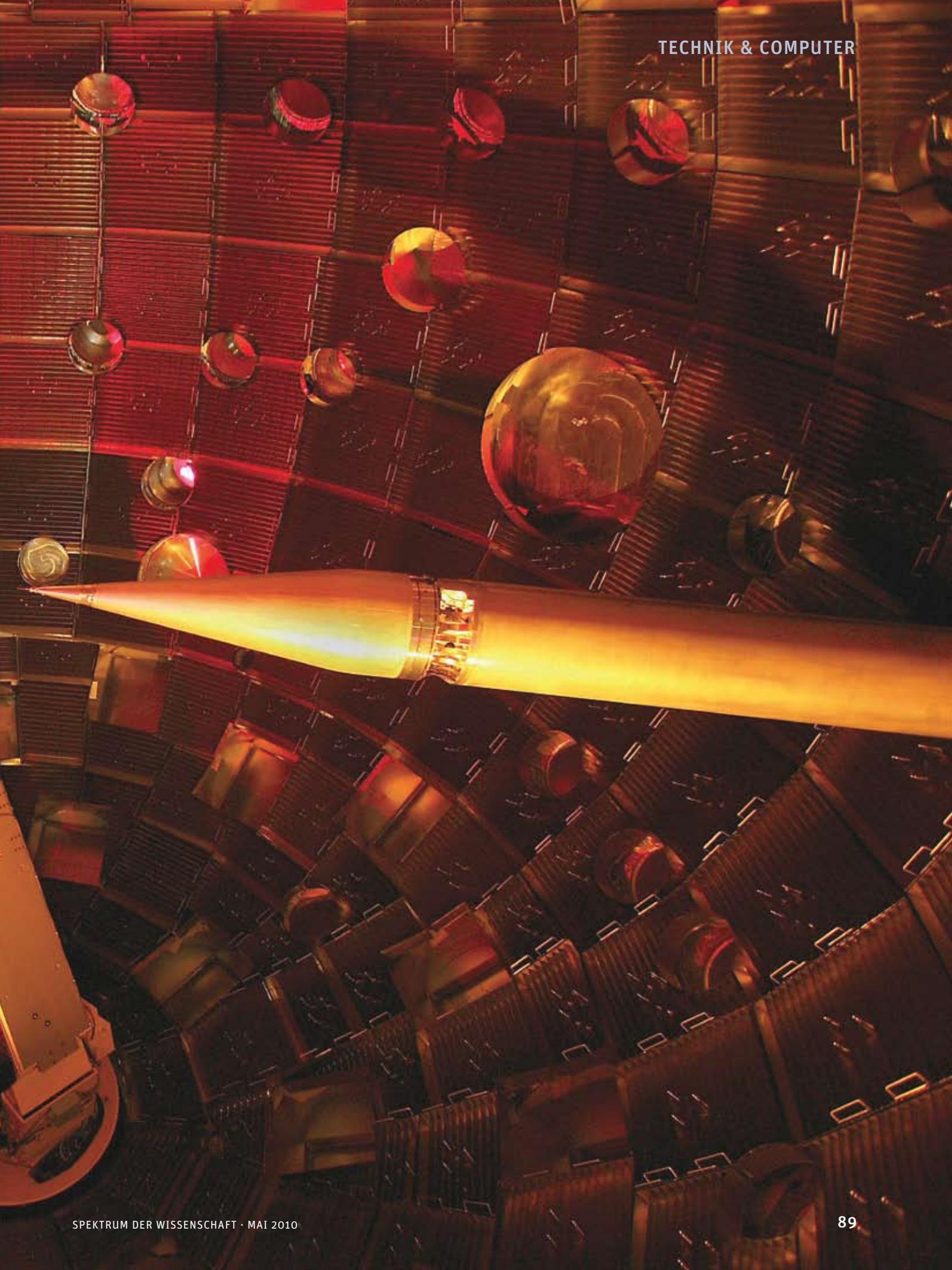


Wann kommt der FUSIONSREAKTOR?

Seit Langem träumen Forscher davon, die Kernfusion – die Energiequelle der Sterne – in irdischen Kraftwerken zu zähmen. Im Prinzip könnte das bald gelingen, doch der Teufel steckt im Detail.

In der National Ignition Facility in Livermore (Kalifornien) zielen 192 gewaltige Strahlenkanonen auf das wasserstoffhaltige Target in der Mitte. Die durch den konzentrierten Laserblitz ausgelöste Fusionsreaktion soll schon bald mehr Energie erzeugen, als die Laser verbrauchen – die erste Voraussetzung für einen Kernfusionsreaktor.



Von Michael Moyer

In Kürze

- ▶ Die **Fusion von Wasserstoffisotopen** soll demnächst mehr Energie liefern, als zur Verschmelzung der Teilchen erforderlich ist – ein Meilenstein im jahrzehntelangen Streben nach Fusionsenergie.
- ▶ Wenn dieser Energieüberschuss nutzbar gemacht werden könnte, wäre ein **neuartiger Kraftwerkstyp** möglich.
- ▶ Doch immer noch sind **erste technische Probleme** zu lösen. Sie dürften den Bau solcher Fusionskraftwerke auf Jahrzehnte hinaus verhindern.

Die Zündung steht nun kurz bevor. Vielleicht schon in einem Jahr wird das weltweit größte und leistungsstärkste Lasersystem an der National Ignition Facility in Livermore (Kalifornien) – ein 13 Jahre altes und vier Milliarden Dollar teures Unternehmen – seine gesamte Energie auf ein Materiekörnchen konzentrieren. Die geballte Strahlung wird das Target mit solcher Macht zermalmen, dass die Wasserstoffisotope im Inneren durch Kernfusion die Energie einer winzigen H-Bombe freisetzen.

