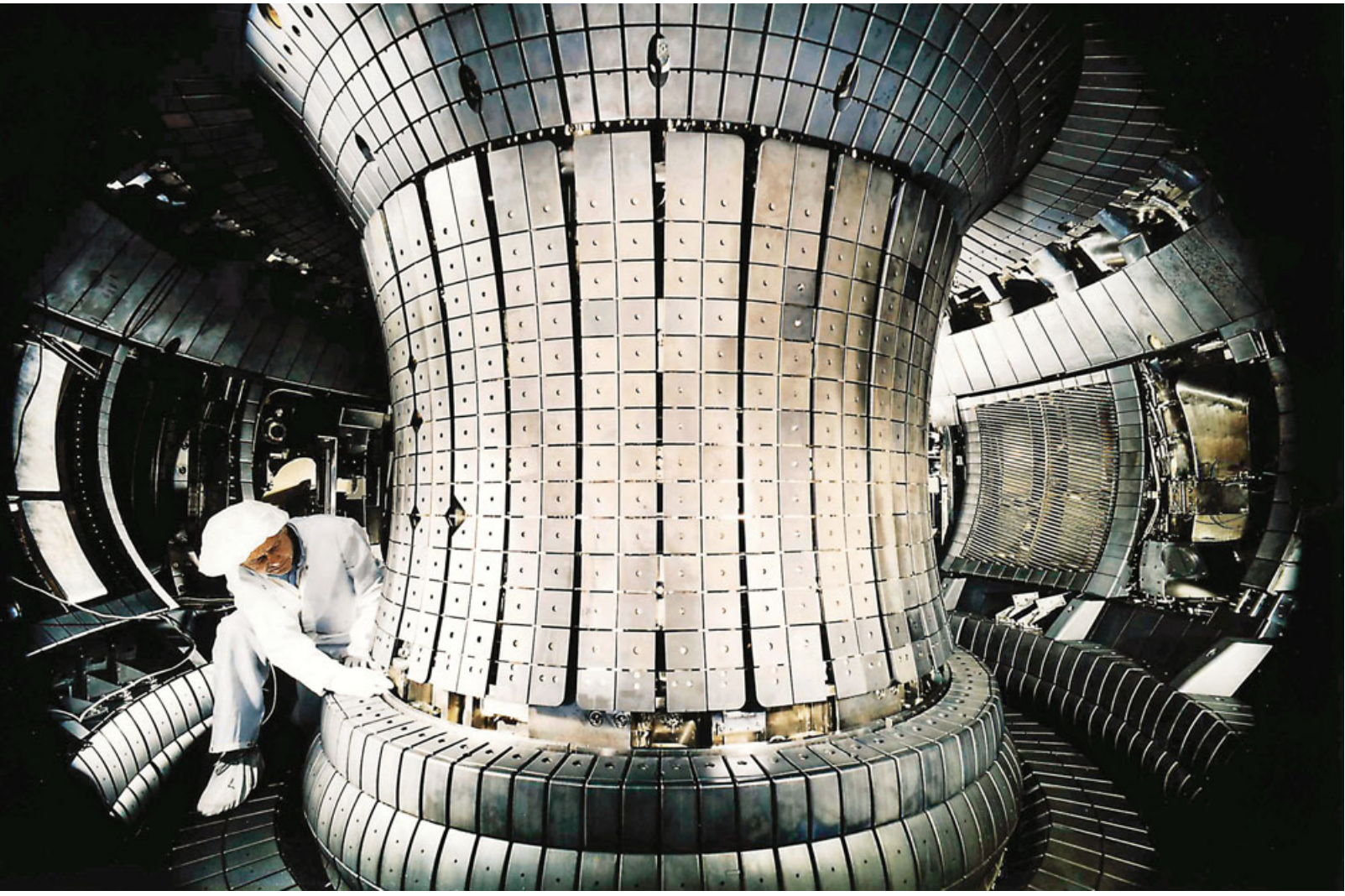
ENERGIE

Die Sonne auf Erden

Für mehr als fünf Milliarden Euro wollen Physiker erstmals ein Fusionskraftwerk errichten, das Energie erzeugt. Nach Jahrzehnten der Rückschläge sind den Forschern in jüngster Zeit erstaunliche Fortschritte gelungen. Wird es tatsächlich irgendwann Strom und Wärme im Überfluss geben?



