



**Spektrum**  
der Wissenschaft

**KOMPAKT**

# SONNENFEUER

Von den Sternen lernen

**Solare Energiequelle**

Was heizt  
die Sonne?

**Fusionsreaktor**

Der Weg zum  
künstlichen Sonnenfeuer

**Private Großprojekte**

Kernfusion einmal  
anders





Uwe Reichert  
E-Mail: reichert@spektrum.de

## Liebe Leserin, lieber Leser,

seit Jahrmilliarden versorgt die Sonne unsere Erde mit Licht und Wärme. Doch was lässt sie so lange und zuverlässig leuchten? Erst seit rund 80 Jahren kennen wir die Antwort: Die Sonne bezieht ihre Energie aus dem Verschmelzen leichter Atomkerne. Der Weg, der zur Aufdeckung dieser Kernfusion führte, war lang und mit vielen Stolpersteinen gespickt. Er stellt eines der spannendsten Kapitel der Astrophysik dar.

Bis das Rätsel der Energieerzeugung in der Sonne – und in anderen Sternen – gelöst werden konnte, waren zahlreiche, scheinbar unabhängige Entdeckungen und neuartige Theorien in verschiedenen Gebieten der Wissenschaft nötig. Viele Schicksale von Forschern sind damit verknüpft. Und die heutige Generation von Wissenschaftlern und Ingenieuren macht sich daran, den Sonnenofen im winzigen Maßstab auf der Erde nachzubauen. Damit möchte die Menschheit einen kühnen Plan verwirklichen: mit Fusionskraftwerken unbegrenzt und auf klimafreundliche Art elektrische Energie erzeugen.

Optimistisch in die Zukunft schauend grüßt Ihr

*Uwe Reichert*

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 14.05.2018

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findeklee, Dr. Michaela Maya-Mrschtik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-Id-Nr. DE229038528  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

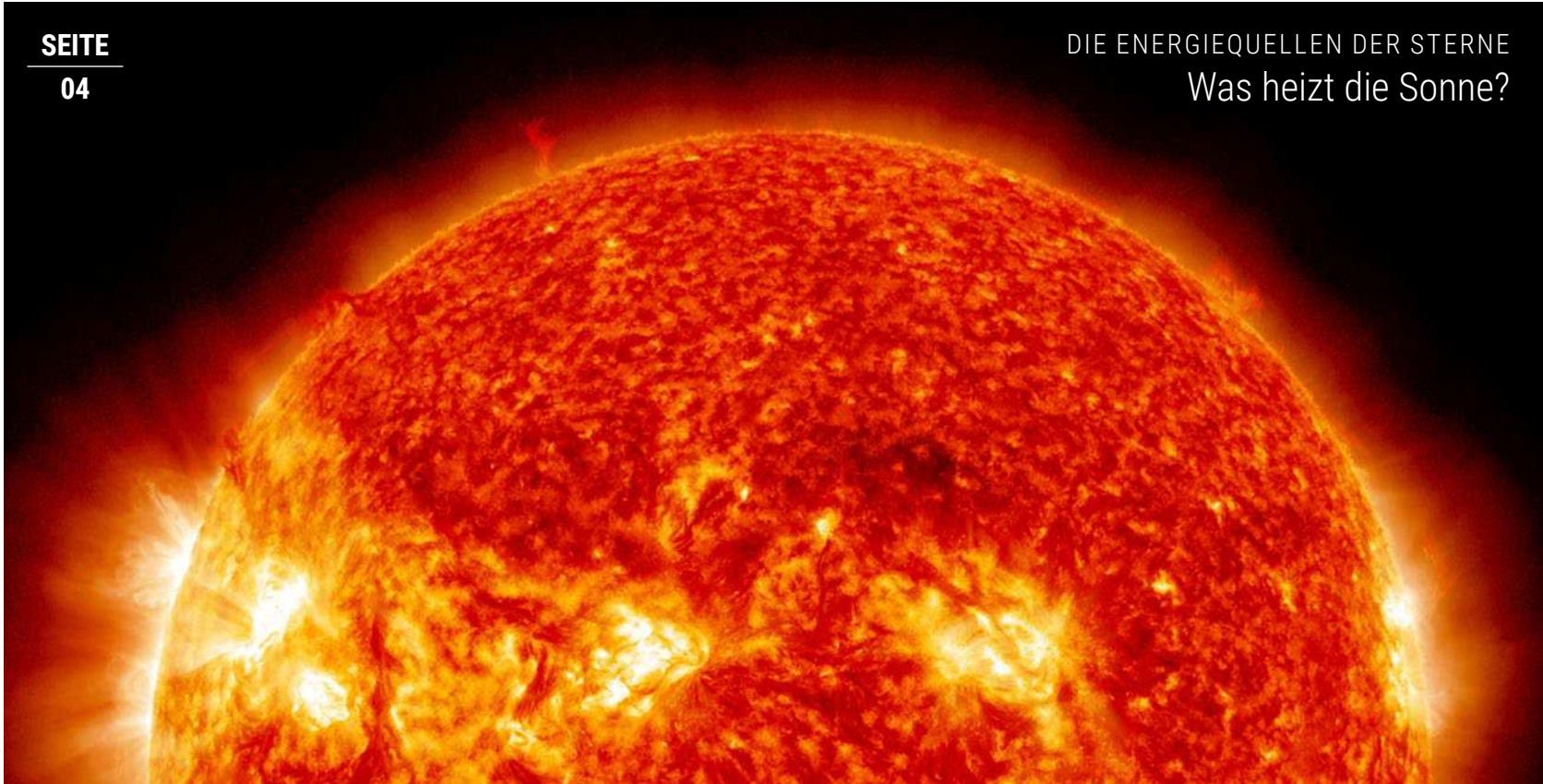
**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an service@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



SEITE  
04

DIE ENERGIEQUELLEN DER STERNE  
Was heizt die Sonne?



NASA, GSFC

SEITE  
23

THERMONUKLEARE PROZESSE  
Junge Physiker enträtseln den  
Sonnenofen



ARVOS / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE  
37

FUSIONSREAKTOR  
Der Weg zum Sonnenofen  
auf der Erde



ITER ORGANIZATION

INTERVIEW  
»Wahrscheinlich wird es  
mehrere DEMOs geben«

SEITE  
56



GREGORY DUBUIS / GETTY IMAGES / ISTOCK

ENERGIETECHNIK  
Kernfusion einmal anders

SEITE  
59



MIT FROL GEN DER TRI ALPHA ENERGY INC.

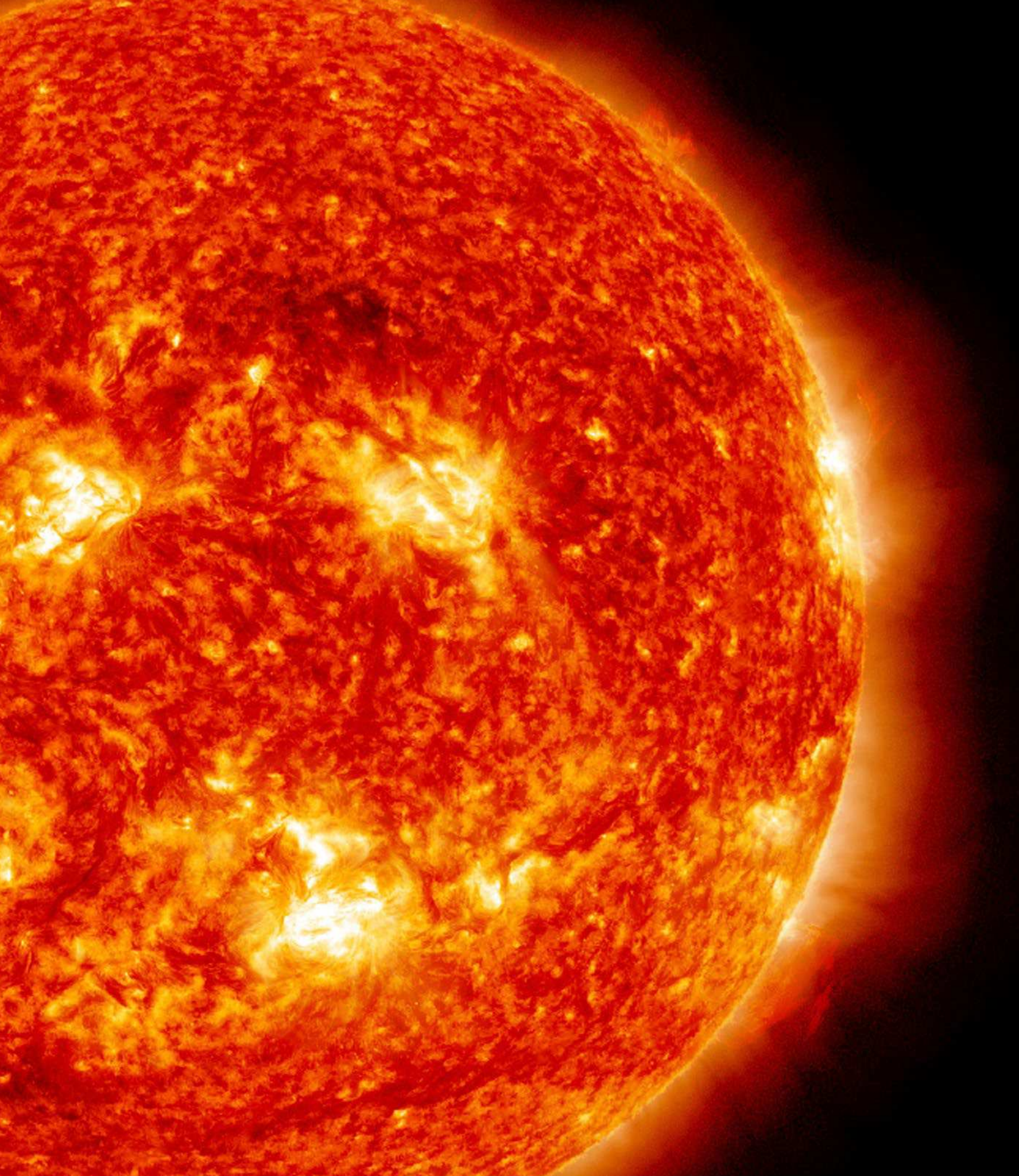
SEITE  
74

KERNFUSION  
Exotische Teilchen  
verschmelzen mit noch  
mehr Power



GENERAL F M V / GETTY IMAGES / ISTOCK (AUSCHNITT)





DIE ENERGIEQUELLEN DER STERNE

# WAS HEIZT DIE SONNE?

von Dietrich Lemke

Zuverlässig und scheinbar unerschöpflich versorgt uns die Sonne mit Licht und Wärme. Wie macht sie das, und lässt sich der Sonnenofen vielleicht auf der Erde nachbauen? Wir beleuchten den langen Weg von der Entdeckung der solaren Energiequelle bis zu den Versuchen der technischen Umsetzung in einem Fusionskraftwerk. Hier erinnern wir zunächst an Entdeckungen, die zum Verständnis der Kernfusion in Sternen führten.



**W**arum leuchten die Sterne? Wie lange wird die Sonne uns mit Licht und Wärme versorgen? Bevor die Menschheit Antworten auf diese Fragen fand, haben Generationen von Wissenschaftlern über mehrere Jahrhunderte hinweg dafür den Weg bereitet.

Schließlich führte zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine Vielzahl von astronomischen, chemischen und physikalischen Entdeckungen schrittweise zu der Vermutung, dass die Sonne und andere Sterne ihre Energie aus der Verschmelzung von Atomkernen beziehen. Damit begann sich die Physik des Größten mit der Physik des Kleinsten zu verbinden. Gegenwärtig sind wir Zeitzeugen bei dem Versuch, den thermonuklearen Sonnenofen auf der Erde nachzubauen. Dieser Anlauf zur zweiten Beherrschung des Feuers durch den Menschen strebt nach einem hohen Ziel: mit Fusionskraftwerken unbegrenzt und auf klimafreundliche Art elektrische Energie zu erzeugen.

---

**Dietrich Lemke** leitete bis zu seiner Emeritierung am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg mehrere Weltraumprojekte.

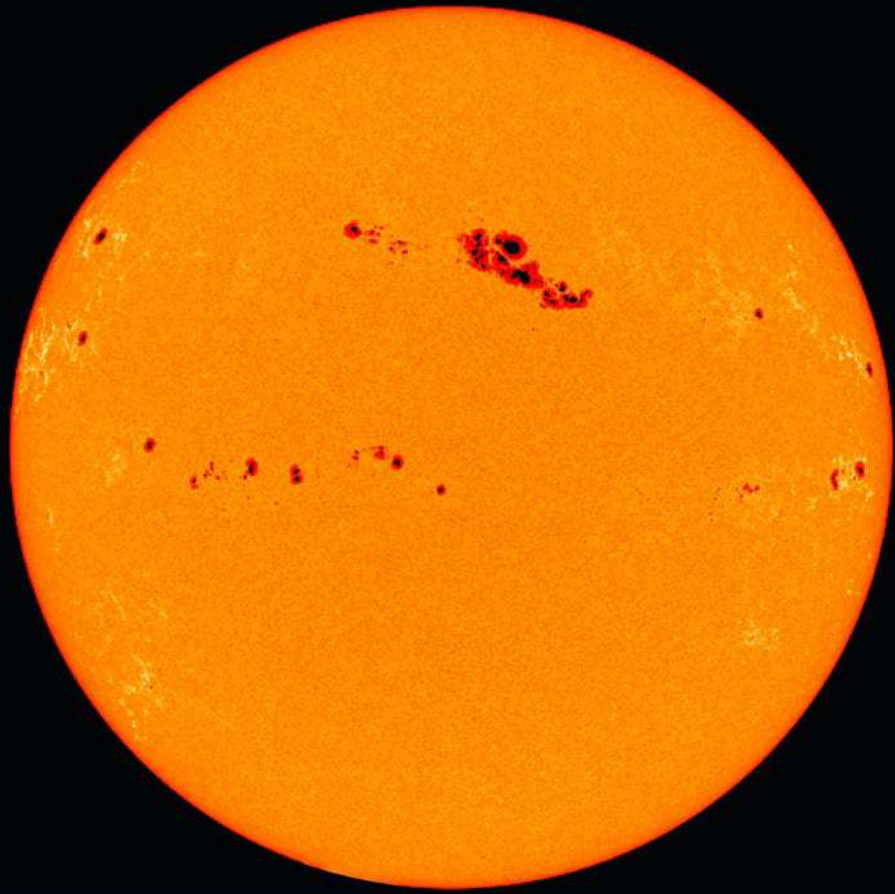
In einer dreiteiligen Artikelserie soll dieses Thema Kernfusion von den historischen Anfängen bis zum Stand der gegenwärtigen Forschung und Entwicklung nachgezeichnet werden. Im hier vorliegenden ersten Teil folgen wir einigen Meilensteinen naturwissenschaftlicher Entdeckungen. Obwohl diese anfangs wenig untereinander und in keinerlei Zusammenhang mit der Astronomie standen, sollten sie nach 1930 zur gemeinsamen Grundlage für das Verständnis der Energiequellen der Sterne werden.

### **Frühe Erklärungsversuche**

Der Heilbronner Stadtarzt Robert Mayer (1814–1878), der als einer der ersten Wissenschaftler den Energieerhaltungssatz beschrieben hat, versuchte 1848 auch, die Leuchtkraft der Sonne zu erklären. Eine chemische Verbrennung schloss er aus. Denn seine Abschätzung ergab: Selbst wenn die gesamte Sonne aus Steinkohle bestünde, könnte sie ihre Leuchtkraft nicht länger als 4600 Jahre aufrechterhalten. Mayer vermutete deswegen, dass der Sonne die abgestrahlte Energie kontinuierlich wieder zugeführt werden müsse. Obwohl kaum mit den physikalischen Begriffen

## **Auf einen Blick**

- 1 Erst seit rund 80 Jahren wissen wir, dass die Sonne und andere Sterne ihre Strahlungsenergie aus der Verschmelzung leichter Atomkerne, der Kernfusion, beziehen.
- 2 Der Weg, der zu dieser Erkenntnis führte, war lang und mit vielen Stolpersteinen gespickt. Er stellt eines der spannendsten Kapitel der Astrophysik dar.
- 3 Viele – scheinbar unabhängige – Entdeckungen und revolutionäre, neuartige Theorien in verschiedenen Wissenschaftsfeldern waren nötig, um das Rätsel der stellaren Energieerzeugung zu lösen. Schicksale von vielen Forschern sind damit verknüpft.



## SONNE MIT SONNENFLECKEN

**Noch in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts glaubten Astronomen, die Sonne habe einen dunklen Kern, den man durch Wolkenlöcher hindurch sehen könne. Im Jahr 1859 klärte Gustav Kirchhoff in Zusammenhang mit seiner neuen Spektralanalyse, dass sich unter der leuchtenden Oberfläche der Sonne ein noch heißerer Kern befinden muss – die Sonnenflecken sind demnach nur etwas kühlere Stellen auf der Oberfläche.**

sich die Umlaufbahnen der Planeten messbar verändert hätten.

Etwas weiter führt die bei der Kontraktion des Sonnenkörpers mögliche Umwandlung von Gravitationsenergie in Wärme: Sie könnte den Energiestrom der Sonne für fast 20 Millionen Jahre speisen. Diesen Zeitraum hatte Hermann von Helmholtz (1821–1894), damals Professor in Königsberg, bereits 1854 errechnet.

Ausgehend von Helmholtz' Überlegungen versuchte der amerikanische Physiker Jonathan Homer Lane (1819–1880) im Jahr 1870 ein Sonnenmodell aufzustellen. Sein Aufsatz hatte den etwas weitschweifigen Titel »Über die theoretische Temperatur

vertraut, folgerte Mayer aus dem newtonschen Gravitationsgesetz, dass sich Objekte im Sonnensystem »dem Schwerpunkte der Sonne zu nähern streben und bei ihrer Annäherung an denselben mehr und mehr in Bewegung gerathen«. Die Sonnenwärme entstünde demnach durch das Auffallen

kleiner Himmelskörper auf die Sonne und der Umwandlung von Bewegungs- in Wärmeenergie.

Wäre Mayers Erklärung richtig, dann müssten so viele Himmelskörper auf die Sonne einfallen, dass sie nach 10 Millionen Jahren ihre Masse verdoppelt hätte und

der Sonne unter der Hypothese einer gasförmigen Masse, die ihr Volumen infolge ihrer inneren Wärme aufrechterhält und die den Gasgesetzen gehorcht, wie sie aus irdischen Experimenten bekannt sind.« Mutig war seine Annahme einer gasförmigen Masse. Dies erlaubte es ihm, den Energietransport aus dem Innern eines Sterns an dessen Oberfläche durch Konvektion, also durch auf- und absteigende Schwaden bewerkstelligen zu lassen. Strahlungstransport wurde damals noch nicht betrachtet.

Aber Lanes Temperaturwerte waren zu ungenau, sie fußten teilweise auf Brennglasexperimenten zum Schmelzen hitzebeständiger Stoffe. In einem weiterentwickelten Kontraktionsmodell konnte William Thomson (1824–1907), besser bekannt als Lord Kelvin, im Jahr 1887 eine Temperatur von mehreren Millionen Grad für das Innere der Sonne herleiten. Dieser hohe Wert ist eine Folge des Zusammenpressens des Sonnengases, wodurch sich der nach außen gerichtete Druck erhöht. Nur wenn der Gasdruck und die Gravitation sich die Waage halten, kann die Sonne auf Dauer ihr großes Volumen beibehalten.

Immer weiter verfeinerte Sonnenmodelle, so von August Ritter (1826–1908) in

Aachen und Robert Emden (1862–1940) in München, konnten um 1900 den inneren Aufbau und viele beobachtete Eigenschaften der Sonne (wie den scharfen Rand und die gemessene Oberflächentemperatur) befriedigend erklären – nicht aber ihre Energieerzeugung. So resigniert Emden gegen Ende seines berühmten Buchs »Gaskugeln« von 1907: »Die Energiequelle der Sonnenstrahlung ist noch völlig unbekannt; Kräfte, die nach dem newtonschen Gravitationsgesetz wirken, können nur einen verschwindend kleinen Anteil der in Betracht kommenden Energie liefern.«

Altersbestimmungen aus der Geologie, der Biologie und der Physik zeigten schon vor Ende des 19. Jahrhunderts, dass das Sonnensystem viel älter sein müsse als die aus der Umwandlung von Gravitationsenergie möglichen 20 Millionen Jahre: Es existiert offenbar schon seit mehreren hundert Millionen Jahren, in denen sich die Leuchtkraft der Sonne nicht verändert hat.

Wie also ließ sich das Rätsel der solaren Energiequelle lösen? Der Weg, der schließlich zu einer Lösung führen sollte, ist eines der spannendsten Kapitel der Astrophysik. Einerseits machten die Astronomen in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts

Eine Fülle von Entdeckungen in Physik und Chemie war nötig, um die stellare Energieerzeugung zu erklären

eine Fülle aufregender Entdeckungen, wodurch sie die Leuchtkräfte, Massen und Durchmesser der Sterne bestimmen sowie die chemische Zusammensetzung ihrer äußeren Schichten ermitteln konnten. Andererseits stellten Physiker und Chemiker ihre Wissenschaften auf völlig neue Grundlagen: Sie entwickelten ein schlüssiges Modell vom Aufbau der Atome, die Relativitätstheorie erweiterte die klassische Physik, und die Quantenmechanik erlaubte es, die geheimnisvolle Welt der kleinsten Teilchen zu beschreiben.

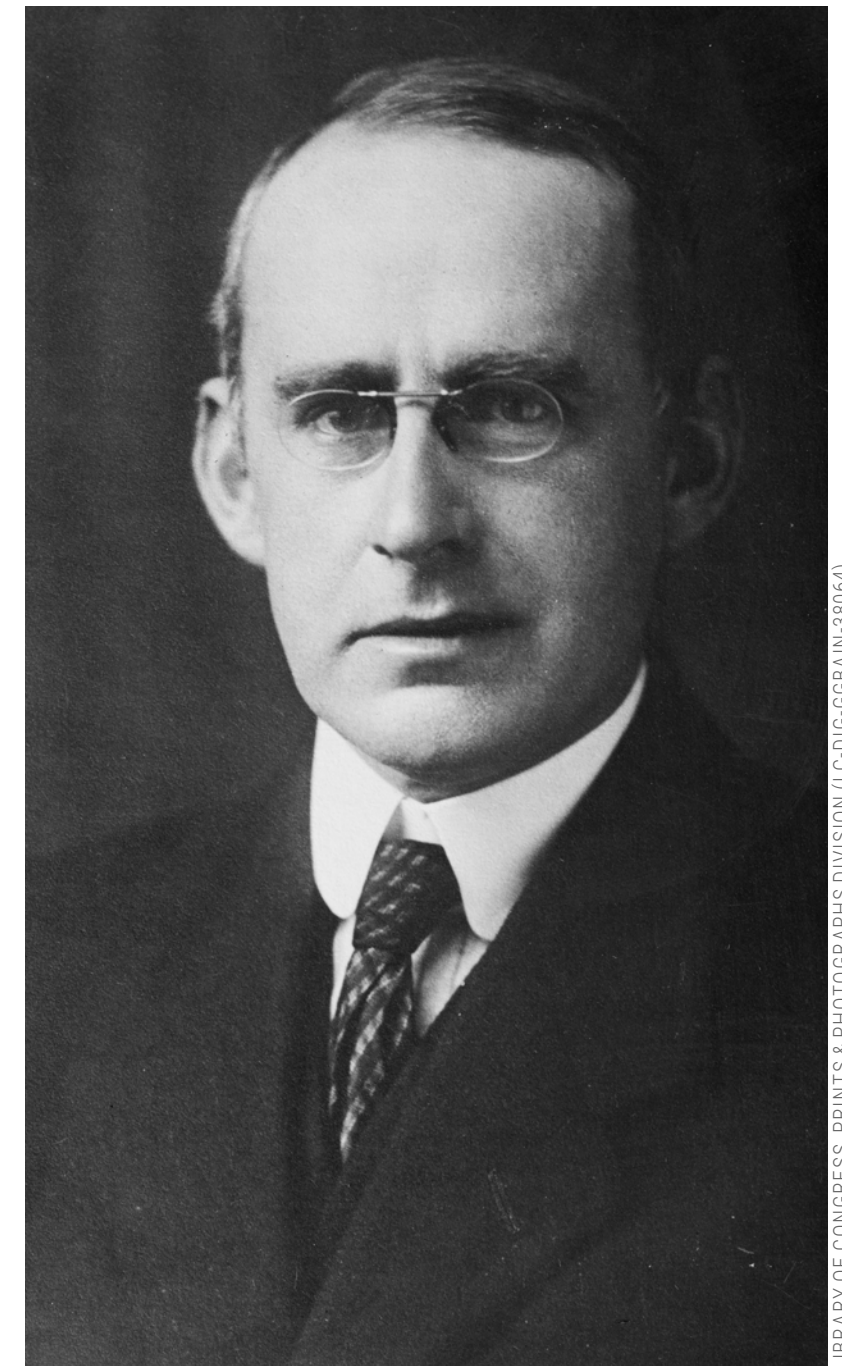
Der Erkenntnisweg verlief keineswegs geradlinig. Er war gespickt mit Stolpersteinen, und nur allzu oft gerieten die Forscher in Sackgassen. Manchmal spielte der Zufall eine Rolle, und mitunter befruchtete eine Entdeckung auf einem völlig anderen Gebiet den weiteren Fortschritt. Junge Physiker, die bis dahin keine Berührung mit der Astronomie gehabt hatten, traten mit zündenden Ideen hervor und wurden dabei öfters von ihren schon berühmten älteren Kollegen gebremst. Einzelne Quereinsteiger setzten sich dennoch durch und begründeten neue Forschungsrichtungen. Andere junge Physiker schafften es, ihre Ideen und Instrumente aus dem Labor auf den Him-

mel zu richten und neue Forschungsfelder für die Astronomie zu öffnen. Viele dieser Arbeiten wurden mit Nobelpreisen gekrönt, und sie alle bereiteten den Weg, der schließlich zum Gipfel der astrophysikalischen Erkenntnis führte.

### Neue Physik

Ein physikalischer Ausgangspunkt der hier zu erzählenden Geschichte ist Würzburg im Jahr 1895. Hier entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) die nach ihm benannte Strahlung hoher Energie, die Materie durchdringt (wofür er im Jahr 1900 den ersten Nobelpreis für Physik erhielt). Das veranlasste Antoine Henri Becquerel (1852–1908) in Paris, mittels dieser Röntgenstrahlen Proben aus der Mineraliensammlung seines Vaters zu untersuchen. Dabei bemerkte er, dass von einigen Uranmineralen Leuchterscheinungen ausgehen, ohne dass er sie vorher der Röntgenstrahlung ausgesetzt hatte. Für diese Entdeckung der Radioaktivität erhielt er zusammen mit Marie und Joliot Curie im Jahr 1903 den Nobelpreis für Physik.

In den folgenden Jahrzehnten erwiesen sich die von Physikern und Chemikern in



**ARTHUR EDDINGTON**

**Sir Arthur Eddington führte die Strahlungsleistung der Sonne korrekt auf die Freisetzung einer »inneratomaren Energie« zurück.**



den Laboratorien und in theoretischen Studien durchgeführten Untersuchungen zur Radioaktivität als wissenschaftlich ungemein ergiebig und führten zu neuen Forschungsgebieten, der Atom- und der Kernphysik. Beide sollten bald zu großer Bedeutung für die Astronomie werden.

Einen weiteren Meilenstein setzte der Physiker Max Planck (1858–1947). Er fand im Jahr 1900 eine Formel, mit der sich die Wärme- und Lichtabstrahlung heißer Körper beschreiben ließ, genauer: eines Schwarzen Körpers, wie ihn Gustav Kirchhoff (1824–1887) vier Jahrzehnte zuvor als Gedankenexperiment eingeführt hatte. Grundlage für Plancks revolutionäre Ideen waren die präzisen Strahlungsmessungen an der neu gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin. Plancks fundamentales Gesetz, nach dem sich die spektrale Verteilung der Abstrahlung eines Körpers allein aus dessen Temperatur ergibt, ließ sich bald auf das Innere und Äußere der Sterne anwenden.

Für die Herleitung seiner Strahlungsformel war Planck gezwungen gewesen, die Energiezustände des Strahlers als diskret anzunehmen, also zu quanteln. Plancks Entdeckung folgend, erklärte Albert Ein-

stein (1879–1955) 1905 mit seiner Lichtquantenhypothese den elektrischen Photoeffekt. Im gleichen Jahr entwickelte er die spezielle Relativitätstheorie, der zufolge Masse  $m$  und Energie  $E$  äquivalent sind. Die Gleichung  $E = mc^2$ , die diese Äquivalenz mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  verbindet, ist wohl die berühmteste Formel der Welt. Für ihre wegweisenden Arbeiten zur Entwicklung der Quantentheorie erhielten Planck 1918 und Einstein 1921 den Physiknobelpreis.

### **Inneratomare Energie?**

Einer der Ersten, die sich die neuen Erkenntnisse zu Nutze machten, war Arthur Stanley Eddington (1882–1944), wohl der angesehenste Astrophysiker seiner Zeit. Angeregt durch Einsteins Entdeckung der Äquivalenz von Masse und Energie vermutete Eddington, dass sich in der Sonne Materie in Strahlung umwandle. Der hohe Wert der Lichtgeschwindigkeit von rund 300 000 Kilometern pro Sekunde führt nämlich nach Einsteins Formel  $E = mc^2$  dazu, dass in einer winzigen Masse eine gewaltige Energiemenge vorhanden ist. Eddington rechnete nach: 1 Gramm Materie entspricht einer Energie von  $9 \cdot 10^{20}$  erg (in

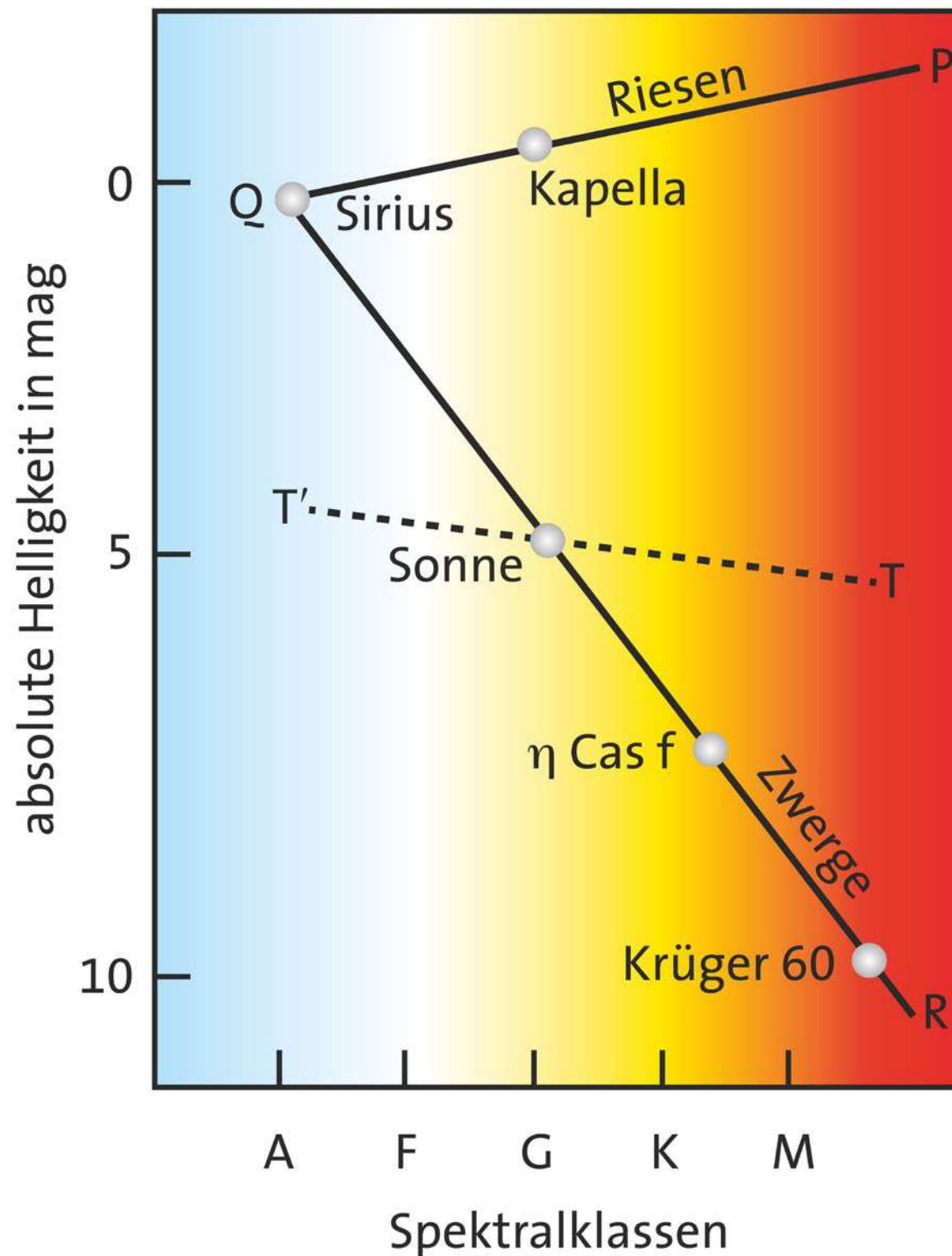
heutigen Einheiten:  $9 \cdot 10^{13}$  Joule); multipliziert mit der Sonnenmasse von  $2 \cdot 10^{33}$  Gramm folgt ein Energievorrat von  $1,8 \cdot 10^{54}$  erg. Aus der gemessenen Abstrahlung von jährlich  $1,2 \cdot 10^{41}$  erg könnte deshalb auf eine Betriebszeit der Sonne von 15 Billionen ( $15 \cdot 10^{12}$ ) Jahren geschlossen werden – falls ihre gesamte Masse in Strahlung umgewandelt würde.

Die Freimachung »inneratomarer Energie« war für Eddington mehr als eine amüsante physikalische Gedankenspielerei – erlaubte sie doch der Sonne und anderen Sternen, ihren ungeheuren Energiestrom über mehrere Jahrmilliarden zu erzeugen.

Auch das wirtschaftliche Potenzial dieser Idee lag für Eddington auf der Hand. Mit einer Vision begeisterte er seine Zuhörer auf der zweiten Weltkraftkonferenz in Berlin im Jahr 1930: »Wir bauen ein großes Kraftwerk, etwa mit einer Leistung von 100 000 Kilowatt, und stattdessen es mit Ladepätzen und Eisenbahnanschluß aus, um eine Ladung Betriebsstoff nach der anderen zur Fütterung des Untiers heranzuschaffen. Ich sehe im Geiste, daß diese Einrichtungen zur Versorgung mit Betriebsstoff eines Tages überflüssig sein werden; statt daß wir den Hunger der Maschine mit



Temperaturabnahme →



## Hertzsprung-Russell-Diagramm

Noch ohne Kenntnis der chemischen Zusammensetzung und der Art der Energiequelle von Sternen leitete Arthur Eddington Beziehungen zwischen ihrer Masse, Temperatur und Leuchtkraft her. Ein schematisches Hertzsprung-Russell-Diagramm ergänzt seine Arbeit von 1924: Die Sterne konzentrieren sich längs der Linien PQ (Riesen) und QR (Zwerge). Nach Eddington haben die Riesen Dichten ähnlich wie Luft, die Zwerge ähnlich wie Wasser. Am Wendepunkt Q sah man früher die Grenze für die Behandlung der Sterne mit den Gesetzen für ideale Gase. Eddington hat diese Gesetze schließlich auch auf die Zwerge angewendet, da er das Gas als hoch ionisiert erkannt hatte. Dies war richtig; aber fälschlicherweise vermutete man 1924 noch, Sterne würden sich langfristig beginnend als Riesen von P über Q zu Zwergen nach R entwickeln.



