

Von der Vision zur Fusion

In Südfrankreich entsteht das Fusionsexperiment ITER. Die Anlage ist für Generaldirektor Bernard Bigot mehr als ein internationales Großforschungsprojekt.

Kerstin Sonnabend

Die Provence im Süden Frankreichs ist vor allem bei Touristen bekannt: Die Kombination aus mildem mediterranen Klima und reizvollen Landschaften lockt jedes Jahr mehrere Millionen Besucher an. Seit mehr als zehn Jahren geht es auch im beschaulichen Ort Saint-Paul-lès-Durance immer internationaler zu. Allerdings sind es weniger Touristen als Physikerinnen und Physiker, die den Ort besuchen. Und sie kommen nicht zum Urlaub, sondern um die Fusionsforschung voranzutreiben. Denn unweit des französischen Kernforschungszentrums Cadarache, in dem sich etwa 5000 Mitarbeiter vor allem mit Kernspaltung beschäftigen, entsteht der International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). Noch ist das Großexperiment nicht mehr als eine riesige Baustelle – mehrere hohe Baukräne in tief ausgehobenen Baugruben vermitteln einen Eindruck davon, wie aufwändig es ist, die Energiequelle unserer Sonne auf die Erde zu holen. Dass dies machbar ist, soll ITER zeigen. Dabei ist die Anlage nur ein Schritt zu nahezu unbegrenzt verfügbarer und „sauberer“ Energie aus Kernfusion – zahlreiche technische Herausforderungen warten auf dem langen Weg (lat. iter) vom Fusionsexperiment zum Fusionskraftwerk, das die neue Energiequelle auch kommerziell nutzen könnte.

Die Idee, die Fusion von Wasserstoff zu Helium als Energiequelle zu nutzen, stammt bereits aus den 1950er-Jahren. Etwa zeitgleich entwickelten Lyman Spitzer in den USA sowie Andrei D. Sacharow und Igor E. Tamm in der UdSSR Konzepte, um ein Plasma aus Deuterium und Tritium in einem Magnetfeld einzufangen. Ein toroidales und ein poloidales Feld halten die Teilchen auf geschlossenen



Im Zentrum der Baustelle von ITER wächst die Betonhülle in die Höhe, die später das Vakuumgefäß

des Fusionsexperiments umgibt. Das unterste der sieben Stockwerke wird gerade fertiggestellt.

Bahnen. Das poloidale Feld entsteht im Stellarator durch die Geometrie der Magnetspulen; im Tokamak wird es im Plasma induziert. Beide Konzepte werden heute noch verfolgt.¹⁾ Bei Temperaturen von 150 Millionen Kelvin – zehnmals heißer als im Innern der Sonne – entsteht durch Kernfusion Helium. Dabei wird Energie frei, die in Form von Wärme eine Dampfturbine mit Stromgenerator antreiben könnte. Der instabile Brennstoff Tritium soll direkt im Fusionsreaktor aus Lithium entstehen. Rechenbeispiele zeigen, dass das Deuterium aus einer Badewanne voll Wasser und das Lithium aus einer Laptop-Batterie ausreichen, um auf diese Weise genug Energie zu gewinnen, um eine Familie 50 Jahre lang mit Strom zu versorgen. Die technische Umsetzung ist aber anspruchsvoll – beispielsweise treten die hohen Plasmatemperaturen in unmittelbarer Nachbarschaft supraleitender Magnetspulen auf, die bei Tempera-

turen von wenigen Kelvin betrieben werden. Ob es mit ITER tatsächlich gelingt, zehnmals mehr Energie zu erzeugen, als zum Heizen des Plasmas nötig ist, bleibt abzuwarten.

