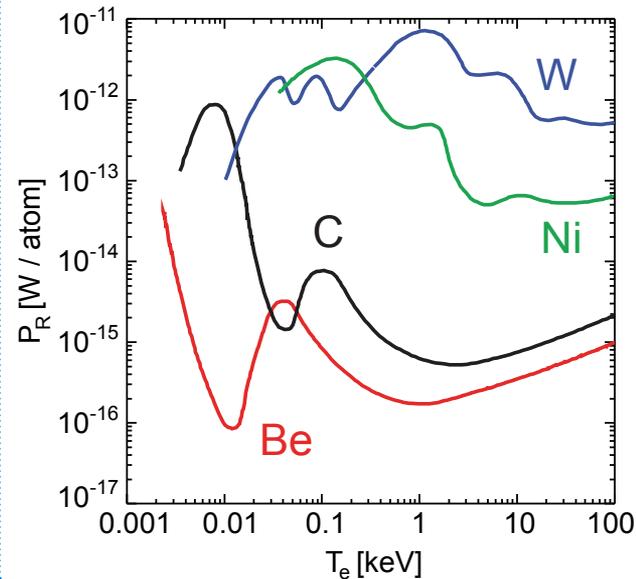


## Wandprobleme

JOACHIM ROTH

Auch in einem optimal eingeschlossenen Fusionsplasma ist die Wechselwirkung des Plasmas mit der Gefäßwand nicht nur unvermeidbar, sondern sogar notwendig, weil die erzeugte Energie und die Fusionsprodukte Neutronen und Helium über die Gefäßwände abgeführt werden müssen. Materialprobleme, die sich durch den Kontakt des Plasmas mit den Gefäßwänden ergeben, werden im Bereich Materialforschung bearbeitet.



▲ Abb. 1

Schon 1962, in den Anfangszeiten des IPP, wurde eine Arbeitsgruppe „Wandprobleme“ zur Lösung derartiger Fragen im Wendelstein-Stellarator gegründet. Die Wechselwirkung zwischen Plasma und Wand beschränkte zwar noch nicht die Lebensdauer der Wände. Die Verunreinigung des Plasmas mit Atomen oder Molekülen, die von der Wand desorbierten, erschwerte jedoch die Aufheizung des Plasmas. Denn beim damaligen Stand der Vakuumtechnik verunreinigten an der Wand adsorbierte, leicht freisetzbare Moleküle – hauptsächlich Kohlenmonoxid und Wasser – die Plasmen viel zu stark. Für die ersten Fusionsanlagen des IPP entwickelte die Arbeitsgruppe deshalb neue Techniken der Vakuumphysik, Wandreinigung und plasmainduzierten Desorption von Adsorbaten. 1968 entstand aus dieser Arbeitsgruppe eine eigenständige Abteilung Oberflächenphysik mit den Themen „Wandzerstäubung durch energetische Ionen“ und „Gasaufzehrung“, d. h. Wasserstoffrückhaltung in den Wänden.

Mit zunehmendem Erfolg der Plasmaphysik änderten sich die Fragestellungen und Wandmaterialien und damit auch die Aufgaben der Oberflächenphysik. Ausschlaggebend wurde nun die Verunreinigung des Plasmas durch erodierte Wandatome und die damit verbundenen Energieverluste, die das Aufheizen des Plasmas begrenzen. Abbildung 1 zeigt die Energieabstrahlung aus dem Plasma durch verschiedene Verunreinigungsatome als Funktion der Plasmatemperatur<sup>1,2</sup>. In den noch vergleichsweise kühlen Plasmen der frühen Anlagen – etwa bei Pulsator, dem ersten Tokamak des IPP, oder den ersten ASDEX-Plasmen – strahlten hauptsächlich leichte Atome wie Kohlenstoff und Sauerstoff aus

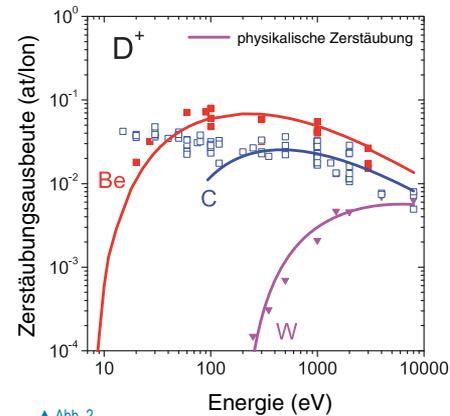
Abb. 1: Strahlungsverlustleistung für Beryllium, Kohlenstoff, Nickel und Wolfram bei jeweils einprozentiger Konzentration der Verunreinigungen im Plasma.

