

Die Fusion dringt zum Kern vor

Das Sonnenfeuer auf die Erde holen – das ist ein uralter Traum der Menschheit. Nie zuvor in der Geschichte war die Verwirklichung dieser Vision so nahe. Trotzdem müssen die Forscher noch mannigfaltige Schwierigkeiten meistern, bis uns eines Tages der erste Fusionsreaktor mit umweltfreundlicher Energie versorgt.

TEXT **GÜNTHER HASINGER**

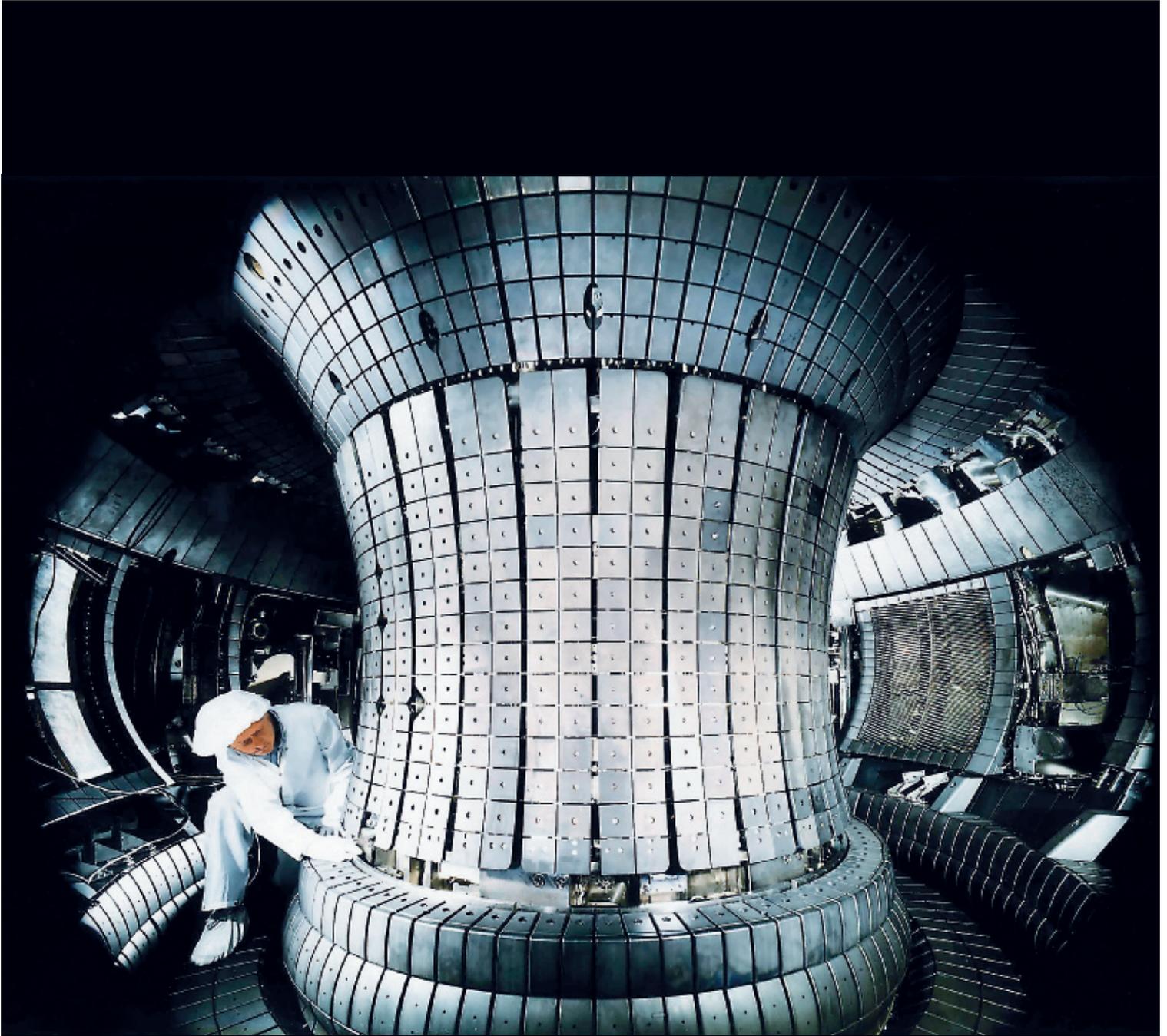
Der weltweite Strombedarf wird in diesem Jahrhundert etwa auf das Sechsfache ansteigen, die Hälfte dieses Anstiegs wird nach 2050 erwartet. Experten sind sich einig, dass diese gewaltige Nachfrage auf klimaverträgliche Weise nur durch den massiven Einsatz neuer Energietechnologien gedeckt werden kann. Brückentechnologien für Energieerzeugung