Momentan entsteht auf dem 42 Hektar großen ITER-Gelände die nötige Infrastruktur, um die Komponenten des Tokamak zusammenzufügen. „Bei jedem Besuch sieht es hier anders aus“, stellt Sibylle Günter, Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP), erfreut fest. Die Dimensionen des Großprojekts zeigen sich auf den ersten Blick: Eindrucksvoll ragt das Stahlskelett der 60 Meter hohen und fast 100 Meter langen Fertigungshalle auf, das teilweise schon mit einer spiegelnden Außenschicht verkleidet ist. In dieser Halle werden an die neun Teile des Plasmagefäßes jeweils zwei supraleitende Magnetspulen montiert, bevor ein Kran die vorinstallierten Teile in das benachbarte Tokamak-Gebäude zur endgültigen Montage

1) Das IPP betreibt als einziges Institut weltweit Anlagen beider Typen: Wendelstein 7-X und ASDEX Upgrade. Vgl. Dossier „Fusionsforschung“ www.pro-physik.de/phy/physik/dossier.html?qid=8688061

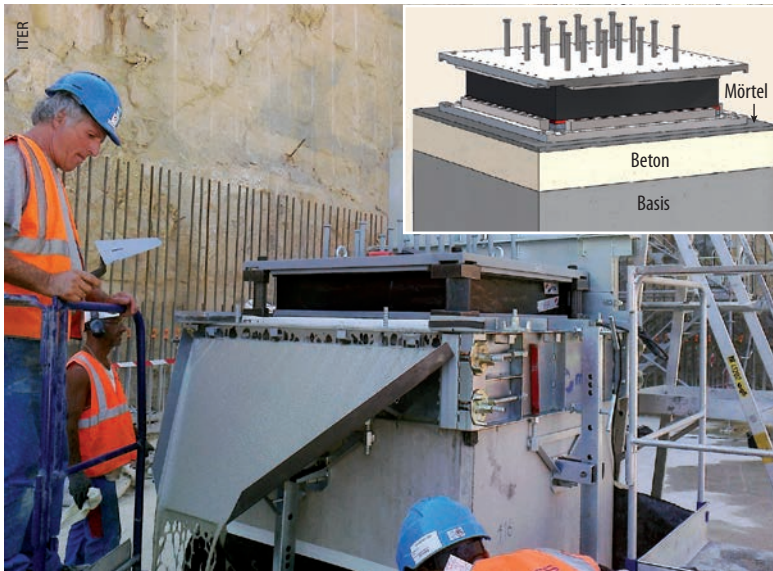


Abb. 1 Ein besonderes Verfahren garantiert, dass keinerlei Lufteinschlüsse im Mörtel zwischen Metallplatte und Beton-

heben soll.²⁾ Seine Bodenplatte ruht erdbebensicher auf 500 anti-seismischen Federungen (Abb. 1); nach und nach wachsen seine massiven Mauern aus Stahlbeton bis zur Bodenebene der Fertigungshalle.

Erst wenn das Plasmagefäß aufgebaut ist, wird das siebenstöckige Gebäude, das auch die komplette technische Versorgung des Fusions-experiments beherbergen soll, fertiggestellt. Daneben entstehen zahlreiche kleinere Gebäude auf dem Gelände wie die „Cleaning Facility“, in der die Komponenten von ITER nach ihrer teils langen Anreise vor der Montage gereinigt werden, oder das „Cryoplant Building“, das die Kryotechnik beherbergt, um die supraleitenden Magnetspulen mit flüssigem Helium und Stickstoff zu versorgen. Fertiggestellt

sockel die Qualität der 500 seismischen Federungen mindern, auf denen das Tokamak-Gebäude steht.

und seit Oktober 2012 bezogen sind das Büro- und Empfangsgebäude sowie die große Halle, in der die supraleitenden Magnetspulen gewickelt werden. Während Ingenieure und Management auf diese Weise sichtbar vor Ort wirken, scheinen sich Wissenschaftler noch gedulden zu müssen.

