

TOTENGRÄBER DER ENERGIEWENDE

Die Kernfusion kommt

Nicht nur Putins Angriffskrieg, sondern auch technische Innovationen **beschleunigen** das Ende der Energiewende. Bis 2030 wird die Kernfusion als neue Energiequelle **zur Verfügung** stehen. Eines der vielen kommerziellen Projekte wird alle Illusionen über den Nutzen **von Wind und Sonne** beerdigen



VON PETER HELLER

Es ist die beruhigende Nachricht dieser Tage: Die Kernfusion wird bis zum Ende der Dekade als nachhaltige Energiequelle zur Verfügung stehen. Was in den 1940er-Jahren als Vision begann und seit den 1960er-Jahren experimentell erforscht wurde, hat ein Stadium erreicht, in dem das physikalische Wissen und die technischen Fähigkeiten zur Realisierung ausreichen. Es hängt nun nur noch von dem Willen ab, die erforderlichen Ressourcen in diese Innovation zu investieren.

Es gibt viele Optionen, Energie aus dem Feld der starken Kernkraft zu gewinnen, das Quarks zu Neutronen und Protonen formt und Letztere in den Atomkernen zusammenhält. Die Spaltung schwerer Kerne ist bereits etabliert. Ein Nettoenergiegewinn ist durch die Verwendung von Isotopen des Urans oder des Plutoniums möglich, die erstens mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit

von selbst zerfallen und dabei zweitens neben den leichteren Tochterprodukten auch noch zwei oder mehr einzelne Neutronen zur Zertrümmerung weiterer Kerne freisetzen.

Diese Eigenschaft **öffnet den eleganten Weg einer steuerbaren Kettenreaktion**, der **bedauerlicherweise bei der künstlich induzierten Verschmelzung leichter Nuklei nicht beschrritten** werden kann. Es bedarf **brachialer Gewalt**, die **Barriere der elektrischen Abstoßung der positiv geladenen Kerne** zu überwinden. Denn **nur dann übernimmt die starke Wechselwirkung das Regime und verbindet sie miteinander.**