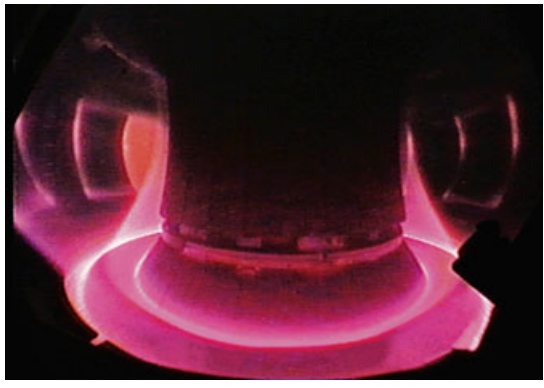
Plasmakammer der Fusionsanlage „Asdex Upgrade“*: *„Wir nähern uns dem Durchbruch“*

Bei der Zündung Nummer 23995 geht etwas schief. Erst vor einer Sekunde entfacht, löst sich das künstliche Sternenfeuer gleich schon wieder auf. Kurz vor dem jähen Untergang beginnt das Plasma in der Fusionskammer zu schwingen. Mikrofone übertragen das Quietschen an die Überwachungszentrale.

Arne Kallenbach hört sofort, dass etwas nicht stimmt. „Wahrscheinlich kam das Plasma zu nahe an die Kammerwände und ist dann schlagartig abgekühlt“, vermutet der erfahrene Physiker. „Das passiert häufiger mal. Vor allem in der Aufheizphase reagiert das Plasma leider sehr empfindlich.“

Gebannt schaut Kallenbach auf den Monitor. Zusammen mit seinen Kollegen wartet er auf die Messdaten. Durch Betonwände abgeschirmt, wirkt ihre Zentrale wie der Kontrollraum einer Weltraummission. Doch die Forscher vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching bei München schießen keine Raketen ins All: Sie arbeiten daran, die Sonne auf die Erde zu holen.

* Am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching.



Fusionsexperiment in der Plasmakammer*
Heißer noch als im Innern von Sternen

Ihre Maschine „Asdex Upgrade“ ist die bislang größte Fusionsanlage Deutschlands. Auch nach Tausenden Versuchen sind die Wissenschaftler noch immer nicht am Ziel. Kallenbach: „Wir suchen weiter nach der perfekten Zündung, bei der alles stimmt.“

Seit einem halben Jahrhundert quälen sich Physiker auf der ganzen Welt damit herum, das Fusionsfeuer zu entfachen. Nach so langer Zeit hat die Öffentlichkeit längst die Hoffnung verloren, dass bei ihrer Forschung jemals etwas Nützliches herauskommen wird. Doch ausgerechnet jetzt, da sich kaum noch jemand für ihre Arbeit interessiert, scheinen die Plasmaphysiker erstaunliche Fortschritte zu machen.

Voller Enthusiasmus spricht der neue IPP-Direktor Günther Hasinger über die jüngsten Erfolge. Bis vor wenigen Wochen war der Astrophysiker darin vertieft, das Geheimnis der Schwarzen Löcher im Kosmos zu lüften. Nun hat der oberste deutsche Fusionsforscher gelernt, wie weit seine Mitarbeiter insgeheim schon vorangekommen sind.

„Wir nähern uns dem Durchbruch, es geht viel schneller voran, als viele denken“, behauptet Hasinger. „Mit einer Art ‚Apollo‘-Programm der Kernfusion hätten wir sogar schon zur Jahrtausendwende einen Reaktor bauen können, der Strom und Wärme liefert – nur fehlte das nötige Geld für eine so große Maschine.“

Im Innern von Sternen geschieht die Fusion von ganz allein. Unter gewaltigem Druck verschmelzen leichte Wasserstoffkerne zu schwererem Helium. Kaum fassbare Energiemengen werden dabei freigesetzt. Es ist diese seit Jahrmilliarden ablaufende Kernfusion, die das Leben auf der Erde unablässig mit Licht und Wärme versorgt – im Labor jedoch lässt sich die Sonne nicht so einfach nachbauen.

Es scheitert schon daran, dass keine irdische Maschine so hohe Drücke wie ein Stern zu erzeugen vermag. Die Forscher versuchen, diesen Mangel durch noch weit höhere Temperaturen als in der Sonne auszugleichen: Sie erhitzen das elektrisch geladene Wasserstoffgas auf sagenhafte 100 Millionen Grad Celsius.

Das so entstehende Plasma ist schwer zu bändigen. Starke Magnete müssen es in der Schwebe halten; denn sobald es zu sehr mit den Kammerwänden in Berührung gerät, wird es verunreinigt, kühlt dadurch ab – und der empfindliche Fusionsprozess bricht in sich zusammen.