Der Trick gelang zwar schon früher, aber bislang musste viel mehr Energie in die Laser gepumpt werden, als die Reaktion hergab. Dieses Mal wird die Bilanz positiv sein: Die Explosion des Pellets wird mehr Energie abgeben, als die Laser hineinstrahlen. Theoretisch kann man diesen Überschuss sammeln und damit ein Kraftwerk betreiben. Den Brennstoff liefern Substanzen in gewöhnlichem Meerwasser; der Betrieb ist emissionsfrei. Die Menschheit kann im Prinzip für immer ihren unersättlichen Energiehunger stillen, indem

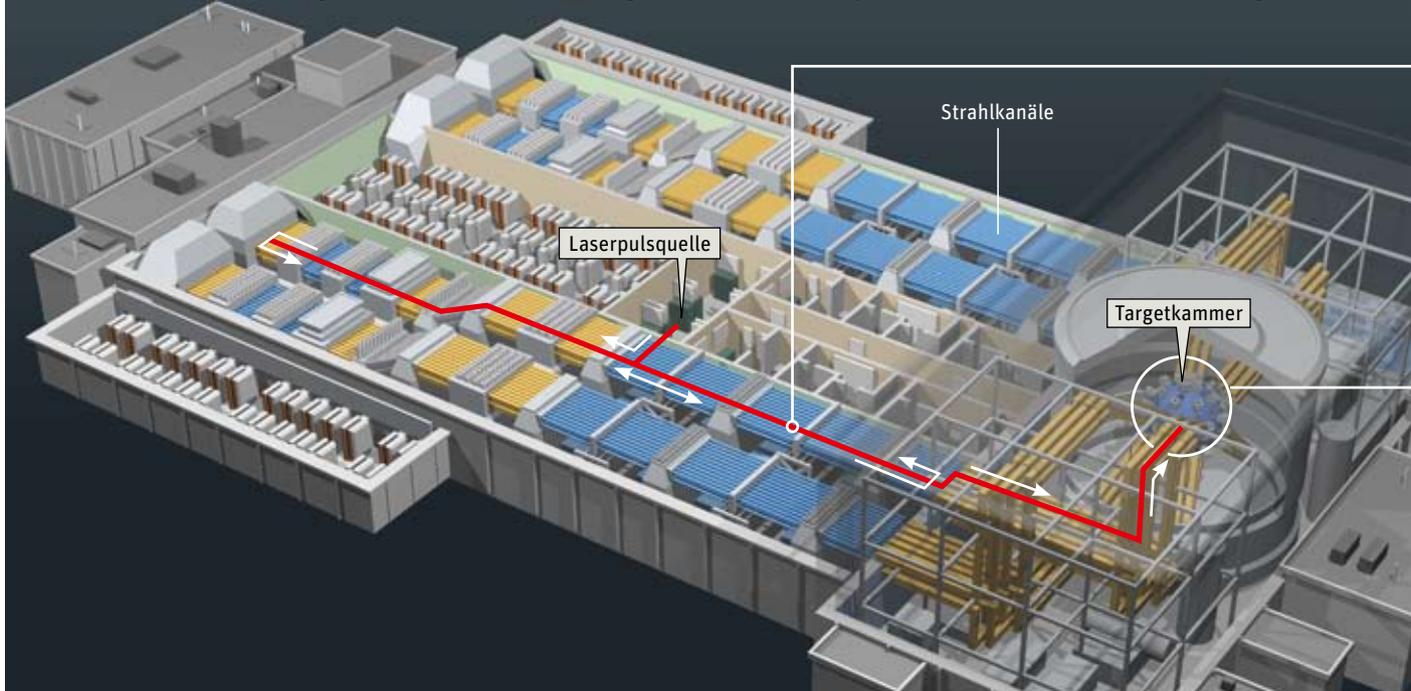
sie gleichsam einen Stern einfängt, um irdische Maschinen anzutreiben.

Eine weitere große Fusionsanlage namens ITER entsteht in Südfrankreich, nahe dem Dorf Cadarache. Das gut zehn Milliarden Euro teure Projekt verwendet nicht Laser, sondern supraleitende Magnete, um Wasserstoffisotope einzusperren und auf 150 Millionen Grad Celsius zu erhitzen – rund zehnmal mehr, als im Zentrum der Sonne herrschen. Auch ITER soll bald einen Nettoenergiegewinn liefern. Während ein Lasersystem nur separate Energiestöße erzeugt, können die Magnete fast kontinuierlich arbeiten und das Plasma zehn oder gar 100 Sekunden zusammenhalten.

Doch mit der erfolgreichen Zündung ist es längst nicht getan. Bau und Betrieb eines echten Fusionskraftwerks werfen so große Probleme auf, dass manche Kritiker die Idee von vornherein verwerfen. Das Baumaterial eines funktionierenden Reaktors müsste jahrelang Millionen Grad Hitze aushalten. Da es unentwegt mit hochenergetischen Kernteilchen bombardiert wird, droht es spröde und radioaktiv zu werden. In einem komplizierten Brutvorgang müsste die Anlage ihren eigenen

FUSION MIT LASERN

Die **National Ignition Facility (NIF)** ist »nichts als ein enormer Laserverstärker«, sagt Betriebsleiter Bruno M. Van Wonterghem. Den größten Teil der Anlage machen 192 separate Strahlkanäle aus, die einen schwachen Laserpuls aufnehmen und viele Male verstärken. Dann werden die Strahlen in der Targetkammer auf einen Hohlraum gebündelt. Dieser Goldzylinder enthält das Deuterium-Tritium-Target.