Abb. 2: Zerstäubungsausbeuten ausgewählter ITER-Materialien.

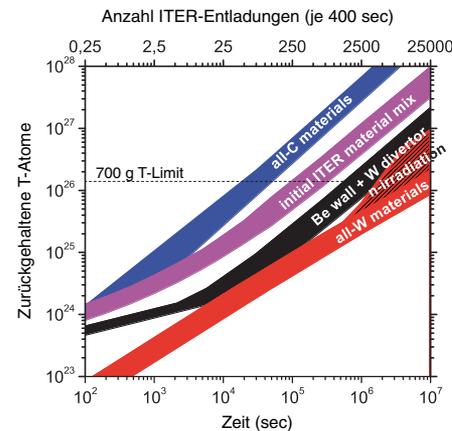
Abb. 3: Aufbau des Tritiuminventars in der Gefäßwand von ITER für verschiedene Materialauswahl.

desorbierten Wandmolekülen Energie ab. Die Oberflächenphysik beschäftigte sich deshalb schwerpunktmäßig mit der Wandreinigung und der plasmainduzierten Desorption von Adsorbaten.

Dies änderte sich völlig mit dem Einsatz der Neutralteilchen-Heizung. In den nun viel heißeren Plasmen sind leichte Atome vollständig ionisiert, die Linienstrahlung der Atome spielt daher keine Rolle mehr und Sauerstoff- und Kohlenstoffatome sind im Plasma besser verträglich. Durch die höhere Energie der auftretenden Plasmateilchen wurden nun aber auch schwere Wandatome zerstäubt – in Abbildung 1 stellvertretend repräsentiert durch Nickel –, die auch bei hohen Plasmatemperaturen nicht vollständig ionisiert sind. Je mehr Elektronen noch an die Atomkerne gebunden sind, desto mehr Energie entziehen sie dem Plasma und strahlen sie als Ultraviolett- oder Röntgenlicht wieder ab. Ausschlaggebend wurde damit die Verunreinigung des Plasmas durch erodierte Wandatome. Es stellte sich die Frage, wie man durch Beschichtung der Wand mit leichten Elementen das schwere Grundmaterial schützen kann, und mit welchen Zerstäubungsausbeuten man für typische Fusionsmaterialien rechnen muss. Man entwickelte daher Schutzschichten für die Wand – durch Karbonisieren oder Borieren – und baute eine Datenbasis für Zerstäubungsausbeuten durch Deuterium- und Heliumionen auf. Zudem waren die physikalischen Grundlagen zu klären und zu modellieren<sup>3</sup>. Bei Kohlenstoff kam die chemische Erosion als Fragestellung hinzu<sup>4</sup>, weil sich – insbesondere bei niedrigen Energien der auftretenden Wasserstoffionen – flüchtige Kohlenwasserstoffe bilden können.



▲ Abb. 2



▲ Abb. 3

Abbildung 2 zeigt Zerstäubungsausbeuten der heute für ITER favorisierten Materialien Beryllium, Kohlenstoff und Wolfram in Abhängigkeit von der Energie der auftretenden Deuterium-Ionen<sup>5</sup>. Für Beryllium und Wolfram zeigt sich dabei eine Schwelenergie von 10 bzw. 200 Elektronenvolt für die Zerstäubung, die mit zunehmender Ordnungszahl der Materialien ansteigt. Sofern die Plasmatemperatur in der Plasmarandschicht und im Divertor zuverlässig unter 50 Elektronenvolt gehalten werden kann, eignet sich Wolfram besser als leichte Elemente wie Beryllium oder Kohlenstoff als Wandmaterial. Heute wird ASDEX Upgrade als weltweit erste Anlage erfolgreich mit vollständiger Wolframauskleidung betrieben<sup>6</sup>.