Immerhin besteht das Problem nicht mehr darin, Wasserstoffkerne überhaupt dazu zu bringen, miteinander zu verschmelzen. Futuristische Heizmaschinen, darunter riesige Mikrowellenapparate, bringen das hochverdünnte Gas sekundenschnell auf vielfache Sternentemperatur. Zum Arsenal der Garchinger Forscher gehört auch eine Partikelkanone: Sie schießt Teilchen in das Plasma hinein, die darin abgebremst werden und so einen Großteil ihrer Energie abgeben. Auf die Außenhülle der Kanone hat ein Witzbold einen feuerspeienden Drachen gemalt.

Allerdings wird bei der Labor-Fusion bislang zu wenig Energie freigesetzt, um den Verschmelzungsprozess von selbst am Kochen zu halten. Ohne ständige Heizung von außen erlischt die Fusionsflamme. Es kommt den Forschern so vor, als würden sie nasses Holz anzünden.

Die Isolierung des Plasmas ist einfach noch nicht gut genug, zu viel Energie geht verloren. Aber es gibt einen Ausweg: den Bau einer richtig großen Fusionsmaschine.

„Wenn wir das Volumen des Plasmas drastisch erhöhen, sinken automatisch auch die Wärmeverluste“, erläutert Hasinger. „Wir nennen das die Eisbärenformel: In kalten Gegenden fällt es großen Tieren leichter als kleinen, ihre Körperwärme zu halten.“

Um den Beweis zu erbringen, dass die Fusion tatsächlich für die Energiegewinnung taugt, wollen die Wissenschaftler deshalb jetzt eine Anlage der Superlative errichten: In wenigen Monaten beginnen im südfranzösischen Cadarache die Bauarbeiten am Fusionskraftwerk „Iter“ („Internationaler Thermonuklearer Experimenteller Reaktor“). Der 500-Megawatt-Versuchsreaktor soll erstmals zehnmal mehr Energie erzeugen, als für die Aufheizung seines Plasmas verbraucht wird – das wäre in der Tat der langersehnte Durchbruch.

Einen so aufwendigen Koloss zu konstruieren dauert indes ein weiteres Jahrzehnt – mindestens. Und erst ab 2050 würden dann die ersten kommerziellen Fusionskraftwerke ans Netz gehen. Doch Hasinger ist überzeugt: „Wenn ‚Iter‘ in zehn bis zwölf Jahren läuft, wird niemand mehr zweifeln, dass dies eine gute Investition war.“

Der Wald bei Cadarache ist bereits gerodet, die letzten Wildschweine sind vertrieben. Planierraupen haben das Areal glattgezogen. Beton und Stahl für das 30 Meter hohe Reaktorgebäude sind bestellt.

Neben Europa beteiligen sich Russland, die USA, China, Indien, Japan und Südkorea an der Errichtung der über fünf Milliarden Euro teuren Maschine. Schon jetzt steht fest, dass „Iter“ am Ende mindestens 30 Prozent mehr kosten wird als veranschlagt.

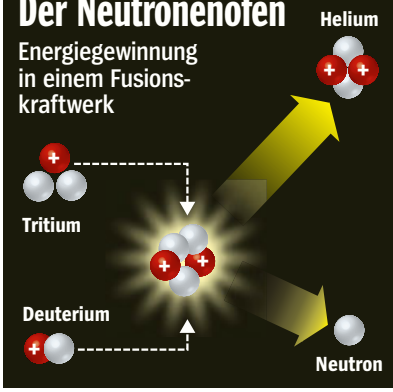
Kritiker halten das alles für rausgeschmissenes Geld – und übersehen dabei, dass allein die Förderung der deutschen Steinkohle noch immer jährlich zweieinhalb Milliarden Euro verschlingt. Wenn die Fusion tatsächlich klappt, wären die Energiesorgen der Menschheit wohl wirklich für alle Zeiten gelöst – der Traum von der (fast) sauberen Energie im Überfluss würde wahr werden. Sollte die Menschheit ernsthaft darauf verzichten, eine Technik zu entwickeln, die einmal alle Atom- und Kohlekraftwerke ersetzen könnte?

Was Fusionskraftwerke – theoretisch – leisten, klingt wie Hexerei. Weil bei der Kernverschmelzung Materie in Energie umgewandelt wird (was auch die verheerende Vernichtungskraft von Wasserstoffbomben erklärt), käme ein 1000-Megawatt-Fusionsreaktor mit verblüffend geringen Brennstoffmengen aus: Pro Stunde würde gerade mal das Gewicht von zehn Zuckerwürfeln verfeuert. Unterm Strich könnte ein Kilogramm Wasserstoff so viel Strom liefern wie 11 000 Tonnen Kohle.