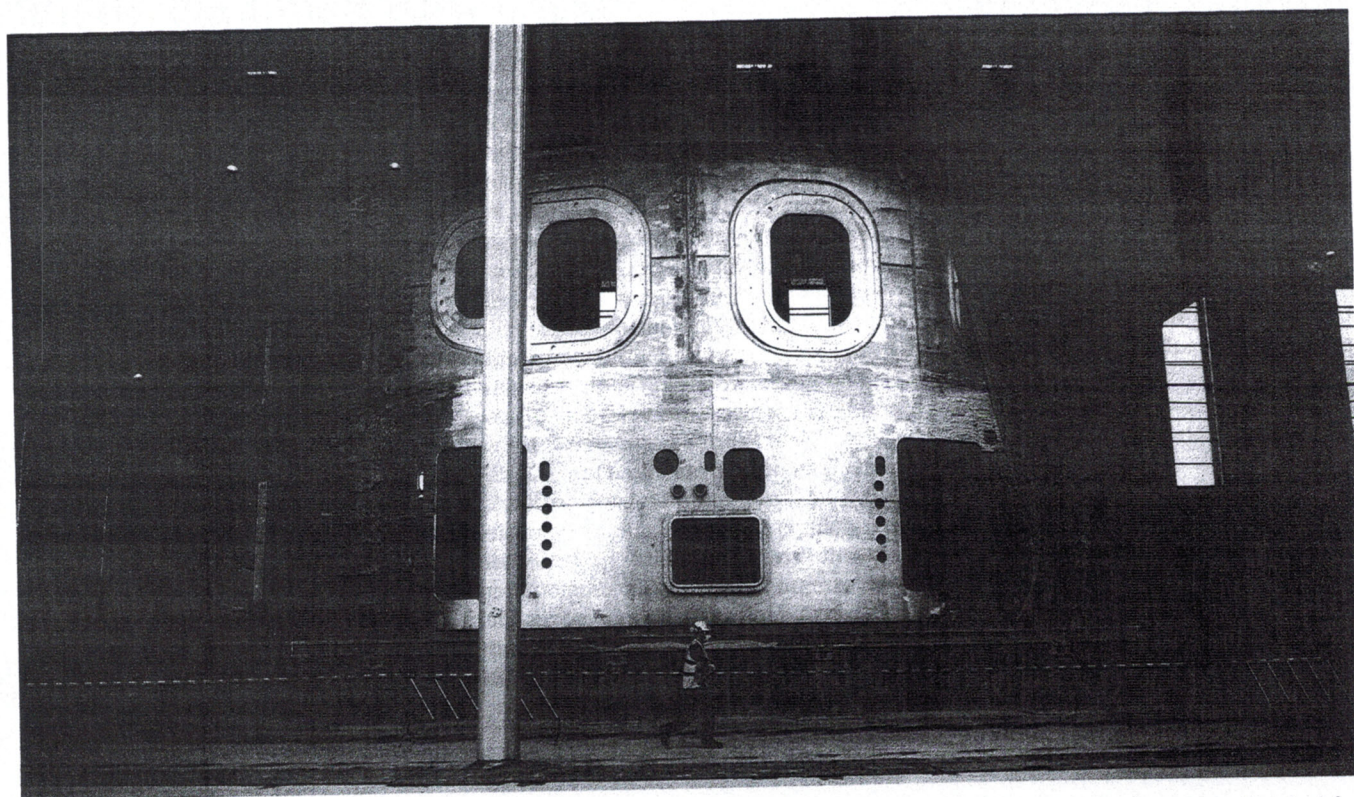
Effizient und effektiv

Verbreitet ist die Beschreibung der Kernfusion als unter irdischen Verhältnissen realisiertes „Sonnenfeuer“ – eine irreführende Metapher. Es ist unmöglich, die im Zentrum der Sonne herrschenden Verhältnisse mit einem Druck von 200 Milliarden Atmosphären, einer Dichte von 1500 Tonnen pro Kubikmeter und einer Temperatur von über 15 Millionen Grad „nachzubauen“.

Auch könnte kein Material die unter diesen Bedingungen auftretenden Wärmemengen überstehen und daher einen von der Außenwelt isolierten Reaktionsraum definieren. Weder die Proton-Proton-Fusion noch der Bethe-Weizsäcker-Zyklus oder gar der Drei-Alpha-Prozess, um die wichtigsten Varianten stellarer Energieerzeugung zu nennen, sind also technisch realisierbar.

Dies anzustreben wäre ohnehin nicht besonders clever. Sind doch Sterne äußerst ineffiziente Reaktoren. Technische Innovation bedeutet seit jeher eben nicht, die Natur lediglich zu kopieren. Vielmehr besteht die kreative Leistung des Menschen darin, Mechanismen und Prinzipien zu übernehmen und an seine Zwecke anzupassen. Die Sonne ist kein Vorbild, sondern nur ein Hinweisgeber auf eine verfügbare Option. Künstliche Fusion funktioniert anders und wesentlich besser.

Zunächst liegt bei den erforderlichen hohen Temperaturen in einem Reaktor der Brennstoff als Plasma vor. Die Atomhüllen sind vollständig aufgelöst



Teil des „Tokamak“, dem Kernstück des International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) in Saint-Paul-les-Durance, Frankreich

und Kerne und Elektronen voneinander getrennt. In diesem Zustand kann das Material von elektromagnetischen Feldern beeinflusst werden. Insbesondere lässt es sich in einem definierten Volumen einschließen und mit ausreichend Energie vollpumpen, um die Fusion zu zünden. Auf diesem Ansatz beruht die Idee des torusförmigen, von Magnetspulen eingeschlossenen Behälters, das älteste und bislang am intensivsten erforschte Konzept.