Nuklearbrennstoff herstellen – und all das zuverlässig über Jahrzehnte hinweg, möglichst ohne Stilllegungen oder Unglücksfälle.

»Man hat gedacht, okay, das sind schwierige Probleme, aber lösbar, also konzentrieren wir uns auf die Fusion selbst«, meint Richard D. Hazeltine, Direktor des Institute for Fusion Studies an der University of Texas in Austin. »Das war vielleicht ein Fehler.«

Warum die Sonne scheint

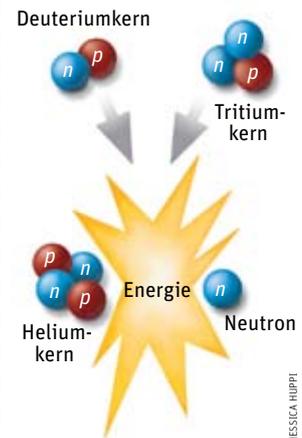
Indirekt beschäftigte das Rätsel der Kernfusion einige Naturforscher schon Mitte des 19. Jahrhunderts. Darwins neue Theorie der Evolution durch natürliche Selektion erforderte Milliarden Jahre, wenn sie die unglaubliche Vielfalt der Lebensformen durch kleine Veränderungen erklären sollte. Doch damals schätzte der große britische Physiker William Thompson – besser bekannt als Lord Kelvin – das Sonnenalter auf höchstens einige zehn Millionen Jahre, und Charles Darwin sah darin einen besonders schweren Schlag gegen die Evolutionstheorie. Er konnte die Wissenschaftler nur lahm ersuchen, ihr Urteil angesichts unserer lückenhaften Kenntnis der kosmischen Gesetze auf später zu vertagen.

Darwin hatte Recht. Es dauerte noch 70 Jahre, bis Forscher auch nur ahnen konnten, warum die Sonne scheint. Um 1930 wusste man, dass die Materie aus Atomen besteht und dass Atome einen Kern aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen besitzen; das einfachste Element, Wasserstoff, hat nur ein Proton als Kern. Seit Albert Einsteins berühmter Gleichung $E=mc^2$ war bekannt, dass Masse sich in Energie verwandeln kann. Und spektrografischen Analysen zufolge besteht die Sonne nicht – wie Thompson angenommen hatte – aus geschmolzenem Gestein, sondern größtenteils aus Wasserstoff mit ein bisschen Helium.

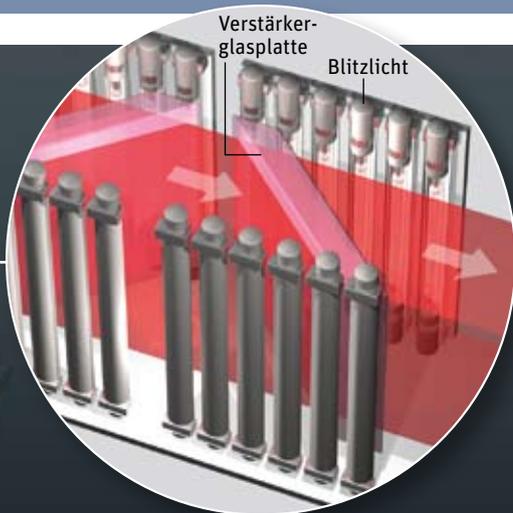
Wie der Physiker Hans Bethe 1938 erkannte, ist der Druck im Zentrum der Sonne so groß, dass einzelne Wasserstoffkerne trotz der zwischen gleichnamig geladenen Ionen wirkenden Abstoßung eng aneinandergedrückt werden. Bethe formulierte die vierstufige Fusionsreaktion für Wasserstoffionen. Die Endprodukte sind ein wenig leichter als die Anfangskerne, und dieser Massendefekt liefert gemäß $E=mc^2$ die Energie der Sonne.

Die erforderlichen Drücke gibt es nur im Zentrum von Sternen. Ein vergleichsweise ein-

DIE D-T-REAKTION

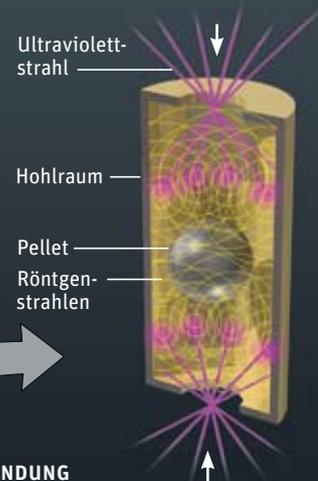


Wenn die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium eng aneinandergedrückt werden, überwinden sie ihre elektromagnetische Abstoßung und fusionieren. Die Reaktion erzeugt Helium, ein Neutron und überschüssige Energie.



1 LASERVERSTÄRKER

Nachdem ein schwacher Laserpuls aufgespaltert und durch Vorverstärker geschickt wurde, passiert er eine Reihe von Verstärker-glasplatten. Xenonblitzlampen regen das Neodym im Glas an; beim Durchgang der Laserstrahlung fügt ihr das Glas diese Energie hinzu. Der Prozess wird in 52 Durchgängen wiederholt; bei jedem Durchgang wird der Laserstrahl um 25 Prozent verstärkt.



3 ZÜNDUNG

Im Zentrum der Targetkammer konvergieren die Strahlen auf den Goldhohlraum, der daraufhin hochenergetische Röntgenstrahlen emittiert. Diese brennen die Außenschicht des Pellets ab, komprimieren es auf die 100-fache Dichte von Blei und erhitzen es auf 100 Millionen Grad. Der plötzliche Anstieg von Druck und Temperatur löst die Fusion aus.

