

Die Sonne auf Erden

Physik Wasserstoff plus Hitze gleich Energie – diese Formel steht für den Menschheitstraum vom sauberen Strom. Im Fusionsreaktor Iter könnte er sich erfüllen. Aber wie teuer soll das Jahrhundertprojekt noch werden?

Man lasse eine Badewanne volllaufen und werfe eine Laptop-Batterie hinein. Was passiert? Nichts. Doch wer das Lithium aus dem Akku nimmt, das Wasser nutzt und die Künste der Physik bemüht, könnte damit eine Familie 50 Jahre lang mit Energie versorgen.

Dieses magisch anmutende Szenario beschreibt das Versprechen der Fusion, der Verschmelzung von Atomkernen, wie sie normalerweise nur in Sternen geschieht.

Das Sonnenfeuer auf die Erde zu holen ist ein Menschheitstraum. Im Kernforschungszentrum Cadarache in Südfrankreich wird dieser Traum in Beton gegossen. Dort wächst seit fünf Jahren der International Thermonuclear Experimental Reactor (Iter) heran, ein Milliardenprojekt, finanziert von 35 Ländern der Erde.

Sechzig Meter hoch ragt das Gerippe der zentralen Werkhalle inzwischen in den Himmel über der Provence. Auch das Fundament für den „Tokamak“ ist gegossen, den Reaktor der Anlage. Noch sieht der Ort aus wie jede andere Großbaustelle. Doch hier geschieht Epochales: Irgend-

wann sollen sich in der Iter-Maschine Atomkerne vermählen, verschweißst von Temperaturen, die sich der menschlichen Vorstellungskraft entziehen.

Über 150 Millionen Grad heiß, zehnmal so warm wie das Sonneninnere, muss das Iter-Fusionsfeuer brennen. Gelingt der Coup, wird der Menschheitstraum wahr: die Versorgung der Welt mit unermesslich viel sauberer Energie.

Im Vorfeld der Pariser Klimakonferenz rückt die Fusion wieder in den Fokus. Auf etwa das Doppelte wird der Primärenergieverbrauch der Menschheit bis zum Ende des Jahrhunderts steigen. Diesen Energiehunger zu stillen wird allein mit Sonne, Wind und Biomasse nicht gelingen. Als klimaneutrale Alternative kommt neben der Atomkraft nur die Fusion infrage.

Gleich ein halbes Dutzend Start-ups wie General Fusion, Tri Alpha Energy oder Helion Energy in Nordamerika entwickeln Konzepte, um die Sonne auf Erden zu entzünden. Hinter ihnen stehen Geldgeber wie Amazon-Chef Jeff Bezos oder Microsoft-Mitbegründer Paul Allen.

Gleichzeitig wagt das Iter-Projekt einen Neuanfang. Mitte nächster Woche wird der Franzose Bernard Bigot, Generaldirektor der Organisation, ein neues Preisschild an das Megaprojekt heften und einen überarbeiteten Zeitplan vorstellen. Es ist der Versuch, die Iter-Mitgliedstaaten auf weitere Härten vorzubereiten.

Denn um etwa fünf Jahre und damit bis zum Jahr 2025 wird sich der Startschuss für die Arbeit des Experimentalreaktors verschieben. Entsprechend reichen die bislang geschätzten 15 Milliarden Euro wohl nicht aus. „Es ist davon auszugehen, dass das Projekt deutliche Verzögerungen und Mehrkosten aufweisen wird“, heißt es in einem internen Bericht des Bundesforschungsministeriums (BMBF) an den Haushaltsausschuss des Bundestags, der dem SPIEGEL vorliegt. Allein die Errichtung des Tokamak-Gebäudekomplexes sei um „bis zu 45 Monate“ in Verzug und könne sich „um bis zu 1 Mrd. Euro verteuern“.