Leckerbissen wie Kohle und Öl stillen, werden wir ihr eine einfache Kost von inneratomarer Energie verordnen. Wenn dieser Tag je erscheinen sollte, so werden die Lastkähne, die Güterwagen und Loren, die Kräne verschwinden, und der Jahresbedarf an Betriebsstoff für das Kraftwerk wird in einer Teetasse serviert werden, nämlich in Gestalt von 30 Gramm Wasser.«

Allerdings: Welcher Brennstoff im himmlischen Ofen der Sonne verheizt wird und dabei die »inneratomare Energie« freisetzt, konnte Eddington damals noch nicht angeben. Mit dem Kenntnisstand der Atom- und Kernphysik in den 1920er Jahren kamen theoretisch zwei Vorgänge als Energielieferanten der Sterne in Betracht. Beide waren freilich bis dahin experimentell nicht beobachtet worden:

Erstens könnte das Zusammentreffen der entgegengesetzt geladenen Teilchen Proton und Elektron zum Doppelselbstmord dieser Partikel durch Zerstrahlung führen. Es bliebe nichts anderes übrig als elektromagnetische Strahlung.

Zweitens könnten leichte Atomkerne zu schwereren verschmelzen. Eddington wusste, dass ein Heliumatom etwas leichter ist als vier Wasserstoffatome. Würde sich diese

Massendifferenz bei der Verschmelzung von Wasserstoff in Helium in Strahlungsenergie umwandeln, ließe sich die Abstrahlung des Sterns immer noch über Jahrmilliarden aufrechterhalten, und seine Masse würde sich dabei nur geringfügig verringern. Diese Verschmelzungsreaktion wäre freilich nur möglich, wenn die Wasserstoffkerne, also Protonen, mit sehr hoher Geschwindigkeit aufeinandertreffen, damit sie ihre Abstoßung auf Grund ihrer gleichen Ladung überwinden und sich nahe genug kommen, um sich zu verbinden. Dafür wären Temperaturen weit oberhalb von 40 Millionen Grad erforderlich – viel höher, als aus den Sternmodellen folgte. Zudem war damals noch nicht klar, ob Sterne überhaupt ausreichende Mengen an Wasserstoff enthalten.

### **Riesen und Zwerge**

Der Frage nach dem Aufbau und der Entwicklung der Sterne näherten sich die Astronomen durch Beobachtungen. Zu einem machtvollen Werkzeug entwickelte sich das Hertzsprung-Russell-Diagramm. Seine Namensgeber legten die Grundlagen dafür vor einem Jahrhundert.

Um 1910 hatte Henry Norris Russell (1877–1957) in den USA bemerkt, dass die

eher roten Sterne zwei unterschiedliche Gruppen bildeten: einerseits solche mit geringer Leuchtkraft wie die Sonne, andererseits solche mit sehr hoher Leuchtkraft wie Beteigeuze oder Arktur. Blaue Sterne dagegen hatten fast immer hohe Leuchtkräfte. Russell hatte sonnennahe Sterne untersucht. Ejnar Hertzsprung (1873–1967), ein dänischer Astronom, der damals am Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam arbeitete, führte etwa zeitgleich ähnliche Untersuchungen an Sternhaufen wie den Plejaden aus, deren Mitglieder sich alle in der gleichen Entfernung zu uns befinden.

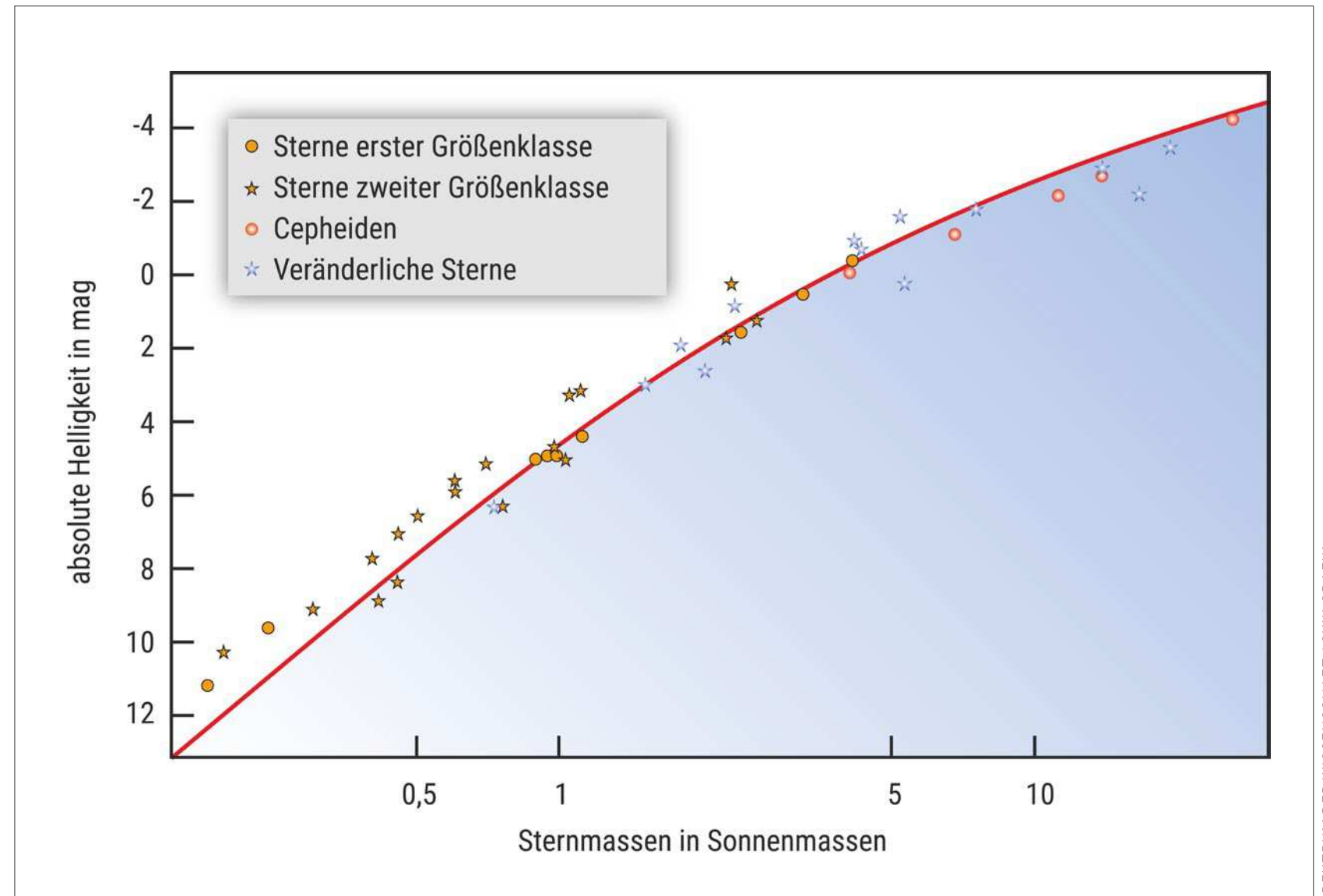
Beide Forscher gelangten zu ähnlichen Ergebnissen: Trägt man die Leuchtkraft (die absolute Helligkeit) gegen den Farbindeix (ein Maß für die Temperatur) auf, finden sich die meisten Sterne, einschließlich der Sonne, auf einer leicht gekrümmten Kurve, der so genannten Hauptreihe. Über ihr gibt es bei hohen Leuchtkräften und niedrigen Temperaturen ein Gebiet der roten Riesensterne, deren übergroßer Durchmesser mit dem damals neuen Interferometer bestimmt werden konnte.

Was waren die Gründe für die strenge Versammlung fast aller Sterne auf zwei eng begrenzten Inseln im Hertzsprung-Rus-



sell-Diagramm (kurz auch HR-Diagramm oder HRD genannt)? Hatten etwa alle Sterne auf der Hauptreihe, genannt Zwerge, mit damals nicht messbarem kleinem Durchmesser, einen ähnlichen inneren Aufbau wie die dort ebenfalls liegende Sonne? Und haben sie vielleicht andere Energiequellen als die Riesen, bei denen man Kontraktion vermuten durfte?

Um das verborgene Innere der Sterne durch Gedankenexperimente zu erforschen, schien es damals am aussichtsreichsten, zunächst die Riesen mit bekanntem Durchmesser zu behandeln. Ihre hohe Leuchtkraft verdanken sie dem großen Durchmesser und damit einer großen strahlenden Oberfläche. Ihre Massen sind oft nur wenig größer als die der Sonne. Da demzufolge ihre Dichte klein ist, wandte man auf sie die aus irdischen Experimenten gesicherten physikalischen Gesetze für ideale Gase an. In diesem Modell betrachtet man die Atome und Moleküle als Teilchen, die nur durch Stöße untereinander in Wechselwirkung treten. Die Zustandsgleichung für ideale Gase, die den Druck mit dem Volumen und der Temperatur verbindet, sollte auch für Sterne gelten, deren Gas durch das Gleichgewicht



von Gravitation und Druck in einer Kugel eingeschlossen ist. Zur Anwendung muss allerdings etwas über die von der chemischen Zusammensetzung abhängige Teilchenmasse bekannt sein, ausgedrückt im Molekulargewicht  $\mu$ . Da der Druck in einer solchen Gaskugel hundertmilliardenfach größer ist als der irdische Luftdruck, folgt aus der Zustandsgleichung eine Tempera-

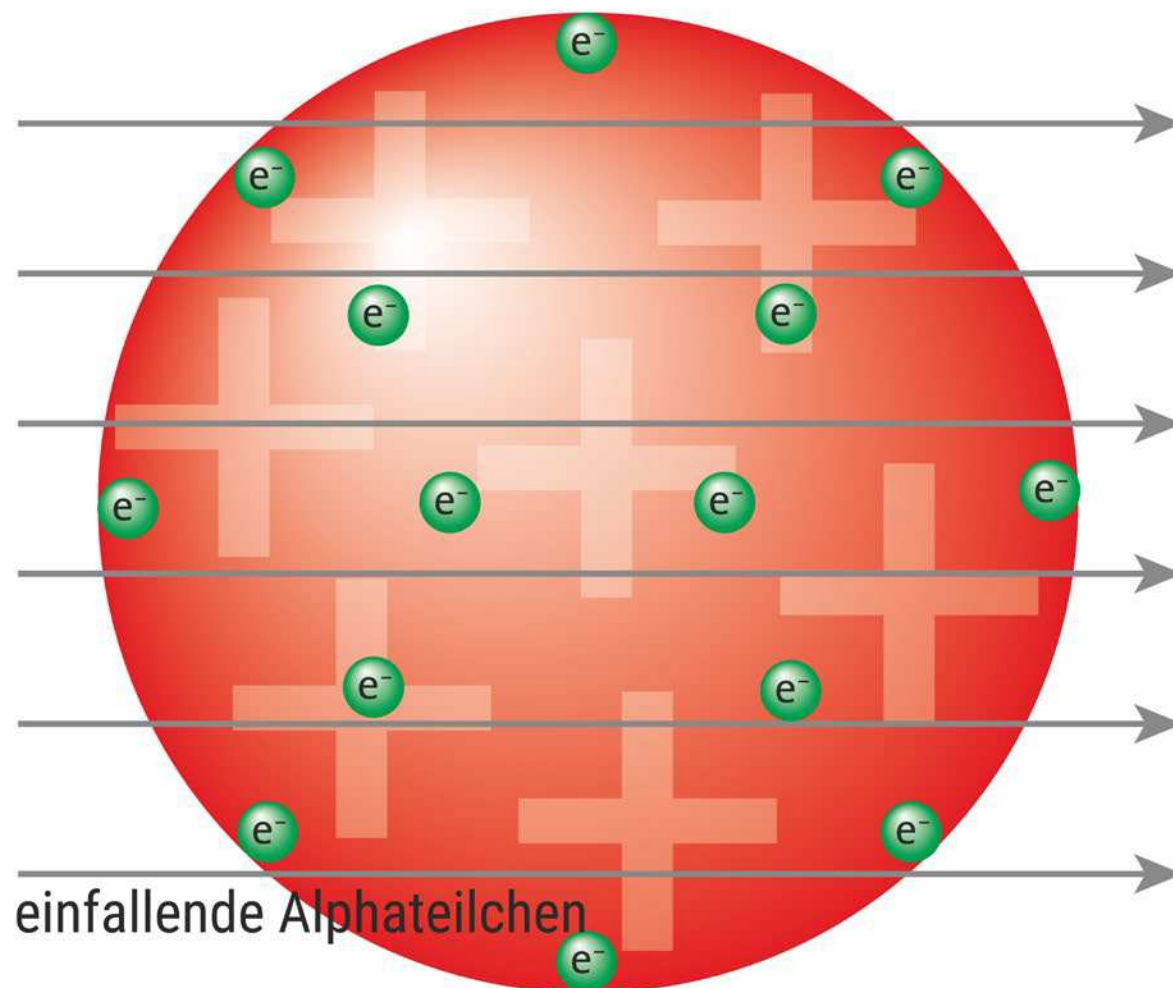
### MASSE-LEUCHTKRAFT-BEZIEHUNG

**Mit den damals neuesten atomphysikalischen Daten leitete Eddington eine Beziehung zwischen der Masse und der Leuchtkraft (absolute Helligkeit) von Sternen ab. Die Übereinstimmung seiner Berechnung (rote Kurve) mit den Beobachtungsdaten von 44 Sternen zeigte, dass sowohl Riesen als auch Zwerge als ideales Gas behandelt werden können.**

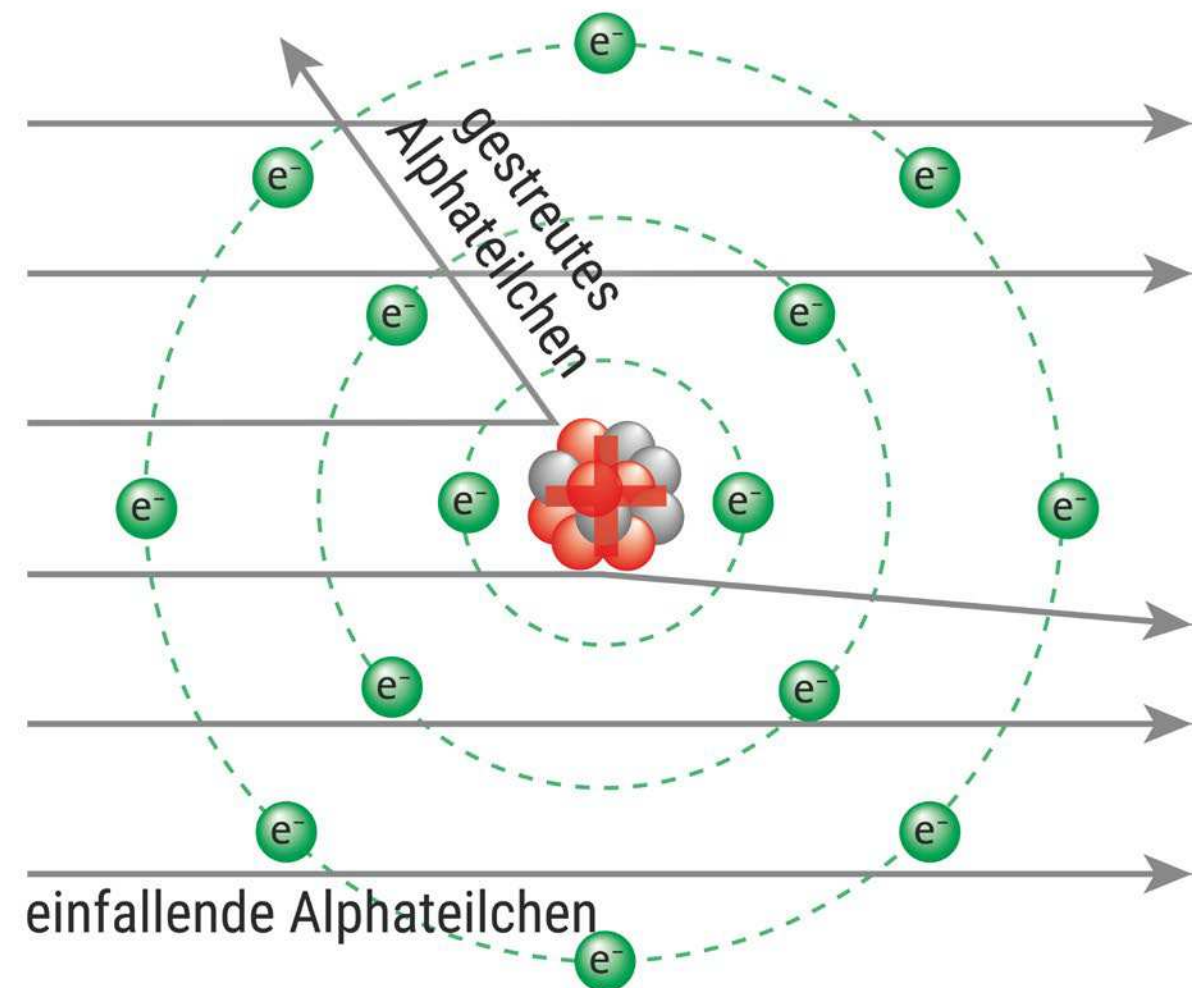
# Atommodelle

Joseph Thomson stellte sich 1903 das Atom aus gleichmäßig verteilter, positiv geladener Masse (rot) vor, in der die Elektronen (grün) wie Rosinen in einem Kuchen eingebettet sind. Streuversuche mit Alphateilchen an einer Goldfolie ergaben jedoch ein anderes Bild: Fast die gesamte Masse eines Atoms ist in einem kleinen, positiv geladenen Kern konzentriert, der Rest ist »leer«. Dies führte 1911 zum Atommodell von Ernest Rutherford, das Ausgangspunkt für die Kernphysik wurde.

Atommodell von Joseph Thomson



Atommodell von Ernest Rutherford





tur von etwa 10 Millionen Grad für das Sterninnere.

Für die zahlreichen Zwergsterne auf der Hauptreihe schienen die Gesetze für ideale Gase zunächst nicht anwendbar. Denn die Zwerge waren viel dichter und enthielten auch schwerere Elemente. Für die Sonne nahm man damals eine ähnliche Zusammensetzung wie die der Erde an. Joseph Fraunhofer hatte 1814 in Benediktbeuern dunkle Linien im Sonnenspektrum entdeckt. Gustav Kirchhoff und Robert Bunsen konnten 1859 in Heidelberg zeigen, dass diese Absorptionslinien Fingerabdrücke von einem Dutzend chemischer Elemente sind, die sie in ihrem Labor spektroskopisch untersucht hatten. Russell hat dann 1914 die im Sonnenspektrum wahrgenommenen dunklen fraunhoferschen Linien von über 30 Elementen mit den Häufigkeiten dieser Elemente in der Erdkruste und in Steinmeteoriten verglichen. Er fand große Ähnlichkeiten: »Würde man die Erdkruste auf die Temperatur der Sonne erhitzen, würde ein ähnliches Spektrum entstehen.« Die dabei entstehenden realen Gase waren nicht so stark zusammendrückbar, da ihre molekularen Teilchen zu groß waren und bei hohem Druck schließ-

lich aneinanderstießen, wie in einer Flüssigkeit.

Deshalb schien noch Anfang der 1920er Jahre das Hertzsprung-Russell-Diagramm folgenden Entwicklungsweg der Sterne abzubilden: Sie entstehen oben rechts als Riesen aus dünnem Gas. Bei weiterer Kontraktion wandern sie nach links und gelangen auf die Hauptreihe. Dort haben sie die kritische Dichte erreicht. Durch die masseverbrauchende Energieerzeugung wandern sie schließlich auf der Hauptreihe abwärts, das heißt, sie werden kühler, leuchtschwächer und masseärmer.

### **Das Glück der hohen Temperatur**

Aber schon 1924 führten Ergebnisse aus der aufblühenden Atomphysik zu neuen Ansichten über das Innere der Sterne. Bei einer Temperatur von mehreren Millionen Grad muss dort nach dem planckschen Strahlungsgesetz die Wärmestrahlung aus Röntgenstrahlung bestehen. Der neuen Quantentheorie mit dem Doppelbild von Welle und Teilchen folgend, kann sie auch als aus Röntgenphotonen bestehend angesehen werden: Viele Trillionen Röntgenphotonen pro Kubikzentimeter bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit im Gas. Die-

se energiereichen Röntgenphotonen reißen dabei allen Atomen die äußeren Elektronen ihrer Atomhülle ab, das heißt, sie ionisieren das Gas im Innern der Sterne vollständig, es wird zu einem Plasma. So wird das Wasserstoffatom in einen Kern (ein Proton) und ein Elektron zerrissen. Selbst die schwereren Elemente, wie Eisen, behalten als Ion bestenfalls wenige Elektronen nahe ihrem Kern übrig, ihr ursprünglicher Atomdurchmesser wird auf Tausendstel verkleinert. Da dann sowohl das Ion als auch die Elektronen, verglichen mit dem vollständigen Atom, nur noch winzige Durchmesser haben, gibt es jetzt viel Platz zwischen den Teilchen. Und weil das ionisierte Gas damit zusammendrückbar geworden ist, sollten auch hier die Gesetze für ideale Gase anwendbar sein. Mit anderen Worten: Die Zwerge auf der Hauptreihe sollten sich physikalisch ähnlich wie die Riesen behandeln lassen.

Diese neue Erkenntnis fand eine eindrucksvolle Bestätigung in der 1924 von Edington mit den neuesten atomphysikalischen Daten berechneten Masse-Leuchtkraft-Beziehung der Sterne. Sowohl Riesen als auch Zwerge folgen diesem Verlauf. Die Übereinstimmung mit Beobachtungsda-

ten zeigt, dass wohl überall mit den Gesetzen für ideale Gase gerechnet werden kann. Die bisherige Sorge um Abweichungen für Zwerge war nicht länger berechtigt: Die Leuchtkraft der Sterne sollte nur von ihrer Masse abhängen. Der nun erkannte hohe Ionisationsgrad im Innern der Sterne hatte weitere Folgen. Jetzt konnte das mittlere Molekulargewicht  $\mu$  der Teilchen neu berechnet werden, das in die Zustandsgleichung eingeht. Ohne die neue Erkenntnis eines hohen Ionisationsgrads müsste man für die schweren Elemente im Stern für  $\mu$  große Werte nutzen, entsprechend ihrem Atomgewicht, so für Sauerstoff 16, für Eisen 56. Die tatsächlichen Zahlen sind viel kleiner. So wird Sauerstoff mit dem Atomgewicht 16 durch die Ionisation in einen Kern und acht Elektronen zerlegt,  $\mu$  wird  $16/9 = 1,78$ . Für Eisen folgt entsprechend  $\mu = 2,07$ . Für alle ionisierten Elemente schwerer als Lithium nehmen die Werte für das mittlere Molekulargewicht Werte um 2 an.

Das erwies sich als Glück für Eddingtons Überlegungen, denn damit werden die Rechnungen zu Sternmodellen fast unabhängig von der chemischen Zusammensetzung des Sterns. Nur das Wasserstoffatom macht eine Ausnahme, da es ledig-



MIT FRDL. GEN. VON SMITHSONIAN INSTITUTION ARCHIVES (BILD # SIA2009-1326)

### CECILIA PAYNE

**In einer Zeit, in der viele Universitäten Frauen keine akademischen Grade verliehen, forschte die Engländerin Cecilia Payne (1900–1979) mit einem amerikanischen Frauenförderungsstipendium am Harvard Observatory. Ihre 1925 vorgelegte Doktorarbeit – deren Ergebnisse zunächst von mehreren berühmten Männern abgelehnt wurden – ist eine der wichtigsten der Astronomie: Indem Payne Sternspektren mit Hilfe der neuen Atomtheorie richtig deutete, konnte sie zeigen, dass Wasserstoff den Hauptanteil der Sterne ausmacht – auch wenn die Spektrallinien dieses Elements nicht immer deutlich zu sehen sind, weil ihre Stärke im Wesentlichen von der Temperatur abhängt.**



lich in ein Proton und ein Elektron gespalten wird, hier beträgt  $\mu = \frac{1}{2}$ . Deshalb würde ein hoher Wasserstoffgehalt im Stern zu einer niedrigeren Kerntemperatur führen. Aber Anfang der 1920er Jahre ging man immer noch von einer irdähnlichen Zusammensetzung der Sonne mit einem geringen Wasserstoffanteil aus.

### Entdeckung des Massendefekts

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts war der Physiker Ernest Rutherford (1871–1937) führend in der Erforschung der Radioaktivität, des Atombaus und der Struktur der Materie. Zwei bei ihm arbeitende junge Physiker, Hans Geiger und Ernest Marsden, entdeckten die »anormale Streuung« von Alphateilchen radioaktiver Stoffe an einer Metallfolie. Mit diesem Experiment wurde klar, dass die Masse eines Atoms nicht, wie bisher angenommen, gleichmäßig über sein Volumen verteilt ist, sondern im Wesentlichen in einem kleinen, positiv geladenen Kern konzentriert ist.

Im Jahr 1919 baute Francis Aston (1877–1945) in Rutherfords Labor in Cambridge einen Massenspektrographen, mit dem er das Atomgewicht der Elemente bestimmte. Dazu ließ er schnelle Ionen der zu un-

tersuchenden Stoffe durch ein elektrisches und ein magnetisches Feld fliegen, wobei die Teilchen entsprechend ihres Masse-zu-Ladung-Verhältnis abgelenkt wurden. Dabei entstand auf einer Fotoplatte ein Massenspektrum. Mit dieser Apparatur ließen sich Atomgewichte erstmals mit Promillegenaugigkeit bestimmen. Aston entdeckte, dass viele chemische Elemente Isotope aufweisen. Die unterscheiden sich zwar im Atomgewicht um ganze Zahlen, verhalten sich aber chemisch gleich, da sie die gleiche Kernladungszahl (Protonen) und gleiche Elektronenhüllen haben. So gibt es die stabilen Kohlenstoffisotope  $^{12}\text{C}$  und  $^{13}\text{C}$  mit den Atomgewichten 12 und 13.

Aston erhielt für seine Entdeckung 1922 den Nobelpreis für Chemie. Wichtig wurde seine Feststellung, dass alle Atomgewichte ganzzahlig sind, wenn man für Sauerstoff den Wert 16 annimmt. Das ließ erwarten, dass der Grundbaustein der Atomkerne, das Proton, den Wert 1 hat. Tatsächlich fand Aston 1,008, also fast ein Prozent mehr. Für Helium, von dem man damals annahm, sein Kern bestehe aus vier Protonen und zwei Elektronen (das Neutron als weiterer Kernbaustein oder Nukleon war noch nicht entdeckt, und die Elektronenmasse beträgt

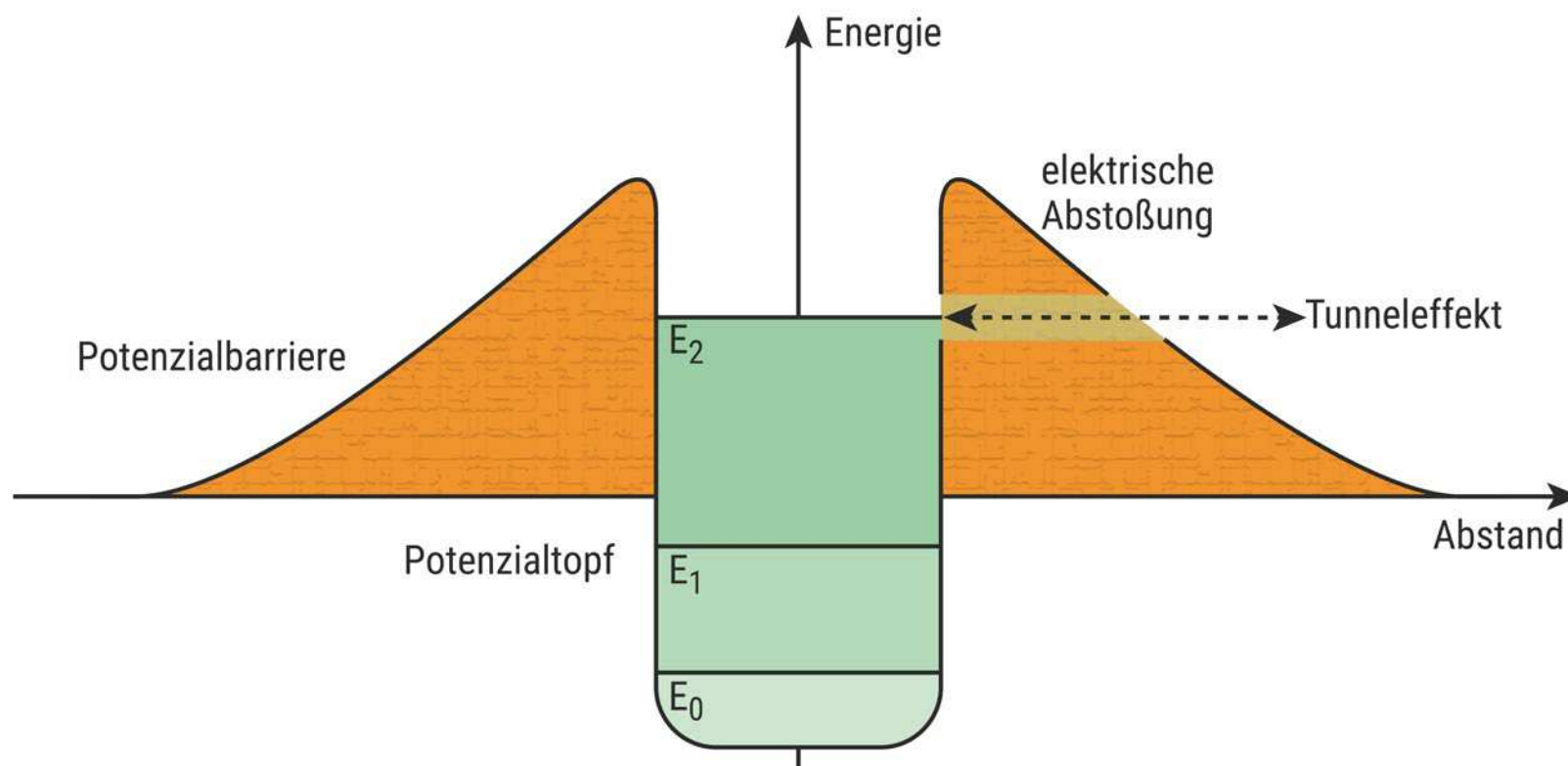
nur  $1/2000$  der Protonenmasse) maß er nicht etwa  $4 \cdot 1,008 = 4,032$ , sondern 3,999. Hier galt offenbar das klassische Gesetz vom Masseerhalt wie bei chemischen Reaktionen nicht.

Nukleonen können sich in einem stabilen Atomkern binden, weil sie einer starken Anziehungskraft unterliegen, die auf kurzen Distanzen wirkt und dann stärker ist als die elektrische Abstoßung zwischen den positiv geladenen Protonen. Beim Einbau eines Nukleons in den Kern sorgt die starke Anziehung durch die Kernkraft für die Freimachung von Bindungsenergie. Wegen der Äquivalenz von Energie und Masse folgt dann ein der Bindungsenergie entsprechender Massendefekt. Wollte man den neuen Kern wieder in seine Nukleonen zerlegen, müsste man mindestens die Bindungsenergie aufwenden, und das würde wieder zum Massenzuwachs der einzelnen Nukleonen führen.

Als Russell in den USA von Astons Entdeckung hörte, war er sogleich begeistert. Er mutmaßte, dass der Massenunterschied  $\Delta m$  von  $4,032 - 3,999 = 0,033$  Atomgewichtseinheiten gemäß Einsteins Formel  $E = mc^2$  in Energie  $E$  umgewandelt worden sei. Er glaubte, nun habe man die lang ge-

# Potenzialtopf und Tunneleffekt

Die im Atomkern versammelten positiv geladenen Protonen üben auf andere Protonen, die von außen mit hoher Geschwindigkeit auf den Kern zufliegen, eine elektrische Abstoßungskraft aus, veranschaulicht als Potenzialbarriere. Innerhalb des Atomkerns werden die Nukleonen (Protonen und Neutronen) durch die starke Kernkraft zusammengehalten, deren Reichweite sich auf eine kurze Distanz beschränkt. Es ergibt sich in diesem Bild ein Potenzialtopf, dessen Breite der Reichweite der starken Kraft entspricht. Ein Nukleon müsste energetisch hoch angeregt werden, um den Kern über die hohen Außenmauern zu verlassen. Quantenmechanisch gibt es aber eine gewisse Wahrscheinlichkeit, die Potenzialbarriere zu »durchtunneln«. So können Alphateilchen beim radioaktiven Zerfall einen angeregten Kern umso leichter verlassen, je höher ihre Energie ist. Sie haben dann nur noch eine dünnere Wand vor sich. Umgekehrt können Nukleonen in den Kern eindringen, verbildlicht tunneln, obwohl ihre Energie nicht ausreicht, die Potenzialbarriere zu übersteigen.



suchte Energiequelle der Sterne gefunden. Trotz des auf den ersten Blick nur geringen Masseunterschiedes würden bei der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium gewaltige Energien frei. Die Fusion, so berechnete Russell, liefere fünfmillionenfach mehr Energie als die chemische Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff.

## Billionen oder Milliarden Jahre?

So großartig Russells Einsicht war, wurde sie doch nicht gleich von den Astronomen übernommen. Nach damaligem Wissen war der Wasserstoffanteil in Sternen eher gering. Der frühere Vorschlag, nämlich die Zerstrahlung von Protonen und Elektronen, liefere dagegen den langfristigen merklichen Masseverlust der Sterne. Dadurch durchliefen sie im HR-Diagramm ihren Billionen ( $10^{12}$ ) Jahre dauernden Entwicklungsweg von Riesen zu leuchtarmen Zwergen, so die (irrige) Ansicht Anfang der 1920er Jahre.

Diese lange Zeitskala der Sternentwicklung wurde anscheinend auch durch Beobachtungen an Doppelsternen nahegelegt. So glaubte Heinrich Vogt (1890–1968) von der Heidelberger Sternwarte um 1925, dass bei spektroskopischen Doppelsternen mit zunehmendem Alter die Periode und die



Bahnexzentrizität durch Störungen anwachsen müssten. Besonders die letztgenannte Feststellung wurde vom britischen Astronomen James Jeans (1877–1946) vorgetragen: Sternpaare seien mit kreisförmigen Bahnen entstanden und erhielten durch Begegnungen mit anderen Sternen schließlich elliptische Bahnen. Weil aber die Sterne in der Milchstraße so weit voneinander entfernt seien, dauere es  $10^{12}$  bis  $10^{13}$  Jahre, bis die beobachteten exzentrischen Bahnen entstanden seien.

Auch die annähernde Gleichverteilung der Bewegungsenergie auf die Sterne der Milchstraße erfordere die lange Zeitskala. Das waren starke Einwände gegenüber den Anhängern der kurzen Zeitskala, die das Alter der Sterne bei nur Milliarden Jahren vermuteten.

### Reichlich Wasserstoff in Sternen

Fast zeitgleich mit Eddingtons Ableitung der Masse-Leuchtkraft-Beziehung arbeitete die englische Doktorandin Cecilia Payne (1900–1979) am amerikanischen Harvard Observatory an einer verbesserten Temperaturbestimmung für die verschiedenen Spektralklassen der Sterne. Ausgehend von der von Niels Bohr und Arnold Sommer-

feld entwickelten Quantentheorie der Atome und ihrer Spektren, hatten Magh Nad Saha und dann Alfred Fowler und Edward Milne den Weg zur atomphysikalischen Deutung der Sternspektren gewiesen. Demnach bestimmt vor allem die Temperatur die thermische Ionisation und Anregung der Atome und somit die Linienstärken in der Sternatmosphäre.

Bei der Temperatur der Sonne beispielsweise ist der Wasserstoff noch überwiegend neutral. Mit steigender Temperatur wird zunehmend der zweite Quantenzustand des Wasserstoffatoms besetzt, der die Ausgangsstufe für die im Sichtbaren liegenden Balmerlinien (H-Alpha, H-Beta und so weiter) ist. Deshalb zeigen Sterne des Spektraltyps A mit Temperaturen von rund 10 000 Kelvin diese starken Wasserstofflinien. Bei noch höheren Temperaturen wird der Wasserstoff fast vollständig ionisiert, und seine Balmerlinien werden wieder schwächer. Mit der neuen Quantentheorie musste die bisherige, naive Deutung aufgegeben werden, nach der die Linienstärken für die Häufigkeit der Elemente stehen.