2 TARGETKAMMER

Wenn die Laserstrahlen in die zehn Meter große Targetkammer eindringen, halbieren Kristalle die Wellenlänge von Rot – das die Optik im Strahlengang weniger gefährdet – zu Ultraviolett, das die Fusion wirksamer auslöst.



KURZE GESCHICHTE DER FUSION

1950: Der sowjetische Physiker Andrei Sacharow entwirft den Tokamak, eine magnetische Flasche, die ein Plasma einzuschließen vermag. Wegen seiner Arbeit an Nuklearwaffen kann Sacharow das Projekt nicht fortsetzen.

1951: Lyman Spitzer von der Princeton University ersinnt den Stellarator, einen anderen Fusionsreaktor auf Magnetbasis.

1952: Die USA zünden die erste Wasserstoffbombe.

1969: Westliche Wissenschaftler besuchen Moskau, um Sacharows Tokamak-Konzept zu studieren. Wie sie feststellen, erzeugt der Tokamak ein viel heißeres, dichteres Plasma als ihr Stellarator. Er beginnt die Magnetfusionsforschung zu dominieren.

1977: Forscher des Lawrence Livermore National Laboratory versuchen mit dem Shiva-Laser Fusion mittels Laserblitzen auszulösen.

1984: Der Joint European Torus geht im britischen Culham in Betrieb. Der Tokamak ist heute noch die weltweit größte Plasma-Fusionsanlage.

2010: Die National Ignition Facility soll Ende des Jahres mit der Deuterium-Tritium-Fusion experimentieren.

2018: Der Bau von ITER soll abgeschlossen sein. Erste Deuterium-Tritium-Fusionstests sind für 2026 geplant.

facher Weg zur Fusion beginnt mit den Wasserstoffisotopen Deuterium (ein Proton plus ein Neutron) und Tritium (ein Proton, zwei Neutronen). Sie fusionieren schon bei relativ geringer Temperatur und geringem Druck zu Helium (zwei Protonen, zwei Neutronen) plus einem Neutron und viel freier werdender Energie.

Fusionsbrennstoffe gibt es im Überfluss: Meerwasser enthält Deuterium, und Tritium kann in einem Reaktor erzeugt werden. Anders als übliche Kernspaltungsreaktoren hinterlässt die Fusion keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Theoretisch könnten ein paar Liter Wasser so viel Energie liefern wie ein Supertanker voll Erdöl, und dabei würde bloß ein wenig Helium ausgestoßen. »Sie gewinnen saubere Energie, unbegrenzten Brennstoff und geopolitische Entspannung«, sagt Edward I. Moses, Direktor der National Ignition Facility. »Es ist zu schön, um wahr zu sein.«

In der Tat. Die ersten Entwürfe für Fusionsreaktoren entstanden Anfang der 1950er Jahre. Damals schätzte Lyman Spitzer an der Princeton University, sein »Stellarator« würde 150 Megawatt leisten, genug für 150 000 Wohnungen. Spitzers Design beruhte auf der Tatsache, dass bei den für Fusionsprozesse nötigen hohen Temperaturen die Atome alle Elektronen verlieren und ein heißes Gas aus geladenen Teilchen bilden. Dieses Plasma kann mit Magnetfeldern gebändigt werden. Der Stellarator ist im Grunde eine magnetische Flasche, die ein Millionen Grad heißes Plasma festzuhalten vermag.

Doch Spitzer und seine Nachfolger mussten zu ihrem Leidwesen erfahren, dass sie viel zu wenig über das ungebärdige Verhalten von Plasmen wussten. Stellen wir uns einen großen weichen Ballon vor, den wir möglichst klein zusammendrücken möchten: Ein Stück Ballonhaut wird uns immer durch die Fingerschlüpfen und Ausstülpungen bilden. Genauso ging es den Forschern mit dem Plasma. Wenn sie versuchten, es möglichst fest zusammenzudrücken, fand es immer einen Weg, seitlich zu entweichen. Dieses Paradox plagt alle Typen von Fusionsreaktoren: Je mehr man das Plasma erhitzt und je enger man es zusammenquetscht, desto mehr sträubt es sich gegen den Einschluss.

In den sechs Jahrzehnten seither wurde versucht, Plasmen mit immer größeren Magnetflaschen zu zähmen. Jede verbesserte Maschine, welche die Probleme der Vorgängerin korrigieren sollte, stieß bei den höheren Energien auf neue Hindernisse. »Man kann machen, was man will«, meint Charles Baker, Exdirektor der Fusionsprogramme am Argonne und am Oak Ridge National Laboratory und derzeit Vorsitzender des amerikanischen ITER-

Beratungsgremiums, »Plasmen sind immer ein wenig instabil.«

Während der Energiekrise der 1970er Jahre entstand ein zweites Fusionsprogramm, das die Probleme des Magneteinschlusses zu vermeiden suchte. Eine Schar von Lasern sollte ein Pellet aus Deuterium und Tritium komprimieren und erhitzen. Die Forschung am Lawrence Livermore National Laboratory – bereits Heimstätte des militärischen Fusionswaffenprogramms der USA – begann mit zwei Laserstrahlen. Fortschritte in der Laserleistung führten 1977 zu Shiva, benannt nach dem erschaffenden und zerstörenden Hindu-Gott, und 1984 zu Nova. Mit jedem Programm überbot Livermore den eigenen Weltrekord für den stärksten Laserblitz, aber wie bei den Magnetprogrammen erreichte es nicht den Break-even-Point – den Punkt, an dem die Fusion so viel Energie hergibt, wie die Laser hineinstecken. Dafür brauchte Livermore einen noch 70-mal stärkeren Laser. Darum wurde 1997 mit dem Bau der National Ignition Facility (NIF) begonnen.