Bisher nur Virtual Reality

In der virtuellen Welt ist ITER dagegen längst in einer 3D-Simulation Realität geworden (Abb. 2). Für Jens Reich, der das Design der vielen tausend Komponenten des Fusions-experiments koordiniert, ist die Simulation unverzichtbares Werkzeug, um zu beurteilen, ob die geplanten Komponenten wirklich

zusammenpassen. „Es ist beeindruckend, welche Detailfülle die Visualisierung bietet“, sagt er begeistert. „Dabei ist nicht nur der fertige Aufbau entscheidend. Mit der Simulation prüfen wir auch, ob und wie wir die Komponenten zusammenfügen können.“ So lassen sich Arbeitsabläufe schon jetzt optimieren und Fehler beim tatsächlichen Aufbau vermeiden. Diese Arbeit hat aber auch ihre Tücken. „Nach zwei Stunden braucht man eine Pause – sonst wird man seekrank“, erklärt Jens Reich die Auswirkungen der Virtual Reality.

Obwohl Fusionsforscher, Ingenieure und Techniker zielstrebig an der Realisierung von ITER arbeiten, sind das Großprojekt und damit auch die Fusionsforschung in der Öffentlichkeit vor allem durch negative Schlagzeilen aufgrund von Verzögerungen und Preissteigerungen bekannt. Beides ist im Fall von ITER vor allem der Organisation des Projekts geschuldet, die historisch gewachsen ist. Im November 1985 schlugen Ronald Reagan und Michail Gorbatschow ein internationales Projekt vor, das die friedliche Nutzung der Fusionsenergie für die gesamte Menschheit als Ziel haben sollte. Zwei Jahre später starteten die USA, die Sowjetunion, Japan und die Europäische Union das gemeinsame Projekt ITER und präsentierten 1990 ein erstes technisches Design des Fusions-experiments. Kurz nachdem sich die Partner auf das finale Design einigten, stiegen die USA Ende 1998 aus dem Projekt aus, sodass weniger Geld zur Verfügung stand. Außerdem erforderten neue Kenntnisse zur Stabilität des Plasmaeinschlusses ein neues Design der Maschine, das 2001 fertig gestellt war.

Bis sich die Partner auf Cadarache als Standort einigen konnten, gingen vier Jahre ins Land. 2003 waren China und Korea dem Projekt beigetreten, und auch die USA beteiligten sich wieder an ITER. Als bisher letzter Partner folgte Indien 2005. Im Jahr darauf unterzeichneten die sieben Partner die ITER-Vereinbarung. Zu diesem Zeitpunkt erwartete man das erste Plasma im

2) Den geplanten Aufbau zeigt die Animation „World's Largest Puzzle“ unter bit.ly/1By1mUq

Beteiligung am Bau der Hauptkomponenten von ITER							
Hauptkomponente	EU	Russland	USA	Japan	China	Korea	Indien
Solenoid	–	–	x	x	–	–	–
Kryostat	–	–	–	–	x	–	x
Magnetspulen	x	x	x	x	x	x	–
Divertoren	x	x	–	x	–	–	–
Kühlwassersystem	–	–	x	–	–	–	x
Mantel Plasmagefäß	x	x	–	–	x	x	–
Heizsysteme Plasma	x	x	x	x	–	–	x
Vakuumkammer	x	x	–	–	–	x	x
Wärmeschild	–	–	–	–	–	x	–

Die Partner von ITER liefern ausschließlich Sachleistungen: Die Komponenten werden in der Regel von verschiedenen Nationalen Behörden in Eigenregie ge-

baut. Design und Qualitätsstandards gibt die ITER-Organisation vor; sie ist auch für den Aufbau und Betrieb des Fusions-experiments zuständig.