Eine Badewanne voll Wasser und das Lithium einer Laptop-Batterie könnten eine Familie 50 Jahre mit Strom versorgen

und Klimaschutz wie die Kernspaltung von Uran oder die Speicherung von Kohlenstoff in der Erde können uns wertvolle Jahrzehnte Zeit erkaufen, in denen alternative Techniken wie Sonnen- und Windenergie sowie moderne Stromnetze und Speicher ausgebaut werden können. Vielleicht gelingt es sogar, durch die Nutzung von Biomasse oder anderen Technologien

bis zum Ende des Jahrhunderts einen Teil des schädlichen Kohlendioxid wieder aus der Erdatmosphäre zurückzuholen. Mit keiner der heute bekannten Techniken wird man jedoch den prognostizierten Energiebedarf alleine decken können. Fusionsenergie, die in gewisser Weise den Prozess der Energieumwandlung der Sterne auf die Erde holt, verspricht gegenüber den bekannten Energiequellen so große Vorteile, dass sich alle Anstrengungen lohnen, um Perspektiven für ihre Nutzung zu entwickeln. Das globale Energieproblem wird bis 2050 bei Weitem noch nicht gelöst sein. Wenn die Fusionsforschung erfolgreich ist, wird sie jedoch entscheidend dazu beitragen können, den weiterhin steigenden Energiebedarf in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu decken.

Die Vorteile der Fusionsenergie liegen auf der Hand: Ihr Brennstoff ist überall auf der Welt fast unbeschränkt verfügbar. Sie benutzt ein heißes Gas – ein Plasma – aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium, die aus Wasser beziehungsweise Lithium gewonnen werden, das wiederum beispielsweise aus verbrauchten Batterien extrahiert werden kann. Eine Badewanne voll Wasser und das Lithium einer Laptop-Batterie könnten eine Familie für 50 Jahre mit Strom versorgen. Fusionskraft ist eine saubere Energie, es entstehen keinerlei Kohlendioxid-Emissionen



Im Kern der künstlichen Sonne:
das Plasmagefäß der Fusionsanlage ASDEX Upgrade in Garching.

und keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Die Fusion kann deshalb mit Fug und Recht als eine „regenerative“ Energieform angesehen werden. Allerdings ist Tritium ein radioaktives Element, und die Wände des Kraftwerks werden durch beim Fusionsprozess erzeugte schnelle Neutronen aktiviert. Die dadurch verursachte Radioaktivität klingt aber innerhalb relativ kurzer Zeit ab und benötigt deshalb kein geologisches Endlager.

Da zu jeder Zeit immer nur eine kleine Menge Brennstoff im Plasma vorhanden ist, gibt es keine Explosionsgefahr und keine Gefahr einer Kernschmelze. Im Gegensatz zu den klassischen erneuerbaren Energien wie Solar-, Wind- und Wasserkraft hat die Fusion jedoch eine extrem hohe Energiekonzentration auf die verbrauchte Fläche gerechnet und damit

.....

Die theoretische Plasmaphysik hat in den vergangenen Jahren gewaltige Fortschritte erzielt

einen vergleichsweise sehr geringen Landschaftsverbrauch. Sie ist unabhängig von Tages-, Jahres- oder regionalen Schwankungen und deshalb ideal für die Grundlastversorgung von Ballungsräumen sowie der Großindustrie. Wo heute ein Kohle- oder Kernkraftwerk steht, könnte später ein Fusionskraftwerk arbeiten. Die Fusionskraft würde sich deshalb gut in einen Energiemix der Zukunft einfügen.