Der als Brennstoff benötigte schwere Wasserstoff (Deuterium) ließe sich billig und in nahezu unbegrenzter Menge aus den Weltmeeren gewinnen; die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen wie Öl und Gas wäre mit einem Mal beseitigt. Im Unterschied zu einem Kohlekraftwerk bläst

Der Neutronenofen

Energiegewinnung in einem Fusionskraftwerk



Ein Gasgemisch aus Deuterium- und Tritium-Atomen wird in einem Magnetfeld eingeschlossen und auf etwa 100 Millionen Grad Celsius erhitzt.

Das Gas wechselt in den Plasma-Zustand: Die Atomkerne trennen sich von ihren Elektronen.

Beim Zusammenstoß eines Deuterium- und eines Tritium-Kerns verschmelzen diese zu einem Helium-Kern, wobei ein Neutron freigesetzt wird (Abbildung). **Beide Reaktionsprodukte besitzen hohe Bewegungsenergie.**

Der Helium-Kern bleibt zunächst im Magnetfeld und heizt über Teilchenstöße das Plasma an.

Das Neutron verlässt das Magnetfeld. Seine **Bewegungsenergie wird in Nutzwärme umgewandelt,** die über Dampfturbinen Generatoren antreibt.

DER SPIEGEL


Physiker Hasinger

PETER SCHINZLER



WOLFGANG FILSER / IPP

Modul für die Fusionskammer von „Wendelstein 7-X“*
„‚Mona Lisa‘ der Schweißtechnik“

ein Fusionsreaktor zudem keinerlei Treibhausgase in die Atmosphäre.

Und die Gefahr eines Unfalls ist gleich null; denn schon bei der kleinsten Störung bricht die Fusion ja von selbst ab. Die radioaktiven Abfälle wiederum, die durch den Beschuss der Reaktorinnenwände mit energiereichen Neutronen entstehen, könnten relativ leicht entsorgt werden. Ihre Strahlung ist bereits nach rund hundert Jahren weitgehend abgeklungen.

Auch von dem zweiten Brennstoff, Tritium, geht ein vergleichsweise geringes Risiko aus. Diese radioaktive Wasserstoffvariante strahlt nur schwach, seine Halbwertszeit beträgt lediglich 12,3 Jahre. Die Garchinger Fusionsanlage wird noch ohne Tritium betrieben. Im Versuchsreaktor „Iter“ hingegen soll es als eine Art nuklearer Brandbeschleuniger dem Deuterium-Plasma beigemischt werden (siehe Grafik Seite 117). Die Energieausbeute lässt sich auf diese Weise drastisch steigern.

Einen weiteren Trick, den Fusionsprozess erheblich zu verbessern, haben die Garchinger Physiker erst vor wenigen Wochen entdeckt. Bei bislang unveröffentlichten Experimenten an der „Asdex Upgrade“-Anlage fanden sie heraus, welche sensationelle Wirkung die Beimischung von Stickstoff hat.

Statt sich durch diese Verunreinigung abzukühlen, ist das Plasma sogar heißer geworden – und gleichzeitig verdoppelte sich der Energieausstoß. „Wie dieses unerwartete Phänomen zustande kommt, haben wir noch nicht wirklich verstanden“, gibt Hasinger zu. „Auf überraschende Weise sorgt der Stickstoff offenbar für eine bessere Isolierung.“

Das Stickstoff-Rätsel zeigt, wie viele offene Fragen noch zu klären sind. Vor allem „Asdex Upgrade“ soll in den kommenden Jahren entscheidende Vorarbeiten für „Iter“ und spätere Großkraftwerke leisten.

Die größte Herausforderung besteht für die Fusionsforscher darin, einen besseren Magnetkäfig für das widerspenstige Plasma zu bauen. Alle herkömmlichen Fusionsanlagen leiden dabei unter einer konstruktionsbedingten Schwäche: Heftige Strompulse werden in das elektrisch geladene Wasserstoffgas gejagt und führen so zum Aufbau jener Magnetfelder, die das heiße Plasma einsperren – zugleich machen sie es aber auch schwerer beherrschbar.

„Mit den Strompulsen zwingen wir das Plasma gleichsam dazu, sich sein eigenes Gefängnis zu bauen“, erläutert Hasinger. „Als Reaktion darauf tobt es in dem Magnetkäfig wie ein wildes Tier und versucht auszubrechen. Wir müssen deshalb den Strom ständig nachjustieren.“

Eine stabilere Fusionsalternative wollen die Max-Planck-Forscher schon bald in der ostdeutschen Provinz erproben: In der IPP-Außenstelle in Greifswald wird für mehr als 400 Millionen Euro derzeit der Experimentalreaktor „Wendelstein 7-X“ errichtet – er basiert auf einem revolutionär anderen Konstruktionsprinzip („Stellarator“). Wichtige Komponenten liefern die Forschungszentren in Jülich und Karlsruhe.