Fusionsreaktor für das Jahr 2016 und schätzte die Kosten des Aufbaus auf fünf Milliarden Euro ab.³⁾ Die Vereinbarung beschreibt die Aufgaben und regelt die Zusammenarbeit von ITER-Organisation, ITER-Rat und nationalen Behörden während der drei Abschnitte Bau, Nutzung und Stilllegung der Anlage (Abb. 3). Sie beruht auf dem Leitgedanken, dass alle Partner gleichberechtigt zu den wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen beitragen und die Komponenten des Fusionsexperiments gemeinsam bauen (Tabelle). Dieser Leitgedanke und die vielstufigen Entscheidungsstrukturen zwischen den Institutionen verzögerten den Ablauf des Projekts nachhaltig und erhöhten die Kosten. Noch hat der ITER-Rat keinen neuen Zeit- und Kostenplan offiziell verabschiedet. Fusionsforscher wie Sibylle Günter halten 2025 für einen realistischen Zeitpunkt, zu dem die Anlage in Betrieb gehen könnte. Die Kosten sind noch schwerer einzuschätzen, weil jede nationale Behörde auf eigene Rechnung zu ITER beiträgt. Klar ist, dass jede weitere Verzögerung die Kosten in die Höhe treibt, allein weil die Preise für Baustoffe wie Beton und Stahl steigen. Der Anteil der Europäischen Union ergibt hochgerechnet Gesamtkosten zwischen 13 und 17 Milliarden Euro.

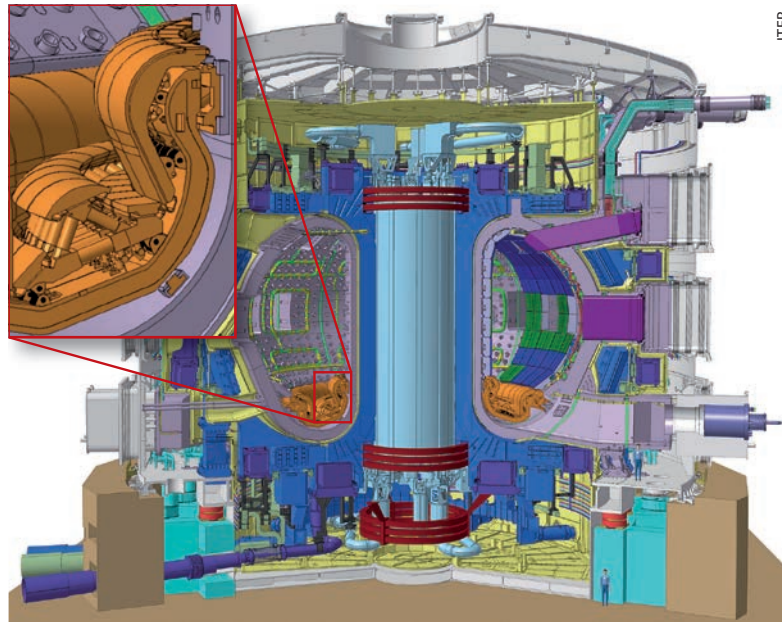


Abb. 2 Der fast 30 Meter hohe Tokamak ITER ist mit großer Detailfülle in einer

3D-Simulation realisiert, um u. a. Arbeitsabläufe beim Aufbau zu erproben.

tion, in dem er forderte, die Mittel sollten lieber der Entwicklung von Kernkraftwerken der vierten Generation zugute kommen.⁹⁾ Die eine Forschungsrichtung gegen die andere ausspielen will Matthias Bartelmann, Vorstandsmitglied der DPG, dagegen nicht: Über die Erforschung der Kernfusion sollte der Ausbau anderer Energiequellen wie Erdwärme oder Solarenergie nicht in Vergessenheit geraten. Er kritisiert vor allem, dass Fusionsforscher ihre Arbeiten als Entwicklung der Energiequelle von morgen an-

preisen, obwohl es sich dabei noch immer um zielgerichtete Grundlagenforschung handele.