Nebenprodukt der Waffentechnik

Von außen wirkt die Anlage unscheinbar. Sie ist fensterlos, so groß wie ein Flugzeughangar und in gedämpftem Beige gestrichen. Doch wie beim Large Hadron Collider bei Genf und anderen Großforschungsprojekten verbirgt sich das meiste tief unter der Erde. Im Inneren erstrecken sich Dutzende von meterdicken Rohren durch die Anlage. Sie führen zur Targetkammer, einer drei Stockwerke hohen Kugel, die mit Bullaugen für die Laser durchlöchert ist. Genau im Mittelpunkt der Kammer wird das Deuterium-Tritium-Target durch eine Art riesige Bleistiftspitze festgehalten. Die Laser werden hochpräzise auf den Mittelpunkt fokussiert und zertrümmern das Target mit einem Laserpuls, der für einen winzigen Sekundenbruchteil mehr Strom verbraucht als die gesamten USA.

Zwar wurde die NIF für den Break-even-Point konstruiert, doch ihr Hauptzweck ist militärisch. 1996 unterschrieb Präsident Bill Clinton den Vertrag über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen und untersagte alle US-Kernwaffentests. Um die Funktionsfähigkeit des Atomwaffenarsenals zu gewährleisten, richteten die Nuklearwaffenlaboratorien in Los Alamos und Livermore das Stockpile Stewardship Program ein; es soll durch Wartung und Tests die Zuverlässigkeit des US-Arsenals von derzeit rund 5200 atomaren Sprengköpfen garantieren.

In der Regel geht es dabei um Routineinspektionen und Ersatzteile. Zudem werden Kernexplosionen am Computer modelliert. Die Modelle sind extrem empfindlich für die

Anfangsbedingungen; das NIF soll solche Daten anhand winziger Deuterium-Tritium-Explosionen liefern. Daneben dient die Anlage auch der reinen Grundlagenforschung – etwa der Modellierung von Supernova-Stoßwellen.

Doch als der Bau im Mai 2009 endlich fertig wurde, machte der Aspekt der Energieerzeugung die meisten Schlagzeilen. In der »New York Times« schrieb Kolumnist Thomas Friedman: »Jedes zertrümmerte Pellet gibt einen Energieschub ab, der dann zum Erhitzen von flüssigem Salz und zur Erzeugung gewaltiger Dampfmen gen genutzt werden kann, um eine Turbine anzutreiben und Strom für Ihr Heim zu produzieren – wie das heute Kohle tut.«

Theoretisch, ja. Aber die NIF war nie als Maschine zur Erzeugung nutzbarer Energie gedacht. Laut Plan wird sie gegen Ende 2010 mit Fusionsexperimenten beginnen und, wenn alles gut geht, vielleicht 2011 den Break-even-Point erreichen. Wohl gemerkt, das ist, wie Moses betont, noch längst kein Kraftwerk-Break-even. Es bedeutet nur, dass aus dem Pellet mehr Energie herauskommt, als das Lasersystem hineinsteckt; der Energieaufwand für Bau und Betrieb des 4,2 Megajoule starken Lasersystems sowie die Verluste auf dem Weg zum Target tauchen in dieser Bilanz nicht auf. Dennoch soll NIF den Meilenstein mehr als 15 Jahre vor ITER erreichen.

Die Tücke des Objekts

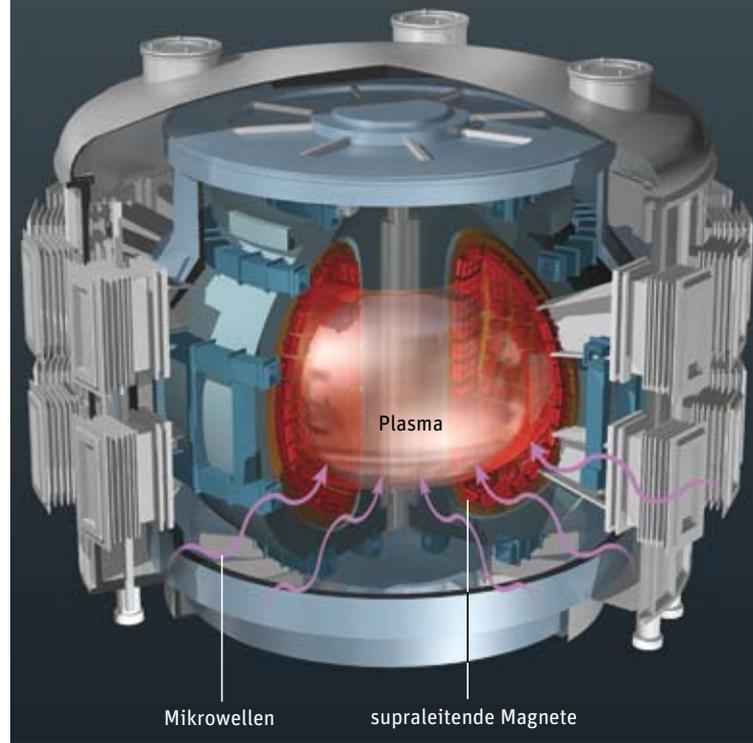
Ob man die Fusion nun mittels Megajoule-Lasern oder Magneteinschluss herbeiführt – der Energiegewinn wird in schnellen Neutronen ausbezahlt. Als neutrale Teilchen werden sie von elektrischen oder magnetischen Feldern nicht beeinflusst und durchdringen die meisten festen Materialien. Ein Neutron stoppt nur, wenn es direkt einen Atomkern trifft. Solche Kollisionen sind oft zerstörerisch. Die aus einer Deuterium-Tritium-Fusion stammenden Neutronen sind so energiereich, dass sie selbst in einem harten Metall wie Stahl einzelne Gitteratome herausschlagen. Mit der Zeit werden durch solche Treffer die tragenden Komponenten eines Reaktors brüchig.