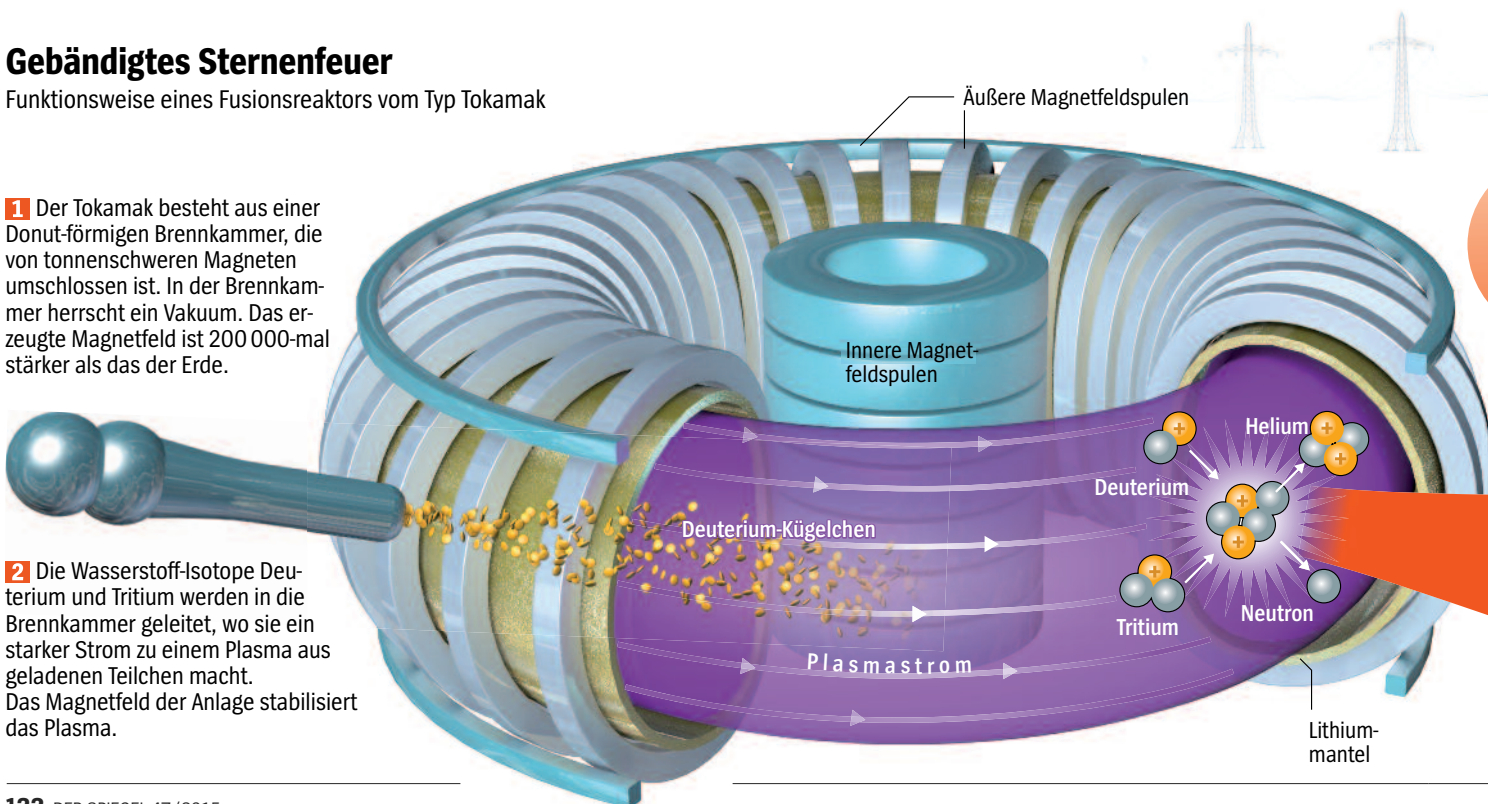
Parlamentarier wie die atompolitische Sprecherin der Grünen, Sylvia Kotting-Uhl, fordern daher, das Projekt einzu-

Gebändigtes Sternenfeuer

Funktionsweise eines Fusionsreaktors vom Typ Tokamak

1 Der Tokamak besteht aus einer Donut-förmigen Brennkammer, die von tonnenschweren Magneten umschlossen ist. In der Brennkammer herrscht ein Vakuum. Das erzeugte Magnetfeld ist 200 000-mal stärker als das der Erde.