Mehrere Varianten, etwa der klassische Tokamak, der modernere, aber komplexere Stellarator und Mischformen aus beiden werden aktuell von vielen Wissenschaftlern favorisiert. Nicht die Gravitation, sondern elektromagnetische Kräfte halten dabei das Plasma zusammen und bringen es auf die erforderlichen Temperaturen – das ist der erste wesentliche Unterschied zur Sonne. „Temperatur“ steht hier für die kinetische Energie der Teilchen, also für deren Geschwindigkeit.

In Cadarache (Südfrankreich) steht eine solche Versuchsanlage. 150 Millionen Grad werden im ITER (Internati-

Die Sonne ist kein Vorbild, sondern nur ein Hinweisgeber. Eine künstliche Fusion funktioniert anders und wesentlich besser

onal Thermonuclear Experimental Reactor) angestrebt. In einem Tokamak oder Stellarator herrschen die Bedingungen eines Hochvakuums, der Druck erreicht höchstens ein Millionstel des Atmosphärendrucks. Anders ausgedrückt befinden sich lediglich wenige Gramm Brennstoff in einem Volumen von knapp 700 Kubikmetern. Sollte das Plasma mit den Behälterwänden in Berührung kommen, kühlt es daher schlagartig ab.

Dieses Problem ist aber zugleich inhärente Betriebssicherheit. Eine „Kernschmelze“, bei der sich radioaktives Material einen Weg durch alle Barrieren hindurch in die Außenwelt bahnt, ist also nicht möglich, von irgendwelchen Explosionen in der Art einer Was-

serstoffbombe ganz zu schweigen. Wird ein Fusionskraftwerk durch eine Fehlfunktion oder einen äußeren Einfluss zerstört, sei es eine Naturkatastrophe oder eine Bombe, geschieht einfach nichts.

Denn es erweist sich als ungeheuer schwierig, heißes Plasma elektromagnetisch zu isolieren, sozusagen die Dichtigkeit des magnetischen Walls zu gewährleisten. In allen aktuell verfügbaren Anlagen der Tokamak-Bauweise kühlt das Plasma schneller ab, als die stattfindenden Fusionsreaktionen Energie nachliefern können. Es bedarf einer Maschine, in der das Produkt aus Teilchendichte, Einschlusszeit und Temperatur einen gewissen Schwellenwert überschreitet (das sogenannte Lawson-Kriterium). Dann erst heizt die Energie der Reaktionsprodukte das Plasma in ausreichendem Umfang auf, um die Energieverluste auszugleichen. Die Fusion trägt sich selbst, ein Nettoenergiegewinn wird möglich.

Fortschritte in der Computer- und der Materialtechnik gestatten heute, was noch im 20. Jahrhundert schlicht ►►

► jenseits aller technischen Möglichkeiten lag, nämlich eine solche Maschine zu entwerfen und zu bauen. Mit absoluter Sicherheit wird ITER die in ihn gesteckten Erwartungen erfüllen und zehnmal mehr Energie aus der Fusion generieren, als man in das Plasma hineinsteckt.

Eine Baustelle als Inspiration

Der seit 2007 im Süden Frankreichs entstehende Reaktor ist neben der Internationalen Raumstation ISS zweifellos eines der ersten beiden Weltwunder des 21. Jahrhunderts. Es handelt sich um die komplexeste Maschine, die die Menschheit jemals errichtet hat. Und das in einer beispiellosen globalen Kooperation.

Beteiligt sind die 27 Staaten der Europäischen Union, Großbritannien und die Schweiz, die USA, China, Russland, Südkorea, Japan und Indien. ITERs Komponenten werden von Dutzenden Unternehmen in eben diesen Ländern hergestellt und wie ein gigantisches Puzzlespiel aus Zehntausenden teils hochkomplexen Teilen von einem ebenfalls internationalen Team auf der Baustelle in Cadarache zusammengesetzt.