Bei der Auswertung von Sternspektren machte Payne 1924 eine erstaunliche Entdeckung: Wasserstoff sei hunderttausend-

fach häufiger vorhanden als die schweren Elemente wie Kalzium oder Magnesium mit den oft starken Linien. Ihr Doktorvater Harlow Shapley (1885–1972) berichtete das überraschende Ergebnis seinem eigenen, früheren Doktorvater Russell, der den angeblich hohen Wasserstoffanteil »absurd« fand. Auch der zweite Titan der damaligen Astrophysik, Eddington, dem Payne bei einem Besuch in Cambridge von ihrer Entdeckung der großen Wasserstoffhäufigkeit berichtete, bemerkte gütig: »Sie meinen wohl nicht in dem Stern, sondern auf dem Stern.«

Nach den Ablehnungen durch die berühmten Männer schien Payne ihr Ergebnis selbst nicht mehr recht zu glauben. Aber bald darauf begannen junge Theoretiker, die Interpretation der Sternspektren mit den neuesten quantenmechanischen Erkenntnissen wesentlich zu verbessern. Führend war dabei der junge Albrecht Unsöld (1905–1995) aus Kiel, der 1927 beim Altmeister der Spektroskopie, Arnold Sommerfeld in München, promoviert hatte. Nun wurde der hohe Wasserstoffanteil bestätigt, auch wenn die ursprünglich von Payne abgeschätzten Werte etwas zu hoch waren. Bald darauf

mussten selbst Eddington und Russell den großen Wasserstoffanteil in Sternen anerkennen. Paynes Doktorarbeit wurde doch noch ausgezeichnet, und nach der Pensionierung ihres Doktorvaters erhielt sie – nach 30 Jahren Wartezeit – im Alter von 56 Jahren in Harvard die erste volle Professur für eine Frau.

Eddington konnte Anfang der 1930er Jahre mit der Annahme eines Gewichtanteils von 33 Prozent Wasserstoff für das Innere und dem daraus folgenden geringeren mittleren Molekulargewicht eine etwas niedrigere Zentraltemperatur der Sterne ableiten. Zusätzlich konnte er den bis dahin nicht verständlichen Unterschied zwischen der astrophysikalisch berechneten und der älteren theoretischen Opazität der Sternmaterie aufklären. Eine hohe Opazität (also geringe Durchsichtigkeit) wirkt wie ein Widerstand gegen das schnelle Entweichen der Energie durch Strahlung aus dem rund 15 Millionen Kelvin heißen Innern zur rund 6000 Kelvin heißen Oberfläche des Sterns. Jede gedachte Kugelschale im Innern des Sterns absorbiert die Strahlung der darunterliegenden und gibt die Energie bei geringerer Temperatur an die weiter außen liegende ab.

Die neue Quantentheorie machte solche Strahlungstransportrechnungen nun auch für die Röntgenstrahlung unter den extremen Bedingungen der Sternmaterie im Sterninnern möglich, Laborwerte waren dafür nicht verfügbar. Mit der erkannten hohen Wasserstoffhäufigkeit und der damit berechneten stimmigen Opazität wurde klar, wie die Sterne ihre (noch unbekannten) inneren Energiequellen gut gegen den kalten Weltraum »abschirmen« und nicht zu hell strahlen.

### **Helium-Kochen im Potenzialtopf**

Eine weitere theoretisch-physikalische Entdeckung wurde 1928 auch für die Astrophysik wichtig. George Gamow (1904–1964), ein sowjetischer Physiker, löste bei einem Studienaufenthalt in Göttingen, der damaligen Hochburg der theoretischen Physik, das Rätsel des radioaktiven Alphazerfalls. Gamow erklärte mit der Wellenmechanik, wie die Alphateilchen den Mutterkern mit niedriger Energie verlassen können: Sie durchtunneln die hohen Wände des Potenzialtopfs, den der Kern darstellt, laut Gamow »gerade so, wie in alten Zeiten ein Geist die dicken Mauern eines alten Schlosses durchdrang«.

Einen überzeugenden physikalischen Vergleich bot in der klassischen Theorie die Totalreflexion eines Lichtstrahls an der Grenzfläche zwischen optisch dichtem und dünnem Medium. Geometrisch-optisch betrachtet, kann kein Lichtstrahl die Grenzfläche überwinden, wellenoptisch berechnet dringt aber doch ein kleiner Teil durch, wie das Experiment beweist.

Friedrich Houtermans (1903–1966) und Robert d'Escourt Atkinson (1898–1982), beide an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg, legten nach Gesprächen mit Gamow in der »Zeitschrift für Physik« einen Vorschlag zur »Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen« vor. Wenn schon schwere Alphateilchen die hohen Wände eines Potenzialtopfs durchtunneln könnten, dann, so meinten sie, sollten einzelne Protonen von außen das erst recht können, wenn sie durch die hohen Temperaturen im Stern energiereich geworden sind.

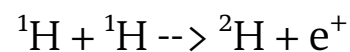
Sie entwickelten 1929 eine Theorie, nach der einzelne Protonen und Elektronen nacheinander in einen Heliumkern eindringen und dort gespeichert werden, bis ein Beryllium-8-Kern entstanden ist. Dieser Kern kann nicht stabil sein, er kommt



auf der Erde nicht vor. Er zerfällt sogleich in zwei Alphateilchen, also in zwei Heliumkerne ( ${}^4\text{He}$ ). Damit wäre die energieliefernde Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium vollendet, ohne dass es eines Sechserstoßes bedurft hätte. Der Vorgang liefere auch gleich die »Kochtöpfe« zum Erzeugen der nächsten Generation von Heliumkernen nach. Die Energieerzeugung wäre lediglich zu einem Beiprodukt beim Aufbau schwererer Elemente in Sternen, insbesondere von Helium, geworden. Und die Energiequelle der Sterne wäre in den Massendefekten der dabei entstandenen Kerne zu suchen.

Diese scharfsinnige Theorie wurde damals zurückhaltend aufgenommen: Der Tunneleffekt war im Labor noch nicht bestätigt, die Wahrscheinlichkeit für das Eindringen von Elektronen in den Kern nicht bekannt, und zum Aufbau noch schwererer Elemente konnte wenig ausgesagt werden. Deshalb empfahl Atkinson 1936: »Astrophysikalische Fragestellungen erfordern weitere Experimente im Laboratorium. Es gibt mehrere Experimente, die noch nicht versucht worden sind und die wahrscheinlich nicht zu schwierig sind. Und für die die heutige Theorie mit einiger Gewissheit die Ergebnisse vorhersagen kann.« Da

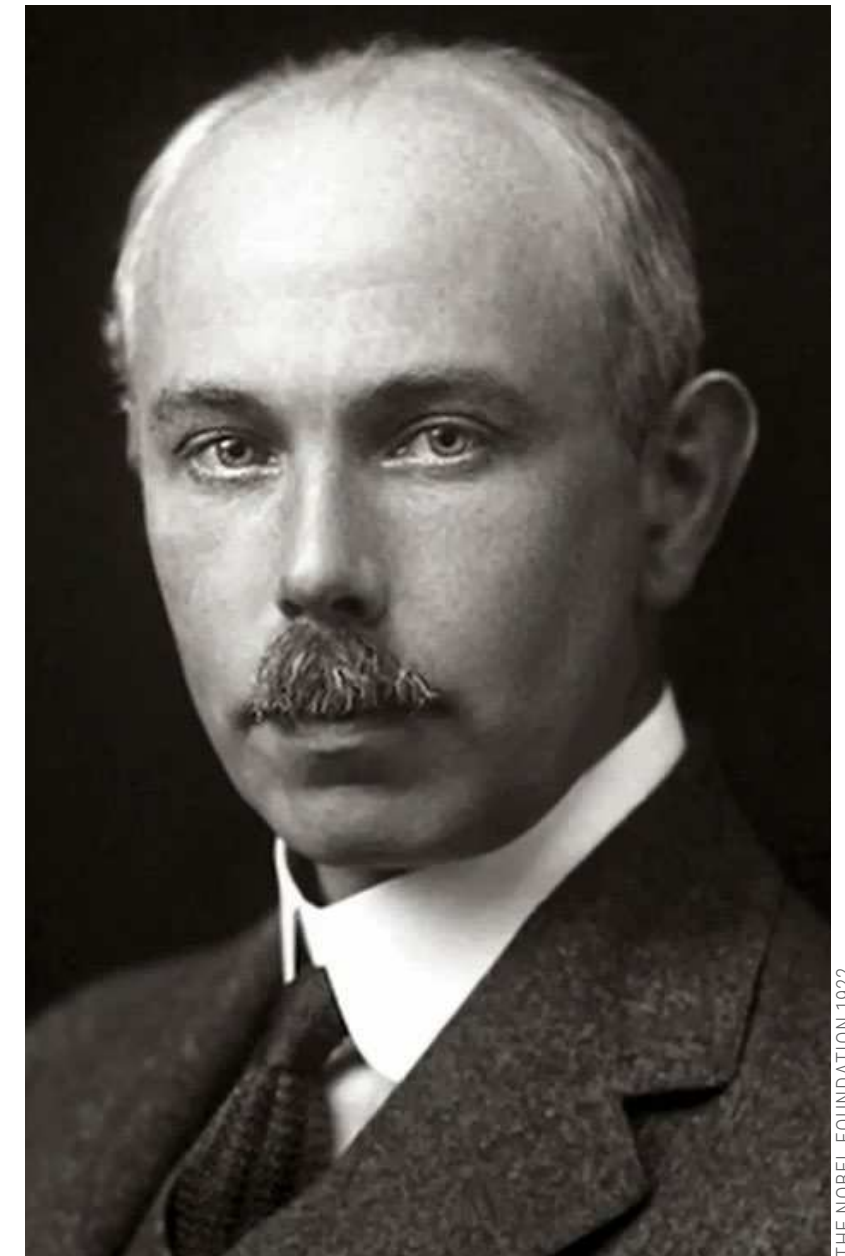
nach seiner Meinung freie Neutronen im Stern schwierig zu erzeugen sind, aber Deuteronen ( ${}^2\text{H}$ , der Atomkern des schweren Wasserstoffs, bestehend aus einem Proton und einem Neutron) für Kernreaktionen ähnlich wirksam seien, schlug er als Quelle für Deuterium eine reine Proton-Proton-Reaktion vor:



Diese Reaktion sollte im Labor versucht werden, durch Protonenbeschuss eines mit Wasserstoffgas gefüllten Röhrchens. Für die Reaktion des Deuteriums mit Helium im Stern ( ${}^4\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ ) schlug er vor, Radiumsalz als Quelle von Alphateilchen in schweres Wasser zu bringen und die vorhergesagte Ausstrahlung eines Gammaphotons ( $\gamma$ ) zu messen. Es ist bewundernswert, dass die jungen Kernphysiker bereits so früh versuchten, vermutete Vorgänge im tiefen, heißen Innern der Sterne durch Experimente im Labor nachzuprüfen!

### Entdeckung neuer Teilchen

James Chadwick (1891–1974) führte 1932 in Cambridge Versuche zu einem glücklichen Ende, die Walter Bothe (1891–1957, Physik-



THE NOBEL FOUNDATION 1922

### FRANCIS ASTON

**Mit selbst gebauten Massenspektrometern bestimmte der Engländer Francis Aston (1877–1945) die Atomgewichte der chemischen Elemente und identifizierte ihre Isotope. Für seine Forschungen erhielt er 1922 den Nobelpreis für Chemie.**

nobelpreis 1954) in Gießen und Irene und Frederic Joliot-Curie (Nobelpreis für Chemie 1935) in Paris in den beiden Jahren vorher unternommen hatten. Bei der Bestrahlung von Beryllium mit Alphateilchen entstand eine unbekannte Ausstrahlung hoher Durchdringungskraft, für welche die beiden wegbereitenden Forschergruppen keine überzeugende Erklärung fanden. Sie hatten unglücklicherweise nicht an Neutronen gedacht, deren Existenz Rutherford bereits seit Jahren vermutete. In dessen Labor untersuchte Chadwick weiter und deutete die energiereiche Strahlung richtig: Mit dem Neutron hatte er einen weiteren Baustein der Atomkerne gefunden, geringfügig schwerer als das Proton, aber elektrisch neutral. Er erhielt dafür 1935 den Physiknobelpreis. Die Entdeckung des Neutrons sollte bald von überragender Bedeutung für das Verständnis der Energieerzeugung der Sterne werden. Dass sogar ganze Sterne aus Neutronen bestehen könnten, vermutete Fritz Zwicky (1898–1974) schon 1937.

Ebenfalls im Jahr 1932 sorgte ein weiteres kernphysikalisches Experiment in Cambridge für Aufsehen. Mit einem Teilchenbeschleuniger für 100 000 Volt konnten energiereiche Protonen auf Lithium ge-

schoßen werden. Dabei entstanden zwei Heliumkerne von insgesamt geringerer Masse als die der Ausgangskerne von Lithium und Wasserstoff zusammen. Die Massendifferenz ging als Energie in die hohe Geschwindigkeit der Heliumkerne. Damit war erstmals experimentell nachgewiesen, dass Elementumwandlungen unter Energiegewinn jedenfalls bei leichten Kernen möglich sind.

Am gleichen Ort und im gleichen Jahr 1932 wurden bei Nebelkammeruntersuchungen der kosmischen Strahlung die Spuren eines weiteren neuen Teilchens, des Positrons, entdeckt, das dieselbe Masse hat wie das Elektron, aber eine positive Ladung. Zeitgleich hatte Carl Anderson (1905–1991) in Kalifornien in einem ähnlichen Versuch ebenfalls Spuren eines Positrons gefunden. Da er seine Ergebnisse etwas schneller veröffentlicht hatte als die gründlichen Cambridge-Forscher, wurde der 31-jährige Anderson 1936 mit dem Nobelpreis für Physik geehrt. Mit dieser Entdeckung war ein erstes Antiteilchen gefunden, wie vom jungen Engländer Paul Dirac (1902–1984) im vorangegangenen Jahr erwartet. Das neue Positron machte auch eine der bisher verfolgten Überlegungen

entbehrlich, nach der die Energieerzeugung in Sternen durch Zerstrahlung der sehr ungleichen Partner Proton und Elektron erfolge. Jetzt wurde klar, dass Elektronen und Positronen die passenden, aber massearmen Partner sind, die beim Zusammentreffen sofort zu zwei Gamma-Photonen zerstrahlen (Paarvernichtung). Umgekehrt kann ein nichtmaterielles, nichtgeladenes Photon im starken Feld eines Atomkerns zwei materielle Teilchen, ein Elektron und ein Positron, erzeugen (Paarbildung). Damit war die 1905 von Einstein erdachte Äquivalenz von Masse und Energie experimentell bewiesen.

## **Galaxienflucht und Weltalter**

Die mit dem frühen Trugbild einer Proton-Elektron-Zerstrahlung vereinbare lange Lebensdauer der Sterne von Billionen Jahren hatte bereits 1929 einen ersten Schlag erlitten: Die Entdeckung der Galaxienflucht durch Edwin Hubble (1889–1953) und das Modell eines nichtstationären Universums von Georges Lemaître (1894–1966) erlaubten die Rückrechnung auf einen Zeitpunkt, zu dem der Kosmos sehr klein gewesen sein muss. Mit Hubbles Wert, demzufolge die Fluchtgeschwindigkeit pro



Megaparsec Abstand um 500 Kilometer pro Sekunde zunimmt, ergab sich ein Weltalter von ungefähr zwei Milliarden Jahren, zu dem alles noch dicht beieinander war. (Der heutige Wert der Hubble-Konstante beträgt 70 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec, und das Weltalter folgt zu rund 13 Milliarden Jahren). Und auch den erwähnten Ableitungen einer langen Zeitskala aus Sternbewegungen wurde durch eine umfassende Untersuchung von Bart Bok vom Harvard Observatory 1936 der Boden entzogen: In Jeans' Rechnungen sei die Rotation des Milchstraßensystems nicht einbezogen. Es sei eher umgekehrt: Sternpaare entstehen mit elliptischen Bahnen und erhielten durch Gezeitenkräfte mit zunehmendem Alter eher kreisförmige Bahnen, Sternhaufen lösten sich spätestens nach wenigen Milliarden Jahren auf.

Damit war Mitte der 1930er Jahre der Boden bereitet, um über die Energieerzeugung in Sternen neu nachzudenken. Zusammengefasst:

- Die sich stürmisch entwickelnde Kernphysik hatte zur Entdeckung neuer Elementarteilchen geführt. Im Labor wurden Experimente möglich, die eine genauere

Beschreibung und theoretische Vorhersage von Kernreaktionen erlaubten.

- Beim Aufbau schwerer Elemente sollte Bindungsenergie der Atomkerne freigesetzt werden. Elementumwandlungen, wie in den Sternen vermutet, waren mit Teilchenbeschleunigern im Labor grundsätzlich bestätigt worden.
- Die Quantentheorie hatte den Schlüssel zur physikalischen Deutung der Spektren der Sterne geliefert, insbesondere zu deren hohem Wasserstoffanteil.
- Astronomische Messungen hatten eindeutige Beziehungen zwischen Leuchtkräften, Temperaturen, Massen und chemischer Zusammensetzung der Sterne verschiedenster Spektraltypen ergeben.
- Die Galaxienflucht zeigte ein Höchstalter der Welt an, viel kleiner als die bisher vermuteten Billionen Jahre.

Die »inneratomaren« Energiequellen der Sterne mussten also nur noch für die Zeitskala von Milliarden Jahren erklärt werden. Einige junge Physiker in Europa und den USA packten die Aufgabe nun an, wie wir im nächsten Teil berichten. ↩

(Sterne und Weltraum, Januar 2018)

Spektrum  
der Wissenschaft

KOMPAKT

AUCH ALS  
GEDRUCKTE  
AUSGABE  
ERHÄLTlich!

# DUNKLE MATERIE

Die Suche nach dem  
Unsichtbaren

Spurensuche | Auf der Jagd  
nach Mr. Axion

Quantenzustand | Dunkle Materie –  
eine Supraflüssigkeit?

Antimaterie | Neue Hoffnung  
für Materiejäger

HIER DOWNLOADEN

Print: 5,90 Euro • Download: 4,99 Euro



# THERMONUKLEARE PROZESSE



Junge Physiker  
enträtseln den Sonnenofen

von Dietrich Lemke



In den 1930er Jahren war die Kernphysik so weit fortgeschritten, dass sie sich auf die Vorgänge im unbeobachtbaren Innern von Sternen anwenden ließ. Unabhängig voneinander entschlüsselten Carl Friedrich von Weizsäcker und Hans Bethe die thermonuklearen Prozesse, mit denen Sterne Wasserstoff zu Helium verbrennen und dabei gewaltige Energiemengen freisetzen.

**I**n den ersten drei Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts war das Wissen über die Struktur der Materie explosionsartig angewachsen. Es war naheliegend, die Erkenntnisse der Atom- und Kernphysik aus dem Mikrokosmos auf den gesamten Kosmos und seine Rätsel anzuwenden. Mitte der 1930er Jahre haben deshalb mehrere in der aufblühenden Atom- und Quantentheorie ausgebildete junge Physiker auf beiden Seiten des Atlantiks versucht, die schnell anwachsenden Erkenntnisse über Atomkerne in Büchern und Übersichtsartikeln zusammenzufassen.

Bereits als 24-Jähriger hatte Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) in einem Buch über »Die Atomkerne« das gesamte einschlägige Wissen der Zeit dargestellt. Überraschend findet sich in seiner Monografie ein anwendungsnahes Kapitel zu

möglichen Kernumwandlungen in Sternen, mit der Bemerkung »... daß die heutigen Kenntnisse über die Möglichkeiten und Wirkungsquerschnitte der Kernreaktionen hinreichen, um das Problem der Energieerzeugung im Sterninneren zu lösen. Die Häufigkeitsverteilung der Elemente müßte als Ergebnis der zur Energieerzeugung notwendigen Umwandlungen folgen.«

Bereits als Schüler hatte Weizsäcker starkes Interesse an der Astronomie gezeigt und sogar eine Berufswahl in dieser Wissenschaft erwogen. Durch seinen akademischen Lehrer Werner Heisenberg kam er dann zur theoretischen Physik, insbesondere zur zeitgemäßen Kernphysik. Ein Jahr nach dem Erscheinen seines Buchs folgte Weizsäcker seiner eigenen darin ausgesprochenen Empfehlung: Der 25-Jährige, inzwischen am Kaiser-Wilhelm-Institut für

AUF EINEN BLICK

## Prozesse im Inneren der Sterne

- 1 Unter den extremen Bedingungen im Innern von Sternen wandeln sich leichte Atomkerne in schwerere um und setzen dabei gewaltige Energiemengen frei.
- 2 Carl Friedrich von Weizsäcker in Deutschland und Hans Bethe in den USA modellierten unabhängig voneinander die kernphysikalischen Reaktionsketten, die zum Aufbau der Elemente und zur Energiefreisetzung führen.
- 3 Erst 30 Jahre nach diesen bahnbrechenden Arbeiten wurde ihre Bedeutung durch das Nobelkomitee gewürdigt – durch die Verleihung des Nobelpreises für Physik an Hans Bethe.

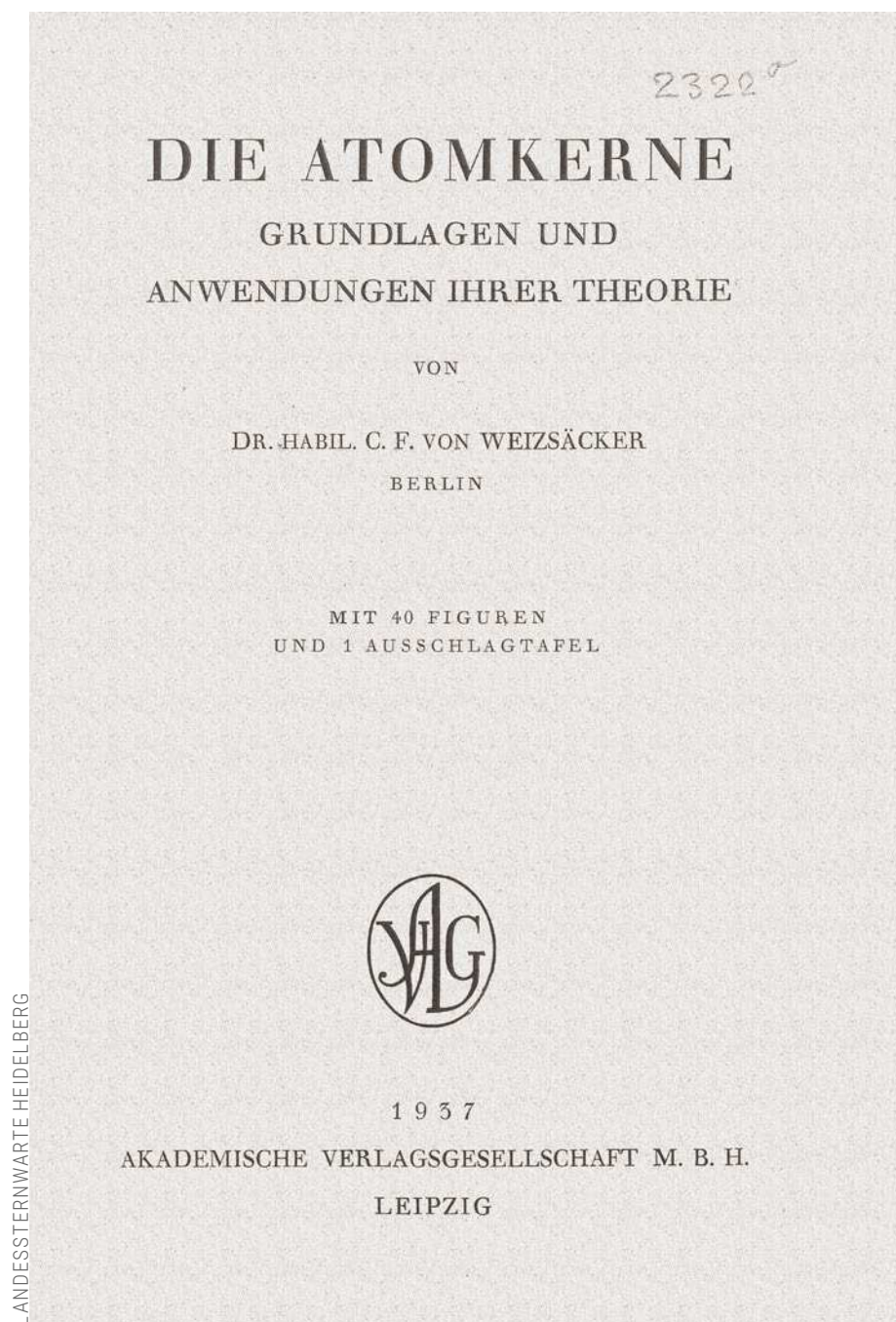
Physik in Berlin-Dahlem, verfasste einen Aufsatz zur Energieerzeugung und zu Elementumwandlungen in Sternen. Der Artikel erschien 1937 in der »Physikalische Zeitschrift« und erregte breite Aufmerksamkeit. Anknüpfend an die 1929 vorgelegten Überlegungen von Robert E. Atkinson und Friedrich Houtermans konnte von Weizsäcker bestätigen, dass auch mit dem neuesten Wissen zu künstlichen Kernumwandlungen und nach dem Auffinden von Neutron, Deuteron und Positron, die wichtigste Energiequelle der Sterne die Umwandlung von Wasserstoff in Helium ist. Das liefere durch Freimachung der Kernenergie bei der Sonne »in der Sekunde pro g ihrer Masse ungefähr 1 erg ... damit reicht der Energievorrat für  $3 \cdot 10^{11}$  Jahre zur Deckung der durch die Temperatur des Sterns bedingten Ausstrahlung«.

Von Weizsäcker nahm mutig an, dass anfangs der gesamte Stern aus Wasserstoff bestehe; die Arbeiten von Cecilia Payne legten das nahe. Er vertiefte sich in dieser Arbeit vor allem in die Entstehung der schweren Elemente und suchte deshalb nach Neutronen liefernden Reaktionen. Diese neutralen Teilchen können leichter in Atomkerne eindringen als Protonen, da

sie elektrisch nicht abgestoßen werden. Er betrachtete eine Vielzahl von aufbauenden Kernreaktionen, darunter solche mit ganz schnellen Neutroneneinfängen, die notwendig sind, um über schnell zerfallende radioaktive Zwischenkerne (mit Halbwertszeiten im Sekunden- und Minutenbereich) die schweren Elemente Thorium und Uran zu erzeugen. In seiner Aufbauhypothese nahm er an, dass sich die Temperatur im Innern des Sterns von selbst so reguliert, dass der Energie liefernde Aufbau leichter Elemente fortlaufend möglich ist.

Von Weizsäcker schlussfolgerte: »Wenn diese Vorstellung richtig ist, so ist der Stern eine Maschine, welche mit Hilfe der fre gemachten Kernenergien die zu ihrer Freimachung notwendigen äußeren Bedingungen automatisch gleichförmig aufrechterhält; er dürfte gleichzeitig die einzig mögliche Maschine dieser Art sein.«

Während der erste Teil seiner Aussage auch heute noch richtig ist, wurde der zweite Teil schnell in Frage gestellt: Schon wenige Jahre später arbeitete er im deutschen Uranprojekt am Bau eines Kernreaktors und skizzierte während des Zweiten Weltkriegs Baupläne für eine Kernwaffe. Unsicher bei Weizsäckers Theorie zum Element-



### »DIE ATOMKERNE«

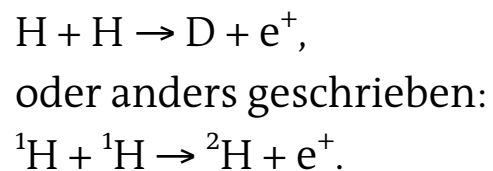
**Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) fasste bereits als 24-jähriger Assistent von Werner Heisenberg in Leipzig das Wissen über die damals hochaktuelle Kernphysik in dem Buch »Die Atomkerne« zusammen.**



aufbau blieb allerdings, wie es vom Helium mit der Massenzahl 4 weitergehen sollte, denn ein Element mit der Massenzahl 5 war unbekannt:  ${}^5\text{He}$  (zwei Protonen und drei Neutronen) oder  ${}^5\text{Li}$  (drei Protonen und zwei Neutronen) sind instabil.

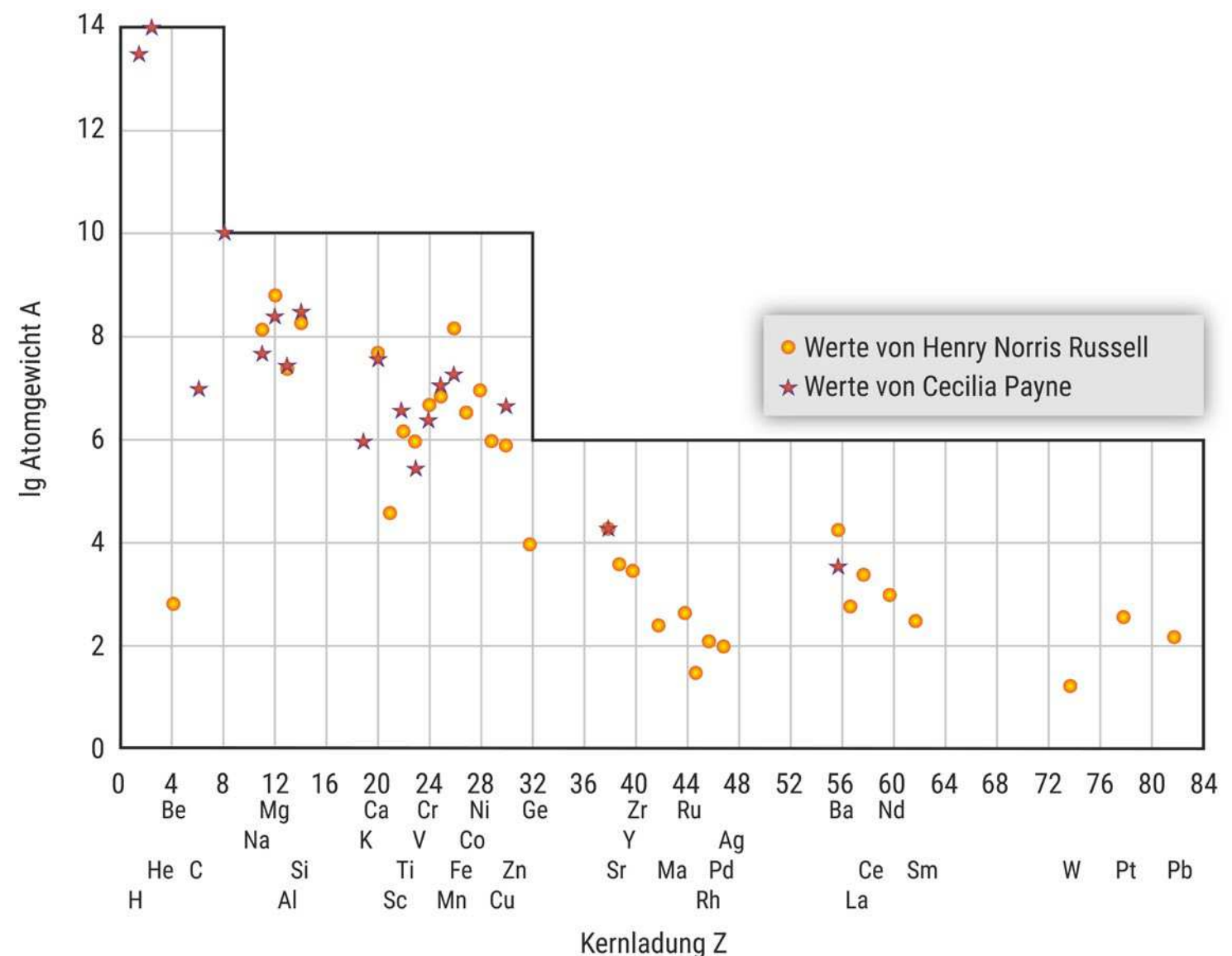
### Ein neuer Reaktionszyklus

Im Jahr 1938 teilte von Weizsäcker in einem zweiten Teil seines Aufsatzes »Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne« in der »Physikalische Zeitschrift« mit, dass in Bezug auf seine Arbeit aus dem Vorjahr »ein Teil der dort verwendeten hypothetischen Voraussetzungen nicht aufrechterhalten werden kann«. Zwar blieb er bei der Energieerzeugung durch den Aufbau leichter Elemente in den wasserstoffreichen Sternen. Die Reaktionen könnten mit der schon von Atkinson vermuteten Reaktion von zwei Protonen (Wasserstoffkernen H) miteinander beginnen und zunächst zu Deuterium (D) führen, unter Aussendung eines Positrons ( $e^+$ ):



## Energieerzeugung in Sternen

In den Jahren 1937 und 1938 legte Weizsäcker zwei wegweisende Arbeiten zur Energieerzeugung in Sternen vor. Für die Elementhäufigkeiten in Sternatmosphären verwendete er die neuen hohen Wasserstoff- und Heliumanteile, die Cecilia Payne 1924 entdeckt hatte (Sterne). Die übrigen Werte (Punkte) stammen von Henry Norris Russell, der anfangs den hohen Wasserstoffwerten misstraute und erdähnliche Häufigkeiten annahm.

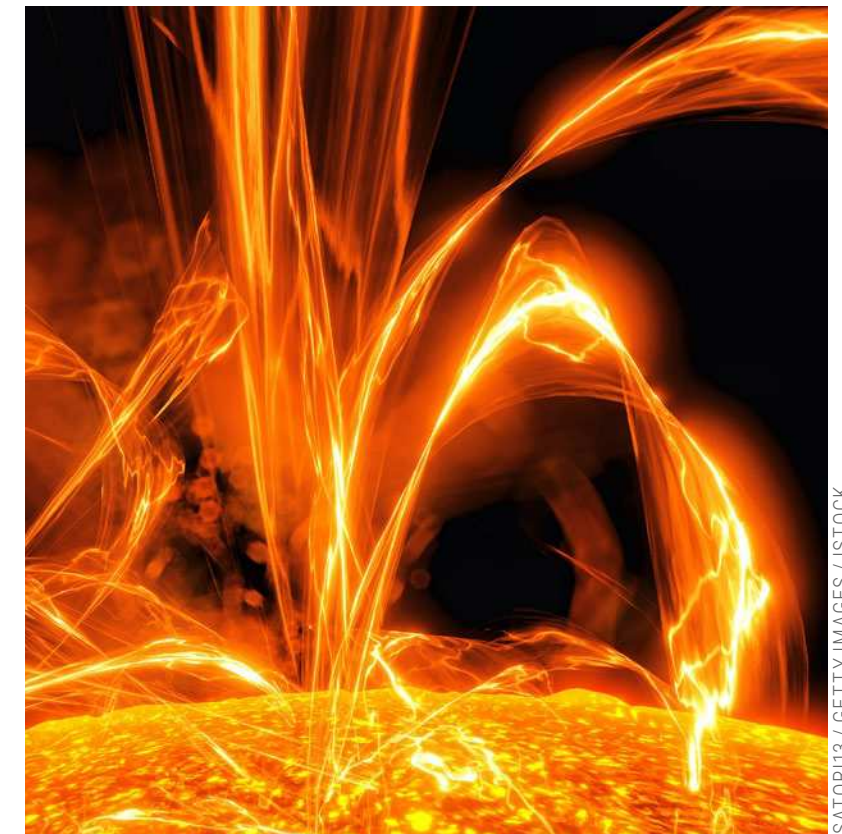


Allerdings sei die Entstehung der schweren Elemente nun nicht mehr durch fortlaufende Neutronenanlagerungen an immer schwerere Kerne zu suchen. Diese schweren Kerne, so vermutete er jetzt, seien »im Stern von Anfang an vorhanden«! Erzeugt worden seien sie im frühen Kosmos durch eine »große ursprüngliche Zusammenballung der Materie, die vielleicht aus reinem Wasserstoff bestand ... Wie groß darf man sich diese erste Zusammenballung denken? Die Theorie setzt ihrer Masse keine obere Grenze, und unsere Phantasie hat die Freiheit, sich nicht nur das Milchstraßensystem, sondern den ganzen uns bekannten Kosmos in ihr vereint zu denken.« Kernreaktionen in diesem ursprünglichen riesigen »Stern« führten bei hohen Temperaturen und Dichten zur Entstehung schwerer Elemente. Wenn dabei ein Prozent der Ruheenergie der Materie in Energie umgewandelt wird, explodiert dieser »Stern«, und seine Trümmer fliegen mit einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit auseinander. Man beobachte solch hohe Geschwindigkeiten bei der kürzlich entdeckten Fluchtbewegung der Spiralnebel und solle daher, so von Weizsäcker, mit der Möglichkeit rechnen, »daß diese Bewe-

gung in einer anfänglichen Katastrophe der betrachteten Art ihre Ursache hat«.