Neben den gestiegenen Kosten erregte vor allem das Management des Projekts viel Unmut. Die in zweijährigem Rhythmus stattfindende Evaluation fiel 2014 so katastrophal aus, dass der ITER-Rat sie nur seinen Mitgliedern und den höchsten Management-Ebenen der ITER-Organisation zugänglich machte. Um die Fehlentwicklungen zu stoppen und das Vertrauen der Partner zurück zu gewinnen, wurde

3) Eine Liste aller Meilensteine von ITER findet sich unter www.iter.org/proj/itermilestones

4) www.gruene-europa.de/eu-atomforschung-6502.html

5) Vollständiger Text in französischer Sprache: bit.ly/1KtkC2i

Kritische Stimmen

Das ist viel Geld für ein Projekt, bei dem nicht feststeht, ob es wirklich den erhofften Durchbruch in der Fusionsforschung bringt. Kritische Stimmen drängen daher zum Abbruch: Die Fraktion der Grünen im EU-Parlament fordert in schöner Regelmäßigkeit, die Arbeiten an ITER einzustellen. In ihrer Argumentation schert die Fraktionsvorsitzende Rebecca Harms dabei allerdings gerne Kernspaltung und Kernfusion über einen Kamm.⁴⁾ Auch namhafte Physiker äußern sich kritisch. Der Physik-Nobelpreisträger Georges Charpak schrieb kurz vor seinem Tod 2010 einen offenen Brief in der französischen Tageszeitung Libéra-

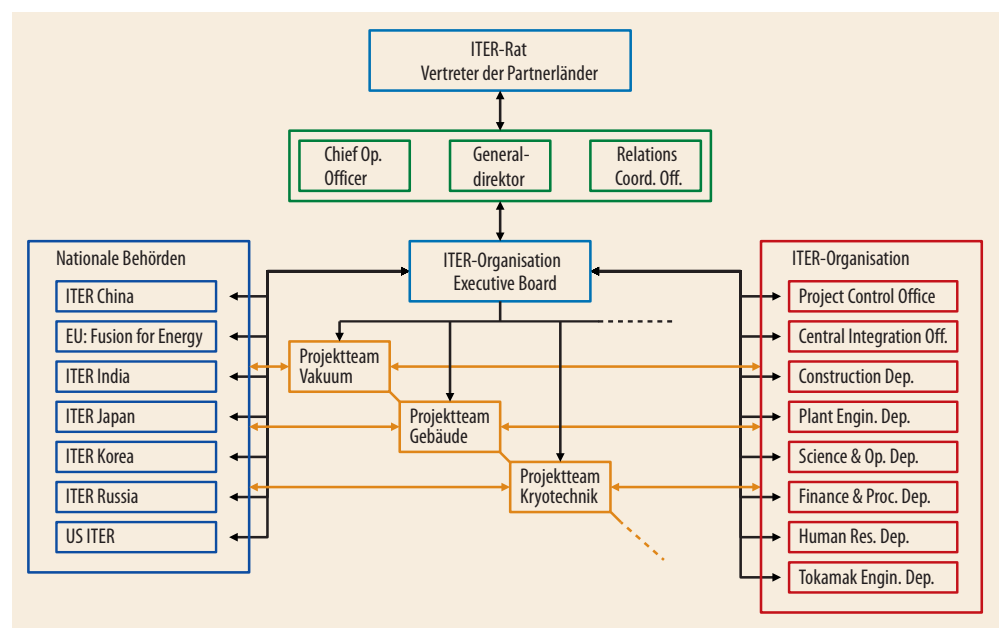


Abb. 3 Die Verwaltung des Großforschungsprojekts ITER ist kompliziert: Die ITER-Organisation arbeitet

eng mit den eigenständigen Nationalen Behörden zusammen. Entscheidungsträger ist der ITER-Rat.



Abb. 4 Bernard Bigot, Generaldirektor der ITER-Organisation, und Sibylle Günter, Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, schlossen am

11. November 2015 einen Kooperationsvertrag ab, um die Steuerungssoftware für das Fusionsexperiment ITER gemeinsam zu entwickeln.

Ein Profi am Werk

der erfahrene Wissenschaftsorganisator Bernard Bigot als Generaldirektor an die Spitze der ITER-Organisation gewählt (Abb. 4).