2 Die Wasserstoff-Isotope Deuterium und Tritium werden in die Brennkammer geleitet, wo sie ein starker Strom zu einem Plasma aus geladenen Teilchen macht. Das Magnetfeld der Anlage stabilisiert das Plasma.





ITER-Baustelle in der Provence: Ein gewaltiges Puzzle, die Organisation ein Albtraum

stampfen. „ITER ist rausgeschmissenes Geld und kommt zu spät; wir brauchen keine Fusionsreaktoren“, sagt sie. Die Befürworter der Technologie widersprechen. „Es gibt nicht so viele Alternativen, um saubere und nachhaltige Energie zu produzieren“, sagt Iter-Chef Bigot. „Kurzfristig“ sei es, die Fusion abzuschreiben: „Wenn wir Erfolg haben, erschließen wir eine klimaneutrale, fast unerschöpfliche Energiequelle, die überall verfügbar ist.“

Wenn zwei Wasserstoffkerne verschmelzen, entsteht ein Masseüberschuss, der sich direkt in Energie verwandelt, ganz so, wie es Albert Einstein mit seiner Formel $E=mc^2$ beschrieb. Ein Gramm Fusions-

brennstoff hat dabei den gleichen Energiegehalt wie acht Tonnen Öl. Um die Reaktion anzustoßen, braucht es indes Herkuleskräfte. Erst bei enormen Temperaturen klappt die Vereinigung.

Unkontrolliert läuft der Vorgang in der Sonne und in Wasserstoffbomben ab. Ist das Sternfeuer zu bändigen? Schon seit den Fünfzigerjahren stellen sich die Physiker diese Frage. Eine Antwort könnte die sogenannte Laserfusion liefern. An der kalifornischen National Ignition Facility haben Forscher eine der stärksten Laserkanonen aller Zeiten in Anschlag gebracht.

Für ein paar milliardstel Sekunden leisten die 192 Laserstrahlen der turnhallen-

4 Die Wärme erzeugt wie in herkömmlichen Kraftwerken zunächst Wasserdampf. Über Turbinen und Generatoren lassen sich anschließend gewaltige Mengen Strom produzieren.

3 Ähnlich wie in einer Mikrowelle wird das Plasma weiter aufgeheizt. Zusätzlich werden hochenergetische Deuterium-Kügelchen in das Plasma geschossen, bis Deuterium und Tritium bei etwa 150 Millionen Grad Celsius zu Helium fusionieren. Dabei entsteht ein Masseüberschuss, der sich entsprechend der einsteinschen Formel $E=mc^2$ in Energie verwandelt. Bei der Reaktion bilden sich freie Neutronen, die in der Hülle des Reaktors abgebremst werden und dabei Wärme abgeben.

VORTEILE

- + Brennstoff ist weltweit und fast unbegrenzt verfügbar. Deuterium ist in Meerwasser enthalten. Tritium lässt sich mithilfe von Lithium direkt im Reaktor erbrüten.
- + klimaneutral, kein CO₂-Ausstoß
- + keine gefährliche Kettenreaktion wie bei herkömmlicher Kernenergie; Unfälle, die große Mengen Radioaktivität freisetzen, sind physikalisch unmöglich
- + kein hochradioaktiver Müll, daher kein Endlager notwendig

NACHTEILE

- Großkraftwerke mit sehr hohen Investitionskosten
- geringe Mengen schwach radioaktiven Mülls mit einer Abklingzeit von 100 Jahren
- Stromproduktion erst ab ca. 2050

DER SPIEGEL

großen Anlage 500 Terawatt, mehr als alle Kraftwerke der USA zusammen. Die Energie wird auf ein winziges Ziel gelenkt: eine kaum pfefferkorngroße Kapsel mit extrem kaltem Wasserstoff. Gelingt das Experiment, entsteht für den Bruchteil einer Sekunde eine Minisonne.