ITER ist nicht nur ein Treiber grenzüberschreitender Kollaboration, sondern auch eine Innovationsmaschine für die Wirtschaft. Dimension und Präzision vieler Strukturen, etwa der gigantischen Magneten, verlangen beispielsweise neue fertigungstechnische Konzepte und induzieren Innovationen für Anwendungen in anderen Bereichen. Der Transport der Teile erfordert Lösungen, die die Kreativität der beteiligten Logistiker beanspruchen. Nicht zuletzt sind Wartung und Reparatur der Anlage ein Treiber für Fortschritte in der Robotik und der Automation.

Der Forschungsreaktor ist zwar ein bürokratisches Monster, aber auch eine juristische Glanzleistung. Man denke an Haftungsfragen, wenn eine Baugruppe die notwendigen Toleranzen nicht einhält oder die geplante Leistung nicht erbringt, an Patente und geistiges Eigentum. ITER soll am Ende jede beteiligte Nation mit den Kenntnissen und Fertigkeiten zurücklassen, die zum Bau eines eigenen Fusionskraftwerks notwendig sind. 2025 wird der Reaktor seinen ersten Probelauf durchführen.

Bei diesem – der zweite wesentliche Unterschied zur Sonne – werden nicht etwa nackte Protonen, sondern Deuteriumkerne (ein Wasserstoffisotop mit einem Proton und einem Neutron) miteinander verschmolzen. Bei dieser Fusion entstehen Tritium (ein kurzlebiges, radioaktives Wasserstoffisotop mit einem Proton und zwei Neutronen), Helium-3 (zwei Protonen und ein Neutron), freie Protonen und freie Neutronen.

Die Neutronen verlassen den Reaktionsraum, werden von einer Abschirmung absorbiert und erwärmen diese dabei. Diese Wärme kann eine Turbine antreiben und Strom erzeugen. Die übrigen Reaktionsprodukte verbleiben in der magnetischen Flasche, kompensieren mit ihrer Energie die energetischen Verluste und können weiterfusionieren bis hin zu Helium-4. Langfristiges Ziel ist die Umstellung auf eine Deuterium-Tritium-Fusion, bei der direkt Helium-4 und freie Neutronen entstehen.

ITER soll jeder beteiligten Nation die Kenntnisse vermitteln, die zum Bau eines eigenen Fusionskraftwerks notwendig sind

Aber, ITER ist eben nur ein Forschungsreaktor. Er wird Optionen aufzeigen und Technologien testen, etwa für die Produktion von Tritium, die Aufheizung des Plasmas, das Entfernen von Reaktionsprodukten und das Einbringen neuen Brennstoffs. Er dient der Erprobung von Betriebskonzepten und Materialien, insbesondere hinsichtlich des Auffangens der Neutronen. Deren Energie aber verpufft ungenutzt.

Und der Nettogewinn aus dem Plasma selbst bedeutet noch keine Aussage über die Gesamteffizienz der Anlage, die ja zusätzliche Leistung insbesondere für die Kühlung der Magneten und die Aufrechterhaltung des elektromagnetischen Feldes benötigt. Nach heutigem Stand werden 50 Megawatt Heizleistung zu 500 Megawatt Fusionsleistung führen, die aber für den Betrieb der Maschine immer noch nicht genügen, der wohl bis zu 700 Megawatt verschlingt.

ITER steht für das, was Forscher treiben, wenn man ihnen Innovationen überlässt. Sie streben die perfekte Lösung an, trachten danach, jeden Vorgang im Detail zu verstehen und zu beschreiben. Und gelangen dabei nie an ein Ende, wirft ja jede neue Erkenntnis auch wieder neue Fragen auf, findet sich bei jedem Prozess eine neue Option zur Verbesserung.

Es ist, als hätte man von Gottlieb Daimler verlangt, ein Automobil gleich nach heutigen Maßstäben zu bauen, mit allen Sicherheits- und Effizienzmerkmalen, von ABS über ESP bis hin zum Katalysator. Und ihm dann gesagt, das ist es noch nicht, erst müssen noch automatisierte Fahrfunktionen wie Abstandshalter, Spurwechselassistent und Einparkhilfe hinzugefügt werden.