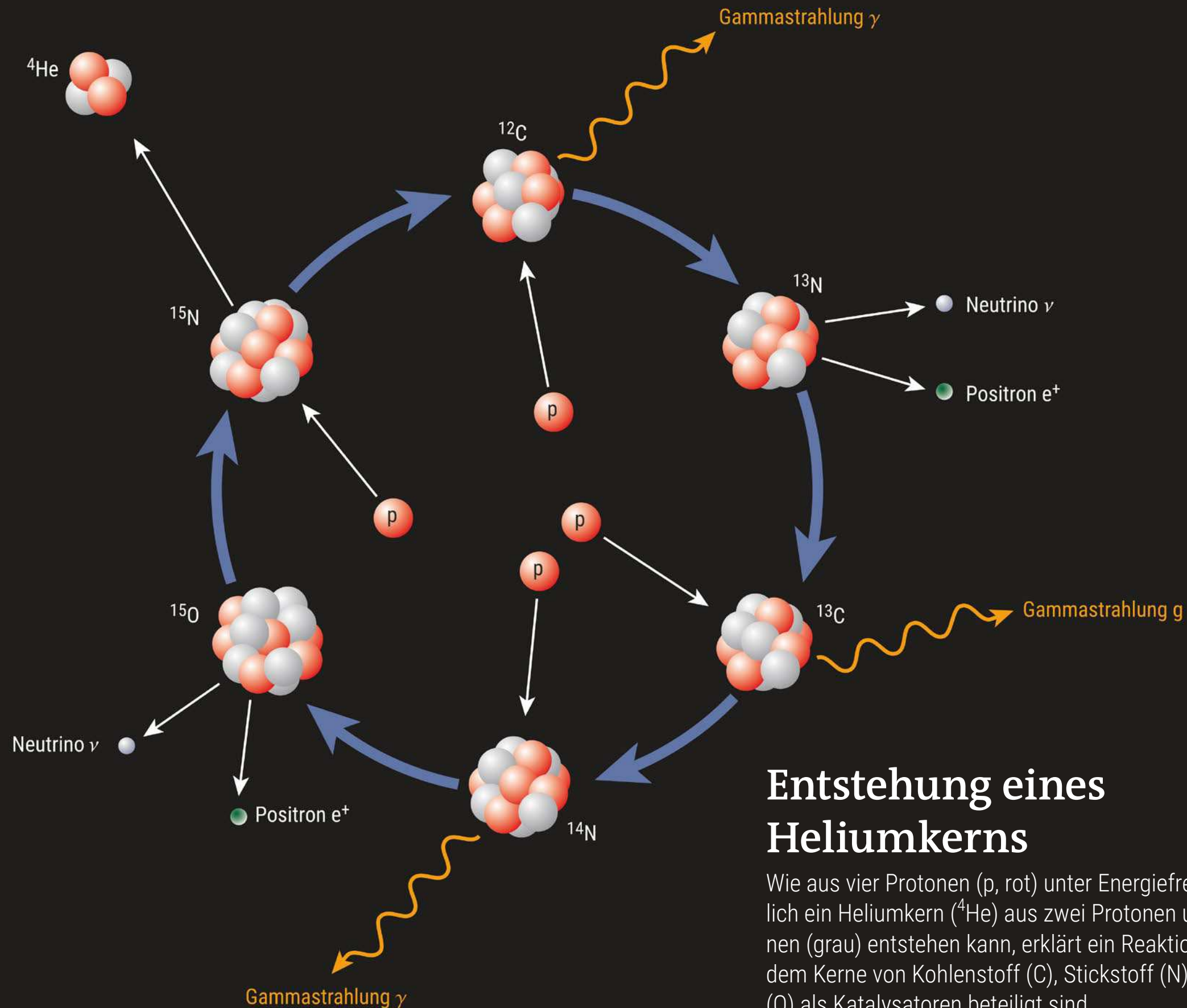
Da durch diesen an den Urknall erinnernden Vorgang schwerere Elemente, wie etwa Kohlenstoff, nun von Anfang an in Sternen vorhanden sind, schlägt von Weizsäcker einen weiteren Energie erzeugenden Ablauf vor, bei dem ebenfalls aus Wasserstoff Helium aufgebaut wird: Der neu erdachte Ablauf beginnt mit der Anlagerung eines Wasserstoffkerns an den im Stern schon vorhandenen Kohlenstoff und führt zur Bildung eines Stickstoffkerns, also  $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N}$ . Nach fünf weiteren Reaktionsschritten mit drei weiteren Protoneneinfängen entsteht schließlich unter Energiegewinn ein Heliumkern  $^4\text{He}$ . Der Kohlenstoff bleibt bei diesem Kreislauf vollständig erhalten, er hat lediglich als Katalysator gewirkt.

Diesen Vorgang hat von Weizsäcker gegenüber der Proton-Proton-Reaktion bevorzugt, da bei ihm die Energieerzeugung eine stärkere Temperaturabhängigkeit zeigt und er damit für den Erhalt der Zentraltemperatur und der Stabilität eines Sterns geeigneter erscheint. Dieser neue Reaktionszyklus wurde 1938 in der »Physikalische Zeitschrift« erstmals veröffent-



In der Sonne tragen die Proton-Proton-Kette und der CNO-Zyklus zur Energiefreisetzung bei





## Entstehung eines Heliumkerns

Wie aus vier Protonen ( $p$ , rot) unter Energiefreisetzung letztlich ein Heliumkern ( $^4\text{He}$ ) aus zwei Protonen und zwei Neutronen (grau) entstehen kann, erklärt ein Reaktionszyklus, an dem Kerne von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) als Katalysatoren beteiligt sind.

licht; in einer Fußnote dort merkt von Weizsäcker an: »Durch Herrn Gamow habe ich erfahren, daß Bethe neuerdings denselben Zyklus quantitativ untersucht hat.« Offensichtlich haben die beiden Physiker tatsächlich zeitgleich und unabhängig voneinander ähnliche Ideen gehabt, auch wenn es durch wissenschaftliche Besuchsreisen einen gewissen Gedankenaustausch gegeben hat.

### »Größter Erfolg der theoretischen Astrophysik seit 15 Jahren«

Die Arbeiten von Weizsäckers von 1937/38 in Berlin haben Gamow in den USA bewogen, der von ihm jährlich veranstalteten Konferenz zur theoretischen Physik an der Universität Washington 1938 den Titel »Kernprozesse als Quelle der stellaren Energie« zu geben. Als dortiger Professor für Physik lud er die bedeutendsten Kernphysiker und Astrophysiker ein. Gamow und sein enger Kollege Edward Teller wollten unbedingt Hans Bethe als Teilnehmer gewinnen, der nach seiner Emigration aus Deutschland jetzt als Professor für Physik an der Cornell University tätig war.

Hans Bethe (1906–2005) hatte bei Sommerfeld in München promoviert und nach

mehreren Auslandsstudien an den Universitäten Stuttgart, Frankfurt am Main und Tübingen eine aussichtsreiche akademische Laufbahn begonnen. Die nationalsozialistischen Rassengesetze führten zu seiner Entlassung, weil seine Mutter die Tochter eines jüdischen Medizinprofessors war. Bethe verließ daraufhin Deutschland noch 1933 und ragte bald auch in seiner neuen amerikanischen Heimat durch Aufsehen erregende Arbeiten zur theoretischen Kernphysik heraus. Als 30-Jähriger verfasste er drei tiefeschürfende Aufsätze für die »Reviews of Modern Physics«, die das gesamte zeitgemäße Wissen zur Kernphysik zusammenfassten und die schnell als »Bethe-Bibel« Berühmtheit erlangten.

Mit der Astrophysik aber nicht sonderlich vertraut, zögerte Bethe zunächst, an der Washingtoner Konferenz teilzunehmen. Er ließ sich jedoch von den ebenfalls eingeladenen Astrophysikern Bengt Strömgren (1908–1987) und Subrahmanyan Chandrasekhar (1908–1995) überzeugen, dass der innere Aufbau der Hauptreihensterne inzwischen gut bekannt sei (35 Gewichtsprozent Wasserstoff, 20 Millionen Grad Zentraltemperatur, 80 Gramm pro Kubikzentimeter Dichte). Noch während

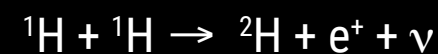
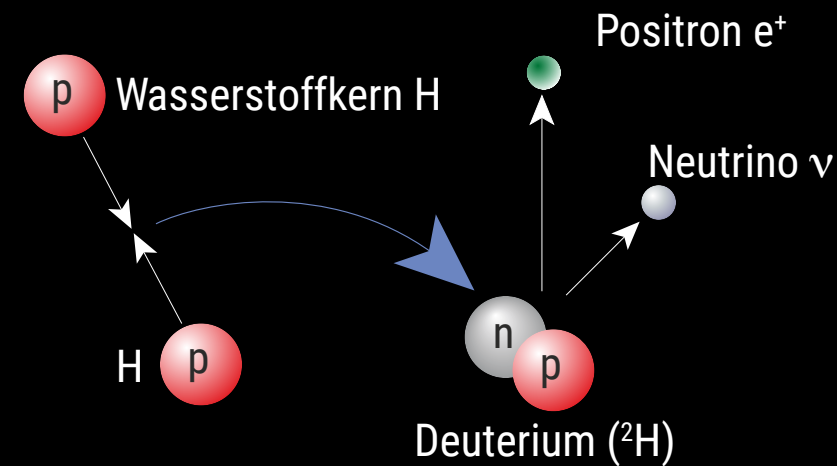
der Tagung verabredet, haben Bethe und C. L. Critchfield, ein Student von Gamow und Teller, wenige Wochen später »Die Bildung von Deuteronen durch Protonen-Verbindung« quantitativ bearbeitet und im Sommer 1938 in der Fachzeitschrift »Physical Review« veröffentlicht. Wie von Weizsäcker gingen sie davon aus, dass die Reaktion  $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+$  am Beginn des Aufbaus chemischer Elemente im Stern steht. Obwohl diese Reaktion bisher kernphysikalisch als zu langsam galt, gelangten sie zu der wichtigen Entdeckung, dass die Reaktion zur gemessenen Ausstrahlung der Sonne von 2 erg pro Gramm und Sekunde doch ausreicht. Denn dieser langsamen Reaktion folgen schnellere: So ist der anschließende Protoneneinfang durch einen Deuteriumkern ( $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$ ) um  $10^{18}$  Mal wahrscheinlicher als die Startreaktion. Weitere schnelle Reaktionen führen vom  $^3\text{He}$  zu  $^4\text{He}$ , dem Endprodukt in der Energieerzeugungskette.

Eindrucksvoll bei dieser Arbeit ist die quantenmechanische Behandlung der Reaktionsrate für die Proton-Proton-Reaktion. Berechnet werden mussten die Wahrscheinlichkeit für den Zusammenstoß zweier Protonen und die Überwin-

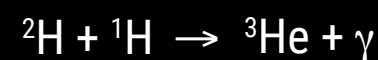
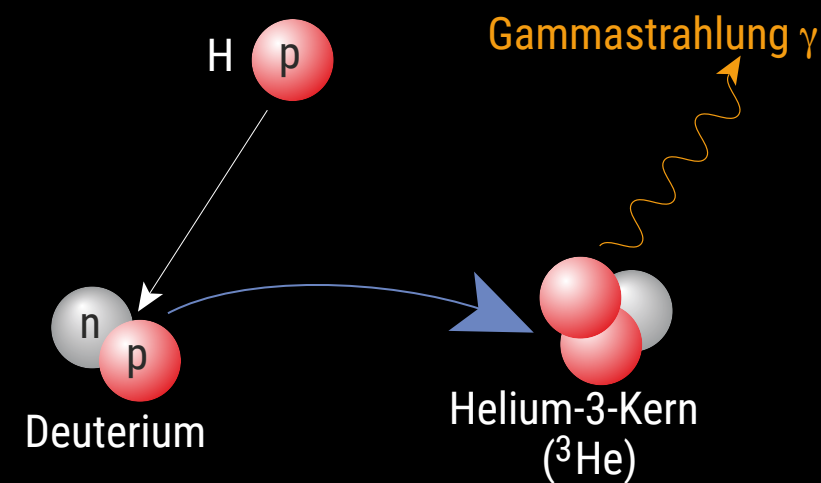
# Die Proton-Proton-Kette

Letzte Zweifel am tatsächlichen Ablauf dieser Reaktionen in der Sonne wurden ab 1968 durch Experimente zum Nachweis der Neutrinos aus thermonuklearen Reaktionen ausgeräumt. Neutrinos verlassen wegen ihrer sehr geringen Wechselwirkung mit Materie die Sonne fast ungehindert. Sie wurden beispielsweise mit dem Chlorexperiment von Raymond Davis (Nobelpreis 2002) nachgewiesen, allerdings mit einem geringeren Fluss als von der Theorie vorhergesagt. Das »Rätsel der fehlenden Sonnen-Neutrinos« wurde durch die Entdeckung der Neutrino-Oszillationen gelöst (Nobelpreis 2015). Damit wurde schließlich das Standard-Sonnenmodell bestätigt.

Durch die Verschmelzung von Wasserstoffkernen (Protonen) entsteht in mehreren Schritten unter Energiegewinn Helium:



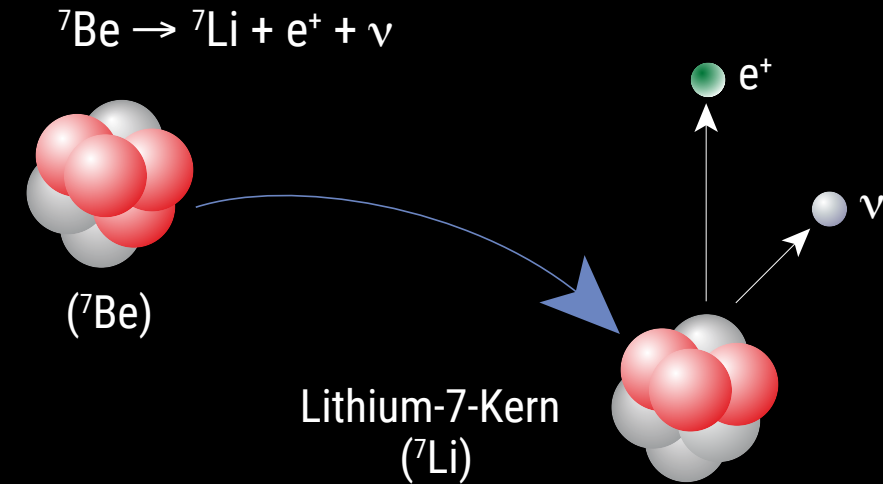
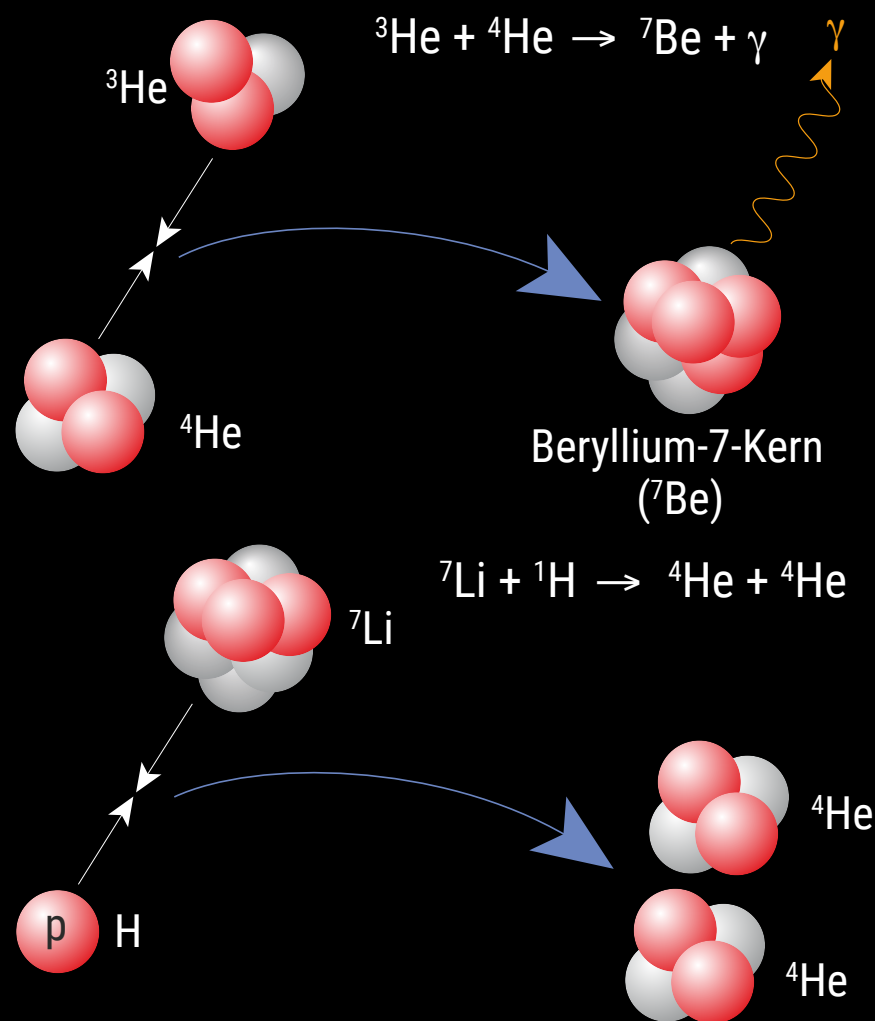
Zwei Protonen (Wasserstoffkerne H) verschmelzen zu einem Deuteriumkern, dabei entstehen auch ein Positron (e⁺) und ein Neutrino (ν)



Aus dem Deuteriumkern und einem weiteren Proton entstehen ein Helium-3-Kern und ein Gammaquant (γ)

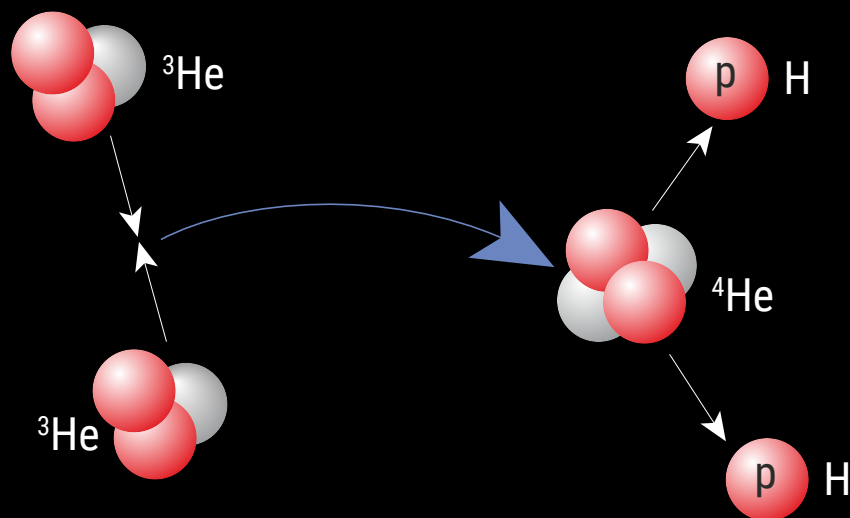


Weitere Schritte sind nach Hans Bethe notwendig, um aus  $^3\text{He}$  den stabilen Helium-4-Kern zu bilden:



Schließlich sind aus  $2 \times 4$  Protonen unter Energiegewinn zwei Helium-4-Kerne entstanden.

Von Bethe noch nicht beschrieben, aber inzwischen als wichtig erkannt ist die Reaktion:



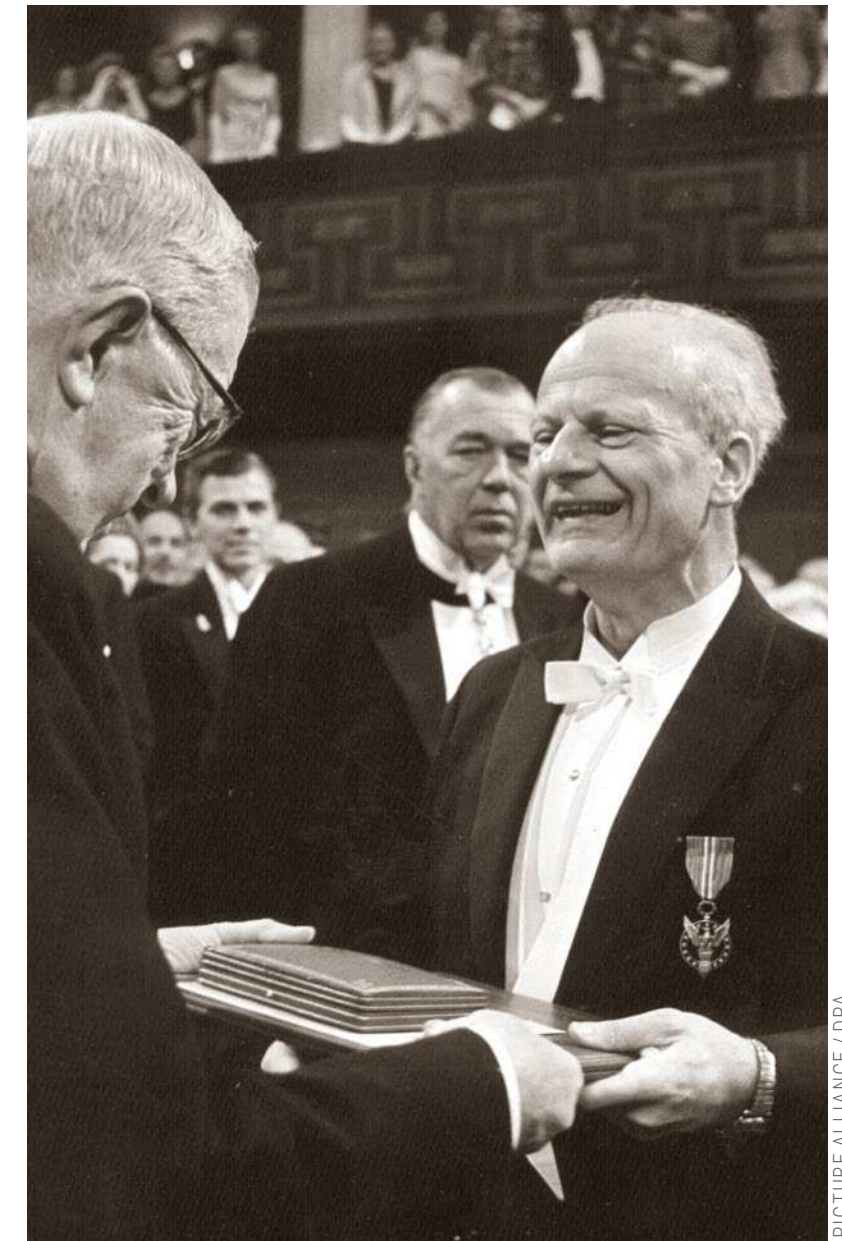
Um diesen Prozess zu ermöglichen, müssen die ersten beiden Teilschritte der Proton-Proton-Kette zweimal ablaufen.

dung der gegenseitigen Potenzialwälle, dann die eher geringe Wahrscheinlichkeit für den Beta-Plus-Zerfall mit der Emission eines Positrons, und das alles unter den extremen Bedingungen des Sterninnern. Mit der von ihnen ebenfalls ermittelten Temperaturabhängigkeit der Energieerzeugungsrate  $\epsilon \sim T^{3,5}$  konnten Critchfield und Bethe folgern, dass »die Proton-Proton-Reaktion die Energieerzeugung der Sonne größenordnungsmäßig richtig erklärt« und dass »der Prozess die hauptsächliche Energiequelle in Sternen ist, die masseärmer als die Sonne sind«. Diese Reaktion würde allerdings wegen ihrer vergleichsweise geringen Temperaturabhängigkeit nicht die sehr hohen Leuchtkräfte der etwas massereicheren Sterne mit etwas höherer Zentraltemperatur erklären können. Bereits in dieser gründlichen Abhandlung wird eine weitere Arbeit angekündigt, in welcher der Protoneneinfang durch Kohlenstoff und Stickstoff eine wichtige Rolle spielen würde.

Und nur wenige Monate nach der Washingtoner Konferenz hatte der 32-jährige Bethe »Die Energieproduktion in Sternen« in einem umfangreichen und tiefeschürfenden Aufsatz ausgearbeitet. Im September

1938 bei »Physical Review« eingereicht, bat er den Herausgeber kurze Zeit später, mit der Veröffentlichung etwas zu warten. Denn sein Student Robert Marshak (1916–1992) hatte inzwischen herausgefunden, dass die New Yorker Akademie der Wissenschaften einen Preis für die beste Arbeit zur Energieerzeugung in Sternen vergeben wollte – vorausgesetzt, sie sei noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht worden. Bethe gewann den Preis von 500 US-Dollar, gab 50 US-Dollar als »Finderlohn« an den Studenten und 250 US-Dollar als »Spende« an die deutsche Regierung, um die Emigration seiner Mutter in die USA zu sichern.

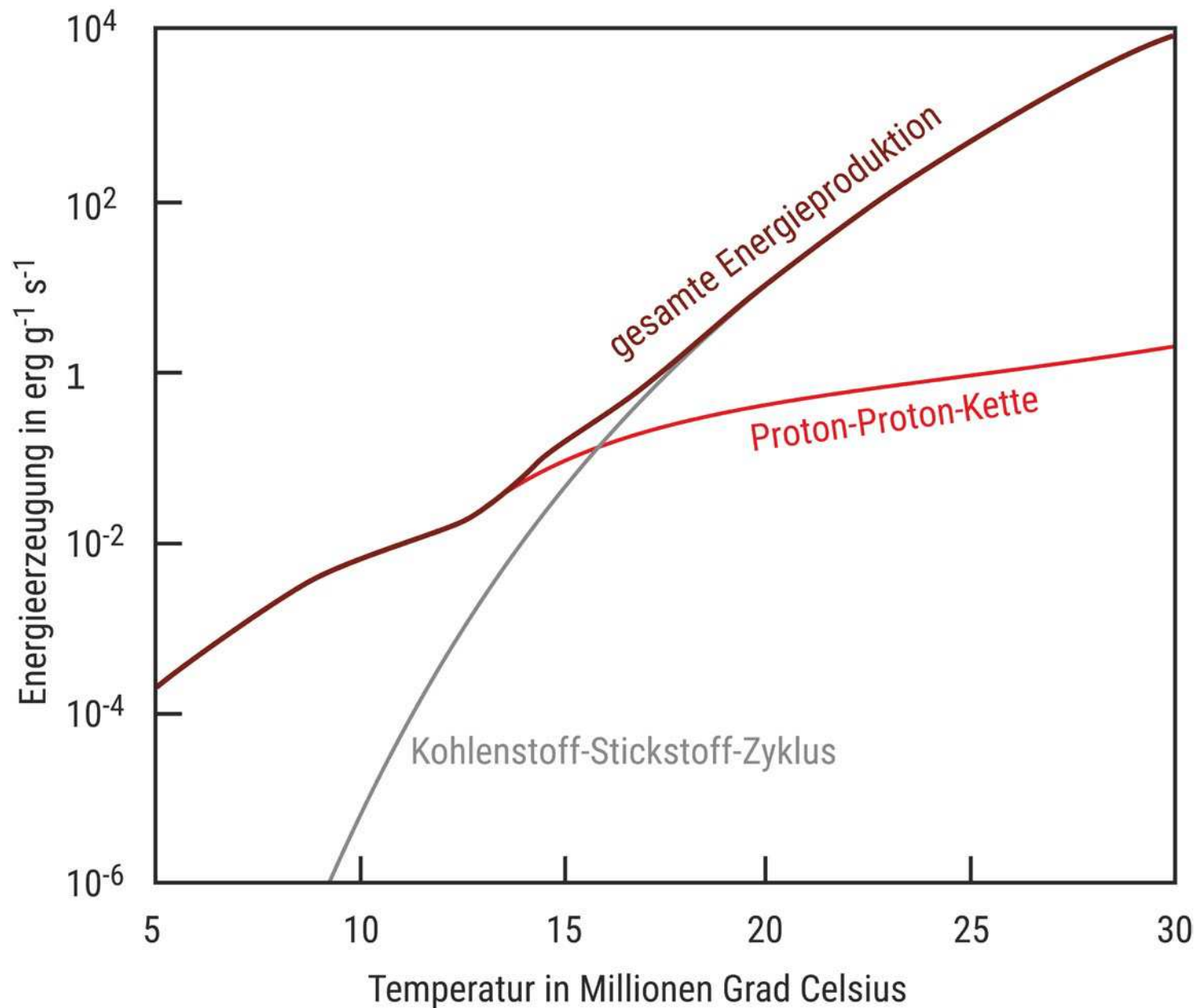
Bethes bahnbrechende Arbeit erschien schließlich in der Ausgabe der »Physical Review« vom März 1939 mit der stolzen Fußnote, dass sie 1938 mit dem Morrison-Preis der New Yorker Akademie ausgezeichnet worden sei. Herzstück war der schon angekündigte Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus, der hier gründlich analysiert wurde. Er sah auf den ersten Blick genauso aus wie der von Weizsäcker im Jahr zuvor veröffentlichte, auch hier diente der Kohlenstoff als Katalysator, um aus vier Protonen einen Heliumkern aufzubauen. Bethe aber ging weit darüber hinaus. Er war in der Lage, genaue Wir-



## HANS BETHE

**Hans Bethe (1906–2005) veröffentlichte seine wegweisenden Arbeiten über die Fusionsreaktionen in Sternen in den Jahren 1938 und 1939. 1967 wird ihm der Nobelpreis für Physik vom schwedischen König verliehen. Er beschrieb diese Zeit als »die glücklichsten Monate meines Lebens«.**

# Energieerzeugung in Sternen



Hans Bethe legte 1939 seine Berechnungen zur Energieerzeugung in Sternen vor: Dargestellt sind die Beiträge der Proton-Proton-Kette (rot) und des Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus (grau) zur gesamten freigesetzten Energie (braun) in Abhängigkeit von der Zentraltemperatur des Sterns.

kungsquerschnitte für alle Reaktionen zu berechnen und konnte die Reaktionsraten für jeden der sechs Prozessschritte angeben: »Ein  $^{12}\text{C}$ -Kern im Sonnenzentrum fängt ein Proton einmal in  $2,5 \cdot 10^6$  Jahren ein, ein  $^{14}\text{N}$  einmal in  $5 \cdot 10^7$  Jahren. Diese Zeiten sind kurz im Vergleich mit dem Alter der Sonne. Der Zyklus wurde in der Lebenszeit der Sonne mehrfach durchlaufen.« Bethe konnte ferner die wichtige Temperaturabhängigkeit des gesamten Zyklus abschätzen. Danach steigt die Energieerzeugungsrate  $\epsilon$  stark mit der Temperatur an:  $\epsilon \sim T^{18}$ . Bethe berechnete für mehr als 30 denkbare Kernreaktionen in Sternen die Reaktionsraten, konnte viele davon als unwahrscheinlich ausschließen und so zeigen, dass »die wichtigste Energiequelle in gewöhnlichen Sternen die Reaktion von Kohlenstoff und Stickstoff mit Protonen ist«. Dieser Vorgang würde bei der Sonne für eine Lebensdauer von 12 Milliarden Jahren ausreichen, das sei lang gegen das (damals aus der Galaxienflucht abgeleitete) Alter der Welt von zwei Milliarden Jahren. Damit seien alle gewöhnlichen Sterne heute jung, hätten noch einen hohen Wasserstoffanteil, und das erkläre auch ihre Lage auf einer Hauptreihe und die Masse-Leuchtkraft-Beziehung.



Massearme Sterne gewinnen nach Bethe ihre Energie hauptsächlich mit der Proton-Proton-Kette, massereichere dagegen mit dem Kohlenstoffzyklus, bei der Sonne tragen beide Prozesse bei. Schwere Elemente können nach Bethes Berechnungen in den Sternen nicht aufgebaut werden, dazu fehlen einfach ausreichend Neutronen liefernde Vorgänge. Der Heliumkern galt gewissermaßen als unverwundbar, an ihn kann auf Dauer kein weiteres Teilchen angebaut werden. Bethe vertiefte sich deshalb nicht in Spekulationen über die Entstehung der schweren Elemente, er nahm als Arbeitshypothese einfach an, »sie seien von Anfang an vorhanden gewesen«. Damit folgte er von Weizsäcker, der aber seine neue Idee ihres Entstehens in einer »Urexpllosion« erörtert hatte. Bethe spekulierte auch nicht über Riesensterne, da deren innerer Aufbau damals nicht sicher bekannt war. Seine auch heute noch fast vollständig gültige Theorie beschränkte sich auf die Hauptreihensterne, die wohl 90 Prozent aller Sterne umfassen.

Zu den ebenfalls erstaunlichen Punkten seiner wegweisenden Arbeit zählt auch die Betrachtung des geringen Energieverlusts durch das Entweichen der hypothetischen,

bei Betazerfällen entstehenden Neutrinos (beziehungsweise Antineutrinos) aus dem Stern. Ebenso ein Ausblick auf einen Drei-Alpha-Prozess bei noch viel höheren Temperaturen (von mehr als 100 Millionen Kelvin), in dem unter Energiegewinn aus drei Alphateilchen ( $^4\text{He}$ -Kernen) ein Kohlenstoffkern  $^{12}\text{C}$  entstehen kann, das Heliumbrennen.

Der US-amerikanische Astrophysiker Henry Norris Russell war von Bethes umfassender, präziser Arbeit so beeindruckt, dass er sie als »größten Erfolg der theoretischen Astrophysik seit 15 Jahren« feierte, seit der Entdeckung der Galaxienflucht.

### Ein Nobelpreis für Astronomie?

Weltweit betrachteten die Astrophysiker das Rätsel um die Energiequellen der Sterne nun als weitgehend gelöst. Das Sonnenfeuer interessierte zahlreiche Menschen auch außerhalb der Astronomie und in aller Welt, wie viele populäre Veröffentlichungen und Vorträge aus jener Zeit bezeugen. Dieser Durchbruch im Verständnis unserer Lebensgrundlage und unserer Zukunft hätte gewiss die höchste wissenschaftliche Auszeichnung verdient. Aber der Nobelpreis, für den sowohl Bethe als

auch von Weizsäcker vorgeschlagen wurden, wurde nicht vergeben – jedenfalls lange nicht. Das war erstaunlich, wurden doch die Preise meist zeitnah nach wichtigen Entdeckungen verliehen. Warum also wurde diese große Entdeckung so lange nicht preisgekrönt, und wer hätte ausgezeichnet werden sollen?

Alfred Nobel hatte testamentarisch die Vergabe der jährlichen Auszeichnungen an fünf Preisträger (Physik, Chemie, Medizin oder Physiologie, Literatur, Frieden) verfügt, die »im vergangenen Jahr der Menschheit den größten Nutzen erbracht haben«. Mathematik und Astronomie (damals häufig Himmelsmathematik) gehörten nicht zu den erwähnten Gebieten. Warum Nobel sie nicht würdigte, darüber wurde viel gemutmaßt: Seine Frau sei mit einem Mathematiker durchgebrannt (Nobel war nicht verheiratet), oder eine von ihm angebetete Mathematikerin (Maria Kowalewskaja) habe sein Werben nicht erhört, oder der bekannte, aber ihm sehr unangenehme Mathematiker (Gösta Mittag-Leffler) aus Stockholm sollte den Preis keinesfalls erhalten und so weiter.