Die fusionsorientierte Plasmaphysik hat in den vergangenen Jahrzehnten weltweit gewaltige Fortschritte gemacht. Eindrucksvoll belegt dies der Anstieg der Fusionsleistung von wenigen Milli watt in den 1970er-Jahren bis zu dem Weltrekord-Experiment des europäischen Gemeinschaftsprojekts JET (*Joint European Torus*) in Culham, England, das vor zwölf Jahren kurzzeitig eine Spitzenleistung von 16 Megawatt erreichte. Die Fusionsleistung ist in dieser Zeit um mehr als das Milliardenfache gestiegen – und damit deutlich schneller gewachsen, als sich zum Beispiel die Zahl der Schaltkreise auf Computerchips gemäß dem Moore'schen Gesetz (eine Verdopplung alle

18 Monate) entwickelt. JET hat Bedingungen erreicht, die annähernd dem „Break-even“ entsprechen, das heißt, die eingesetzte Heizleistung kann durch die freigesetzte Fusionsleistung wieder gewonnen werden. Der nächste große Schritt auf dem Weg zu einem Kraftwerk ist die internationale Testanlage ITER, die derzeit im südfranzösischen Cadarache aufgebaut wird und die zum ersten Mal ein brennendes Plasma erzeugen soll. Insgesamt ist man nur noch etwa eine Größenordnung von dem Zielwert für ein Fusionskraftwerk entfernt.

Die deutsche Fusionsforschung im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching und Greifswald (abgekürzt: IPP) und den Forschungszentren in Karlsruhe (KIT) und Jülich (FZJ) ist Teil der europäisch koordinierten und geförderten Fusionsforschung (EURATOM). Zugleich tragen die drei Institute das Programm „Kernfusion“ im Forschungsbereich „Energie“ der Helmholtz-Gemeinschaft. Stark arbeitsteilig aufgestellt, sind die Institute international sowohl auf vielen Gebieten der Plasmaphysik als auch in der Fusionstechnologie führend. Diese Spitzenposition der deutschen Fusionsforschung bestätigte 2008 eine umfangreiche Begutachtung der Europäischen Union, der *Facilities Review*: Neben JET – einst wesentlich von deutschen Instituten mitkooptiert – haben die Gutachter unter den Plasma-Experimenten Europas nur den beiden deutschen Anlagen ASDEX Upgrade und Wendelstein 7-X höchste Priorität zuerkannt.

Bis zu einem fertigen Kraftwerk sind jedoch noch erhebliche Anstrengungen nötig. Wesentlich ist zunächst die Entwicklung eines magnetischen Einschluss-Systems, das in einem Grundlastkraftwerk zuverlässig einsetzbar ist. Anlagen vom Typ Tokamak – die derzeitigen Zugpferde der Forschung, auf deren Prinzip auch JET und ITER sowie die Garching-Anlage ASDEX Upgrade basieren – arbeiten bisher nur im Puls-Betrieb. Wichtiges Forschungsziel sind daher *Advanced Szenarios*, die Langpuls-Betrieb oder sogar den Dauerbetrieb der Tokamaks ermöglichen. Eine attraktive Alternative bietet der von vornherein zum Dauerbetrieb fähige Bautyp Stellarator. Mit dem Aufbau des Stellarator-Experiments Wendelstein 7-X in Greifswald liegt hier ein besonderer Schwerpunkt des deutschen Fusionsfor-



schungsprogramms. Um die physikalischen Grundlagen für die Auslegung und den effizienten Betrieb künftiger Kraftwerke zu erarbeiten, müssen die bestehenden Experimente JET und ASDEX Upgrade optimal genutzt und die im Bau befindlichen Anlagen ITER und Wendelstein 7-X möglichst zügig fertiggestellt werden. Die experimentellen Arbeiten werden begleitet durch die theoretische Plasmaphysik, die nicht zuletzt wegen der rasanten Entwicklung moderner Hochleistungscomputer gewaltige Fortschritte gemacht hat. Viele experimentelle Ergebnisse lassen sich heute durch umfangreiche numerische Simulationen quantitativ nachvollziehen.

Ziel ist letztlich ein numerisches Fusionskraftwerk, also Simulationen auf Supercomputern, welche die Experimente an Wendelstein 7-X und ITER auf das Demonstrationskraftwerk hin extrapolieren können.