Zudem machen die Neutronen inaktives Material radioaktiv. Wenn ein Neutron einen Atomkern trifft, kann der Kern es absorbieren und instabil werden. Durch einen stetigen Neutronenstrom – selbst wenn er von der »sauberen« Fusionsreaktion stammt – wird jeder normale Behälter gefährlich radioaktiv, betont Baker. »Wenn Ihnen jemand irgendein Nuklearsystem verkaufen will und behauptet, es gebe keine Radioaktivität, behalten Sie Ihr Geld in der Tasche.«

Ein Fusionskraftwerk muss die Neutronenenergie in Wärme umwandeln, die eine Turbi-

FUSION MIT MAGNETEN

Das ITER-Projekt in Südfrankreich wird versuchen, die Fusion durch ein heißes Plasma aus Deuterium und Tritium auszulösen. Das Plasma wird durch mächtige supraleitende Magnete festgehalten, und Mikrowellen heizen es auf 150 Millionen Grad auf. Da der Prozess – im Unterschied zur Laserfusion bei NIF – kontinuierlich abläuft, könnte die Fusion mehrere zehn oder gar 100 Sekunden lang andauern.



ne antreibt. In künftigen Reaktoren soll die Umwandlung in einer Hülle um den Fusionskern stattfinden, dem so genannten Blanket (englisch für Decke). Obwohl die Chance gering ist, dass ein bestimmtes Neutron einen bestimmten Atomkern im Blanket trifft, fängt eine genügend dicke Hülle aus dem richtigen Material – zum Beispiel meterdicker Stahl – fast alle Neutronen ab. Die Kollisionen heizen das Blanket auf, und geschmolzenes Salz als Kühlflüssigkeit entzieht dem Reaktor diese Wärme. Das heiße Salz bringt dann Wasser zum Kochen, und der Dampf treibt wie üblich eine Turbine zur Stromerzeugung an.

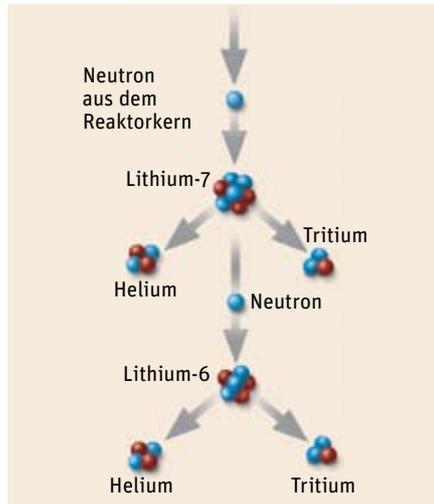
Nur ist es nicht so einfach. Das Blanket hat eine weitere wichtige Aufgabe: Es soll auch noch Brennstoff herstellen, der in den Reaktor zurückgelangt.

Deuterium ist zwar billig und reichlich vorhanden, aber dafür kommt das radioaktive Tritium extrem selten vor und muss eigens aus Kernreaktionen gewonnen werden. Ein gewöhnlicher Nuklearreaktor kann davon zwei bis drei Kilogramm pro Jahr liefern, zu einem

Der Aspekt der Energieerzeugung machte nach der Fertigstellung die meisten Schlagzeilen

DER TRITIUM-TRICK

Fusionskraftwerke müssen ihren eigenen Tritiumbrennstoff über eine komplizierte Reaktionskette erzeugen. Zuerst trifft ein Neutron ein Lithium-7-Ion; daraus entstehen Helium, Tritium und ein Neutron. Dieses zweite Neutron trifft dann ein Lithium-6-Ion; das ergibt ein weiteres Helium- und ein Tritiumion. Die Lithiumionen sind in die Reaktorhülle, das so genannte Blanket, im-plantiert.



JESSICA HUPPI

Kilogrammpreis zwischen 60 und 90 Millionen Euro. Leider wird ein Magnetfusionskraftwerk rund ein Kilogramm Tritium pro Woche verbrauchen. »Der Fusionsbedarf überschreitet bei Weitem alles, was die Kernspaltung hergibt«, sagt Mohamed Abdou, Direktor des Fusion Science and Technology Center an der University of California in Los Angeles.

Damit eine Fusionsanlage ihr eigenes Tritium fabriziert, muss sie einen Teil der Neutronen von der Energiegewinnung abzweigen. Innerhalb des Blankets sollen Kanäle aus Lithium – einem weichen und hochreaktiven Metall – energiereiche Neutronen einfangen, um Helium und Tritium zu erzeugen. Das Tritium tritt durch die Kanäle aus, wird vom Reaktor eingefangen und wieder in das Plasma injiziert.

Genau besehen ist die Bilanz äußerst prekär. Jede Fusionsreaktion verbraucht exakt ein Tritiumion und erzeugt exakt ein Neutron. Somit muss jedes aus dem Reaktor kommende Neutron mindestens ein Tritiumion ergeben, sonst verbraucht der Reaktor mehr, als er erzeugt. Das Tritiumdefizit lässt sich nur vermeiden, wenn es den Forschern gelingt, eine komplizierte Reaktionskaskade in Gang zu setzen. Zuerst trifft ein Neutron ein Lithium-7-Isotop, das ein Tritiumion und ein Neutron produziert. Das zweite Neutron trifft dann ein Lithium-6-Isotop und erzeugt ein zweites Tritiumion.