2002 wurde die Abteilung Oberflächenphysik mit dem Bereich Materialforschung zusammengelegt mit der erweiterten Zielsetzung, auch neue Materialien zu entwickeln, die der hohen Wärmebelastung und der Schädigung durch energiereiche Neutronen standhalten. Neben den Anforderungen der IPP-Fusionsanlagen bestimmt heute die Vorschau auf die Bedingungen in künftigen Experimenten wie ITER oder dem ersten Demonstrationskraftwerk das wissenschaftliche Programm. In diesen Anlagen wird der radioaktive Brennstoffbestandteil Tritium verwendet werden; die Wandmaterialien werden einem intensiven Fluss energiereicher Neutronen ausgesetzt sein. Im aktuellen Forschungsprogramm wird daher auch untersucht, wie die in den Reaktorwänden akkumulierbare Tritiummenge möglichst niedrig zu halten ist, wobei die neutroneninduzierten Strahlenschäden zu berücksichtigen sind.

Tritium kann sich durch direkte Implantation in den plasmabegrenzenden Oberflächen ansammeln sowie durch Wanderosion und den anschließenden Einbau von Tritium in die re-deponierten Schichten. Co-Deponierung von Tritium ist der wesentliche Prozess bei den leichten Elementen mit ihrer hohen Zerstäubung, während für das schwere Wolfram die direkte Implantation und Diffusion in größere Tiefen des Materials bestimmend sind. Beide Prozesse wurden im IPP in Simulationsexperimenten mit Ionen- und Teilchenstrahlen gründlich untersucht. So werden erste Vorhersagen möglich für das Tritiuminventar in ITER für verschiedene Materialauswahlen (Abb. 3)<sup>7</sup>. Der Vergleich zeigt für Wolfram – auch nach hoher Neutronenbestrahlung – ein erträgliches Tritiuminventar

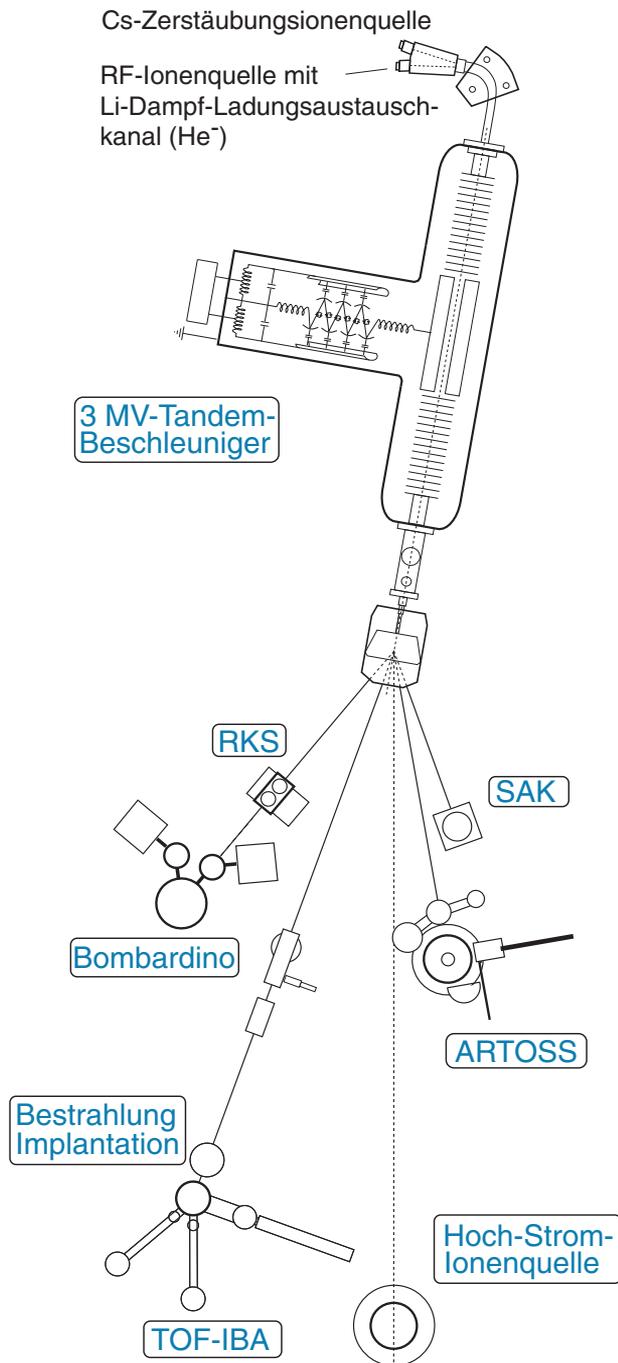
nach Betriebsende von ITER, während es für Kohlenstoff bereits nach zehn Stunden Plasmabetrieb den erlaubten Grenzwert von 700 Gramm erreicht. Wird Beryllium als Wandmaterial und Wolfram im Divertor verwendet, dann dominiert die Co-Deponierung von Tritium mit Beryllium die Inventarbildung. Etwas unsicher bleiben dabei die vorauszusetzenden Eigenschaften des Randschicht- und Divertorplasmas, die von heutigen Experimenten hin zu ITER extrapoliert werden müssen. Hinzu kommen große Unsicherheiten, wenn verschiedene Materialien gleichzeitig verwendet werden: Chemische und physikalische Mischprozesse führen dann zu neuen Verbindungen, deren thermomechanische Stabilität und Tritiumaufnahme noch genauer untersucht werden müssen. Um neutroneninduzierte Strahlenschäden abzuschätzen, wird die Schädigung mit Hilfe energiereicher Wolfram-Ionen simuliert<sup>8</sup>. Die verspröde Wirkung der in großer Materialtiefe erzeugten Helium-Atome vermag diese Simulation jedoch nicht zu berücksichtigen.