Glaubwürdiger ist wohl, dass der praktisch eingestellte Nobel die Mathematik

nur als Hilfsmittel für die von ihm höher bewerteten Naturwissenschaften betrachtete. Streng ausgelegt, reichte die theoriegestützte Erklärung der stellaren Energiequellen – da ohne unmittelbaren praktischen Nutzen – nicht zur Anwartschaft auf den Nobelpreis. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse von der Energieerzeugung in Sternen auf ein Fusionskraftwerk war nur eine sehr ferne Hoffnung. Und so ganz sicher war man sich wohl auch nicht, ob die theoretisch-physikalisch betrachteten Vorgänge tief im experimentell Unzugänglichen der Sterne schon richtig wiedergegeben seien. Da empfahl es sich zunächst einmal abzuwarten. So ist beispielsweise Einstein auch nicht für seine epochemachende, aber mathematiklastige Relativitätstheorie ausgezeichnet worden, sondern für den anschaulicheren elektrischen Photoeffekt.

»Er hat es besser gemacht«

Weizsäcker wäre ein erster Anwärter auf den Nobelpreis gewesen. Mit seinem Buch »Die Atomkerne« und den beiden Veröffentlichungen »Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne« von 1937 und 1938 hatte er die entscheidende Phase der Klärung eingeleitet. Er folgte der Idee, dass

Physik-Nobelpreise für astrophysikalische Entdeckungen		
Jahr	Preisträger	Entdeckung
1936	Victor Hess	kosmische Strahlung
1967	Hans Bethe	Energieerzeugung in Sternen
1974	Martin Ryle Antony Hewish	Radioastronomie (Apertursynthese) Pulsare
1978	Arno Penzias Robert W. Wilson	kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
1983	Subrahmanyan Chandrasekhar William A. Fowler	Theorie der Sterne (Weiße Zwerge) Kernreaktionen für Bildung schwerer Elemente
1993	Russell Hulse Joseph H. Taylor	Pulsar in Doppelsternsystem (indirekter Nachweis von Gravitationswellen)
2002	Raymond Davies Masatoshi Koshiro Riccardo Giacconi	Nachweis kosmischer Neutrinos kosmische Röntgenquellen
2006	John C. Mather George Smoot	Schwarzkörperform und Anisotropie der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
2011	Saul Perlmutter Brian P. Schmidt Adam Riess	beschleunigte Expansion des Universums
2017	Rainer Weiss Barry Barish Kip Thorne	direkter Nachweis von Gravitationswellen

die Sterne überwiegend aus Wasserstoff aufgebaut seien, aus denen schwerere Elemente aufgebaut werden. Die Freisetzung der Bindungsenergie liefere die stellare Energie, insbesondere beim Aufbau von

Helium. Mit seiner neuen Idee, dass die schweren Elemente aus einer »Urexplosion« von Anfang an im Stern vorhanden seien, entwickelte er den Kohlenstoffzyklus in allen sechs Schritten; der erschien erstmals



öffentlich in seiner Arbeit von 1938. Bethes Kohlenstoffzyklus erschien im Folgejahr, er wurde begleitet von umfangreichen kernphysikalische Berechnungen, aus denen sich die Reaktionsraten und die wichtigen Temperaturabhängigkeiten ergaben. Seiner Arbeit lagen die neuesten experimentellen Ergebnisse zu Kernumwandlungen und Wirkungsquerschnitten zu Grunde, die mit großer Gründlichkeit in die Theorie eingearbeitet wurden. Bethes Arbeit muss man als quantitativ einordnen, Weizsäckers dagegen als qualitativ, ihr fehlen wichtige Berechnungen.

Beide Forscher wurden für den Nobelpreis vorgeschlagen: Bethe mehrfach seit 1943, Weizsäcker zweimal in den 1950er Jahren. Die Gutachten bescheinigten Bethes Arbeit wegen ihrer größeren physikalischen Tiefe eine deutlich höhere Bedeutung. Dieser Qualitätsunterschied wog den kleinen zeitlichen Vorsprung von Weizsäcker auf, zumal beide fast gleichzeitig an der Lösung arbeiteten. 1967 schließlich wurde der Nobelpreis für Physik an Hans Bethe verliehen, ausdrücklich für seine Arbeiten zur Erklärung der stellaren Energiequellen. Das war der erste Preis für eine the-

oretisch-astrophysikalische Entdeckung, obwohl deren »nützliche« Anwendung in einem Fusionsreaktor immer noch eine ferne Hoffnung war. Anerkannt wurde nun, dass die Arbeit »zu einem tiefen Wissen über unser Universum geführt hat«. Dieser Neubewertung von Nobels Willen gemäß sollten bald weitere Nobelpreise für astrophysikalische Entdeckungen folgen, bis heute sind es zehn geworden.

Warum hat Weizsäcker den Preis nicht oder nicht miterhalten, war er doch anfangs etwas schneller und fantasievoller? Gelegentlich wurde behauptet, das habe mit seiner Arbeit am Uranprojekt während der Hitler-Diktatur zu tun gehabt. Auch wenn das heute nicht mehr aufgeklärt werden kann, überzeugt die Bevorzugung der Arbeit Bethes wegen ihres Umfangs und ihrer überlegenen Qualität. Sie hat zahlreiche experimentelle Nachprüfungen seiner Theorie ausgelöst, die zu neuen Erkenntnissen führten. Für jeden offensichtlich, bearbeiteten fortan Theoretiker und Experimentatoren artverwandte Aufgaben, im Kosmos und im Labor, und die Sonne diente als Labor für extreme Bedingungen. Werner Heisenberg (1901–1976), Physiknobel-

preisträger von 1932, hat nicht etwa seinen begabten Schüler Weizsäcker für den Preis vorgeschlagen, sondern voller Anerkennung für dessen Werk Hans Bethe.

Bethe selbst war gegenüber seinem Kollegen lange vor der Preisverleihung kritisch: »Weizsäcker hatte sehr, sehr wenig, vielleicht ein Prozent von dem, was ich hatte.« Selbst Weizsäcker räumte 1986 schließlich ein: »Er [Bethe] hat es besser gemacht.«

Bethe berichtet in seinem liebenswerten Aufsatz »My Life in Astrophysics«, der 2003 in den »Annual Review of Astronomy and Astrophysics« erschien, über seine Entdeckung und die Nobelpreisverleihung. Da zwischen Entdeckung und Ehrung fast dreißig Jahre lagen, in denen er der Astrophysik fernstand, musste er für seine Festrede in Stockholm das astrophysikalische Wissen der letzten Jahrzehnte ganz schnell nachholen.

Fast gleichzeitig mit der Preisvergabe vor 50 Jahren gelang ein entscheidender Durchbruch bei der Entwicklung eines Fusionsreaktors auf der Erde – mehr dazu im nächsten Artikel. ↩

(Sterne und Weltraum, Februar 2018)



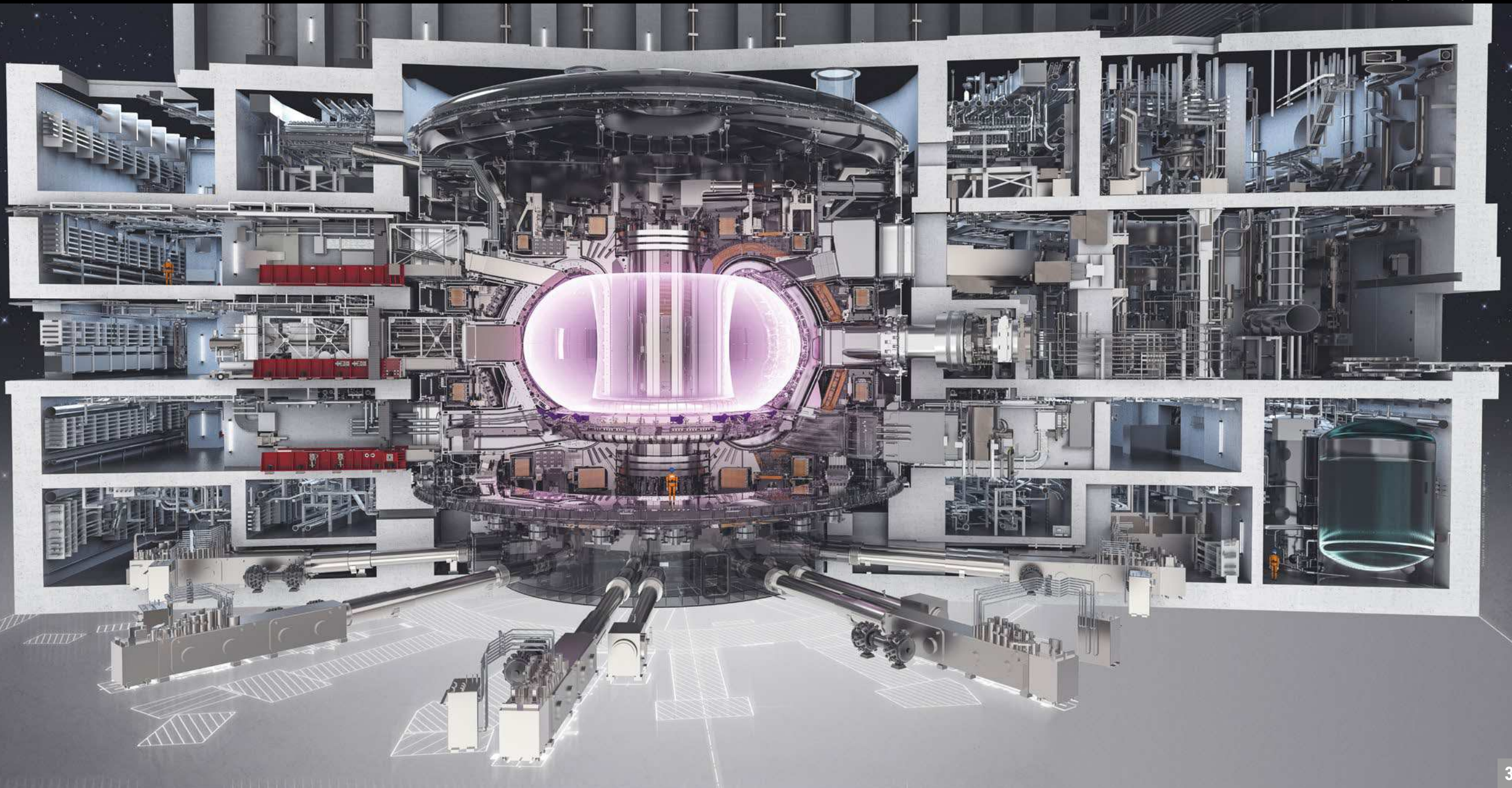
FUSIONSREAKTOR

# Der Weg zum Sonnenofen **auf der Erde**

von Dietrich Lemke

Im kosmischen Kalender soeben erst in der Welt erschienen, hat der Mensch den Bauplan der Sterne enträtselt und schickt sich nun an, den Sonnenofen auf seiner winzigen Erde nachzubauen. Doch bevor ein Kernfusionsreaktor Strom erzeugen kann, sind viele physikalische und technische Schwierigkeiten zu überwinden.

ITER ORGANIZATION





**I**m selben Jahr, in dem Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker die Verschmelzung von Kernen leichter Elemente als Energiequelle der Sterne erkannt hatten, machte eine Entdeckung vom anderen Ende des Periodensystems der Elemente Schlagzeilen: Den beiden Chemikern Otto Hahn und Fritz Straßmann war es im Dezember 1938 im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin gelungen, Urankerne in mittelschwere Kerne des Elements Barium zu spalten.

Diese Entdeckungen zeigten: Kernenergie kann sowohl durch Spaltung schwerer Atomkerne als auch durch Verschmelzung leichter Atomkerne freigesetzt werden. Die Kernspaltung durch Einwirken von Neutronen auf Uran oder Plutonium war technisch leichter zu bewerkstelligen als die Kernfusion bei hohen Temperaturen und Drücken. Bereits 1942 gelang Enrico Fermi (1901–1954) in einem Versuchsreaktor in Chicago die erste kontrollierte Kernspaltung.

Ins öffentliche Bewusstsein brannte sich das Potenzial der Kernenergie allerdings durch den militärischen Einsatz der ersten Atombomben 1945 ein. Deren zerstörerische Wirkung wurde bald verstärkt durch die Wasserstoffbombe, in der die explosive

Fusion von neutronenreichen Kernen wie Deuterium und Tritium durch Zünden einer Spaltbombe ausgelöst wurde.

Die gezügelte, friedvolle Nutzung der Kernspaltung begann erst danach: 1954 speiste der sowjetische Reaktor in Obninsk Strom ins öffentliche Netz ein, 1955 ging in England das Kraftwerk Calder Hall in Betrieb. Seitdem tragen Kernreaktoren in vielen Ländern einen Anteil zur Stromerzeugung bei.

Der durch die eindrucksvollen Erfolge der Kernphysik beflügelte Fortschrittsglaube führte schon Ende der 1940er Jahre zu ernsthaften Überlegungen, auch die Kernverschmelzung in den Sternen zum Vorbild für eine beherrschbare und unerschöpfliche Energiequelle auf der Erde zu machen. Aber waren diese Pläne nicht tollkühn? Wie sollte der Mensch, im kosmischen Kalender gerade erst geboren, das Feuer aus dem Innern der Sterne auf seinen winzigen Planeten Erde holen?

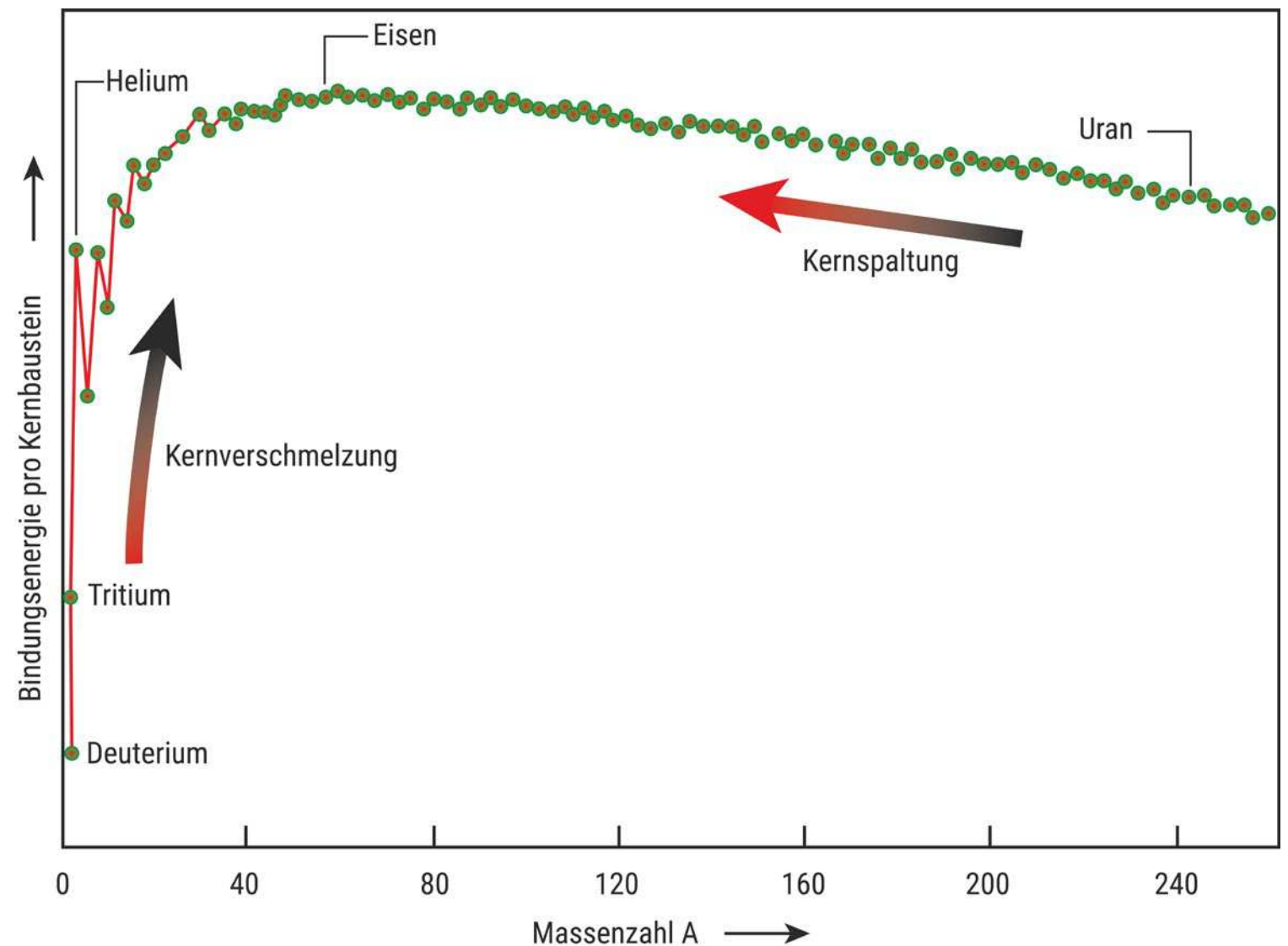
Wir erinnern uns an die Betriebsbedingungen für die Fusion in der Sonne: Im Zentrum beträgt die Temperatur 15 Millionen Kelvin und der Druck mehr als 100 Milliarden Bar. Verursacht werden diese Extrembedingungen durch die Gravitati-

## Auf einen Blick

- 1 Die Idee ist genial: Der in der Sonne seltene erste Schritt – das Verschmelzen zweier Protonen zu einem Deuteriumkern – wird im Fusionsreaktor einfach übergangen. Man nutzt sogleich das auf der Erde vorhandene Deuterium, das im Urknall entstand
- 2 Doch um die Fusion aufrechtzuerhalten, sind Temperaturen von rund 150 Millionen Grad Celsius erforderlich – die materialtechnischen Anforderungen sind enorm.
- 3 Weltweit wird an zwei Konzepten eines Fusionsreaktors geforscht. Doch bis zu einem Fusionskraftwerk werden noch Jahrzehnte vergehen.

# Bindungsenergie

Kernenergie lässt sich auf zwei Wegen freisetzen: durch Verschmelzung leichter Atomkerne (beispielsweise der Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium) oder durch Spaltung schwerer Atomkerne (etwa durch Spaltung von Urankernen). Die physikalische Ursache liegt in der unterschiedlichen Bindungsenergie der Kernbausteine, der Nukleonen, in den verschieden großen Atomkernen: Je fester sie gebunden sind, desto mehr Energie muss zu ihrer Spaltung aufgewandt werden. Umgekehrt wird umso mehr Energie bei ihrer Bildung freigesetzt. Ein besonders großer Energiegewinn wird bei der Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu einem  ${}^4\text{He}$ -Kern erreicht, da die Kurve der Bindungsenergie pro Nukleon für Helium-4 ein lokales Maximum aufweist.



IPP / SUW-GRAFIK

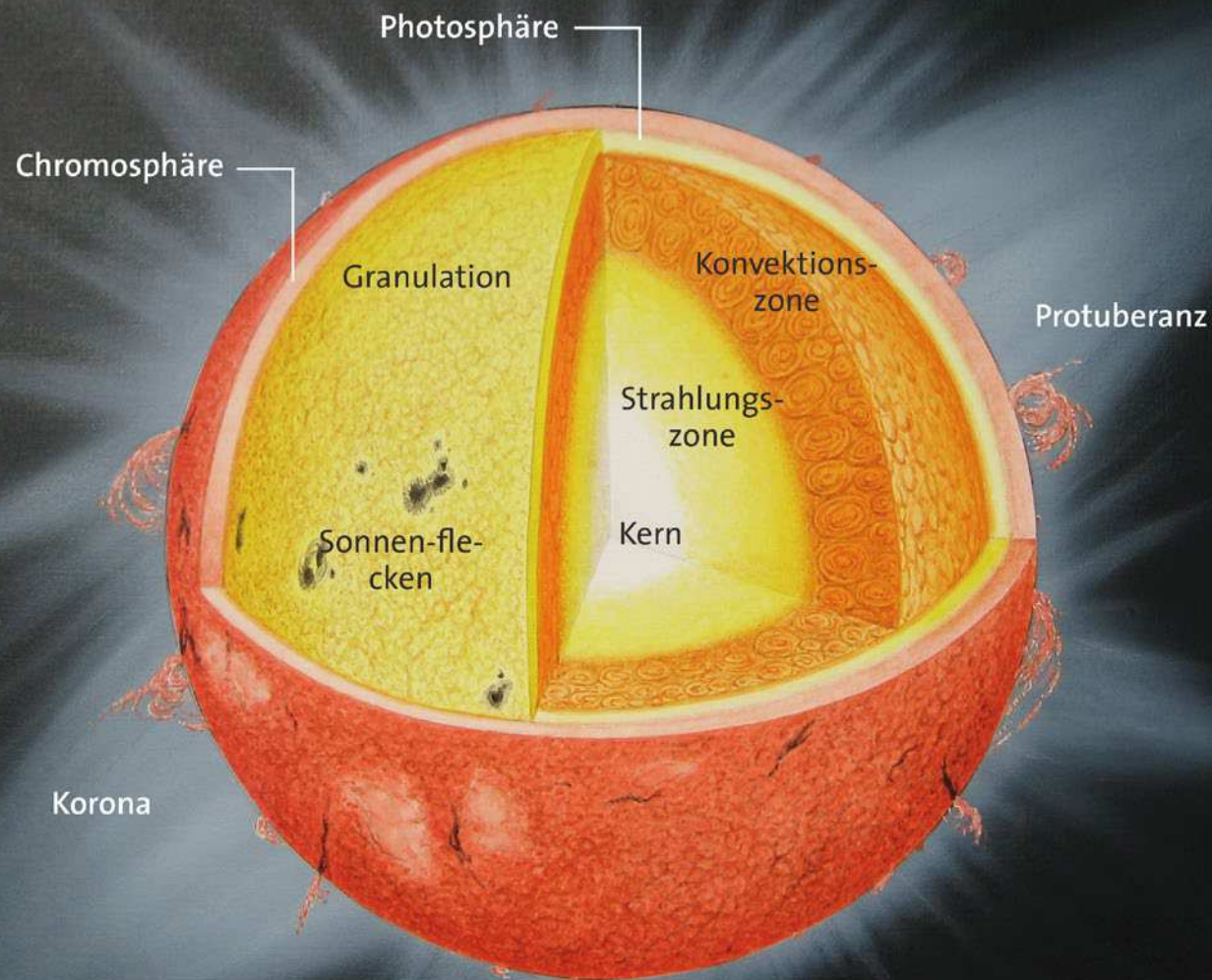
onswirkung des Sonnenkörpers mit einer Masse vom 300 000-Fachen der Erdmasse. Eingeschlossen wird der aktive Kern der Sonne von einer isolierenden Gaskugel mit dem 100-fachen Durchmesser der Erde.

Der thermonukleare Kern der Sonne beherbergt einen zuverlässigen Thermostaten. Sollte beispielsweise die Energieerzeugungs-

rate sinken, sorgt die Gravitation für Anstieg von Dichte, Druck und Temperatur. Damit steigt die Kernverschmelzungsrate wieder an, bis das alte, ruhige Gleichgewicht wiederhergestellt ist. Die von Bethe ermittelte starke Temperaturabhängigkeit der Energieerzeugungsrate sichert jenes Gleichgewicht. Dieser natürliche Thermostat verhindert

verlässlich ein Durchgehen oder Erlöschen des Sonnenfeuers und sorgt für gleichbleibende Abstrahlung.

Jede Sekunde wandelt die Sonne vier Millionen Tonnen ihrer Masse in Energie um; dennoch reicht ihr Fusionsmaterial Wasserstoff für Jahrmilliarden. Wir Menschen befinden uns in einem Sicherheits-



## SONNE

Unsere Sonne ist ein natürlicher Fusionsreaktor. 150 Millionen Kilometer von uns entfernt, setzt sie in ihrer Kernregion, 700 000 Kilometer unter der Oberfläche, bei einer Temperatur von fast 15 Millionen Grad durch Verschmelzen von leichten Atomkernen Energie frei. Gelänge es, diesen heißen Prozess in einem dauerhaft betriebenen Fusionskraftwerk auf unserer winzigen Erde nachzuvollziehen, könnte dies – so die Erwartung – einen wichtigen Beitrag zur Lösung des Energieproblems der Menschheit leisten.

KIEPENHEUER-INSTITUT FÜR SONNENPHYSIK

abstand von 150 Millionen Kilometern von diesem thermonuklearen Großkraftwerk. Mit diesen extremen Bedingungen und Fähigkeiten der Sonne erschien es auf den ersten Blick fast aussichtslos, den Sonnenofen auf der Erde zwischen menschlichen Siedlungen nachbauen zu wollen.

### Magnet statt Masse

Aber die Physiker fanden Wege, um die Fusion auch im Labor machbar erscheinen zu lassen. Da der erste Schritt der solaren Fu-

sionskette, die Verschmelzung von zwei Wasserstoffkernen zu einem Deuteriumkern, wegen des kleinen Wirkungsquerschnitts so selten ist, konnte diese Reaktion bis heute nicht im Labor studiert werden. Deshalb wird nun nicht vom gewöhnlichen Wasserstoff  $^1\text{H}$  als Brennstoff ausgegangen, sondern von dessen schweren und überschweren Isotopen Deuterium  $^2\text{H}$  (D) und Tritium  $^3\text{H}$  (T) mit einem beziehungsweise zwei Neutronen im Kern. Bei ihrer thermonuklearen Reak-

tion entstehen, ähnlich wie in der Sonne, aus Wasserstoff Helium und Energie:



Damit wird der erste, in der Sonne selten stattfindende Reaktionsschritt  $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu$  einfach übergangen, man startet gleich mit dessen auf der Erde natürlich vorhandenem Endprodukt Deuterium. Der Wirkungsquerschnitt für die Deuterium-Tritium-Reaktion ist um Grö-



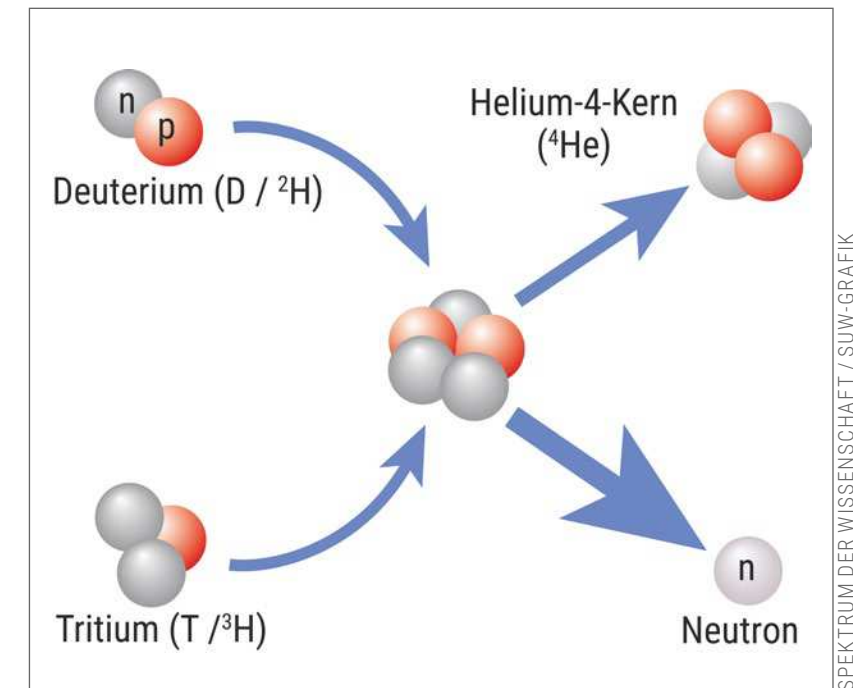
ßenordnungen höher als die aller anderen denkbaren Verbindungen. Die größte Ausbeute wird allerdings erst bei Temperaturen von 150 Millionen Kelvin erreicht, das ist zehnfach heißer als im Innern der Sonne. Erst dann hat ein ausreichend großer Anteil der Teilchen genügend Energie, um die elektromagnetische Abstoßung anderer Teilchen zu überwinden und in den Bereich ihrer Kernkraft zu gelangen und zu fusionieren.

Dieser hohen Temperatur kann keine materielle Wand eines Gefäßes widerstehen. Dennoch scheint sie handhabbar, wenn man mit sehr geringen Gasdichten des Plasmas arbeitet. Statt des gravitativen Einschlusses der Brennzzone im Kern der Sonne kann das elektrisch leitende Laborplasma durch ein Magnetfeld wie in einem Käfig eingeschlossen und auf diese Weise von den Wänden der Brennkammer ferngehalten werden. Die notwendigen sehr starken Magnetfelder müssen mit supraleitenden Magneten erzeugt werden. Die technisch nutzbare Energie der Fusion kann das Plasma hauptsächlich in Form der schnellen Neutronen verlassen; diese elektrisch neutralen Teilchen werden nicht vom Magnetfeld zurückgehalten.

## Tischfeuerwerk

In den USA begann die Fusionsforschung zunächst mit Anlagen, die noch auf dem Labortisch Platz fanden und deren Brennräume nur wenige Liter Inhalt hatten. Der 36-jährige Astrophysiker Lyman Spitzer (der spätere Vorkämpfer für das Weltraumteleskop Hubble) erfand 1951 den so genannten Stellarator, die Stern-Maschine. In einer acht- und später ringförmigen Brennkammer sollte das Plasma durch starke Magnetfelder in einem schlauchförmigen Ring zusammengehalten werden. Zwei weitere, größere Modelle des Stellarators waren zur Absicherung seiner Entwicklung vorgesehen; Spitzers viertes Modell sollte dann bereits Fusionsenergie liefern. Wesentlich zurückhaltender waren zu jener Zeit die Physiker im Forschungszentrum in Los Alamos (New Mexico), die ihr Plasma durch ein rasch ansteigendes Magnetfeld komprimierten und erhitzten. Sie nannten ihre Forschungsanlage Perhapstron, die Vielleicht-Maschine.

Keines der frühen Experimente funktionierte befriedigend. Die Plasmen zeigten schnell zahlreiche Instabilitäten: Die Plasmateilchen entwichen aus dem Magnetkäfig, Wandmaterialien wurden abgetragen



## VERSCHMELZUNG

**Ein Deuteriumkern und ein Tritiumkern verschmelzen über ein Zwischenprodukt zu einem Heliumkern, wobei ein Neutron (n) freigesetzt wird. Wegen der Impulserhaltung erhält das leichtere Neutron eine größere Bewegungsenergie (14 Megaelektronvolt) als der vierfach schwerere Heliumkern (3,5 Megaelektronvolt).**

und verunreinigten das Plasma bis zur Unbrauchbarkeit. Das ist rückblickend nicht überraschend: Die Plasmaphysik war damals noch nicht entwickelt, leistungsfähige Rechner zur Simulation des schwer erklärbaren Plasmaverhaltens gab es noch nicht, ebenso wenig wie gute Messgeräte zur Erfassung des experimentellen Geschehens im Labor. Zu Beginn der 1960er Jahre wurde klar, dass die Entwicklung eines Fusionsreaktors ein sehr langfristiges Vorhaben sein wird. Weltweit waren inzwischen einschlägige Forschungsinstitute entstanden, außer in den USA auch in der Sowjetunion, in England, Frankreich, Japan und Deutschland. Dort musste man sich nun auf jahrelange Grundlagenforschung an Kernfusionsplasmen einstellen.

Überraschend meldete dann 1968 das Moskauer Kurtschatow-Institut auf der Fusionsenergiekonferenz der Internationalen Atomenergiebehörde in Nowosibirsk einen Rekord: In einem neuen Reaktortyp, Tokamak genannt, waren Plasmatemperaturen von 10 Millionen Kelvin und wesentlich längere Einschlusszeiten erreicht worden. Auch die Offenlegung war überraschend, denn während des Kalten Kriegs wurde vieles geheim gehalten. Die Sowjet-

union gestattete Fusionsforschern vom britischen Culham-Labor mit eigenen modernen Messgeräten die Überprüfung der Moskauer Ergebnisse: Sie waren richtig! Das führte zu Richtungsänderungen an mehreren Forschungsinstituten in anderen Ländern, nun wurde der Tokamak die bevorzugte Versuchsmaschine.

### **Tokamak oder Stellarator?**

Tokamak ist ein Kunstwort, gebildet aus der russischen Bezeichnung für »Toroidale Kammer in Magnetspulen«. In einer ringförmigen (toroidalen) Brennkammer bewegt sich ein Plasmastrom längs der geschlossenen Feldlinien, die durch einen Kranz von Ringspulen um die Kammer erzeugt werden. Da aber in einem solchen toroidalen Feld die Feldstärke nach außen abfällt, würden die Plasmateilchen bald an die äußere Wand getrieben werden. Das lässt sich weitgehend verhindern, wenn die Teilchen gezwungen werden, schraubenförmig um die Seele des Plasmaschlauchs zu laufen. Diese Verdrillung des Felds wird durch ein weiteres, überlagertes Magnetfeld hergestellt, das der im Plasma fließende Strom selbst erzeugt. Dieser Strom wird erregt, indem der Plasmaring als Sekun-

därspule eines Transformators benutzt wird, in dessen äußerer Primärspule ein Strom ansteigt.

Obwohl das Plasma elektrisch gut leitend ist, kann sein restlicher ohmscher Widerstand wie in einer elektrischen Heizung das Plasma mit Stromstärken von mehreren Millionen Ampere auf Temperaturen von 10 Millionen Kelvin aufheizen. Um aber die für die Kernfusion notwendigen 150 Millionen Kelvin zu erreichen, muss dem Plasma durch Einstrahlen von Hochfrequenzstrahlung und Einschuss von Neutralteilchen mit hoher Geschwindigkeit zusätzliche Energie zugeführt werden.

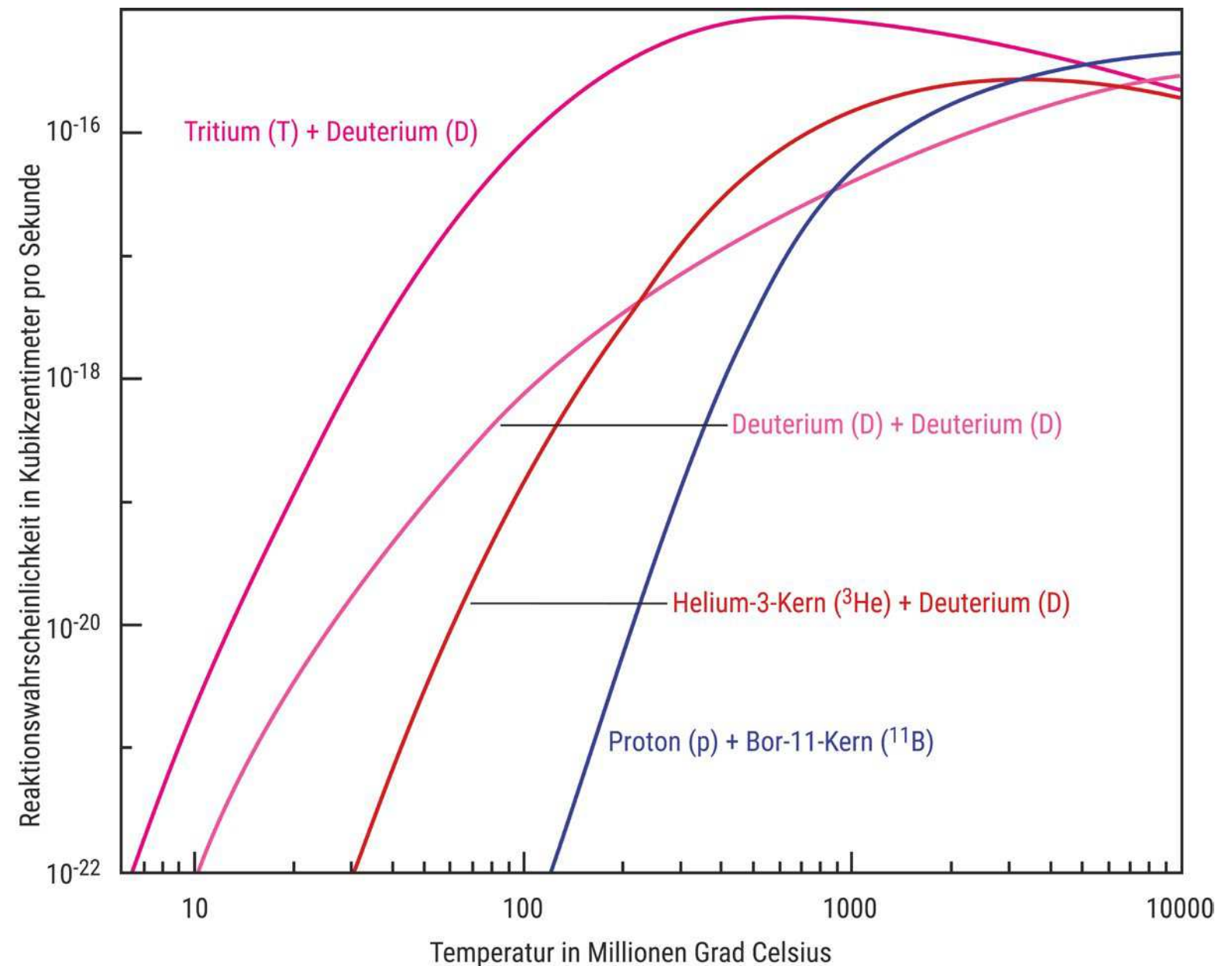
Ein Problem ist sofort erkennbar: Der Tokamak funktioniert nur, solange der Strom im Transformator ansteigt. Beim Maximalwert muss abgeschaltet und ein neuer Zyklus gestartet werden. In dieser Form würde ein Tokamak-Fusionsreaktor nur im Pulsbetrieb arbeiten können. Außerdem führen die wechselnden, starken elektromagnetischen Kräfte zu großer Materialbelastung der Anlage. Ein Kraftwerksbetrieb im Pulsbetrieb schien schwieriger erreichbar zu sein, wird aber jetzt nicht mehr ausgeschlossen, da Heizen des Plasmas mit Neutralteilchen und Energiespei-

cherung lange Pulszeiten und damit quasi-stationären Betrieb möglich erscheinen lassen.