„Wir erschaffen hier eine Präzisionsmaschine, wie sie noch nirgendwo zuvor auf der Welt entstanden ist“, sagt Projektleiter Thomas Klinger. „Unser Reaktor ist zwar schwerer zu bauen als alle vorherigen – dafür wird er viel leichter zu betreiben sein.“

Das Besondere an „Wendelstein 7-X“: Der Magnetfeldkäfig wird ausschließlich durch äußere Spulen aufgebaut, das Plasma bleibt darin sicher eingesperrt. Möglich wird das durch bizarr verdrehte Magnetspulen, die aneinandergereiht aussehen wie die Wirbelsäule eines Dinosauriers. Erst mit dem Einsatz modernster Supercomputer ist es gelungen, die genaue Form des Gebildes zu berechnen.

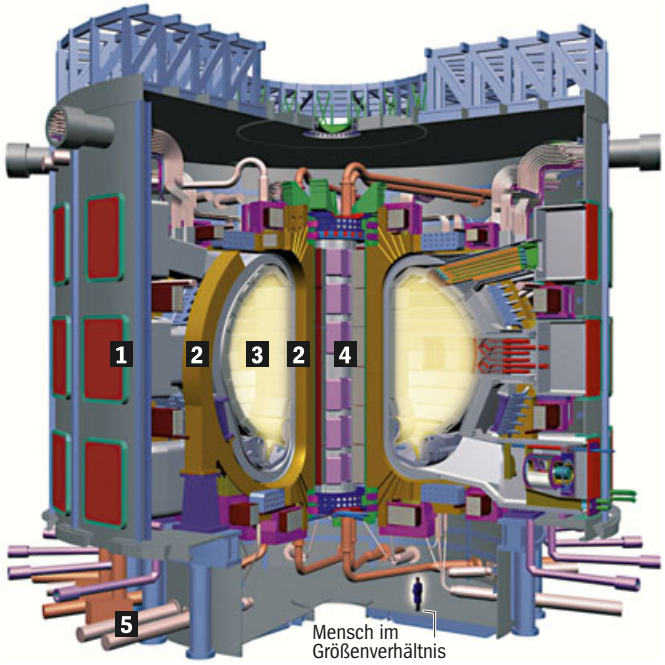
Jede der 70 Spulen wiegt 6 Tonnen und kostet eine Million Euro. Zusammengeschaltet erzeugen sie gewaltige Magnetkräfte. Ohne Superschrauben würde die Fusionsmaschine beim Betrieb auseinanderfliegen. Klinger: „Kein Bauteil hier ist von der Stange.“

In der Greifswalder Werkhalle vermessen Techniker mit Lasern, ob auch die Reaktionskammer exakt den Vorgaben entspricht. Es kommt hier auf Millimeter an. Stolz streicht Klinger über das Stahlgefäß. „Unsere Schweißer vom Deggendorfer Anlagenbauer MAN DWE sind echte Künstler, die rückten hier mit ihren Geräten an wie Symphoniker mit ihren Musikinstrumenten“, sagt der Physiker. „Was die hier geschaffen haben, ist eine Art ‚Mona Lisa‘ der Schweißtechnik.“

In der Nachbarhalle werden bereits die ersten Riesenmodule montiert. In fünf Jahren soll das erste Experiment starten. Am Tag X werden als Erstes die tiefgekühlten Magneten hochgefahren. Sachte blasen Ventile dann ein wenig Wasserstoff in die Vakuumkammer. Schließlich bringen Supermikrowellen, die so viel leisten wie 10 000 Küchengeräte, das Plasma auf mehrfache Sternentemperatur – und das Höllenfeuer bricht los.

„In Wahrheit dauert es auch uns Physikern zu lange, eine so große, komplizierte Maschine zu bauen“, sagt Projektleiter Klinger. „Aber wenn es uns gelingt, wird das die Welt verändern. Stellen Sie sich vor, was es bedeuten würde, mit drei Flaschen Wasser eine Familie ein Jahr lang mit Strom zu versorgen!“

OLAF STAMPF



Schnitt durch den geplanten Fusionsreaktor Iter

1 Strahlungsschutzschild
2 Supermagnete
3 ringförmige Plasma-Brennkammer
4 zentrale Magnete
5 Kühlflüssigkeits- und Versorgungsleitungen

DER SPIEGEL

* In Greifswald.