Das Auto wäre so nie entstanden und wäre niemals auf den Markt gekommen. Sondern ein Gegenstand andauernder Forschung und Optimierung im Labor geblieben, genau wie die künstlich gesteuerte Fusion. Was bleibt ist die Hoffnung, allein die Demonstration des Energiegewinns könne die Fantasie der Privatwirtschaft anregen und Investoren anlocken.

Fantasie der Privatwirtschaft

Dies aber ist bereits der Fall. ITER hat seine Schuldigkeit auch als Baustelle schon getan. Die Website fusionenergybase.com listet neben den beiden großen Konzernen Lockheed Martin und General Atomics 29 Start-ups auf, die an eigenen Lösungen arbeiten und bereits erhebliche Summen von Risikokapitalgebern einwerben konnten. Von diesen haben 19 ihren Sitz in den USA, aber auch Großbritannien und Kanada sind mit immerhin jeweils drei Firmen vertreten, aus Deutschland, China, Frankreich und Australien stammt jeweils eine. An der Spitze der Finanzierungsrankliste liegt die MIT-Ausgründung Commonwealth Fusion Systems mit bislang mehr als zwei Milliarden Dollar Unterstützung.

Auch die Privaten verfolgen das Tokamak-Prinzip, allerdings mit moderneren und leistungsstärkeren Hochtemperatur-Supraleiter-Magneten, die ein wesentlich effizienteres und kompakteres System erlauben. Die ITER-Bauweise ist aufgrund der langen plane-

rischen Vorlaufzeiten bereits veraltet, unternehmerisch denkende, auf einen raschen Markteintritt ausgerichtete Teams adaptieren den Stand der Technik schneller. Der Versuchsreaktor SPARC, in seinen Dimensionen um den Faktor zehn kleiner und entsprechend preiswerter als ITER und dennoch nach allen Berechnungen in der Lage, einen Nettoenergieüberschuss zu erzielen, soll bereits 2025 fertiggestellt sein.

Die Neugründung Helion Energy (ebenfalls USA) verlässt allerdings die ausgetretenen Pfade und verfolgt einen gegenüber dem Tokamak alternativen Ansatz. Zwei Plasmaladungen werden hier in einer Art Linearbeschleuniger aufeinandergeschossen, bei ihrer Kollision zündet die Fusion. Das Plasma dehnt sich aus und induziert dadurch Strom in einer Spule, der direkt und ohne die üblichen Zwischenschritte (Wärme, Dampf, Turbine) zur Verfügung steht. Das System ist äußerst kompakt, es passt in einen Standardcontainer.

Helion setzt auf eine Fusion von Deuterium mit Helium-3 (zwei Protonen und ein Neutron) zu Helium-4 und Protonen. Freie Neutronen, die Energie aus dem Plasma abführen und die Struktur des Reaktors belasten, entstehen nicht. Helium-3 kommt auf der Erde nur in Spuren vor (allerdings in größeren Mengen durch den Einfluss des von einer Atmosphäre nicht abgeschirmten Sonnenwindes auf der Mondoberfläche).

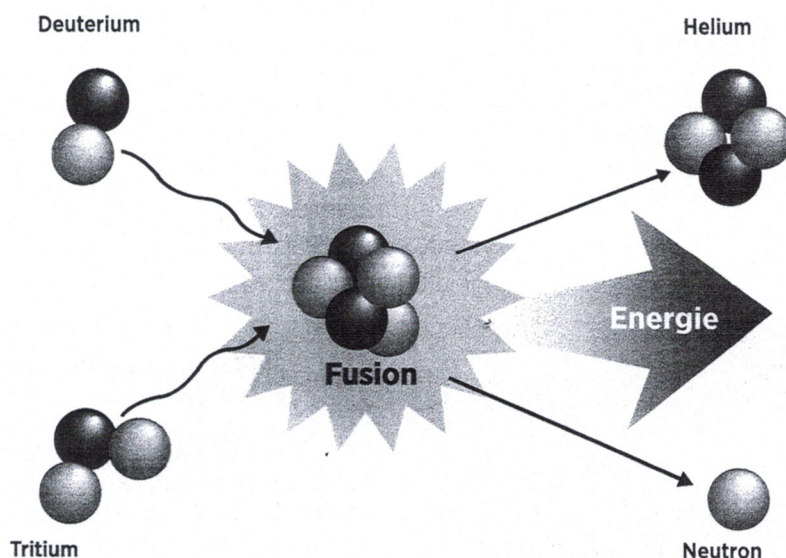
Nachdem das funktionale Prinzip bereits durch Demonstratoren erfolgreich belegt wurde, plant Helion im nächsten Schritt bis 2024 eine Anlage, die Helium-3 aus der Fusion von Deuterium produziert. Mit diesem Reaktor, Polaris getauft, sind bereits ein kleiner Nettoenergiegewinn und die Stromproduktion machbar.