Die erheblichen Fortschritte in der Fusionsforschung sollen anhand einiger im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik erzielter Ergebnisse des Jahres 2009 exemplarisch dargestellt werden: Dies betrifft erstens die H-Mode, für deren Entdeckung Friedrich Wagner, Emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied des IPP, vielfach ausgezeichnet wurde, zuletzt mit der Stern-Geirach-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Bei der H-Mode handelt es sich um eine spontane Selbstorganisation des Plasmas. In der Randzone entsteht dabei eine Transportbarriere, die sich dem Energieverlust durch Turbulenz entgegenstellt. Gleichzeitig steigt der Energieinhalt im Plasmazentrum deutlich an; die Wärmeisolation des Plasmas verbessert sich um mehr als eine Größenordnung. Seit ihrer Entdeckung im Jahr 1982 basieren alle Konzepte der magnetischen Fusion auf der Verbesserung des Energieeinschlusses durch die H-Mode, insbesondere auch der ITER-Entwurf. Im Jahr 1998 wurde an ASDEX Upgrade unter anderem von Otto Gruber und Robert Wolf eine verbesserte H-Mode entdeckt: Der Energieeinschluss war nochmals bis zu 50 Prozent besser als bei der normalen H-Mode, allerdings nur bei relativ niedrigen Dichten.

Im weiteren Verlauf gelang es an ASDEX Upgrade, den Einschluss auch bei normalen Fusionsplasmen mit hoher Dichte um 20 bis 40 Prozent zu verbessern – ein äußerst vielversprechendes Ergebnis, da Simulationen für ITER bei einer Verbesserung

des Einschlusses um 25 Prozent bereits eine Verdoppelung der Fusionsleistung vorhersagen. Lange Zeit ist es jedoch nicht gelungen, diesen verbesserten Einschluss auch bei dem weltweit größten Fusionsexperiment JET zu erreichen. Erst einer von dem IPP-Physiker Jörg Hobirk geführten Arbeitsgruppe gelang

Zwei Meter machen einen Temperaturunterschied von mehr als 100 Millionen Grad

im vergangenen Jahr der Durchbruch: Die gezielte Beeinflussung des Stromprofils im JET-Plasma führte zu einer Verbesserung des Energieeinschlusses um 40 Prozent – ein Ergebnis, das für ITER eine erhebliche Erhöhung der Fusions-Energieausbeute erwarten lässt. Die detaillierte Physik der Einschlussverbesserung ist ebenso wie die der H-Mode noch nicht abschließend geklärt. Sie hängt vermutlich mit der Wechselwirkung der Plasma-Turbulenz mit dem Stromprofil zusammen.

Der Transport von Teilchen und Energie in einem Fusionsplasma ist in der Regel durch turbulente Prozesse bestimmt. Auf nur zwei Meter Entfernung herrscht ein Temperaturunterschied von mehr als 100 Millionen Grad. Dieser extrem steile Abfall der Plasmatemperatur bewirkt Instabilitäten, die letztlich zu einer Turbulenz mit charakteristischen Wirbelgrößen im Zentimeterbereich führen. Die Beschreibung von turbulenten Vorgängen ist heute eine der größten Herausforderungen für die theoretische Physik. Zwar gibt es in magnetisierten Plasmen – im Unterschied zu turbulenten Vorgängen in Gasen oder Flüssigkeiten – eine kleinste aufzulösende Skala: den Gyrationradius der Teilchen im Magnetfeld.

Trotzdem haben wir es immer noch mit einem Multi-Skalenproblem in Raum und Zeit zu tun, was die Entwicklung hocheffizienter Computercodes erfordert. Im vergangenen Jahr sind in den Theorie-Abteilungen von Sibylle Günter und Per Helander erstmals globale (gyro-)kinetische Instabilitäts- und Turbulenzsimulationen – bei denen sich die Plasma-



parameter im Simulationsgebiet stark ändern können – mit realistischen Physikmodellen gelungen. Mit diesen Codes hoffen wir in Zukunft zum Beispiel die Entstehung von Transportbarrieren erklären zu können.