Theoretisch könnte der Prozess bis zu hundertmal mehr Energie liefern, als er verbraucht. Auch Frankreich, Japan, China und die EU erforschen die Technik. Doch der Weg zum Kraftwerk ist weit. Bislang bekommen die Forscher nur etwa ein Prozent der eingesetzten Energie zurück.

Viel weiter fortgeschritten sind die Fusionsanlagen vom ITER-Typ. Gewaltige Spulen erzeugen beim Tokamak ein starkes Magnetfeld, mit dem die Physiker den Wasserstoff gleichsam in einen unsichtbaren Käfig sperren. Die so gebändigte Materie kann dann weiter erhitzt werden, bis die Atomkerne fusionieren (siehe Grafik).

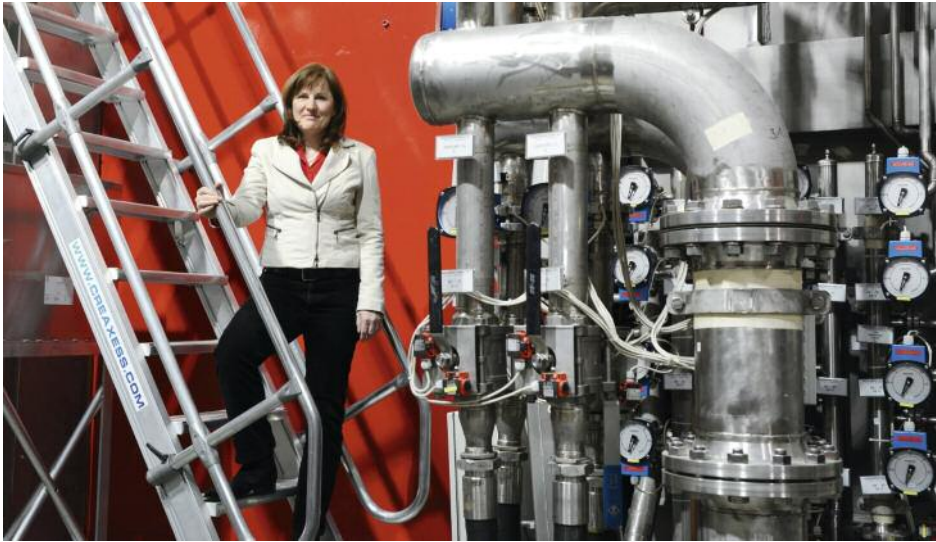
Die Zählung der Atome haben die Forscher inzwischen gut im Griff. Und im Prinzip funktioniert die Fusion darin bereits. In der britischen „JET“-Anlage etwa haben die Physiker schon zwei Drittel der eingesetzten Heizenergie zurückgewonnen.

Um die Energiebilanz der Anlagen ins Positive zu wenden, muss der Tokamak jedoch noch größer sein als der des „JET“. Das ist die Idee von ITER. 24 Meter Durchmesser soll der Reaktor haben. 840 Kubikmeter des sogenannten Plasmas, superheißer Wasserstoffs, sollen in ihm Platz finden. Stimmen die Berechnungen der Physiker, wird die Maschine zehnmal mehr Heizleistung haben, als für ihren Betrieb nötig ist.

„Ich bin mir sicher, dass ITER funktioniert“, schwärmt Sibylle Günter, Leiterin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) in Garching, die mit ihrem Team an der Entwicklung beteiligt ist. Auch an Rohstoffen mangelt es nicht. Als Fusionstreibstoff werden zwei verschiedene Wasserstoffisotope eingesetzt: Deuterium kann aus Meerwasser gewonnen werden, und Tritium lässt sich mithilfe von Lithium herstellen, das weltweit verfügbar ist.