Außerdem muss das Tritium zu fast 100 Prozent aus dem Blanket extrahiert und wieder dem Plasma zugeführt werden. »In dieser Kettenreaktion dürfen Sie kein einziges Neutron verlieren, sonst hört die Reaktion auf«, erklärt Michael Dittmar, Teilchenphysiker an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. »Zuerst einmal müsste gezeigt werden, dass die Tritiumproduktion funktioniert. Ganz offensichtlich ist das völlig ausgeschlossen.«

»Dieses Fusionsblanket ist ein ausgefallenes Wunderding«, meint Hazeltine. »Es verträgt eine Menge Hitze, ohne selbst zu überhitzen. Es nimmt Neutronen auf, besteht aber aus so raffiniertem Material, dass es trotzdem kaum Schaden nimmt. Und es verwendet die Neutronen, um Lithium in Tritium umzuwandeln.«

Leider wird ITER das Blanket-Design nicht testen. Darum finden viele Wissenschaftler – vor allem die amerikanischen, deren Land bei ITER keine große Rolle spielt –, dass eine eigene Anlage nötig ist, um ein Blanket zu konstruieren. »Man muss zeigen, dass das in der Praxis klappt«, sagt Abdou, »und wir haben überhaupt noch nie ein Blanket gebaut oder getestet.« Selbst wenn eine solche Testanlage morgen finanziert würde, schätzt Abdou, dass es 30 bis 75 Jahre dauern würde, bevor man mit der Konstruktion eines funktionsfähigen Kraftwerks beginnen könnte. »Ich halte es für machbar«, sagt er, »aber es ist viel Arbeit.«

Weiter Weg zum Dauerbetrieb

Nehmen wir an, das geschieht. Wir schreiben das Jahr 2050. Sowohl NIF als auch ITER waren uneingeschränkt erfolgreich, sie haben ihre Ziele hinsichtlich des Energiegewinns pünktlich und im Budgetrahmen erreicht. Mutter Natur hielt keine Überraschungen bereit, als die Physiker in beiden Systemen die Energie hochfuhren; das renitente Plasma behalm sich wie erwartet. In einer separaten Anlage wurde ein Blanket entwickelt, das Tritium erzeugt, Neutronen in Strom verwandelt und den subatomaren Dauerbelastungen in einem Fusionskraftwerk standhält. Und nehmen wir an, ein funktionierendes Kraftwerk wird nicht mehr als acht Milliarden Euro kosten. Ist das eine brauchbare Option?

Selbst für diejenigen, die ihr Leben dem Traum von der Fusionsenergie gewidmet haben, ist die Frage schwer zu beantworten. Fusionskraftwerke sollen – wie gewöhnliche Kernspaltungsmeiler – Grundlast liefern. Das heißt, sie müssten permanent in Betrieb sein, um die hohen Anfangskosten einzubringen. »Jedes kapitalintensive System muss rund um die Uhr laufen, gerade weil man nichts für den Brennstoff zahlt«, meint Baker.

Leider ist es extrem schwierig, ein Fusionsplasma längere Zeit aufrechtzuerhalten. Bislang gelingt das nur für Sekundenbruchteile. ITER soll zehn Sekunden und mehr schaffen. Von da bis zum Dauerbetrieb ist es noch ein weiter Weg. »Die Fusion muss zu 90 Prozent betriebsbereit sein«, sagt Baker, und diese Zahl enthält die Abschaltzeiten für Routine-wartung. »Das ist bei Weitem die größte Unwägbarkeit bei der wirtschaftlichen Zuverlässigkeit von Fusionssystemen.«

HINDERNISSE

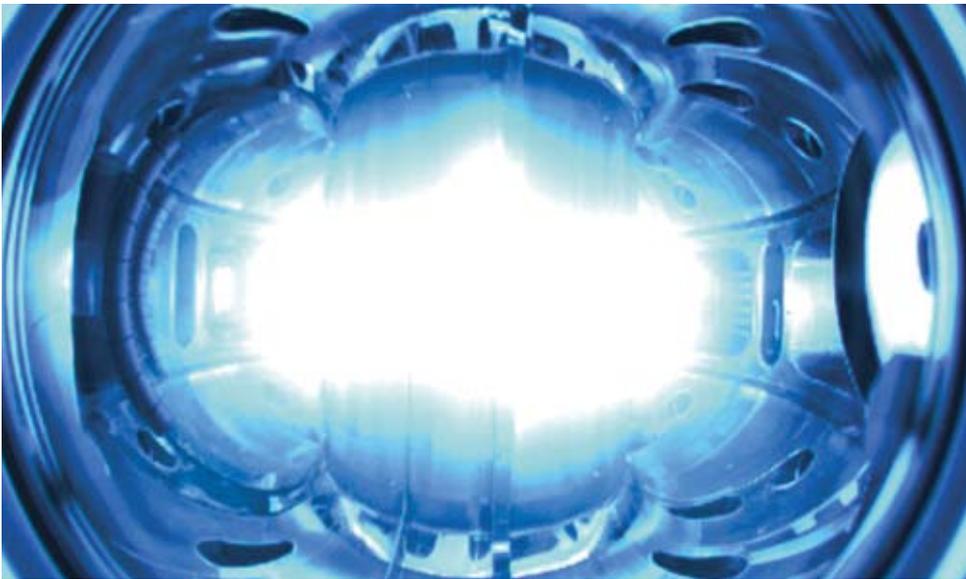
Bevor die Fusion zu einer brauchbaren Energiequelle werden kann, müssen noch mehrere Probleme gelöst werden.