Für das Erreichen der Zündung und – bei einem Tokamak – um einen Strom im Plasma zu erzeugen, benötigt ein Fusionsreaktor externe Heizsysteme. Die Injektion schneller Neutralteilchen ist dafür ein aussichtsreicher Kandidat. Eine wesentliche Komponente derartiger Anlagen ist die Quelle für negative Wasserstoff-Ionen, deren Entwicklung in den vergangenen Jahren am IPP unter der Leitung von Eckehart Speth sehr erfolgreich vorangetrieben und mit

Wolfram gilt als das Wandmaterial der Zukunft

dem Schrödinger-Preis der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) ausgezeichnet wurde. Die auf einem neuartigen Konzept beruhende Prototyp-Quelle des IPP wurde 2007 in das ITER-Design übernommen. Allerdings sind die physikalischen Prozesse zur Erzeugung der fragilen negativen Wasserstoff-Ionen in großen Plasmaquellen so komplex, dass es weltweit noch keine Quelle gibt, die alle Anforderungen von ITER erfüllt. Dies ist das Ziel des Großexperiments ELISE, das – von der Europäischen Gemeinschaft finanziert – derzeit am IPP aufgebaut wird und damit ein zentrales Element des europäischen Fusionsprogramms für die Neutralteilchenheizung an ITER darstellt.

Das Plasmagefäß des Tokamaks ASDEX Upgrade wurde in den letzten Jahren – zum Teil gegen erhebliche Bedenken in der internationalen Fusionsforschung – komplett mit einer inneren Wand aus Wolfram ausgekleidet. Einerseits ist Wolfram das Metall mit dem höchsten Schmelzpunkt. Andererseits sind Verunreinigungen durch Materialien mit hohem Atomgewicht sehr schädlich für das Plasma, weshalb andere Experimente leichtere Elemente wie Kohlenstoff oder Beryllium bevorzugen. Tatsächlich konnten nach dem Übergang zur reinen Wolfram-

Wand auch bei ASDEX Upgrade zunächst nur noch H-Moden bei hohen bis sehr hohen Plasmadichten erreicht werden. Dabei lagen die Einschlussparameter deutlich unter den Werten, die früher bei der mit Kohlenstoff ausgekleideten Wand bei niedrigen Dichten erzielt wurden. In ihren Experimenten erreichten die Arbeitsgruppen um Hartmut Zohm und Arne Kallenbach jedoch sukzessive Verbesserungen, vor allem durch die Kühlung des Divertorplasmas durch eingeblasenen Stickstoff.

Der Divertor ist derjenige Bereich der Vakuumkammer, in dem das Plasma mit der Wand in Kontakt kommt, um Verunreinigungen und die „Asche“ des Fusionsprozesses – Helium-Atome – abzupumpen. Das Divertorplasma wird gezielt gekühlt, um das Wandmaterial nicht zu überlasten. Der Durchbruch gelang Ende 2008/Anfang 2009: Unter den Bedingungen des gekühlten Divertorplasmas verbesserte sich der Energieeinschluss deutlich. Inzwischen erreicht ASDEX Upgrade – mittlerweile unter Benutzung des nach einer Havarie im Jahr 2006 reparierten Schwungradgenerators – routinemäßig die H-Mode mit bis zu 30 Prozent verbessertem Einschluss. Wolfram ist daher dabei, sich als Wandmaterial für künftige Fusionskraftwerke durchzusetzen. Derzeit wird bei JET unter dem Namen *ITER-like wall* eine metallische Wand aus einer Mischung aus Wolfram und Beryllium eingebaut. Wenn die ab 2011 geplanten Experimente erfolgreich sind, könnte ITER von Anfang an mit einem Wolfram-Divertor ausgerüstet werden, wodurch in erheblichem Maße Zeit und Kosten gespart werden könnten.

Auch in anderer Hinsicht hat sich in den letzten Jahren Wolfram als sehr vorteilhaft erwiesen: Die im Fusionskraftwerk verwendeten Wasserstoffisotope können nämlich leicht diffundieren und sich in der Wand des Plasmagefäßes einlagern. Vor allem das radioaktive Tritium bereitet dabei Sorgen, weil davon aus Sicherheitsgründen nur eine geringe Menge im Kraftwerk vorhanden sein darf. Von dem gesamten für ITER vorgesehenen Tritium-Inventar von etwa drei Kilogramm dürfen maximal 700 Gramm in den Gefäßwänden zurückgehalten werden. Kohlenstoff kommt deshalb als Wandmaterial für einen Reaktor nicht in Frage: Er lagert leicht Tritium ein, und der radioaktive Staub könnte die Anlage kontaminieren.