Zudem preist die Professorin die Sicherheit der Anlage. Mit den Problemen der Kernspaltung nämlich hat die Fusion nicht zu kämpfen. „Fusion ist keine Kettenreaktion, die sich selbst erhalten kann“, sagt Günter, „ein unkontrollierter Leistungsanstieg oder so etwas wie eine Kernschmelze ist unmöglich.“

Es entsteht auch kein hochradioaktiver Atomüll. Zwar werden die Reaktorwände durch herumsausende Neutronen „aktiviert“, wie es Physiker nennen. Nach einiger Zeit sind sie mürbe und müssen ausgetauscht werden. 100 Jahre reichen indes aus, bis die leichte Radioaktivität weitgehend abgeklungen ist – kein Vergleich zum Lagerbedarf abgebrannter Kernbrennstä-



Plasmaphysikerin Günter: „Ich hoffe, die Kanzlerin kommt“

be. „Ein Endlager brauchen wir nicht“, sagt Günter.

Klingt gut – wenn da nicht die ungelösten Details wären. So benötigt der Tokamak ein Vakuum, was in dieser Größe ein technisches Kunststück ist. Vor allem aber krankt das Projekt an einem Geburtsfehler: Es ist nicht nur ein Forschungs-, sondern auch ein Friedensprojekt.

Vor genau 30 Jahren, im November 1985, beschlossen der damalige Kreml-Chef Michail Gorbatschow und US-Präsident Ronald Reagan den Bau einer Fusionsanlage, „zum Nutzen der gesamten Menschheit“. China, Indien, Japan, Korea und die EU (mit der Schweiz) folgten dem Ruf, und nun „müssen 35 Nationen mit unterschiedlichen Standards zusammenarbeiten“, klagt Iter-Chef Bigot.

Bigot hat sein Büro direkt mit Blick auf die Baustelle. Früher arbeitete er für die französische Atombehörde. Den Iter-Chefposten hat er im März übernommen. „Lassen Sie mich ehrlich sein“ ist einer seiner Lieblingssätze und Teil einer Vorwärtsverteidigung. Denn Bigot muss ein großes Scheitern erklären.

„Das Projekt hat mit Verzögerungen zu kämpfen“, schrieb er reumütig im Juni im Fachmagazin „Nature“. Fristen würden nicht eingehalten, und „bei Problemen zanken alle, wer die Rechnung bezahlen soll“.

„Frustrierend“ nennt der 65-Jährige das alles und blickt etwas hilflos hinaus auf seine immer teurer werdende Großbaustelle. Knapp fünf Milliarden Euro sollte der Bau einst kosten. Die Summe hat sich inzwischen mehr als verdreifacht. Auch das BMBF macht dafür „ineffektive Zusammenarbeit und unklare Rollen- und Verantwortungsverteilung“ verantwortlich.

Bigot will nun alles ändern. Entscheidungswege sollen gestrafft, die „Projektkultur“ verändert werden. Doch wird das reichen? Iter ist ein gewaltiges Puzzle, die Organisation ein Albatross. Selbst manche

Fachkollegen wenden sich inzwischen frustriert von der Riesmaschine ab und versuchen selbst ihr Glück.

Einen wahren Fusions-Hype beispielsweise löst derzeit die Firma Tri Alpha Energy in den USA aus. Die privat finanzierten Kalifornier entwerfen eine Fusionsmaschine, bei der Plasma aus zwei Kanonen aufeinandergeschossen wird und sich bei der Kollision extrem erhitzt. Für fünf Millisekunden erreichten die Forscher damit Temperaturen von zehn Millionen Grad.

Die Wissenschaftler der kanadischen Firma General Fusion wiederum wollen das Plasma inmitten einer rotierenden Kugel aus flüssigem Blei und Lithium stabilisieren. Eine Armada von Kolben soll dann mit großer Wucht von außen in die Kugel hineinstoßen und den Druck erhöhen, bis der Wasserstoff fusioniert.

Klein, schnell, preiswert – so wollen die Start-ups dem trägen Iter zuvorkommen. Ob ihnen das gelingt, ist allerdings fragwürdig. Tri Alpha Energy etwa baut nicht nur eine ganz neue Maschine, sondern will dazu statt der Wasserstofffusion eine Reaktion mit dem Halbmetall Bor nutzen. Dafür werden Temperaturen von etwa drei Milliarden Grad Celsius benötigt.

