteile der Ionenfalle EBIT.**

punkte bilden Untersuchungen zum radialen und axialen Transport im Plasma und dessen Beeinflussung durch Fluktuationen und Plasmarotation sowie eine direkte Messung der Leistungsübertragung vom Plasma auf ein Target und deren Winkelabhängigkeit.

Mit der Ionenfalle EBIT können durch Ionisation von neutralen Atomen hochgeladene Ionen erzeugt und spektroskopisch untersucht werden. Hochgeladene Ionen kommen unter anderem in Stern- und Fusionsplasmen vor, wo wegen der hohen Temperaturen die Atome sich in ihre Bestandteile - Kerne und Elektronen - zerlegen. Für die Analyse derartiger Ionen bietet die EBIT einzigartige Möglichkeiten, da mit ihr nahezu jedes beliebige Element des Periodensystems in entsprechend hohe Ladungszustände überführt und unter definierten Bedingungen untersucht werden kann.

Die Abbildung links zeigt die schematische Anordnung der EBIT-Quelle: Ein Elektronenstrahl wird im Bereich der Hochspannungselektroden, der eigentlichen „Falle“, durch ein Magnetfeld hoher Feldstärke - drei Tesla - auf einen Durchmesser von etwa 70 Mikrometer komprimiert. Die Energie der Strahlelektronen kann über die an den Elektroden anliegende Hochspannung von 500 bis zu 40.000 Elektronenvolt variiert werden. Der Elektronenstrahl hat mehrere Funktionen zu erfüllen: Er ionisiert die in die Falle eingebrachten Atome und schließt die so erzeugten, positiv geladenen Ionen durch anziehende Kräfte ein. Durch Stöße zwischen Elektronen und Ionen regt der Elektronenstrahl zudem Strahlungsprozesse an, die dann mit Spektrometern beobachtet werden können.

Mit der EBIT werden sowohl fusionsrelevante als auch grundlegende plasma- und atomphysikalische Fragestellungen bearbeitet. So wurden mit Blick auf den möglichen Einsatz von Krypton für die Kühlung des Randschichtplasmas in Fusionskraftwerken Energieverlust-Raten für hochgeladene Krypton-Ionen ermittelt. Hinzu kommen spektroskopische Untersuchungen an Wolfram-Ionen. Wolfram wird als Wandmaterial für Fusionsanlagen in Betracht gezogen. Bis zu 72fach ionisierte Wolfram-Ionen würden dann im Plasma als Verunreinigung vorkommen. Mit den an der EBIT gewonnenen Spektren dieser Ionen konnte zum Beispiel die Natur des zuvor in ASDEX Upgrade beobachteten Quasi-Kontinuums der Wolframstrahlung gedeutet werden. Weitere Untersuchungen an hochgeladenen Argon-Ionen dienten zur Überprüfung von

Atomdaten für die spektroskopische Temperaturdiagnostik. Schließlich wurden auch methodische Studien zur Physik der Ionenfalle und zum Einschluss der Ionen ausgeführt. Schwerpunkt der künftigen Forschung auf diesem Gebiet sollen Experimente mit extrahierten Ionen sein, die auf ein außerhalb der EBIT-Quelle befindliches Gastarget geschossen werden.

Auf dem Gebiet der Plasmatheorie beschäftigt sich der Bereich mit Modellrechnungen mit dem B2/Eirene-Code sowohl für ASDEX Upgrade zur Untersuchung des sogenannten „abgelösten“ Plasmazustandes als auch für den Plasmagenerator PSI-2. Mit einem eindimensionalen Modell für die Energie- und Teilchenbilanz sowie die Schichtbeschreibung an Kathode und Anode wurden die Elektronendichte und -temperatur des Plasmagenerators selbstkonsistent bestimmt. Mit Hilfe dieses einfachen Modells konnten die für verschiedene Arbeitsgase gemessenen Strom-Spannungskennlinien gut beschrieben werden. Theoretisch analysiert wurden weiterhin chaotische Zustände, die in einem strahlenden Randplasma auftreten können. Durch Lösungen der räumlich eindimensionalen und zeitabhängigen Wärmeleitungsgleichung können sie in Form einer periodisch getriebenen Reaktions-Diffusions-Gleichung beschrieben werden. Die künftigen Untersuchungen werden sich hauptsächlich mit Fragen befassen, die im Zusammenhang mit dem Stellarator WENDELSTEIN 7-X in Greifswald stehen.

Foto: Dieter Lange



**Mit der Ionenfalle EBIT werden hochgeladene Ionen erzeugt und untersucht**