Ein Stellarator dagegen könnte im Dauerbetrieb arbeiten. Hier wird das zum anhaltenden Einschluss des Plasmas notwendige verdrillte Feld durch äußere Spulen um die ringförmige Brennkammer erzeugt. Diese Spulen haben komplizierte, nichtebene Formen. Mit ihnen lässt sich eine Feldliniendrehung um die Seele des Plasmaschlauchs erreichen. Anders als beim Tokamak muss beim Stellarator kein Strom durch den Plasmaring fließen. Der Plasmaring hat beim Stellarator eine komplizierte, nichtaxialsymmetrische Form, in ihm pendeln die Teilchen hin und her. Die Simulation des Stellarators und die Berechnung der komplizierten Magnetspulen wurden erst mit den Großrechnern der letzten Generationen möglich.

### Isolation und Heizung des Plasmas

Für beide Fusionsmaschinen müssen große technische Herausforderungen bewältigt werden. Die offensichtlichste ist, das 150 Millionen Kelvin heiße Plasma von den kalten Wänden der Brennkammer fernzuhalten. Direkt hinter der Wand befinden



### REAKTIONSWAHRSCHEINLICHKEIT

**Die Wahrscheinlichkeit, mit der zwei leichte Atomkerne fusionieren, ist von der Art der Kerne und von der Temperatur – die ihre kinetische Energie bestimmt – abhängig. Die Verschmelzung von Deuterium (D) mit Tritium (T) verspricht die beste Ausbeute über einen großen Temperaturbereich.**



sich die mit flüssigem Helium auf 4 Kelvin (–269 Grad Celsius) gekühlten supraleitenden Spulen zur Erzeugung des Magnetfelds. Der Magnetfeldeinschluss des Plasmas muss deshalb eine Wärmeisolation für einen Temperaturunterschied von 150 Millionen Grad auf knapp zwei Meter Wandabstand bewirken, also etwa 1 Million Grad pro Zentimeter. (Zum Vergleich: Bei der riesigen Sonne beträgt der Temperaturgradient nur 15 Millionen Grad auf eine halbe Million Kilometer.)

Durch den gewaltigen Temperaturgradienten entstehen im Plasma Turbulenzen. Diese Störungen und weitere Instabilitäten des Plasmas kleinzuhalten, gehört zu den größten Schwierigkeiten auf dem Weg zum Fusionsreaktor.

Die Heizung des Plasmas bis zu dessen Zündung und zum Selbsterhalt der Fusion ist eine weitere anspruchsvolle Aufgabe. Das kann durch Einstrahlung elektromagnetischer Wellen erfolgen, möglichst in einer Resonanzfrequenz des Plasmas. Die Teilchen nehmen dann Energie aus der Einstrahlung auf und übertragen sie durch Stöße an weitere Plasmateilchen. Ein anderer Weg zur Heizung ist der bereits erwähnte Einschuss von hochenergetischen Neutralteilchen: Zu-

nächst werden Ionen elektrisch durch Hochspannung auf Geschwindigkeiten von mehr als 1000 Kilometer pro Sekunde beschleunigt. Vor dem Einschuss in den Plasmaschlauch müssen die schnellen Teilchen aber elektrisch neutralisiert werden, da sie andernfalls durch die Magnetfelder abgelenkt würden und die Seele des Plasmas nicht erreichen würden. Sobald das Plasma gezündet hat, sorgen die schnellen bei der Fusion entstehenden  $^4\text{He}$ -Kerne für dessen Heizung. Eingeschossen werden soll auch der Brennstoff, millimetergroße Tröpfchen von gefrorenem schwerem Wasserstoff. Gaskanonen schießen diese Pellets mit Überschallgeschwindigkeit in das heiße Plasma, wo sie sofort verdampfen und ionisiert werden. Allerdings sind dabei noch komplizierte Fragen zu klären, wie das Erreichen eines Dichteprofiles im Plasma, das auch die Beseitigung der von der Wand kommenden Verunreinigungen und des unbrennbaren Reaktionsprodukts Helium mit einer speziellen Vorrichtung, einem Divertor, ermöglicht.

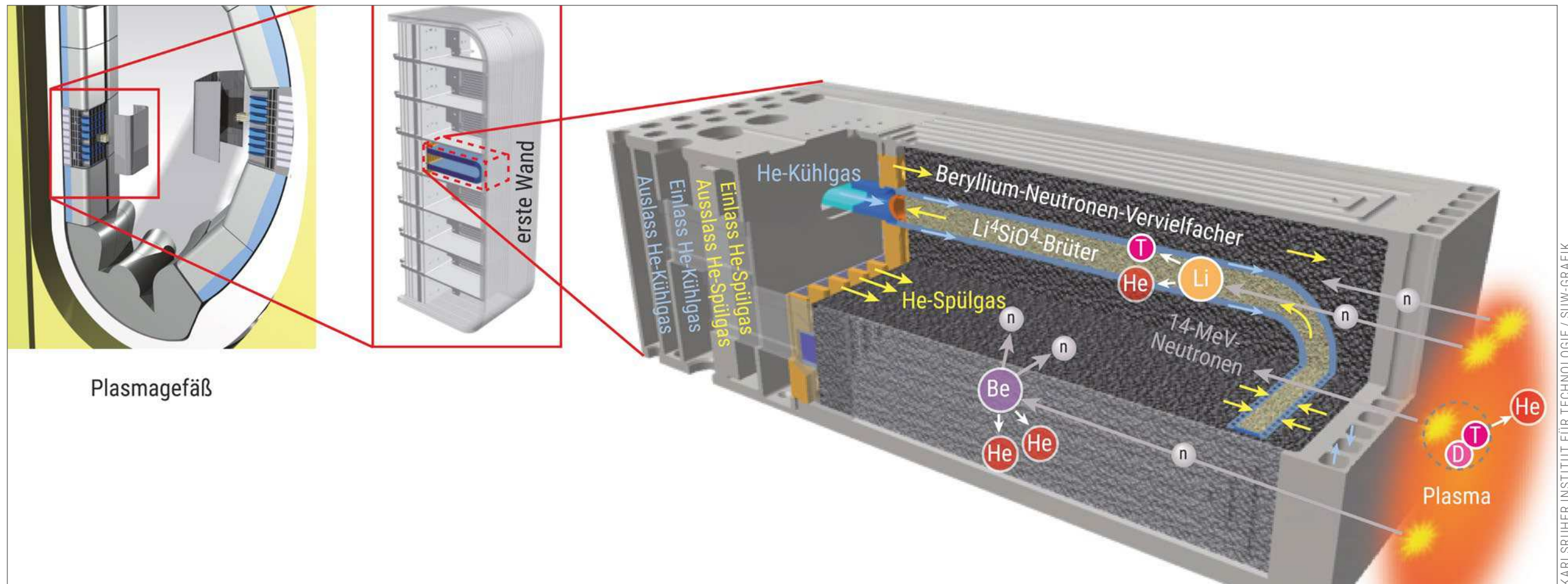
### **Innere Wand**

Die innere Wand der Brennkammer, das Blanket, hat einen mehrschichtigen Aufbau.

In einer »ersten Wand« werden die im Plasma erzeugten schnellen Fusionsneutronen abgebremst, ihre Bewegungsenergie wird in Wärme umgewandelt. Absorbiert werden dort auch die Wärmestrahlung und Teilchen, die von der Oberfläche des Plasmas entweichen. Dadurch ist diese erste Wand einer hohen Wärmelast ausgesetzt, typischerweise ein Megawatt pro Quadratmeter, stellenweise sogar bis zum Zehnfachen. Die Wärme wird durch Kühlkanäle im Blanket mittels eines Kühlmittels (Heliumgas bei dem in der Abbildung gewählten Beispiel) bei hoher Temperatur und hohem Druck abgeführt und gelangt schließlich zum Wärmetauscher eines Dampfkraftwerks.

Im Blanket befindet sich auch eine Brutanlage zur Erzeugung von Tritium aus Lithium. Das erbrütete Tritium wird mit Heliumgas ausgespült und dem Brennstoffkreislauf zugeführt. Die hintere Wand des Blankets dient der Abschirmung der Magnetfeldspulen und des äußeren Reaktors gegen die restliche Neutronenstrahlung.

Die Materialien für das Blanket müssen neben der hohen thermomechanischen Belastbarkeit weitere Anforderungen erfüllen. Die erste Wand muss widerstandsfähig gegen Erosion durch entweichende

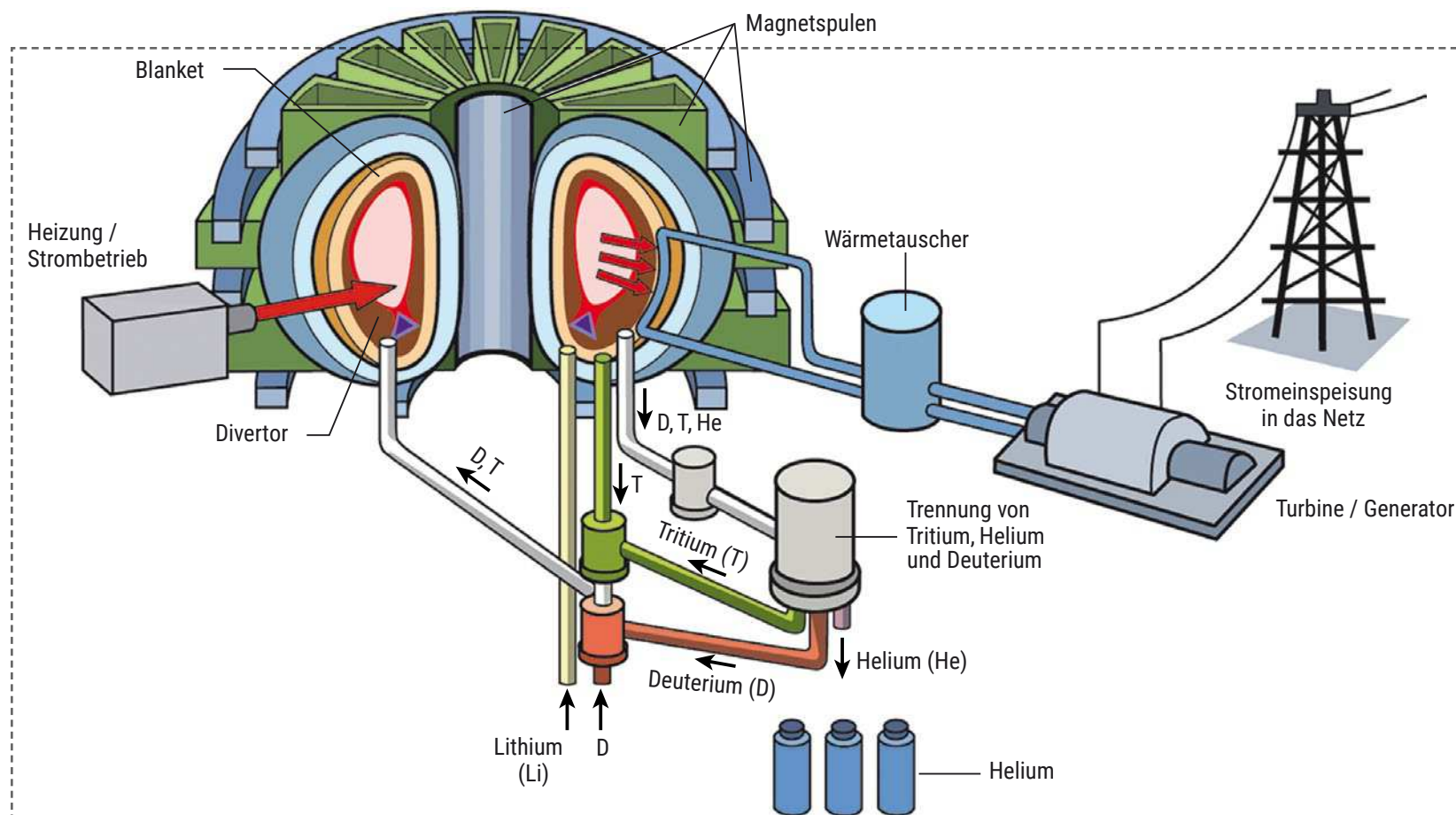


Plasmateilchen sein, weil diese zu Verunreinigungen führen könnten. Die Wandelemente bestehen deshalb aus ferritischen Stahllegierungen, die mit einer millimeterdicken Wolframschicht überzogen sind. Dennoch abgesprengte Ionen der Wand werden vom Plasma angeregt und geben intensive Ultraviolettstrahlung ab. Diese Energie geht dem Plasma verloren, es kühlt ab. Bei stärkerer Verunreinigung (im Promillebereich) erlischt die Fusion. Außerdem soll das Wandmaterial unter steter Neutronenbelastung nicht zu schnell ver-

spröden, um lange Betriebszeiten bis zu einem Wechsel zu gewährleisten. Ferner soll das Material nicht leicht neutronenaktivierbar sein, das heißt radioaktiv werden. Die dennoch entstehenden radioaktiven Stoffe sollten mit kurzer Halbwertszeit wieder zerfallen. Speziell für diese Anforderungen entwickelte Stähle mit geringem Einfangquerschnitt für Neutronen versprechen bereits Fortschritt. Das Blanket muss austauschbar sein, deshalb ist es aus Segmenten zusammengesetzt, die einzeln gewechselt werden können.

## BLANKETMODUL

**In den Blanketmodulen eines Fusionsreaktors ist die erste Wand enormen Belastungen durch Strahlung und Teilchenbeschuss aus dem Plasma ausgesetzt. Im Blanket wird die kinetische Energie der frei werdenden Fusionsneutronen weitgehend in Wärme umgewandelt, die von Heliumgas als Kühlmittel aufgenommen und zu einem Dampferzeuger des Kraftwerks abgeleitet wird. Des Weiteren wird im Blanket Tritium durch den Beschuss von Lithium mit Neutronen erbrütet. Beryllium (Be) wirkt als Neutronenvervielfacher.**



## Stromerzeugung

Im Blanket erbrütetes Tritium wird außerhalb des Reaktors als Brennstoff extrahiert. Ein Divertor saugt Helium (die Brennasche) und weitere Verunreinigungen aus der Brennkammer ab. Über einen Kühlmittelkreislauf und Wärmetauscher wird die Wärmeenergie einem gewöhnlichen Dampfkraftwerk zur Stromerzeugung zugeführt.

Die Materialfragen sind ein Schlüsselproblem der heutigen Fusionsreaktorforschung. Deshalb wird eine »International Fusion Materials Irradiation Facility« entwickelt, mit EURATOM und Japan als Partnern. Hier soll mit einer starken Quelle für energiereiche Neutronen (wie sie bei der Fusion entstehen) die Entwicklung geeigneter Blanketmaterialien vorangetrieben werden. Erste Ergebnisse könnten Mitte der 2030er Jahre erwartet werden.

### Brennstoffe für die Kernfusion

Die Wasserstoffisotope Deuterium  $^2\text{H}$  und

Tritium  $^3\text{H}$  sind das Brennmaterial für den Fusionsreaktor. »Eine Badewanne voll Wasser und das Lithium einer verbrauchten Laptop-Batterie könnten eine Familie für 50 Jahre mit Strom versorgen«, so leitete das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik die Festschrift zu seinem 50-jährigen Bestehen im Jahr 2010 ein.

Aus dem Meerwasser kann das in Spuren vorkommende Deuterium durch erprobte Isotopentrennungsverfahren gewonnen werden. Es ist in kleinen Mengen in den ersten Minuten nach dem Urknall im Kosmos erzeugt worden und hat eine

Häufigkeit von etwa einem Zehntausendstel, bezogen auf gewöhnlichen Wasserstoff. Deuterium ist nicht radioaktiv. Auf der Erde wurde der schwere Wasserstoff 1931 vom US-Amerikaner Harold Urey (1893–1981) entdeckt, der dafür den Nobelpreis erhielt.

Tritium dagegen ist radioaktiv, es ist ein Betastrahler, der mit einer Halbwertszeit von zwölf Jahren zerfällt. In der Erdatmosphäre entsteht Tritium auf natürliche Weise durch die kosmische Höhenstrahlung; etwa drei Kilogramm sind in ihr verteilt. Das wäre viel zu wenig für



eine eventuelle Anreicherung als Fusionsbrennstoff. Deshalb soll Tritium im Fusionsreaktor selbst erzeugt werden: durch Bestrahlung von Lithium mit Neutronen mittels der Reaktion  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ . Für das Erbrüten des Tritiums muss Lithium direkt hinter der ersten Wand eingebracht werden, entweder fest gebunden in einem Mineral oder flüssig in einer Schmelze mit Blei. Das Blei fungiert als Neutronenvervielfacher, da bei seiner Bestrahlung mit den Fusionsneutronen ein weiteres Neutron vom Blei abgeht. Ganz ähnlich muss das feste Lithium mit dem Neutronenvervielfacher Beryllium umgeben werden, das bei seiner Spaltung zu Helium ein weiteres Neutron abgibt. Die Abtrennung des erbrüteten Tritiums erfolgt außerhalb des Reaktors.

### Heutige Fusionsexperimente

Gegenwärtig ist JET, der Joint European Torus, die weltweit größte Fusionsforschungsanlage. Sie wird seit 1983 im britischen Culham westlich von London gemeinsam von europäischen Forschern betrieben, die Europäische Union trägt 87 Prozent der Kosten. JET ist eine Tokamak-Maschine, mit der 1991 erstmals der experimentelle Nach-

weis der Energieerzeugung aus der Deuterium-Tritium-Fusion gelungen war. 1997 konnte mit JET eine Fusionsleistung von 16 Megawatt erzielt werden, das ist mehr als die Hälfte der zur Plasmaheizung eingesetzten Energie – bis heute ein Rekordwert!

Für eine noch größere Fusionsleistung ist JET mit 80 Kubikmetern jedoch zu klein. Da die Energieverluste des Plasmas über seine Oberfläche erfolgen, muss das Ziel eine Vergrößerung des Plasmas sein, denn sein Volumen steigt schneller als die Oberfläche. Durch mehrjährige Experimente und begleitende theoretische Studien konnte hier gezeigt werden, dass eine Maschine mit zehnfach größerem Volumen durch die bessere Isolation des Plasmas einen Nettogewinn vom Zehnfachen der eingesetzten Heizleistung erbringen würde.

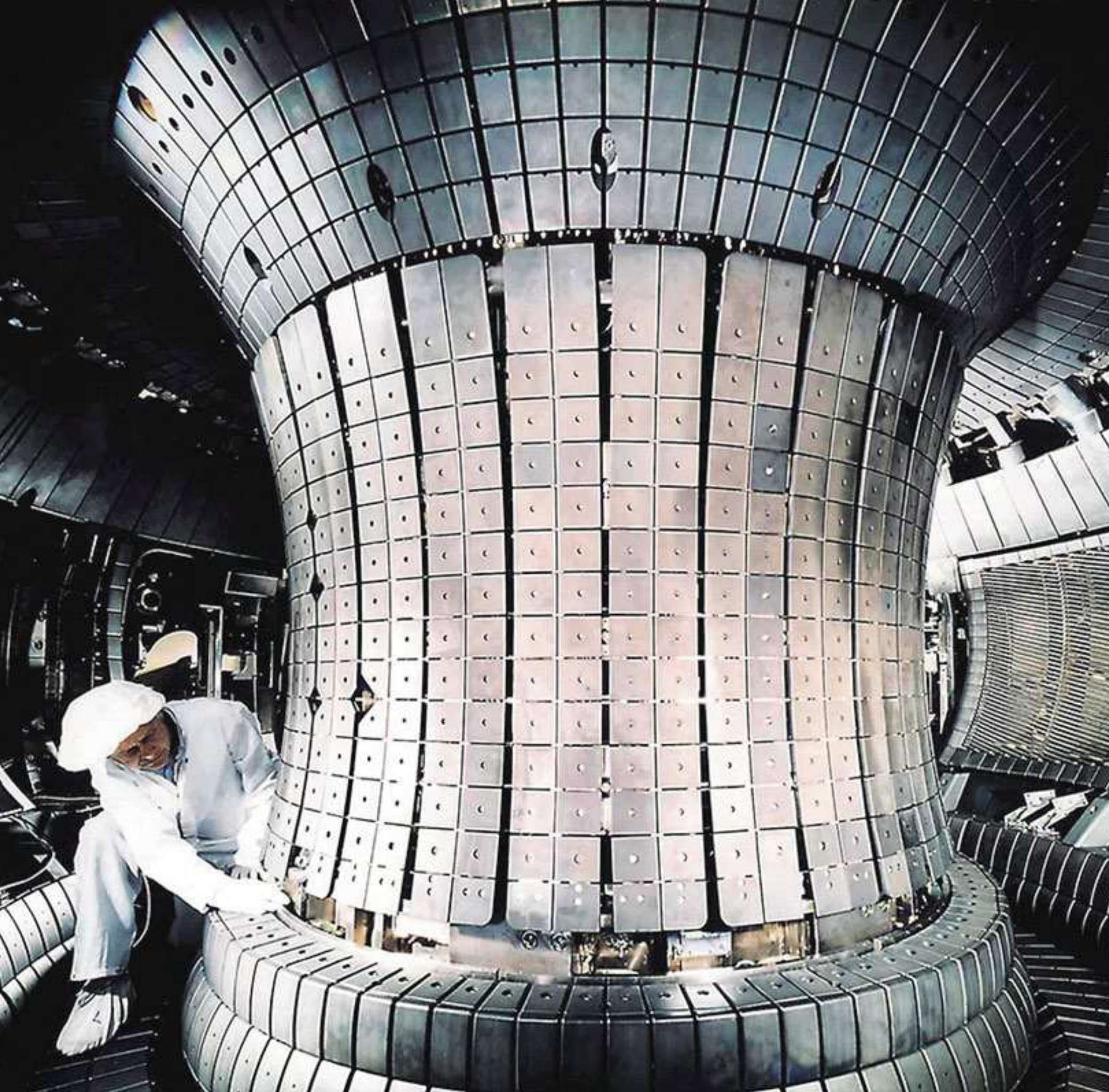
Nach Experimenten mit Tritium ist die Brennkammer für einige Zeit nicht betretbar. Am JET wurden daher Manipulatoren entwickelt, die Umbauten im Innern – wie etwa der Austausch der Wände – erfolgreich erledigen können, das ist wichtig für künftige Fusionsreaktoren.

Die Experimente mit JET werden begleitet durch Forschung an einer großen Zahl kleinerer Anlagen in vielen Ländern der

Welt. Als Beispiele seien die beiden Fusionsforschungsanlagen in Deutschland erwähnt, die Interessierte bei Führungen kennen lernen können. Sie werden betrieben vom Max-Planck-Institut für Plasma-physik (IPP) mit den beiden Teilinstituten in Garching bei München und in Greifswald. In Garching wird mit dem Tokamak ASDEX Upgrade geforscht. Dabei werden Plasmen mit hoher Dichte, Temperatur, Reinheit und guter Wärmeisolation angestrebt. Diese Bedingungen sollen länger aufrechterhalten bleiben. Untersucht werden neue Wandmaterialien wie Wolfram, denn die bisher eingesetzten Kohlenstoffschichten waren zwar thermisch stabil, binden aber den Wasserstoff des Plasmas zu verunreinigenden Kohlenwasserstoffen. Fernziel ist auch eine Betriebsweise zur Verringerung der Probleme des Pulsbetriebs eines Tokamaks.

Mit großer Aufmerksamkeit wird die Forschung am 1994 gegründeten IPP-Teilinstitut Greifswald verfolgt. Hier wurde seit 2004 das weltweit größte Fusionsexperiment vom Typ Stellarator aufgebaut: Wendelstein 7-X. Es soll zunächst nachweisen, dass sich in diesem Modell ein Plasma ähnlicher Qualität wie im Tokamak erzeu-



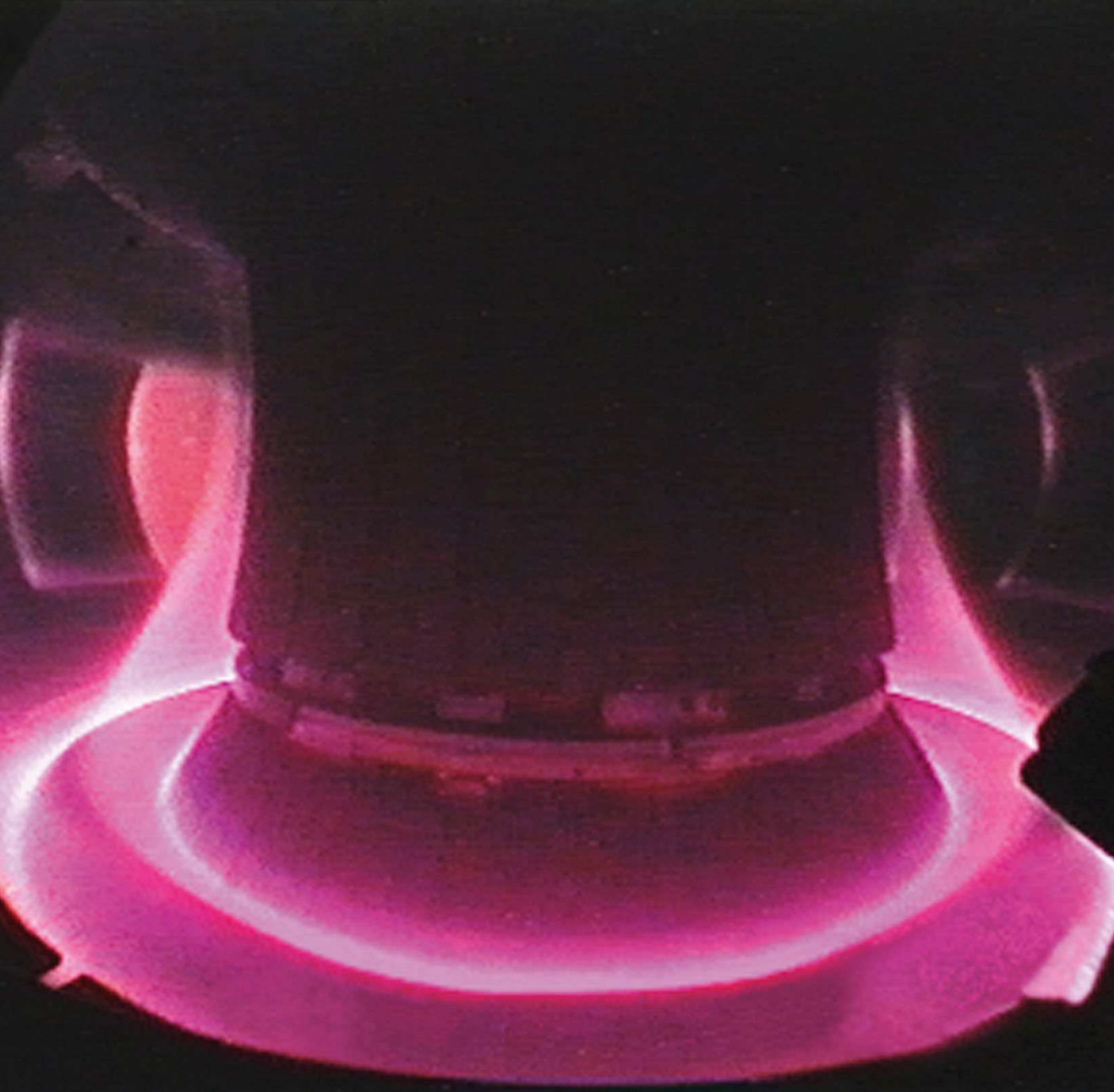


IPP

## **FUSIONSEXPERIMENT ASDEX**

**Mit dem Fusionsexperiment ASDEX Upgrade im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching, das nach dem Tokamak-Prinzip aufgebaut ist, wird das Verhalten eines Deuteriumplasmas untersucht. Die Brennkammer hat ein Volumen von 14 Kubikmetern.**





**PLASMA IN DER  
BRENNKAMMER**  
Im ASDEX-Experiment  
wurden schon Plasma-  
temperaturen von  
100 Millionen Grad  
erreicht.



gen und unterhalten lässt. Geforscht wird nur mit Wasserstoff und Deuterium, das ist ausreichend für die Entwicklung der komplizierten Plasmaphysik des Stellators. Auf Arbeiten mit Tritium wird zunächst verzichtet, da dies aus Strahlenschutzgründen zu Wartezeiten beim Umbau der Experimente führen könnte. Doch ein wesentlicher Schritt wurde bereits vollzogen: Im Jahr 2016 gelang in Greifswald die erfolgreiche Erzeugung eines Plasmas im 30-Kubikmeter-Volumen des Wendelstein 7-X. Für das Jahr 2020 werden Einschlusszeiten von bis zu 30 Minuten angestrebt. Die supraleitenden Magnetfeldspulen bilden dafür die Voraussetzung.

### **Auf dem Weg zum Fusionskraftwerk**

Ein internationales Projekt für die Fusionsforschung wurde 1985 anlässlich von Abrüstungsverhandlungen zwischen dem sowjetischen Generalsekretär Michail Gorbatschow und dem US-Präsidenten Ronald Reagan verabredet. Gemeinsam sollte die Gewinnung fast unerschöpflicher und sauberer Energie entwickelt werden. Diesem Vorhaben ITER (lateinisch: Weg, als Akronym für International Thermonuclear Experimental Reactor) haben sich neben

Russland und den USA seither die Länder der Europäischen Union, die Schweiz, China, Japan, Südkorea und Indien angeschlossen. Die Projektpartner stehen für die Hälfte der Weltbevölkerung.

Im Jahr 1988 begannen die Partner als Gäste am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching mit der detaillierten Entwicklungsplanung für ITER. Am ausgewählten Standort Cadarache nahe Aix-en-Provence in Frankreich wird seit 2007 das große Fusionsexperiment aufgebaut.

Die Mitgliedsländer leisten ihre Beiträge meist durch Bereitstellung von Bauteilen und Systemgruppen, so fließen die Entwicklungskosten überwiegend in die heimische Industrie. Beispielsweise liefern Japan, China, die USA und andere die großen Magnetspulen; Südkorea, Europa und Russland das gigantische Vakuumgefäß und Frankreich die Gebäudeinfrastruktur sowie die aufwändige Energieversorgung. ITER soll die Zündbedingungen für ein selbsterhaltendes Plasma erfüllen. Mit 830 Kubikmetern Plasmavolumen wird ITER eine Fusionsleistung von 500 Megawatt erbringen, zehnmal mehr, als zur Plasmaheizung aufgewendet werden muss. Dennoch bleibt es ein Forschungsreaktor; viele

der oben angesprochenen Fragen sollen hier in mehrjährigen Experimenten beantwortet werden: Materialauswahl, Heizung, Zündung, Selbsterhalt der Fusion, Plasmastabilität, Blanket, Tritiumerbrütung, Entfernung der Heliumasche, supraleitende Magnetspulen und so weiter.

Die Kostenschätzungen für ITER mussten seit dem Baubeginn mehrfach nach oben korrigiert werden, zeitweise zogen sich die USA zurück, die Zeitplanungen mussten erneut angepasst werden. Das ist verständlich, denn bei einer so großen Zahl von internationalen Partnern gibt es Anlaufschwierigkeiten, jeder möchte die interessantesten Aufgaben übernehmen. Mehr als zehn Millionen Einzelteile müssen zusammenpassen, jede neue Erkenntnis und Änderung einer Schnittstelle führt zu Änderungen – und Kosten – bei anderen Beistellern.

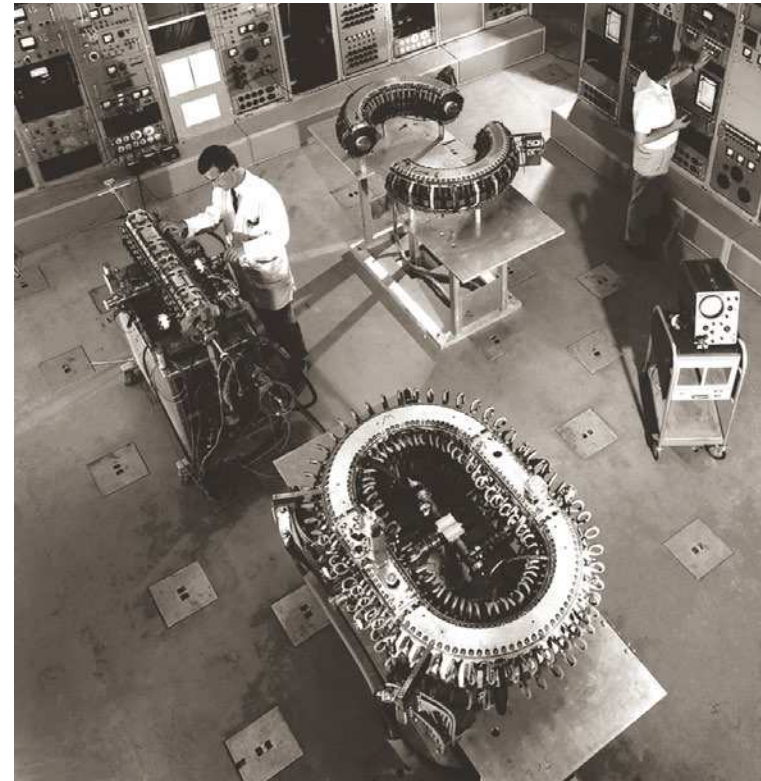
Nach heutigem Stand ist zu erwarten, dass ab etwa 2027 mit ITER geforscht werden kann. Wegen dieser langen Entwicklungszeiten hat bereits jetzt die Planung für den übernächsten Schritt begonnen, den Bau einer Demonstrationsanlage für ein kommerzielles Fusionskraftwerk: DEMO. Sollten die Experimente mit Wendelstein

# Magnetischer Einschluss: Stellarator oder Tokamak

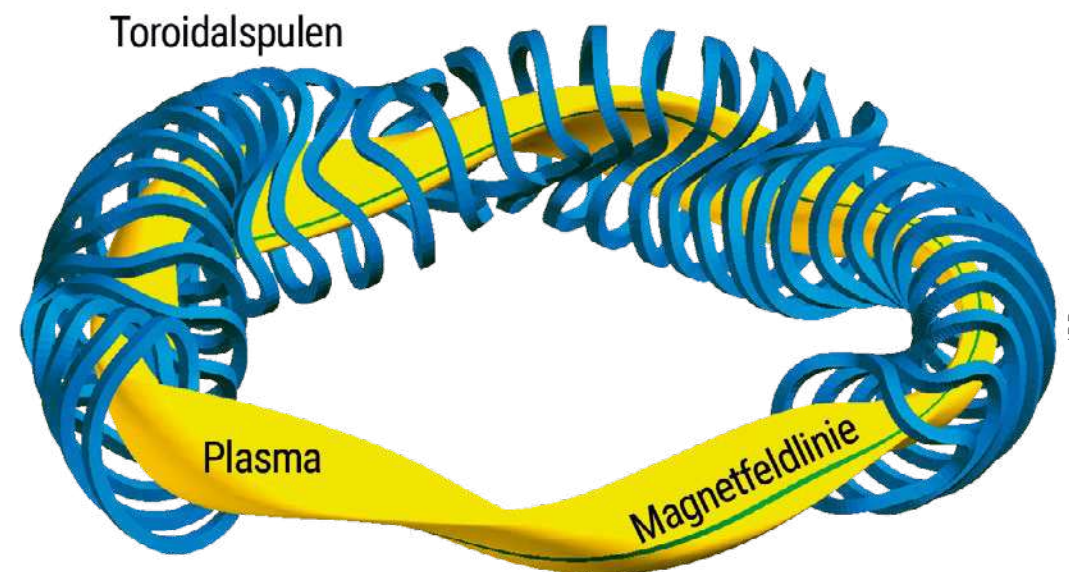
Um einen Kernfusionsreaktor dauerhaft zu betreiben, sind zahlreiche physikalische und technische Schwierigkeiten zu überwinden. Die Forschung konzentriert sich derzeit darauf, eine kontrollierte Fusionsreaktion in einer ringförmigen Brennkammer zu erzeugen. Das Wasserstoffgas muss hierzu auf Temperaturen von 100 bis 150 Millionen Grad aufgeheizt werden; Atomkerne und Elektronen sind dann voneinander getrennt. Mittels Magnetfeldern soll dieses Plasma aus geladenen Teilchen in einem ringförmigen Schlauch eingeschlossen werden. Ein Kontakt mit den Wänden der Kammer würde das Plasma verunreinigen und abkühlen, wodurch die Fusionsreaktion sofort zum Erliegen käme.