Um Materialien und mögliche Wechselwirkungen zu untersuchen, sind sehr spezielle Test- und Analysemethoden nötig. Im Bereich Materialforschung entstanden daher Anlagen zur Bestrahlung von Materialien mit Ionenstrahlen, welche die Bedingungen in der Randschicht und im Divertor von ITER simulieren. Mit der Testanlage GLADIS können Oberflächen mit Wärmeffüssen bis zu 90 Megawatt pro Quadratmeter belastet werden (Abb. 4)<sup>9</sup>. Darüber hinaus stehen definierte Plasmaexperimente zur Verfügung sowie ein Labor mit vielfältigen Analysemöglichkeiten für implantierte Wasserstoffisotope sowie chemische und mechani-



Abb. 4: Der Wärmefluss-Teststand GLADIS.

Abb. 5, 6: Der Tandem-Beschleuniger, ein Analyseinstrument der Materialforschung.



▲ Abb. 5

sche Materialeigenschaften. Hinzu kommt die Probenuntersuchung mit Licht- und Elektronenmikroskopen mit Nanometerfeiner Auflösung. Mit dem großen Tandem-Beschleuniger des Bereiches (Abb. 5) lassen sich schließlich die Wasserstoffinventare in Metallen in Tiefen von 7 bis 30 Mikrometern bestimmen<sup>10</sup>. Dafür stehen mehrere Strahlrohre zur Verfügung, die zu verschiedenen Ionenstrahl-Simulationsexperimenten führen. In speziellen Analysekamern können Wandproben aus den Plasmaanlagen quantitativ untersucht werden.

Zur Vorbereitung eines Demonstrationskraftwerks gehört die Entwicklung neuer Materialien mit hoher Widerstandsfähigkeit gegen Neutronenschädigung sowie – in den pulswise arbeitenden Tokamaks – mit hoher mechanischer Festigkeit bei thermischer Wechselbelastung. Hierfür entwickelt und optimiert der Bereich Materialforschung neue Materialien und Legierungen, die in Zusammenarbeit mit externen Partnern hergestellt werden. So konnten große Fortschritte erzielt werden bei der Entwicklung von Diffusionssperrschichten für Tritium<sup>11</sup>, von Wolfram-Legierungen mit Selbstpassivierung gegen Oxidation bei hohen Temperaturen<sup>12</sup> und bei der Optimierung von Wolfram-Beschichtungen als plasmabelastete Schutzschicht auf Wärmesenkenmaterialien. Wegen der längeren Betriebszeiten, der höheren Wandflüsse und Oberflächentemperaturen und der intensiveren Neutronenbestrahlung im ersten Demonstrationskraftwerk wird die Plasma-Wand-Wechselwirkung und Materialphysik ein wichtiges Thema bleiben.



▲ Abb. 6