Anders Wolfram: Wie die IPP-Gruppe „Plasma-Wand-Wechselwirkung“ unter Leitung von Joachim Roth in den letzten Jahren zeigen konnte, sank mit fortschreitender Wolfram-Auskleidung die Deuterium-Einlagerung in ASDEX Upgrade um fast eine Größenordnung. Die Tritium-Einlagerung in Wolfram erreicht demgemäß einen Sättigungswert. Er würde auch bei jahrelangem Betrieb von ITER mit einer Wolfram-Wand um mehr als eine Größenordnung unter den geforderten Grenzwerten liegen. Dies vereinfacht später auch die Zwischenlagerung des neutronenaktivierten Materials aus einem Fusionskraftwerk.

Das Stellarator-Experiment Wendelstein 7-X, das derzeit am IPP-Standort in Greifswald entsteht, ist vermutlich die komplizierteste Fusionsanlage, die bisher gebaut wurde. Es soll zeigen, dass ein Stellarator dem Tokamak ebenbürtig ist und vor allem, dass Fusionsenergie im Dauerbetrieb erzeugt werden kann. Damit stellt es neben ITER einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zu einem Kraftwerk dar. Das Projekt Wendelstein 7-X wurde in den späten 1980er-Jahren in Garching begonnen und ab 1996 in Greifswald weitergeführt. Nach Stilllegung des Vorgängers Wendelstein 7-AS in Garching zogen die Physiker bis 2003 nach Greifswald um. Der ursprüngliche Zeitplan sah eine Fertigstellung bereits im Jahr 2006 vor – eine viel zu optimistische Planung, wie das Institut auf schmerzliche Weise erkennen musste. Wendelstein 7-X als ein großes, hochkomplexes und einzigartiges wissenschaftliches Projekt erfordert bei Entwicklung und Aufbau ingenieurtechnische Meisterleistungen und stellte die beteiligten Industriefirmen vor gewaltige Herausforderungen. Im Jahr 2005 wurde die Projektorganisation komplett neu aufgestellt. Mit erheblich mehr Ressourcen und einer Revision der gesamten Planung konnte sich unter der Leitung des technischen Direktors Remmert Haange sowie des wissenschaftlichen Direktors Thomas Klinger das Projekt erholen und mausert sich zunehmend „vom Sorgenkind zum Musterknaben“. Der überarbeitete Zeitplan, der die Fertigstellung im Jahr 2014 und den Endausbau bis zum Jahr 2019 vorsieht, ist realistisch und hat seit mehr als zwei Jahren keine wesentlichen Verzögerungen erfahren; auch die Projektkosten blieben im Rahmen.



DER AUTOR

Günther Hasinger, Jahrgang 1954, studierte Physik in München, wo er sich an der Ludwig-Maximilians-Universität auch habilitierte. Von 1984 bis 1994 gehörte er der Röntgengruppe am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching an. Hasinger war Wissenschaftlicher Vorstand des Astrophysikalischen Instituts Potsdam und wurde 2001 als Direktor an das Garchinger Max-Planck-Institut berufen. Seit 2008 ist er mit dem Leibnizpreis ausgezeichnete Forscher Wissenschaftlicher Direktor des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching und Greifswald.

Im Jahr 2009 wurden wesentliche Meilensteine erreicht: Alle 70 supraleitenden Spulen sind bei CEA Saclay bei Tieftemperatur erfolgreich auf Herz und Nieren getestet worden, womit eines der größten Probleme der Vergangenheit gelöst werden konnte. Vier Fünftel der Spulen sind bereits in den Magnetmodulen verbaut; das erste der insgesamt fünf Magnetmodule ist fertiggestellt und in seiner endgültigen Position in das thermisch isolierende Außengefäß eingesetzt. So präsentierte sich die Baustelle für Wendelstein 7-X kürzlich auch der Bundeskanzlerin Angela Merkel bei ihrem Besuch in Greifswald. Mit Wendelstein 7-X werde „Fusionsgeschichte geschrieben“, erklärte sie sichtlich beeindruckt und sagte der Fusionsforschung und dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik weiterhin die Unterstützung der Bundesregierung zu. ◀