Ein stabiler magnetischer Einschluss des Plasmas ist nur möglich, wenn die Magnetfeldlinien entlang der ringförmigen Brennkammer schraubenförmig verdreht sind. Dieses verdrehte Magnetfeld, das Stärken von einigen Tesla erreichen muss, hält das heiße Plasma gegen seinen Druck zusammen, der es auseinanderzutreiben sucht.

Für den magnetischen Einschluss konkurrieren zwei technische Konzepte miteinander. Beim Stellarator ist die Brennkammer von supraleitenden Elektromagneten umgeben, die das verdrehte Magnetfeld erzeugen. Im Laufe der Zeit zeigte sich, dass die Magnetspulen kompliziert geformt sein müssen. Ihre genaue Formgebung konnte erst mit Hilfe von Supercomputern berechnet werden. Die gegenwärtig modernste Anlage ist Wendelstein-7-X in Greifswald.



**WENDELSTEIN 1A**  
Die erste Experimentieranlage in Garching nach dem Stellarator-Prinzip, genannt Wendelstein 1a, fand 1960 noch Platz auf einem Labortisch.



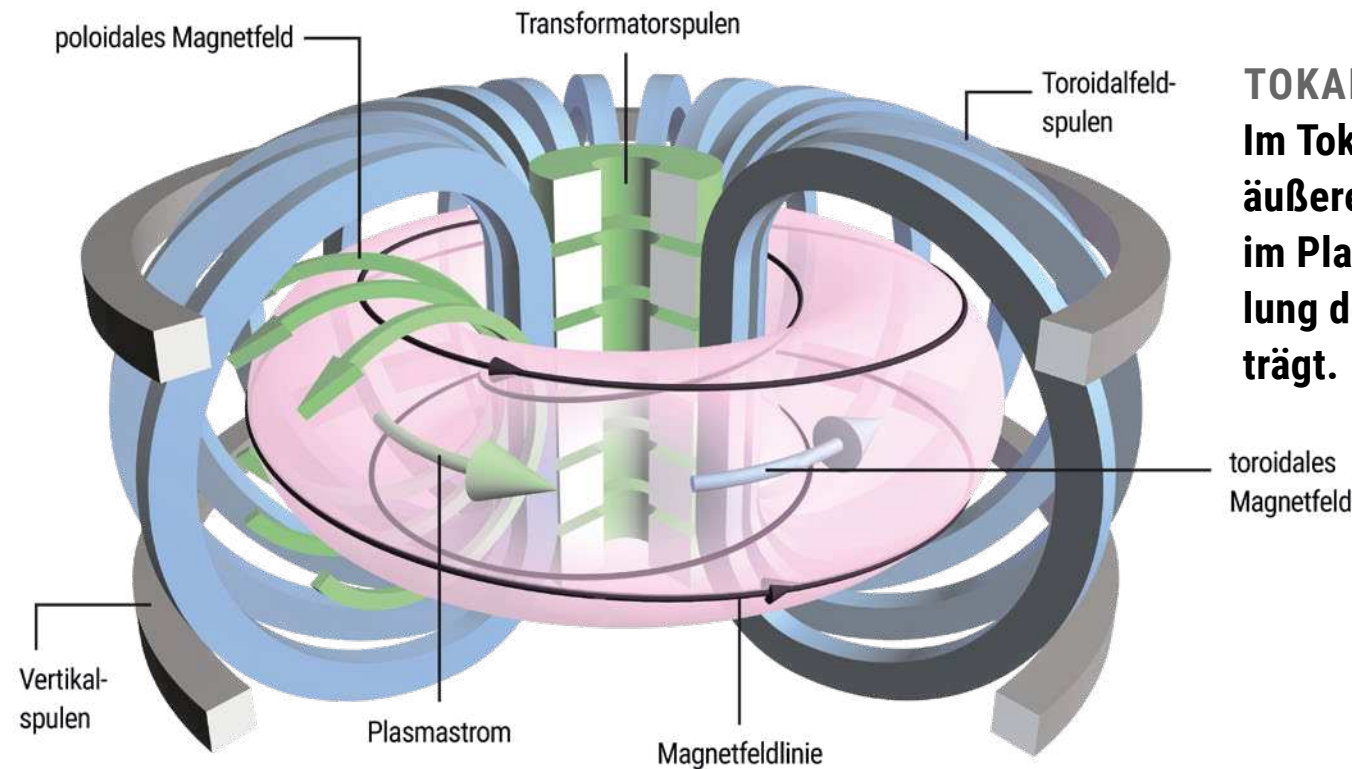
**WENDELSTEIN 7-X**  
Im Stellarator Wendelstein 7-X wird das Plasma (gelb) durch kompliziert geformte Toroidalspulen (blau) in einem verdrehten Magnetfeld zusammengehalten.



Beim Tokamak hingegen ist der Plasmaschlauch nicht dreidimensional strukturiert, sondern vollständig rotationssymmetrisch. Der komplizierte Magnetkäfig wird durch Überlagern der Felder von äußeren Toroidal- und Vertikalspulen und dem im Plasma induzierten Strom erzeugt. Dieser ringförmige Stromfluss im Plasma selbst, der für die Verdrillung des Magnetfelds sorgt, ist ein wesentlicher Unterschied zum Stellarator.

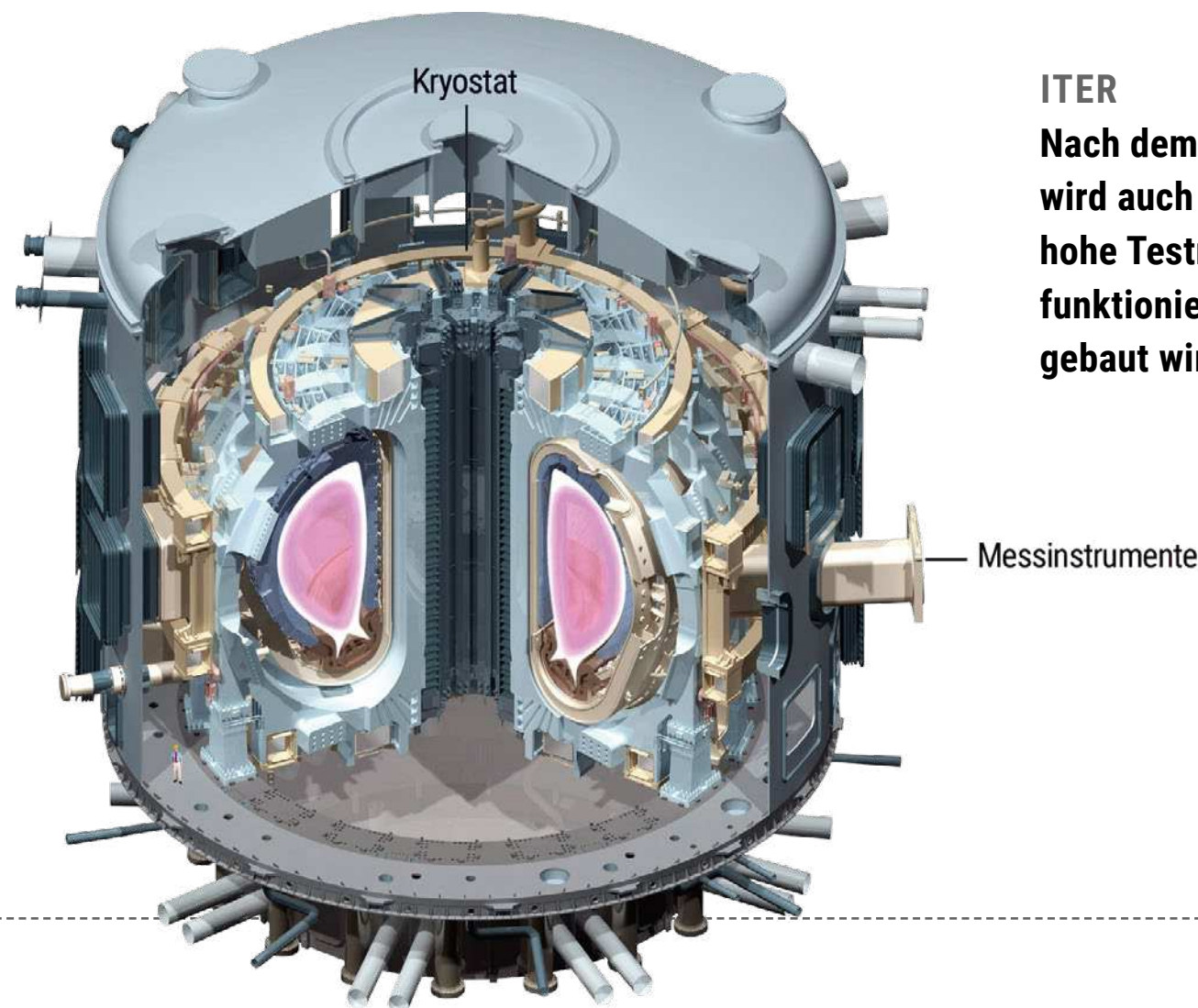
Tokamak-Forschungsanlagen sind zum Beispiel ASDEX Upgrade in Garching und JET im englischen Culham. Der im Bau befindliche Testreaktor ITER in Cadarache, Frankreich, ist ebenfalls ein Tokamak. Er soll in zehn Jahren ein selbstheizendes Plasma erzeugen können.

Noch ist allerdings unklar, wie in einem Tokamak ein Fusionsplasma dauerhaft aufrechterhalten werden kann. Ein Stellarator hingegen könnte grundsätzlich als Kraftwerk im Dauerbetrieb arbeiten.



## TOKAMAK-PRINZIP

**Im Tokamak induzieren äußere Spulen einen Strom im Plasma, der zur Verdrillung des Magnetfelds beiträgt.**



## ITER

**Nach dem Tokamak-Prinzip wird auch der 30 Meter hohe Testreaktor ITER funktionieren, der derzeit gebaut wird.**

7-X erfolgreich sein, könnte DEMO sogar nach dem Stellaratorprinzip entwickelt werden, das neben dem Dauerbetrieb wahrscheinlich höhere Plasmadichten erlaubt.

Berechtigte Hoffnung wird auch in die Entwicklung von Supraleitern für höhere Temperaturen gesetzt, welche die aufwändige Kühlung der bisherigen, teuren, supraleitenden Niob-Tantal-Magnetspulen mit flüssigem Helium ersetzen könnten. Das Versuchskraftwerk DEMO soll nach 2035 gebaut werden. Es soll Mitte der 2040er Jahre bereits Strom liefern und schließlich die sichere Planung für große Fusionskraftwerke nach der Mitte unseres Jahrhunderts ermöglichen.

### **Unerschöpfliche Brennstoffvorräte**

Radioaktivität spielt auch beim Fusionsreaktor eine Rolle, wenn auch eine viel geringere als beim Kernspaltungsreaktor. Einer der Brennstoffe, Tritium, ist ein weicher Betastrahler, dessen Strahlung kaum die menschliche Haut durchdringen kann. Allerdings darf Tritium keinesfalls in den menschlichen Körper gelangen, da es als Wasserstoff in die Zellen eingebaut werden könnte und dort Strahlenschäden verursachen kann.

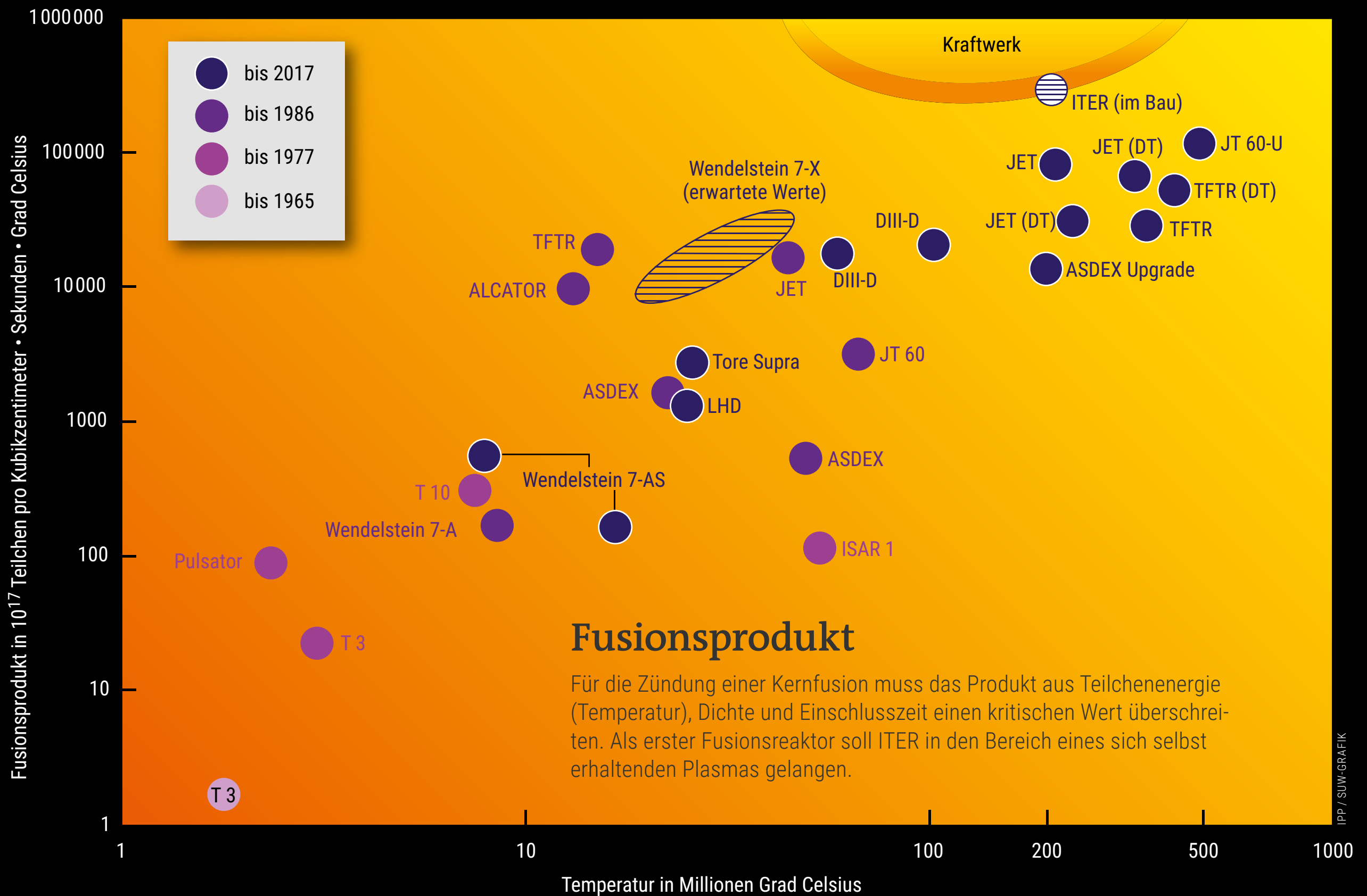
Im Fusionsplasma befindet sich gerade so viel Tritium, wie in den nächsten Minuten verbraucht wird. Ein unkontrolliertes Durchgehen des Reaktors ist nicht möglich; der Nachschub kann sofort unterbrochen werden. Bei einer Störung würde das Plasma die Wand berühren, abkühlen und die Fusion sofort erlöschen. Mehr Tritium befindet sich in einem inneren Brennstoffkreislauf, es wird nicht von außen angeliefert und gelangt auch nicht nach draußen. Etwas schwieriger zu handhaben sind die durch Neutronenaktivierung in den inneren Wänden entstandenen radioaktiven Stoffe. Die laufenden Materialentwicklungen zielen auf niedrige Aktivierbarkeit und rasch zerfallende Isotope. Studien haben gezeigt, dass in den gelegentlich auszutauschenden und dann zu lagernden Wänden die Aktivität in 100 Jahren um einen Faktor 10 000 abfällt auf einen Wert, der ihre Wiederverwendung ermöglicht. Ein geologisches Endlager ist nicht erforderlich. Die von außen anzuliefernden Brennstoffe – das Deuterium und das Lithium, aus dem Tritium erzeugt wird – sind nicht radioaktiv. Die Asche der Fusion, Helium, ist ebenfalls nicht radioaktiv. Beim Betrieb eines Fusionskraftwerks entstehen keine klimaschädlichen Gase.

Die Brennstoffvorräte auf der Erde reichen für viele Millionen Jahre. Deuterium wird leicht aus Meerwasser gewonnen. Ein Liter enthält 0,02 Gramm, rechnerisch ausreichend für einige hundert Millionen Jahre beim gegenwärtigen Energieverbrauch auf der Erde. Die geologisch abbaubaren Lithiumvorräte reichen für 1000 Jahre; bei der Gewinnung von Lithiumsalzen aus dem Meerwasser werden jedoch wieder Reichweiten von Millionen von Jahren erreicht. Der Betrieb eines Gigawattkraftwerks benötigt pro Jahr etwa 100 Kilogramm Deuterium und 5000 Kilogramm Lithium. Die Brennstoffkosten für ein Fusionskraftwerk werden auf ein Prozent der Betriebskosten geschätzt.

Solche Kraftwerke können beim stetig steigenden Energiebedarf der wachsenden Weltbevölkerung eine wichtige Rolle im Grundlastbetrieb spielen – unabhängig von Wetter, Tageszeit, Jahreszeit und Standort. Noch werden in Asien viele Kohlekraftwerke errichtet, trotz der bekannten Klimaschädlichkeit, sie könnten in 40 Jahren durch Fusionsanlagen ersetzt werden.

### **Zweite Beherrschung des Feuers**

Die gemeinsame Fusionsforschung von Wissenschaftlern aus vielen Ländern der





Erde ist schon jetzt ein friedensstiftendes und vertrauensbildendes Unternehmen, vergleichbar mit der erfolgreichen internationalen Zusammenarbeit in der Erforschung des Weltraums. Wissenschaftlich befruchten sich Plasmaphysik und Astrophysik gegenseitig: Fast der gesamte sichtbare Kosmos befindet sich im vierten Aggregatzustand, er besteht überwiegend aus Plasma.

Wir sind heute Zeitzeugen beim Anlauf zur zweiten Beherrschung des Feuers durch den Menschen, diesmal des Feuers aus dem Innern der Sterne. Der Steinzeitmensch hatte als einziges Lebewesen gelernt, das Feuer nicht zu fürchten. Vor einer Million Jahren begann er das Feuer zu unterhalten, später auch selbst zu entzünden. Diese erste Beherrschung des Feuers war ein gewaltiger Fortschritt in der Menschheitsentwicklung. Der *Homo erectus* konnte damit sein Überleben sichern, indem er bessere und haltbarere Nahrung erzeugte. Unsere nördlichen Gegenden konnten selbst zur Eiszeit besiedelt werden, dank der Herrschaft über das wärmende Feuer.

Der gegenwärtige Aufbruch der Menschheit zur Beherrschung des Sonnenfeuers

auf der Erde ist eine gewaltige Aufgabe für ein lohnendes Ziel: der Klimazerstörung Einhalt zu gebieten und fast unerschöpfliche Energiequellen zu erschließen, die eine wachsende Weltbevölkerung mit steigenden Ansprüchen benötigen wird. Anerkennung verdienen die an dieser langwierigen Entwicklung beteiligten Wissenschaftler und Techniker, denn die Früchte ihrer Arbeit werden erst die Enkelgenerationen ernten.

Wann genau werden wir das Sonnenfeuer auf der Erde furchtlos beherrschen? Die verlautbarten Zeitpläne sind oben genannt worden, aber die Umsetzung hat neben den physikalisch-technischen Fragen auch eine starke politische Seite. Sollte sich die Menschheit bald darauf verständigen, den Ausstoß klimaschädlicher Gase in die Erdatmosphäre rascher zu verringern, könnte die Entwicklung der Fusion mit größerem finanziellen und personellen Aufwand beschleunigt werden. Dazu wäre ein nachdrückliches Programm mit viel Geld und Geist unter einem straffen Management erforderlich, ähnlich Apollo.

Aber noch ist die Energieerzeugung aus Kohle, Öl und Gas billig – und noch scheinen die menschengemachten Schäden in

der Natur überschaubar, obwohl der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre unbarmherzig weiter steigt, ebenso wie die globalen Temperaturen mit ihren schädlichen Klimaveränderungen. Eine kluge Antwort auf die Frage nach einem genaueren Zeitplan für den Fusionsreaktor hat Lew Arzimowitsch, einer der russischen Tokamak-Erfinder, gegeben: »Die Fusion wird bereitstehen, wenn die Gesellschaft sie benötigt. Vielleicht sogar ein wenig früher.« ↩

(Sterne und Weltraum, März 2018)

INTERVIEW

# »Wahrscheinlich wird es mehrere DEMOs geben«

von Dietrich Lemke

**Herr Jenko, Ihr Institut steht für die deutsche Beteiligung an den weltweiten Anstrengungen, das Sonnenfeuer in einem Fusionskraftwerk auf die Erde zu holen. Was genau machen Sie im IPP dabei?**

Jenko: Drei Voraussetzungen müssen für ein Fusionskraftwerk erfüllt werden: Die physikalische Machbarkeit, die technische Umsetzbarkeit und die Wirtschaftlichkeit. Wir bearbeiten überwiegend das Feld der physikalischen Machbarkeit, also die Frage des magnetischen Einschlusses eines heißen Plasmas als Voraussetzung für die Gewinnung von Fusionsenergie. Das geschieht durch aufwändige Experimente mit unseren Fusionsanlagen ASDEX Upgrade in Garching und Wendelstein 7-X in Greifswald, aber auch durch theoretische Arbeiten und Computersimulationen im Rahmen der Plasmaphysik.

**Können Sie Beispiele für wichtige Erfolge des IPP nennen?**

Eine zentrale Herausforderung in der Fusionsforschung ist es, hohe Energieeinschlusszeiten zu erreichen und gleichzeitig zu vermeiden, dass zu viele Verunreini-

gungen von den Wänden in das Plasma eindringen und dort zu einer Strahlungsabkühlung führen. In diesem Zusammenhang spielt der Plasmarand eine wesentliche Rolle. Zudem ist es wichtig, möglichst lange Entladungszeiten zu erreichen. In diesen und weiteren Bereichen wurden am IPP entscheidende Durchbrüche erzielt, die auch in die Planung des internationalen ITER-Experiments eingeflossen sind. Hierbei weisen Experimente und Simulationsrechnungen gemeinsam den Weg zu kontinuierlichen Verbesserungen.

**Woran arbeitet Ihre Theoriegruppe gegenwärtig?**

Unser langfristiges Forschungsziel ist die Entwicklung eines virtuellen Fusionsplasmas auf den weltgrößten Supercomputern, um den Betrieb von ITER zu unterstützen und das Design von Fusionskraftwerken zu optimieren. Die bisher erforschten Einzelaspekte des Plasmaverhaltens sollen dabei mehr und mehr zu einem Gesamtbild verflochten werden. Entsprechende Simulationsprogramme müssen hierzu viele unterschiedliche Prozesse – schnelle und langsame, groß- und kleinskalige – in ihrer Wechselwirkung beschreiben können. Die



**Frank Jenko leitet den Bereich Tokamaktheorie am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching.**



Fortschritte auf diesem Gebiet waren ziemlich atemberaubend in den letzten Jahren, und wir erwarten eine Fortsetzung dieser Erfolgsgeschichte auf dem Weg in das Exascale-Computing, wenn wir also in der Lage sein werden, Trillionen von Rechenoperationen pro Sekunde durchzuführen.

**Im weltweit verzweigten Konsortium für das große ITER-Experiment hat es in der Vergangenheit Verzögerungen, Kostensteigerungen und Austrittserwägungen gegeben. Ist die Krise heute überwunden?**

Nach gründlichen Begutachtungen durch externe Experten, die in wissenschaftlich-technischen Großprojekten erfahren sind, kam es zu einem Neustart mit realistischen Zeitplänen. Der neue französische Generaldirektor bringt wertvolle Projekterfahrungen mit und steht für einen transparenten, erfolgsorientierten Managementstil. Diese Entwicklungen haben dem Projekt sehr gut getan und Optimismus geweckt.

**Nach ITER soll DEMO als erstes Versuchsfusionskraftwerk folgen. Weil schon die Standortwahl für ITER nicht einfach war – Japan wollte es gerne**

**haben – können Sie vermuten, wo DEMO gebaut wird?**

Bereits bei ITER gibt es einen intensiven Wettbewerb um die Entwicklung der technologisch anspruchsvollsten Komponenten. Wenn ITER erfolgreich ist und die physikalische Machbarkeit eines Fusionskraftwerks demonstrieren kann, könnte ich mir gut vorstellen, dass es mehrere DEMOs geben wird. So könnte man zum Beispiel vermuten, dass China ein eigenes Versuchskraftwerk errichten wird. In dem Rieseland steigt der Energiebedarf weiter stark an. Heute werden dort noch Kohle- und Kernkraftwerke gebaut, die aber nach 2050 ergänzt und ersetzt werden müssen.

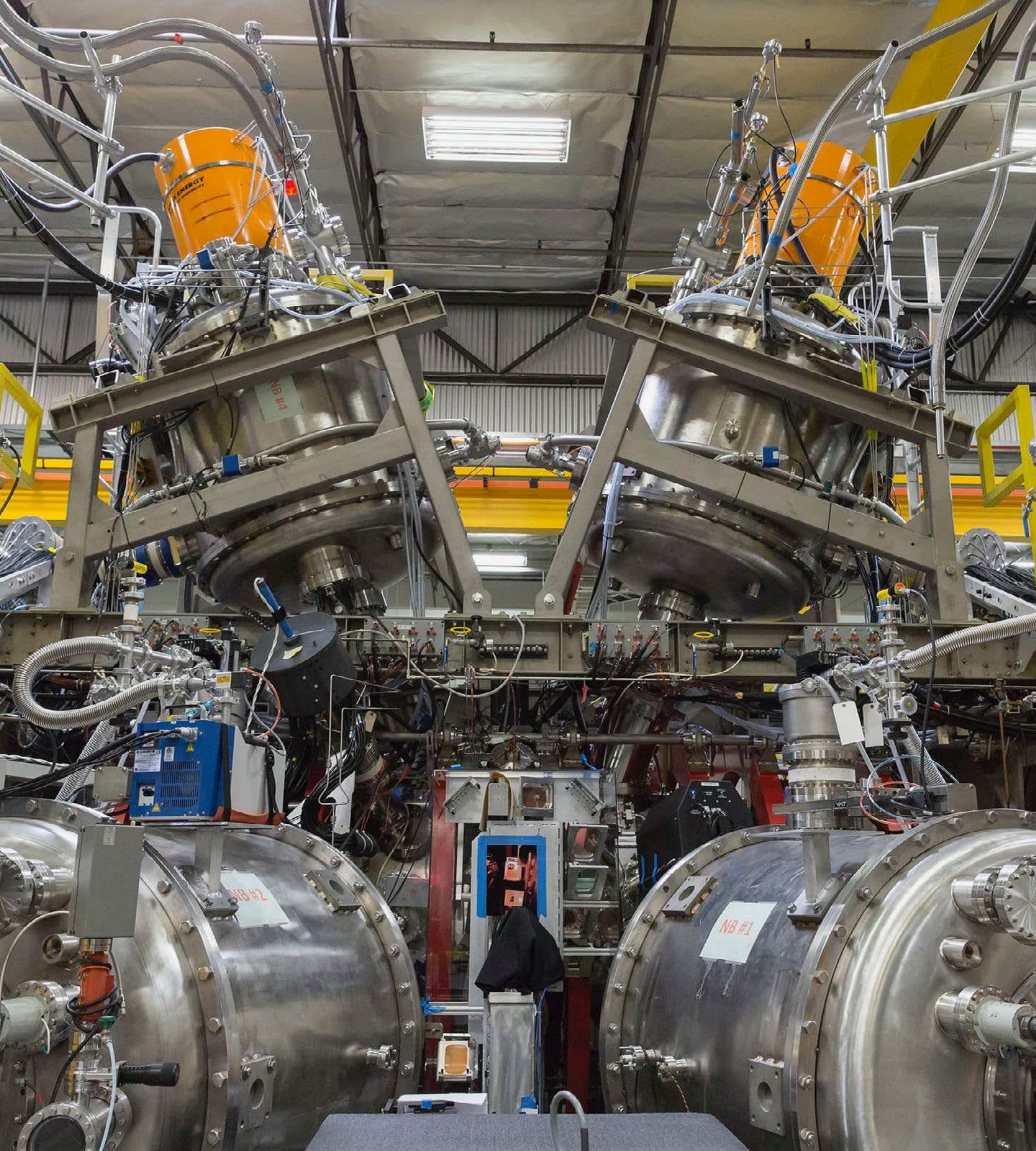
**Hat Ihre Plasmaforschung für die Fusion Ähnlichkeiten mit der Erforschung der Plasmen im Kosmos?**

Ja, wir wenden unsere Erkenntnisse und Simulationsprogramme auch auf astrophysikalische Plasmen an. Zu den wichtigen Themengebieten gehören beispielsweise Turbulenzen im Sonnenwind, die Dynamik in Akkretionsscheiben um junge Sterne und Schwarze Löcher sowie die Beschleunigung von Teilchen der kosmischen Partikelstrahlung in Supernova-Überresten. Die

Astrophysik gibt Anregungen für unsere Arbeit mit Fusionsplasmen – und umgekehrt. Mit Interesse erwarten wir eine hoffentlich positive Entscheidung für den Bau des europäischen Forschungssatelliten THOR zur Untersuchung von Turbulenzen im Sonnenwind. Letzterer – ein Plasmastrahl von der Sonne in den interplanetaren Raum und sichtbar an Kometenschweif – wurde übrigens 1959 von Ludwig Biermann entdeckt, der dann 1960 zu den Gründungsvätern unseres Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik gehörte. ↩

Das Gespräch führte Dietrich Lemke.  
(Sterne und Weltraum, März 2018)





ENERGIETECHNIK

# KERNFUSION EINMAL ANDERS

von W. Wayt Gibbs

Risikofreudige Physiker – und ein paar Milliardäre dahinter – erproben schnellere und billigere Wege, um eine potenziell unerschöpfliche, saubere Energiequelle nutzbar zu machen.

## FUSIONSREAKTOR BEI TRI ALPHA ENERGY

**Bei Tri Alpha schießen Injektoren (gelbe und metallisch blanke Zylinder) Atomstrahlen auf rotierendes Plasma, um dessen Bewegung aufrechtzuerhalten und zu stabilisieren.**

MIT FRDL. GEN. DER TRI ALPHA ENERGY INC.



**A**uf den ersten Blick sieht die Ansammlung von Bildschirmen und Schaltknöpfen aus wie die überdimensionale Version eines Computerspiels, in dem es irgendwelche Verbrecher abzuknallen gilt. Aber hier treffen die Bezeichnungen wie »plasma guns« und »shot control« zu. Ich sitze im Kontrollraum für den Fusionsreaktor der Firma Tri Alpha Energy in Foothill Ranch (Kalifornien). Diese experimentelle Anlage ist der Prototyp eines Kraftwerks, in dem dasselbe Höllenfeuer entfesselt werden soll wie im Inneren eines Sterns oder einer Wasserstoffbombe. Als wir den nächsten Schuss vorbereiten und ich auf dem Bildschirm beobachten kann, wie die Arbeiter aus Sicherheitsgründen den Reaktorraum verlassen, wird mir doch etwas mulmig zu Mute.

Um die blechglänzende, zylindrische Vakuumkammer im Zentrum des Reaktors, die ungefähr so groß ist wie zwei Busse hintereinander, winden sich zwei Dutzend ringförmige Elektromagnete, jeder von ihnen größer als ich und dicker als mein Oberschenkel. Gleich werde ich die Temperatur

im Inneren der Kammer auf zehn Millionen Grad ansteigen lassen – allerdings nur für einen winzigen Augenblick.

In einem Nachbargebäude des unscheinbaren Lagerhauses haben sich heute morgen vier Schwungräder, jedes sieben Tonnen schwer, mit Strom aus dem öffentlichen Netz auf Touren gebracht. Auf meinen Knopfdruck hin verwandeln sie ihre ganze angesammelte Bewegungsenergie in einen 20-Megawatt-Stromstoß. Die elektrische Ladung fließt in die Magnetspulen und füllt eine Reihe fatter Kondensatoren. Binnen zwei Minuten springen alle Anzeigen auf meinem Kontrollschirm von »aufladen« auf »fertig«. Der Operator sagt »Achtung, Schuss« über Lautsprecher; Warnlampen blinken auf. Ich drücke den Auslöser.

In einer Mikrosekunde geben die Kondensatoren ihre angestaute Energie frei. Zwei große Düsen an den Enden des Zylinders schießen Wasserstoffionen mit einer Geschwindigkeit von fast einer Million Stundenkilometern in Richtung Zylindermitte; dort stoßen sie aufeinander und verwirbeln sich zu einem heißen, rotierenden Plasma in Form einer hohlen Zigarre. Ungeheure Energien werden auf kleinstem

## AUF EINEN BLICK

### Kleinfusion

- 1 Milliarden schwere Großprojekte wie ITER und NIF sind nach wie vor weit davon entfernt, mehr Energie aus Fusionsreaktionen zu gewinnen, als sie zu deren Auslösung aufwenden.
- 2 Einige private Firmen erproben jetzt andere Zugänge in kleineren und einfacheren Anlagen. Erste Ergebnisse stimmen hoffnungsvoll.
- 3 Gleichwohl sind noch gewaltige Hindernisse zu überwinden, bis man die Turbulenz im heißen Plasma sowie den Übergang vom Experimental- zum Produktionsbetrieb beherrscht.



Raum konzentriert – aber es gibt keinen Lichtblitz und keinen Knall, nur ein gedämpftes »Pling«, als hätte nebenan jemand einen Schraubenschlüssel auf den Betonboden fallengelassen.

Einen Augenblick später hat sich die Plasmawolke verflüchtigt. Die Warnlampen verlöschen, die Arbeiter machen da weiter, wo sie soeben aufgehört haben, und die Computer arbeiten sich durch die Gigabytes an Daten, die Dutzende von Sensoren im Inneren des Reaktors von dem Ereignis geliefert haben. Bei den hundert Schuss pro Tag, die Tri Alpha abfeuert, ist einer mehr kein Grund für besondere Aufregung.