Der promovierte Chemiker und Physiker hatte zahlreiche führende Positionen in französischen Forschungseinrichtungen und Ministerien inne: Er war Kommissar für Atomenergie (2003 – 2009) und Vorsitzender des Verwaltungsrats (2009 – 2014) der französischen Atom- und Energiebehörde CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), sodass er sich mit politischen Ränkespielen und bürokratischen Fallstricken auskennt. Für ihn ist ITER mehr als ein Großforschungsprojekt: „Damit alle gemeinsam von Globalisierung profitieren, müssen wir eine neue Form der Zusammenarbeit entwickeln und als internationale Gemeinschaft Lösungen finden. Das können wir an ITER lernen!“

Zum Amtsantritt bei ITER veröffentlichte er seine Meinung zum Status Quo und seine Agenda in einem Nature-Artikel.⁶⁾ Sein Ziel ist es, die Abläufe in der ITER-Organisation und mit den nationalen

Behörden zu beschleunigen. Dazu hat er Verwaltungsebenen ersatzlos gestrichen und neue effizientere Strukturen geschaffen. So gibt es nun Projektgruppen, die sich mit einem speziellen Aspekt wie dem Bau der Kryoplanen beschäftigen. In diesen arbeiten Ingenieure, Techniker und Wissenschaftler von ITER-Organisation und nationalen Behörden zusammen. Die Gruppen berichten an Direktorium und nationale Behörden. So will Bigot vermeiden, dass Entwicklungsarbeit mehrfach stattfindet und sich gute Ideen im Getriebe der Zuständigkeiten verlieren. Seine Umstrukturierungen stießen aber nicht bei allen Mitarbeitern auf Gegenliebe, und der anfängliche Optimismus flaute schnell wieder ab. „Es brauchte viele Gespräche, um alle davon zu überzeugen, dass

sie an einem der außergewöhnlichsten Abenteuer der Menschheit teilhaben“, erklärt Bigot, der aber inzwischen von der Akzeptanz seiner Maßnahmen überzeugt ist.

Außerdem möchte er für mehr Transparenz sorgen, damit ITER in Politik und Öffentlichkeit wieder in positives Licht rückt. So finden sich im Webauftreten von ITER nun Organigramme zum Management, eine ausführliche Zeitachse mit allen Meilensteinen des Projekts und Stellungnahmen zur bisherigen Entwicklung des Zeitplans und der Kosten. Die Leistung seiner Vorgänger im Amt des Generaldirektors, Osamu Motojima und Kaname Ikeda aus Japan, möchte Bernard Bigot nicht kritisieren: „Sie haben das Beste erreicht, was sie unter den schwierigen Umständen tun konnten“, ist er sicher und fügt hinzu, dass er seinen Nachfolgern weitgreifende Schritte als sich selbst zutraut. Innerhalb der Gremien von ITER müsse Schluss sein mit nationalem Taktieren.

Weil die fünfjährige Amtsperiode des Generaldirektors im Vergleich zu den Zeitplänen von ITER (Abb. 5) kurz ist, ist es Bigots wichtigstes Ziel, die Zukunft für seine Nachfolger bestmöglich vorzubereiten. Dabei denkt er nicht nur an die oberste Führungsebene: „Die gesamte Mannschaft muss vorbereitet werden, denn nach dem Bau der Anlage kommen neue Aufgaben wie Betrieb und Wartung auf uns zu.“ Hier sieht er auch die Wissenschaftler, die an ITER experimentieren werden, in der Pflicht. Sie müssten lernen, die Anlage möglichst effizient zu nutzen, um die offenen Fragen auf dem Weg zum Demonstrationskraftwerk schnell zu beantworten. Gleichzei-

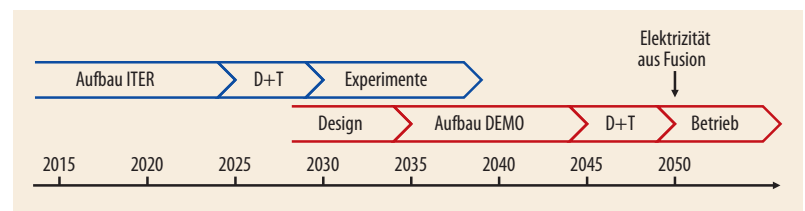


Abb. 5 Die Fusionsforscher hoffen, dass ITER bis 2025 in Betrieb geht. Die Fusion von Deuterium (D) und Tritium (T) sollte innerhalb von fünf Jahren gelingen. Zeitgleich mit den Experimenten kann das

Design des Demonstrationskraftwerks DEMO geplant und der Aufbau begonnen werden. Der Betrieb von DEMO – und damit Elektrizität aus Fusion – ist nicht vor 2050 zu erwarten.