„Wissenschaftlich bewegt man sich dabei auf völlig unbekanntem Terrain“, kritisiert Dennis Whyte, Plasmaforscher am Massachusetts Institute of Technology bei Boston. „Es ist okay, sich einen Technologiesprung vorzunehmen, aber er sollte nicht so groß sein, dass man die Machbarkeit infrage stellen muss.“ Auch IPP-Chefin Günter verortet das Tri-Alpha-Konzept „weit jenseits dessen, was man heute technisch beherrschen kann“. Den Ansatz von General Fusion findet sie zwar spannend, aber „in der Entwicklung Jahre zurück und auch nicht billiger“. Manch anderes Konzept, das jetzt wieder auftaucht, sei zudem von der Forschung schon „vor 30 Jahren“ als unnützlich verworfen worden.

Ist Iter also die einzige Chance, den Fusionsraum zu verwirklichen? Auch politisch hat es das Großprojekt gerade schwer. Die EU hatte ihren Zuschuss eigentlich bei 6,6 Milliarden Euro gedeckelt. Bigot wird am Donnerstag dennoch weiteres Geld einfordern. Er glaubt, dass die Partner sich erweichen lassen. „Jeder will doch wissen, ob Fusion möglich ist“, sagt er.

Die Grüne Kötting-Uhl sieht das ganz anders. Sie fragt grundsätzlich, ob Großkraftwerke noch in die Energielandschaft passen werden. Frühestens 2050 sei mit kommerziellen Fusionsreaktoren zu rechnen – wenn überhaupt, sagt die Politikerin. „Dann müssen wir die Energiewende aber schon geschafft haben.“

Erneuerbare Energien aus Wind oder Sonne seien bis dahin vermutlich „spottbillig“, die Fusion daher überflüssig. „Und in einem System der Erneuerbaren“, sagt Kötting-Uhl, „brauchen wir keine Großkraftwerke mehr, sondern kleine Anlagen, die schnell zugeschaltet werden können, wenn zum Beispiel mal der Wind ausbleibt“. Dafür sei die Fusion ungeeignet.

Die Befürworter der Technik widersprechen. „Ich finde es falsch, erneuerbare Energien und Fusion gegeneinander auszuspielen“, sagt IPP-Chefin Günter. Für große Industriegebiete und Städte sei auch künftig ein Grundlastbedarf zu erwarten, der allein mit Erneuerbaren nicht zuverlässig zu decken sein werde.

Für Günter ist die Entscheidung für oder gegen Iter auch eine geopolitische. „China versucht bereits, parallel zu Iter noch einen eigenen Reaktor zu bauen“, berichtet sie.

Für die Physikerin steht viel auf dem Spiel. Deutschland ist führend in der Fusionsforschung. Im IPP in Garching steht einer der modernsten Tokamaks. An seinem Zweitstandort Greifswald in Mecklenburg-Vorpommern hat das IPP zudem eine neue Anlage errichtet: den „Wendelstein 7-X“.

Dieser sogenannte Stellarator weist mit einem komplex verschlungenen, von Supercomputern errechneten Magnetfeld weit in die Zukunft. In einer größeren Variante könnte eine solche Anlage künftig eine Alternative zum Iter sein. Noch vor Jahresende soll das erste Plasma in der Greifswalder Sternenmaschine gezündet werden, eine Gelegenheit, bei der Günter erneut für die Fusion werben will.

„Ich hoffe, die Kanzlerin kommt“, sagt die Professorin. Die Chancen stehen nicht schlecht. Wendelstein 7-X steht im Wahlkreis der Physikerin Angela Merkel.

Philip Bethge

Mail: philip_bethge@spiegel.de, Twitter: @philipbethge



Video: Wie ein Fusionsreaktor funktioniert

spiegel.de/sp472015fusion
oder in der App DER SPIEGEL