Hitze: Das Reaktormaterial muss jahrelang extrem hohe Temperaturen aushalten.

Struktur: Die hochenergetischen Neutronen der Fusionsreaktionen machen gewöhnliche Materialien brüchig.

Brennstoff: Ein Fusionskraftwerk muss in einer komplexen Kettenreaktion sein eigenes Tritium erbrüten (siehe Kasten oben).

Zuverlässigkeit: Laserreaktoren lösen die Fusion nicht kontinuierlich aus. Magnetreaktoren müssen das Plasma wochenlang aufrechterhalten.



Das Projekt KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) in Daejeon (Südkorea) erzeugt seit 2008 mit supra-leitenden Magneten blendend weißes Plasma.

NIF-Direktor Moses meint die Lösung zu kennen. Er schlägt einen hybriden Fusions-Spaltungs-Reaktor vor, der Neutronen aus laserbetriebenen Fusionsreaktionen nutzt, um Spaltungsreaktionen in einem Blanket aus gewöhnlichem Nuklearabfall auszulösen. Er nennt sein System LIFE (*Laser Inertial Fusion Engine*, Laser-Trägheitsfusionsmaschine) und behauptet, es könne in 20 Jahren ans Netz gehen.

Das System beruht auf der Tatsache, dass nur fünf Prozent des in Kraftwerke gespeisten Urans genutzt werden, bevor es extrahiert wird und ins Endlager wandert. LIFE soll diesen verbrauchten Brennstoff mit Neutronen bombardieren, dadurch seinen Zerfall in leichtere, weniger radioaktive Elemente beschleunigen und unterdessen Wärme zur Stromerzeugung liefern. »Nach unseren Untersuchungen wären wir gegenüber allen heute erhältlichen Energiequellen wettbewerbsfähig«, sagt Moses, »oder sogar billiger.«

Natürlich hat LIFE seine Probleme. »Man darf die große Lüge in jedem Programm nicht übersehen«, warnt Edward C. Morse, Professor für Nukleartechnik an der University of California in Berkeley. »Die große Lüge bei der Laserfusion besagt, wir könnten die Targetkapseln für ein paar Cent pro Stück herstellen.« Die pfefferkorngroßen Kügelchen aus Deuterium-Tritium-Brennstoff müssen haargenau fabriziert und exakt rund sein, damit sie gleichmäßig von allen Seiten komprimiert werden können. Jede winzige Unebenheit auf dem Pellet verhindert, dass das Target im Laserfeuer explodiert; das macht die gegenwärtige Produktion der Pellets praktisch unbezahlbar. Zwar gibt Livermore, das seine Pellets selbst herstellen möchte, die mutmaßlichen Kosten nicht preis, doch das Laboratory for Laser Energetics an der University of Rochester produziert äh-

liche Deuterium-Tritium-Kugeln. »Das Jahresbudget für die Fabrikation der in Rochester benutzten Targets beträgt mehrere Millionen Dollar, und sie machen zirka sechs Kapseln pro Jahr«, sagt Morse. »Man könnte also sagen, der Stückpreis ist rund eine Million.«

Während am NIF die Pellets derzeit bestenfalls in mehreren Stunden Abstand explodieren, müssten die Targets in der Kammer mit dem Tempo einer Schnellfeuerkanone nachgeladen werden. »Diese Maschine macht 600 Umdrehungen pro Minute«, sagt Moses stolz. »Sie gleicht einem Automotor mit Millionen Pferdestärken, der aber ohne Kohlenstoff funktioniert.« Eine LIFE-Anlage wird im Dauerbetrieb fast 90 000 Targets pro Tag verbrauchen.

Natürlich lässt sich unmöglich vorhersagen, wie der globale Energiemarkt in 20 Jahren aussehen wird. Vielleicht entsteht eine riesige Nachfrage nach Fusionsenergie – oder die Fusion wird durch einen Durchbruch bei Solar- und Windkraft oder eine andere, ungeahnte Alternativenenergie vergleichsweise viel zu teuer und unhandlich. »Vielleicht werden die Leute sagen: Ja, es funktioniert, super, aber wir brauchen das nicht mehr, weil wir eine Menge Alternativen haben«, meint Hazeltine.

Bisher blieb die Fusion von solchen Überlegungen verschont. Sie unterschied sich grundlegend von schmutzigen fossilen Brennstoffen oder gefährlichem Uran. Sie war schön und rein – eine dauerhafte Lösung, das Ende unseres Energiehungers. Sie zauberte das Sternenlicht in ein irdisches Gefäß.

Inzwischen mutet diese Vision eher wie ein Schildbürgerstreich an. Die Fusion ist nur eine ferne Möglichkeit, deren Verwirklichung im günstigsten Fall noch Jahrzehnte dauern wird. Der Break-even-Point mag kurz bevorstehen, die Ära unbegrenzter Energie aber nicht. <



Michael Moyer ist Redakteur bei »Scientific American«.

Hazeltine, R. (Hg.): Research Needs for Magnetic Fusion Energy Science. Final Workshop Report, Bethesda 2009.

Heller, A.: Safe and Sustainable Energy with LIFE. In: Science and Technology Review. Publication of Lawrence Livermore National Laboratory, 2009.

Kaufmann, M.: Quantenphysik und Fusionsforschung. Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2003.

Seife, C.: Sun in a Bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking. Viking, New York 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1026694.