6) www.nature.com/news/nuclear-physics-pull-together-for-fusion-1.17708

tig ist ihm klar, dass es schwierig ist, über die lange Zeitspanne mehrerer Jahrzehnte verlässlich zu planen.

„Die Kontinuität eines Projekts zu garantieren, an dem mehrere Generationen unter immer neuen Voraussetzungen mitwirken, ist eine große Herausforderung“, erklärt er.

Seinen Zeitplan und eine Kostenabschätzung hat Bigot dem ITER-Rat Mitte November vorgestellt, der diese ausführlich diskutierte. In der mit Spannung erwarteten Pressemitteilung bewilligte das Gremium Bigots Vorschläge zunächst für 2016 und 2017. Darüber hinaus soll ein unabhängiges Gutachten bis Juni dieses Jahres prüfen, ob und wo es noch Potenzial für Optimierungen gibt.⁷⁾ Für Sibylle Günter ist das ein guter Kompromiss: „Natürlich hätten wir Forscher uns gewünscht, dass Bigots Pläne komplett akzeptiert und veröffentlicht werden. Stattdessen kann er für zwei Jahre weiterarbeiten, und die Partnerländer haben Zeit, sich zu einigen. Die schlimmsten Befürchtungen – das Projekt für

die Beratungszeit zu stoppen oder gar ganz einzustellen – sind nicht eingetreten.“ Sie sieht das Wirken des Franzosen positiv und hätte ähnliche Forderungen gestellt, um ITER neuen Schwung zu geben.

Erfolgsgeschichte Fusion?

Sibylle Günter hofft, dass die Neuerungen dafür sorgen, dass die Errungenschaften der Fusionsforschung anerkannt werden. Als Beispiel nennt sie den Lawson-Parameter: Das Produkt aus Teilchendichte, Temperatur und Einschlusszeit der Energie muss größer als ein gewisser Schwellenwert sein, damit ein Fusionsplasma zündet und Energie liefert. „Heute fehlt uns noch ein Faktor zehn – seit Beginn der Fusionsforschung haben wir aber schon einen Faktor 100 000 erreicht“, sagt sie stolz. Die spöttische Bemerkung, die einzige Konstante der Fusionsforschung sei die Zahl 50, weil es unabhängig vom Zeitpunkt der Fragestellung

noch 50 Jahre dauere, bis ein Kraftwerk möglich sei, findet sie unangebracht. Die Fusionsforschung sieht sie jetzt vor einem entscheidenden Schritt: „Wir verstehen, was im Plasma passiert. Jetzt müssen wir zeigen, dass Fusion mehr Energie bereitstellt, als das Heizen des Plasmas benötigt. Dafür brauchen wir ITER!“

Doch was ist ein realistischer Zeitplan auf dem Weg zum Fusionskraftwerk? Nach dem jetzigen Stand der Arbeiten könnte die Anlage in Südfrankreich bis 2025 in Betrieb gehen (Abb. 5). Dass ein Fusionskraftwerk wie DEMO Elektrizität ins Netz einspeist, ist nicht vor 2050 zu erwarten. „Diese Planung ist sehr spekulativ, weil wir nicht wissen, welche technischen oder politischen Schwierigkeiten uns noch erwarten“, will sich Sibylle Günter nicht festlegen lassen. Bernard Bigot, Jahrgang 1950, schätzt die Lage ähnlich ein: „Ich persönlich werde wohl nicht mehr erleben, wie ein Fusionskraftwerk ans Netz geht.“