Viele weitere Wege werden von den privaten Forschern parallel beschritten: Auf den Linearreaktor setzt die ebenfalls in den USA beheimatete TAE Technologies. General Fusion aus Kanada hingegen verfolgt die Idee der mechanischen Kompression. First Light Fusion (Großbritannien) nutzt Schockwellen. Focused Energy (USA/Deutschland) arbeitet mit Hochleistungslasern.

Und dann wären da noch die Teams, die gar nicht auf eine Fusion im strengen physikalischen Sinn abzielen, ob-

Kernfusion

schematische Darstellung moderner Reaktoren



wohl sie es aus Gründen der kommunikativen Anschlussfähigkeit behaupten. Sie arbeiten mit Bor, das bei der Kollision mit einem Proton in drei Helium-4-Kerne zerfällt. Dabei wird zwar viel Energie frei, aber eben keine Neutronen. Die zu schaffenden Bedingungen für diesen Protoneneinfang stellen jedoch eine erheblich höhere Herausforderung dar als bei der Deuterium- oder Tritiumfusion. Dennoch widmen sich HB11 Energy (Australien) und Marvel Fusion (Deutschland, 35 Millionen Euro) dieser Option.

Innovativ sein oder untergehen

Viele Ideen, viele auf dem Papier ausgereifte und durchkalkulierte Konzepte, viele Demonstratoren und manch ein Projekt kurz vor dem Durchbruch. Bei aller Skepsis, bei allen Hürden, die noch zu nehmen sind, scheint doch die Vorstellung, kein einziges dieser Vorhaben könne bis 2030 Erfolg haben, zunehmend unwahrscheinlich. Wie sich die Fusion dann ökonomisch einsortiert, bleibt abzuwarten.

Natürlich können sich politische Maßnahmen nur auf das stützen, was ist. Denkbare zukünftige ökonomische, gesellschaftliche oder technische Entwicklungen bieten keine festen Leitplanken, da unklar bleibt, ob sie überhaupt eintreten, geschweige denn,

wann oder wie. Aber sie müssen in einer breiten Variantenvielfalt mitgedacht werden, will man nicht sinn- und zwecklose, Zeit und Ressourcen verschwendende Maßnahmen ergreifen. Es gilt, in unterschiedlichen Szenarien zu denken, denn der Mangel an exaktem Zukunftswissen verbietet langfristige Festlegungen.

Der Krieg hat die Energiewende als schädlich entlarvt. Eine Rückkehr zum Märchen von Wind und Sonne ist ausgeschlossen

Putins Angriff auf die Ukraine hat die deutsche „Energiewende“ konterkariert, sie als nicht zielführend und gar schädlich entlarvt. Und auch nach Ende dieses Konflikts ist eine Rückkehr zur Märchenwelt von Wind und Sonne ausgeschlossen. Inhärent sichere Kernspaltungsreaktoren der vierten Generation, emissionsfreie Kohle- und Gaskraftwerke und schließlich die Kernfusion werden den Energiemarkt neu sortieren. Wer da nicht mitgeht, endet in einer teuren Sackgasse und verliert seine Wettbewerbsfähigkeit. ■