Als ich im Februar 2016 die Anlage besuchte, hatte die Versuchsmaschine C-2U zwei Jahre Betrieb und 50 000 kleine Plings hinter sich – und damit ihre Schuldigkeit getan. Die Ingenieure von Tri Alpha hatten alle Daten beisammen, um weiterzumachen. Michl Binderbauer, der drahtige, leicht hyperaktive Technikchef der Firma, ließ die Anlage im April 2016 abschalten und ausschlachten. Teile von ihr sollen in dem Nachfolgemodell namens C-2W Verwendung finden, dessen Fertigstellung für Mitte 2017 vorgesehen ist.

Mit diesem »Klein-und-schnell«-Konzept – einen Prototyp bauen, das Nötigste daran austesten und ihn alsbald durch einen besseren ersetzen – steht Tri Alpha in krassem Gegensatz zu den Bräuchen der Zunft. Seit Jahrzehnten versuchen akademisch geprägte Wissenschaftler mit gigantischen Maschinen, dem hochoverhitzten, gewaltigen Kräften ausgesetzten Plasma seine Geheimnisse zu entreißen. In dessen Innerem soll eine Kernfusion stattfinden – aber das passiert eben häufig nicht. Binderbauer, Sohn eines vielseitigen Wiener Unternehmers, gehört zu einer neuen Sorte Fusionsforscher: getrieben von den Ertragserwartungen risikobereiter Investoren, der pragmatischen Geisteshaltung eines Ingenieurs und dem unablässig verfolgten Ziel, nicht einen Tempel der Hochenergiephysik zu errichten, sondern ein konkret realisierbares Kraftwerk. Auch etliche andere Start-ups, zum Beispiel General Fusion aus der Nähe von Vancouver (Kanada), setzen darauf, dass sie mit einem Fusionsreaktor Geld verdienen können, ohne zuvor die komplexe Physik in allen Einzelheiten bewältigt zu haben.

Eigentlich sind Fusionskraftwerke ideale Energiegewinnungsanlagen: Ihr Brenn-

stoff steht – im Ozean oder in Allerweltsgesteinen – in praktisch unerschöpflicher Menge zur Verfügung und enthält keinen Kohlenstoff, also tragen die Anlagen auch nicht nennenswert zum Treibhauseffekt bei. Sie produzieren nur geringe Mengen strahlender Abfälle, deren Radioaktivität zudem nach relativ kurzer Zeit abklingt, und kein waffenfähiges Uran. Ein einziges Kraftwerk würde unabhängig von Wind und Sonnenschein den Energiebedarf einer ganzen Stadt decken. Es bleibt nur noch ein Hindernis: Man müsste einige der schwierigsten physikalischen und technischen Probleme lösen, die Menschen je angegangen sind.

### **LIFE ist beendet, und ITER wird niemals Strom ins Netz liefern**

Zurzeit genießen die Pragmatiker größere Aufmerksamkeit, weil die staatlich geförderten Kollegen in einer Sackgasse gelandet sind. Mit ihren Riesenreaktoren haben sie zwar einige Grundlagenfragen geklärt, aber keine Vorstellung, wie sie bis Mitte des Jahrhunderts Strom ins öffentliche Netz einspeisen könnten.

Paradebeispiel ist die National Ignition Facility (NIF) am Lawrence Livermore Nati-

onal Laboratory (LLNL) in Livermore (Kalifornien). Die vier Milliarden Dollar teure Anlage feuert Laserpulse mit einer Billion Watt auf winzige Brennstoffbehälter. »Die NIF schießt ein paar hundert Mal pro Jahr«, sagt Binderbauer in seinem österreichisch gefärbten Singsang; für einen Kraftwerksbetrieb müssten es jedoch einige 10 000 Schuss pro Tag sein.

Für ihren Hauptzweck, die Waffenforschung, hat die NIF brauchbare Ergebnisse geliefert. Aber das Nachfolgeprojekt LIFE (Laser Inertial Fusion Energy) müsste den Energieausstoß um den Faktor 30 000 steigern, nur um die Laser aus eigener Kraft betreiben zu können – und noch wesentlich darüber hinaus, damit sich ein Kraftwerk rechnet. Im April 2014 hat das LLNL dem Projekt LIFE ein Ende gesetzt und damit seine Pläne für den Prototypen eines Kraftwerks beendet.

Das zweite traurige Beispiel ist der ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), eine zehn Stockwerke hohe Maschine, die ein internationales Konsortium zurzeit in Cadarache in Südfrankreich baut. Riesengroße supraleitende Magnete sollen ein Plasma zusammenhalten, das zumindest für etliche Minuten eine Tem-

peratur von 150 Millionen Grad Celsius erreicht. Selbst wenn ITER erfolgreich ist, wird er niemals Strom ins Netz abgeben.

Bei der Vertragsunterzeichnung im November 2006 rechneten die Politiker mit Baukosten von 5,5 Milliarden Euro, Betriebskosten in ungefähr gleicher Höhe und einer Fertigstellung 2016. Im Mai 2016 war die Kostenschätzung allerdings auf 20 Milliarden angeschwollen, und mit dem Regelbetrieb rechnet man inzwischen für 2035 – frühestens. In den USA, die mit ungefähr fünf Milliarden Dollar an den Kosten beteiligt sind, stimmte ein frustrierter Senat mit 90 zu 8 Stimmen für einen Ausstieg aus dem Projekt. Nachdem das Energieministerium jedoch in einem ausführlichen Bericht den Verbleib nachdrücklich empfohlen hatte, gab der Kongress grünes Licht für zweieinhalb Jahre, gerechnet ab Mai 2016.

Der quälend langsame Fortschritt der Dinosaurierprojekte NIF und ITER hat Binderbauer und den anderen »neuen Wilden« klargemacht, dass sie ihr Heil in kleineren Maschinen und neuen Zugängen suchen müssen. Es geht darum, eine sehr geringe Menge Brennstoff heiß genug zu machen, dicht genug zusammenzupres-

sen und lang genug in diesem Zustand zu halten, damit einige der Atome miteinander verschmelzen und dabei einen Teil ihrer Masse in Energie verwandeln. Dabei kann zum Beispiel eine höhere Temperatur eine niedrigere Dichte wettmachen; es kommt darauf an, dass das Produkt von Temperatur, Dichte und Einschlusszeit einen hinreichend großen Wert erreicht.

Das eröffnet eine breite Palette von Möglichkeiten. An deren Extrempunkten – geringe Dichte, hohe Temperatur oder umgekehrt – finden sich die Großprojekte NIF und ITER; die Neulinge dagegen ziehen es vor, in der bislang wenig erforschten Mitte (vergleichsweise mäßige Dichten und Temperaturen) nach Beute zu suchen.

Außerdem sind diese Unternehmungen so konzipiert, dass sich der Erfolg oder das Scheitern relativ bald zeigt. Ihre Reaktoren sind »im Prinzip für ein Hundertstel des Preises von ITER zu haben, einfacher und in kürzerer Zeit zu bauen und treiben die Forschung schneller voran«, sagt Scott Hsu, ein Fusionsphysiker am Los Alamos National Laboratory, der mit einem weiteren Start-up namens HyperV Technologies zusammenarbeitet. Dort schießt man aus Hunderten von Rohren Plasmen aus Was-

serstoff und Argon in den Mittelpunkt eines kugelförmigen Reaktors, wo sie sich zu einer verdichteten Brennstoffwolke vereinigen. Irgendwelche fatalen Fehler in einer dieser Ideen werden höchstwahrscheinlich zu Tage treten, bevor Jahrzehnte vergangen und Milliarden verbraten sind.

So etwas gefällt den Investoren. General Fusion hat seine 100 Millionen Dollar unter anderem bei Jeff Bezos, dem Gründer des Onlinehändlers Amazon, der kanadischen Regierung und dem Staatsfonds von Malaysia eingesammelt. Tri Alpha rühmt sich, mehrere hundert Millionen von prominenten Geldgebern wie der Großbank Goldman Sachs und Paul Allen, einem der Gründer von Microsoft, erhalten zu haben. Und ein etabliertes Institut wie die Sandia National Laboratories bezieht einen Teil seiner Finanzierung von der Advanced Research Projects Agency – Energy (ARPA-E) des Energieministeriums, die sich in dieser Beziehung wie ein Risikokapitalgeber verhält.

Es handelt sich um Wetten mit hohem Hauptgewinn – und hohem Risiko. »Die Geschichte der Fusionsforschung ist voll von Fällen, in denen die Natur gesagt hat: ›Nette Idee, aber so läuft's nicht‹«, lästert Stephen A. Slutz, Cheftheoretiker des Sandia-Projekts.

### **Kernfusion ist wie Speed Dating – nur millionenfach heißer und schneller**

Dass es so schwer ist, ein heißes, wildes Plasma im Zaum zu halten, liegt in der Natur der Kernfusion. Zwei Atomkerne, ihrer Elektronenhülle beraubt, würden von der starken Kernkraft durchaus zueinander hingezogen – aber nur aus unmittelbarer Nähe. Aus etwas größerer Entfernung finden sie sich wegen der elektrostatischen Kräfte überaus abstoßend. Es geht also darum, die widerstrebenden Atomkerne so intensiv zusammenzubringen, dass sich ihre anziehenden Kräfte auswirken können. Wenn das geschieht, vereinigen sich die beiden Partner zu dem Atomkern eines schwereren Elements, der etwas weniger Masse hat als die Summe seiner Teile. Dieser »Massendefekt« wird als Energie frei, die in Form von Photonen und schnellen Elementarteilchen davonfliegt und sich am Ende als Wärme nutzen lässt. Konventionelle Kernreaktoren beziehen dagegen ihre Energie nicht aus der Vereinigung, sondern aus der Spaltung von Atomkernen, in der Regel Uran.

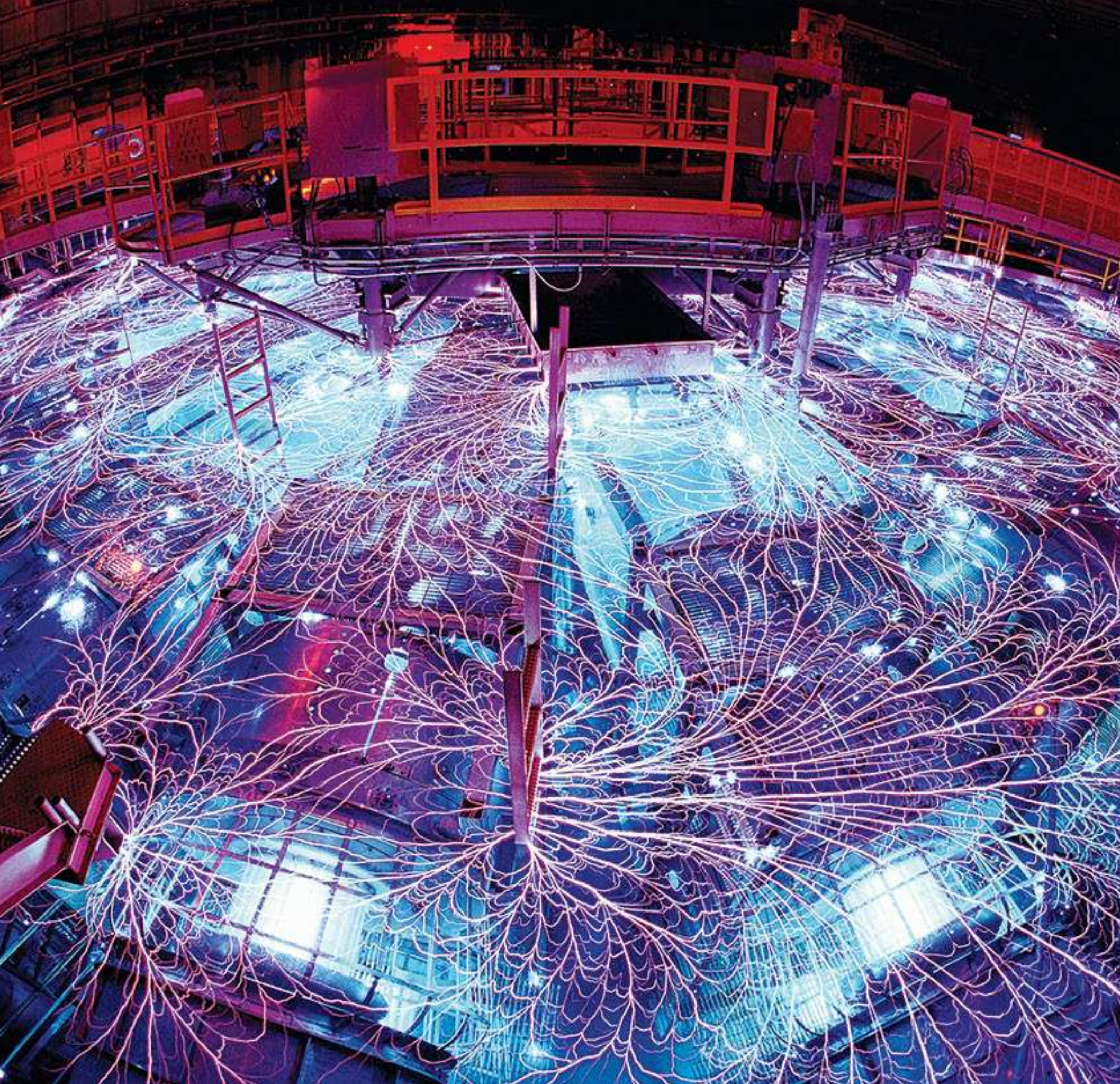
Damit sich bei dieser etwas gewaltsamen Form von Speed Dating viele Paare bilden, müssen die Partner mit hoher Ge-

schwindigkeit zusammengebracht werden, so dass die elektromagnetische Kraft sie nicht vorzeitig auseinandertreibt, aber nicht zu schnell, so dass die starke Kernkraft ihre Wirkung entfalten kann. Das läuft typischerweise auf eine Plasmatemperatur jenseits von 100 Millionen Grad hinaus. Der Reaktor muss die superheißen, sprich schnell bewegten Vereinigungskandidaten auf sehr engem Raum innerhalb einer Vakuumkammer zusammenpressen und dort halten, bis eine ausreichende Zahl heftiger Begegnungen stattgefunden hat. Nach einer gängigen Faustregel muss das Produkt von Dichte und Einschlusszeit größer sein als ungefähr  $10^{14}$  Sekunden pro Kubikzentimeter. Die Faktoren dieses Produkts dürfen dabei um etliche Größenordnungen variieren.

ITER begnügt sich mit einem ziemlich dünnen Plasma: ungefähr ein halbes Gramm der neutronenreichen Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, verteilt auf eine torusförmige Vakuumkammer (»Tokamak«) vom Volumen eines kleinen Hauses. Dafür soll der heiße Stoff für mehrere Sekunden beisammen bleiben.

Am anderen Ende der Skala schießt die NIF Laserpulse mit einer Gesamtleistung





## **Z MACHINE**

**Die Z Machine von den Sandia National Laboratories erzeugt mit kurzen, sehr intensiven Stromstößen Magnetfelder, die das Plasma komprimieren.**

RANDY MONTOYA / SANDIA NATIONAL LABORATORIES



von bis zu 500 Billionen Watt auf einen kleinen Krümel aus tiefgefrorenem Deuterium und Tritium. Die Anlage zur Bereitstellung dieser gewaltigen Energiemengen füllt ein 30 Meter hohes Gebäude, das die Fläche von drei Fußballfeldern bedeckt. Um das Plasma zu »zünden«, das heißt in einen Zustand zu versetzen, in dem es ohne weitere Hilfe von außen mit der selbst erzeugten Energie die Fusionsreaktion aufrechterhält, benötigt die NIF eine unglaublich hohe Plasmadichte, denn nichts hält die Atome zusammen außer ihrer Massenträgheit. Damit haben sie nur den Bruchteil einer Nanosekunde, um zusammenzufinden.

Die Mitte zwischen diesen beiden Extremen, also mäßige Dichten und mäßige Einschlusszeiten, biete vielleicht die besten Aussichten, sagt Patrick McGrath, der Programmdirektor von ARPA-E. Aber bislang kann keine Maschine die Kobilde der Turbulenz und der Instabilität zähmen, die unweigerlich in solchen Plasmen ihr Unwesen treiben. Ein heißes Fusionsplasma zu bändigen ist wie eine Kerzenflamme zusammenzudrücken, ohne sie zu berühren. Es ist sogar noch viel schwerer, weil die Ionen im Plasma selbst komplexe und starke

elektromagnetische Felder erzeugen. »Sogar wenn es uns gelingt, die Kerze anzuzünden, bläst sie sich selbst aus«, drückt es Dylan Brennan aus, ein Fusionsforscher am Princeton Plasma Physics Laboratory.

### **Jede Menge Fachleute sind sich sicher, dass das Verfahren von General Fusion nie funktionieren wird**

In dieser Disziplin hat zurzeit Tri Alpha den größten Fortschritt zu verzeichnen. »Alles hier ist jünger als ein Jahr«, sagt Binderbauer stolz, während wir die Maschine C-2U der Länge nach abschreiten – immerhin 23 Meter, aber winzig im Vergleich zu NIF oder ITER. Schon drei Monate nach Inbetriebnahme produzierte sie bis zu 100 rotierende Wasserstoff-Plasmawölkchen pro Tag. Sie lebten immerhin fünf Millisekunden und brachten es auf die Hälfte der geplanten Dichte von  $10^{14}$  Ionen pro Kubikzentimeter.

Bis zu der Zielvorstellung der Firma – ein Plasma, das in aller Ruhe Tage oder Wochen am selben Platz vor sich hinrotiert – ist es noch weit hin. Aber die Vision scheitert nicht an prinzipiellen Hindernissen, sondern an den Grenzen der Energiezufuhr von außen, sagt Binderbauer. Ein Pro-

duktionsreaktor, der sowohl das Stromnetz als auch sich selbst mit Energie beliefert, könne beliebig lang am Stück laufen. In dem Nachfolgemodell C-2W soll eine elektronische Steuerung den Neigungen des Wölkchens, zu schwingen oder davonzulaufen, entgegenwirken.

Scott Hsu bescheinigt der Firma Tri Alpha, mit der er in keiner Weise verbunden ist, sie habe das Stabilitätsproblem im Wesentlichen gelöst. Jetzt kommt es darauf an, längere Einschlusszeiten zu erreichen, und das bei höheren Temperaturen, während die ganze Zeit Brennstoff nachgefüllt wird; denn erst im Dauerbetrieb erzeugt der Reaktor einen Energieüberschuss.

Im Gegensatz dazu arbeitet der Reaktor von General Fusion im Pulsbetrieb. Die kugelförmige, einen Meter breite Reaktionskammer trägt eine gigantische Igelfrisur aus zahlreichen Kolben, jeder reichlich 30 Zentimeter dick und so lang wie Michel Laberge, der großgewachsene, rotbärtige Gründer und Chefwissenschaftler der Firma. Mit dem unverkennbaren Akzent eines Frankokanadiers beschreibt er sein etwas punkig geratenes Baby: »Jeder Kolben wird mit Pressluft auf 200 Kilometer pro

Stunde beschleunigt, dann trifft er auf den Amboss, und wumm!«, ruft er und klatscht in die Hände. »Die müssen alle innerhalb von fünf Millisekunden zuschlagen, dann gibt es eine Stoßwelle.« Die trifft im Zentrum der Kugel auf etwas Plasma, das zwei große Injektoren »just in time« in Form eines Rauchrings dorthin geschossen haben, komprimiert es gewaltig und löst damit eine kurze, aber energiereiche Kaskade von Fusionsreaktionen aus. Das Ganze soll sich ungefähr einmal pro Sekunde abspielen, wie ein Herzschlag. Auf diese Weise lasse sich die Turbulenz leichter beherrschen, so Laberge, weil der kleine Plasmatorus nur eine Millisekunde lang seine Form wahren muss.

Die richtige Plasmadichte erreicht das Injektorsystem schon, sagt Laberge, ebenso die Temperatur und die magnetische Feldstärke. Bloß mit der Einschlusszeit hapert es noch. Nur 20 statt 1000 Mikrosekunden hält das Plasma durch, bevor es der Instabilität zum Opfer fällt. Mit einer neuen, trompetenähnlich geformten Düse will Laberge dem vom Plasma selbst erzeugten Magnetfeld den richtigen Dreh geben, so dass dieses die Atome lange genug zusammenhält.

»Und trotzdem gibt es jede Menge Fachleute, die sich sicher sind, dass das Verfah-

ren von General Fusion nie funktionieren wird«, sagt Brennan, der die Firma berät. Es ist auch wenig plausibel, dass ein kleines Häuflein Entschlossener aus einem Start-up etwas hinkriegen sollte, an dem akademische Forscher in jahrelanger Arbeit gescheitert sind. »Aber gibt es ein wissenschaftliches Argument, das uns erklärt, dass das unmöglich ist? Nein!«

In einer Anlage namens MagLIF (Magnetized Liner Inertial Fusion) ist den Sandia Laboratories in Albuquerque (New Mexico) etwas gelungen, was die Start-ups noch vor sich haben: Fusionsreaktionen in nennenswerter Menge auszulösen. Wie NIF strebt MagLIF hohe Teilchendichten an – um die  $10^{24}$  Ionen pro Kubikzentimeter – und begnügt sich mit Einschlusszeiten im Nanosekundenbereich. Aber es ist mit 34 Metern Breite viel kleiner und entsprechend billiger als NIF. Die Fusion findet in einem offenen Metallzylinder statt, der nicht größer ist als der Radiergummi am hinteren Ende eines Bleistifts. Das Kunststück, trotz der bescheidenen Größe eine Fusion auszulösen, gelingt durch einen gezielten Doppelschlag.

Erstens schickt die so genannte Z Maschine einen elektrischen Stromstoß von 19

Millionen Ampere durch den Apparat. Das dadurch erzeugte Magnetfeld drückt den Zylinder zusammen wie ein Bodybuilder eine Getränkedose und bringt die Fusionspartner dadurch näher zusammen. In diesem Moment ionisiert zweitens ein kurzer Laserstrahl von einer Billion Watt den komprimierten Brennstoff. Ein weiteres Magnetfeld hindert das dadurch entstehende Plasma, durch die Enden des Zylinders zu entweichen. Allerdings krumpelt sich die kleine Metallröhre noch nicht so geregelt zusammen, dass das Plasma nicht durch irgendwelche Risse in der Seitenwand verschwinden könnte.

Seit den ersten Tests Ende 2013 hat sich die Ausbeute pro Schuss ver Hundertfacht. Projektleiter Daniel Sinars rechnet in naher Zukunft mit weiteren Verbesserungen.

Wenn alles gut geht, wollen die Sandia-Leute den Stromstoß auf 25 Millionen Ampere hochdrehen. Die dann stattfindenden  $10^{16}$  Fusionsreaktionen würden mehr Energie liefern, als zuvor in den Brennstoff hineingesteckt wurde. Damit wäre der Erfolg der NIF von 2014 zu einem Bruchteil der Kosten erreicht.

Der Nachfolger der Z Maschine ist schon auf dem Reißbrett. Die neue Z800 würde



mit 65 Millionen Ampere zuschlagen und statt des bisherigen Deuteriums ein wesentlich zündfreudigeres Gemisch aus Deuterium und Tritium verwenden. Das gäbe die bis zu 100 000-fache Ausbeute pro Schuss. In ihren kühnsten Träumen erreichen die Forscher von Sandia damit die sich selbst erhaltende Fusion zehn oder mehr Jahre, bevor ITER so weit ist.

Da Sandia vom Staat finanziert wird, müsste der Kongress jede größere Neuinvestition genehmigen, und der war in letzter Zeit nicht in Geberlaune. Aber hier könnte Konkurrenz das Geschäft beleben. Stephen A. Slutz versäumt nicht, darauf hinzuweisen, dass chinesische Wissenschaftler eine kleinere Version der Z-Maschine gebaut und das – veröffentlichte – Experiment erfolgreich repliziert haben; Russland plant eine ähnliche Anlage mit 50 Millionen Ampere.

### **Bislang scheint das Plasma umso besser beherrschbar zu sein, je heißer es ist**

Selbst wenn eines dieser Projekte die Parameter Dichte und Einschlusszeit in ungeahnte Höhen treiben sollte, bleibt noch der dritte: eine ebenfalls unglaublich hohe Plasmatemperatur. Und die ist schwer zu

erreichen, weil das Plasma seine innere Bewegungsenergie auf vielen Wegen verlieren kann, vor allem über Abstrahlung von Licht und Wechselwirkungen zwischen Elektronen. Dann würde die Auskühlung die Fusionsreaktionen ersticken, kaum dass sie begonnen haben.

Daher versuchen Sinars und Slutz bei Sandia herauszufinden, wieso der Laser nicht die theoretisch vorhergesagte Heizleistung erbringt. Vielleicht gibt es Streuverluste durch die dünnen Fenster, welche die Enden des Fusionszylinders verschließen. Oder ein Laser ist für diesen Zweck prinzipiell ungeeignet. Sinars räumt ein, »dass man in einer kommerziellen Anlage den Brennstoff wahrscheinlich auf andere Weise erhitzen möchte«. Noch versuchen die Ingenieure allerdings, die Heizung durch Laser zu optimieren. Wenn das misslingt, werden sie das immerhin relativ bald merken.

Tri Alpha hat noch einen weiteren Weg vor sich, weil die Firma mit einem Gemisch aus gewöhnlichem Wasserstoff und Bor-11 (dem häufigsten Bor-Isotop) arbeitet. Diese beiden Partner kommen sich erst bei 3,5 Milliarden Grad hinreichend nahe, dem 20-Fachen der Temperatur, die das Deuterium-Tritium-Gemisch benötigt.

Im Prinzip ist ein Plasma umso schwieriger zu bändigen, je heißer es ist. Aber Binderbauer wettet darauf, dass die Einschlusstechnik von Tri Alpha mit steigender Temperatur sogar besser funktioniert. So war es jedenfalls bisher in Experimenten, aber das sagt leider nicht viel. Selbst die neue C-2W wird auf kaum ein Prozent der benötigten Temperatur kommen und das Plasma gerade mal für 30 Millisekunden zusammenhalten. Die Wette könnte Binderbauer verlieren, wie er offen zugibt, aber: »Wir haben keine Daten für diesen Bereich. Da müssen wir's wohl ausprobieren.«

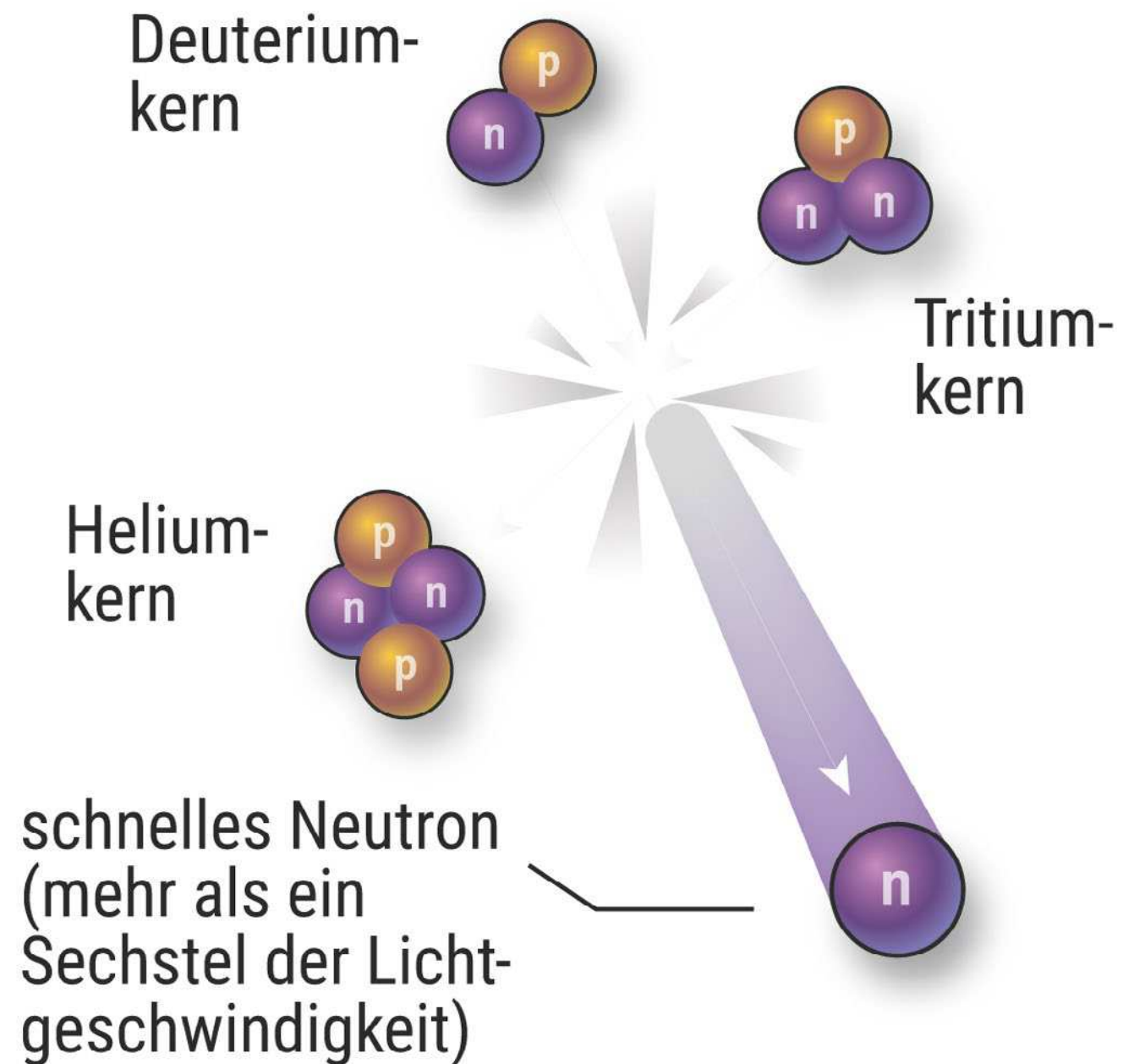
Auch General Fusion wagt sich in ein Gebiet vor, über das die Physik noch keine Auskunft geben kann – in diesem Fall darüber, wie schnell das Plasma Wärmeenergie nach außen verliert. »Da hilft es nicht, über die Bewegung einzelner Atome nachzudenken oder allgemeine Wahrheiten wie den Energieerhaltungssatz heranzuziehen. Also können jede Menge Überraschungen auf uns warten – gute oder böse«, sagt Laberge. »Wenn die Wärmeverluste schlimmer sind als erwartet, können wir das ganze Ding größer machen. Das verbessert nämlich das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche. Aber

# Neue Fusionsreaktoren

Mehrere Forschergruppen arbeiten an Prototypen für Anlagen, die geringe Anteile der Masse von Atomkernen in Energie verwandeln sollen. Die Sandia National Laboratories und das Start-up-Unternehmen General Fusion wollen ein Plasma erzeugen, das seine Energie in Form schneller Neutronen abgibt, während es bei Tri Alpha in erster Linie Röntgenstrahlen sind. In jedem Fall müssen diese Energien noch in nutzbare Formen umgewandelt werden. Die Abbildungen zeigen nicht die aktuellen Prototypen, sondern deren geplante, kommerziell nutzbare Nachfolger.

## Materie zu Energie

Wenn zwei Atomkerne wie die von Deuterium und Tritium (schwerer und überschwerer Wasserstoff) mit der richtigen – hohen – Geschwindigkeit zusammenprallen, verschmelzen sie zu einem schwereren Atomkern, im Beispiel Helium, wobei noch ein Neutron übrig bleibt. Die Gesamtmasse der Reaktionsprodukte ist geringer als die Massen der beiden ursprünglichen Kerne zusammen. Die Fusionsreaktion verwandelt diese überschüssige Masse in Energie, die in Form von (Röntgen-)Photonen oder Bewegungsenergie der Reaktionsprodukte frei wird.

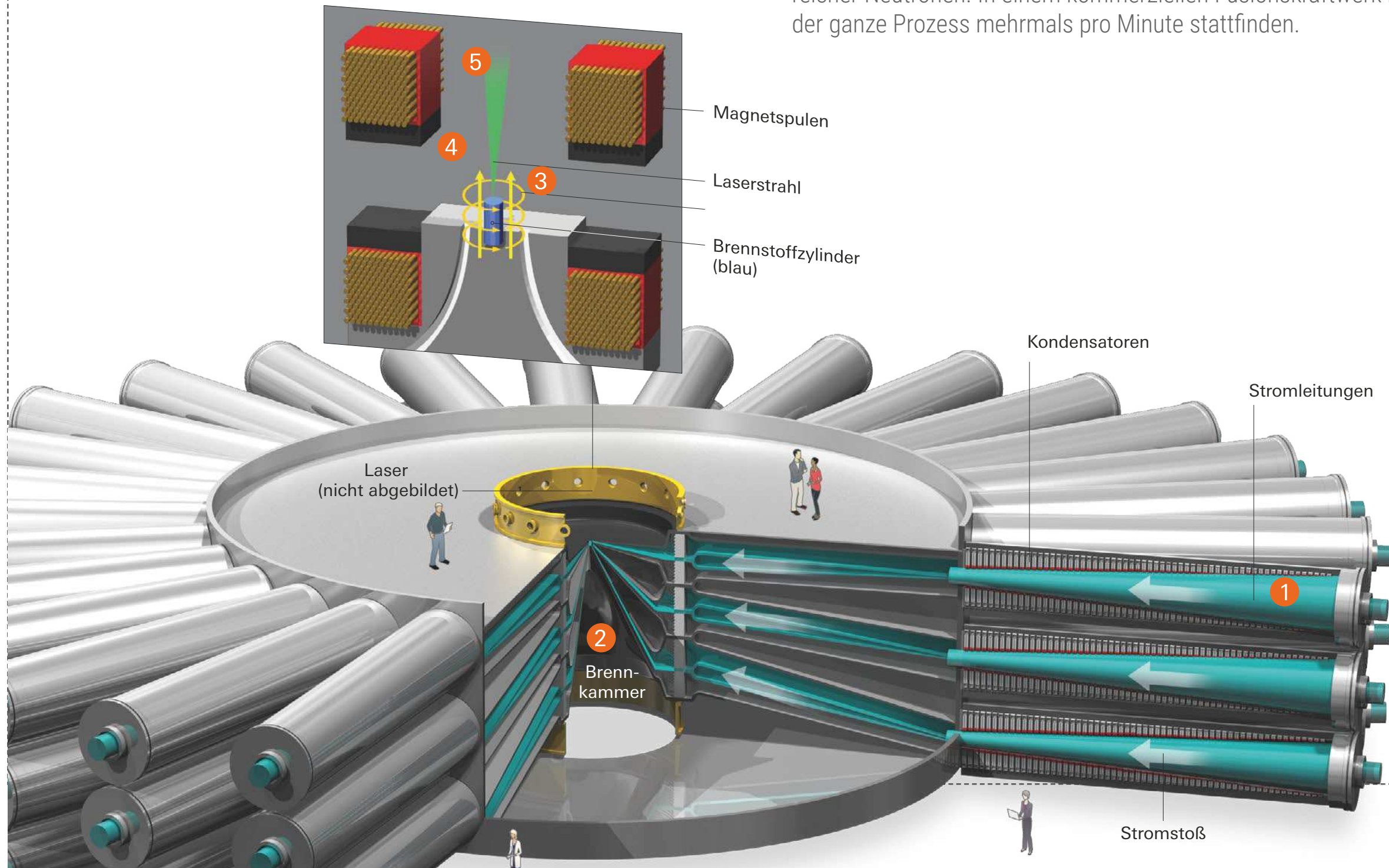




## Sandia: Die Magnetfaust

90 Gruppen von Kondensatoren entladen sich zeitgleich und schicken über dicke Verbindungsleitungen (1) einen Stromstoß von 65 Millionen Ampere in die Brennkammer (2). Das erzeugt ein starkes Magnetfeld rund um die vertikale Achse eines nur wenige Millimeter großen Metallzylinders (blau), der mit kaltem Deuterium und Tritium gefüllt ist. Unter der Wirkung des Magnetfelds implodiert er

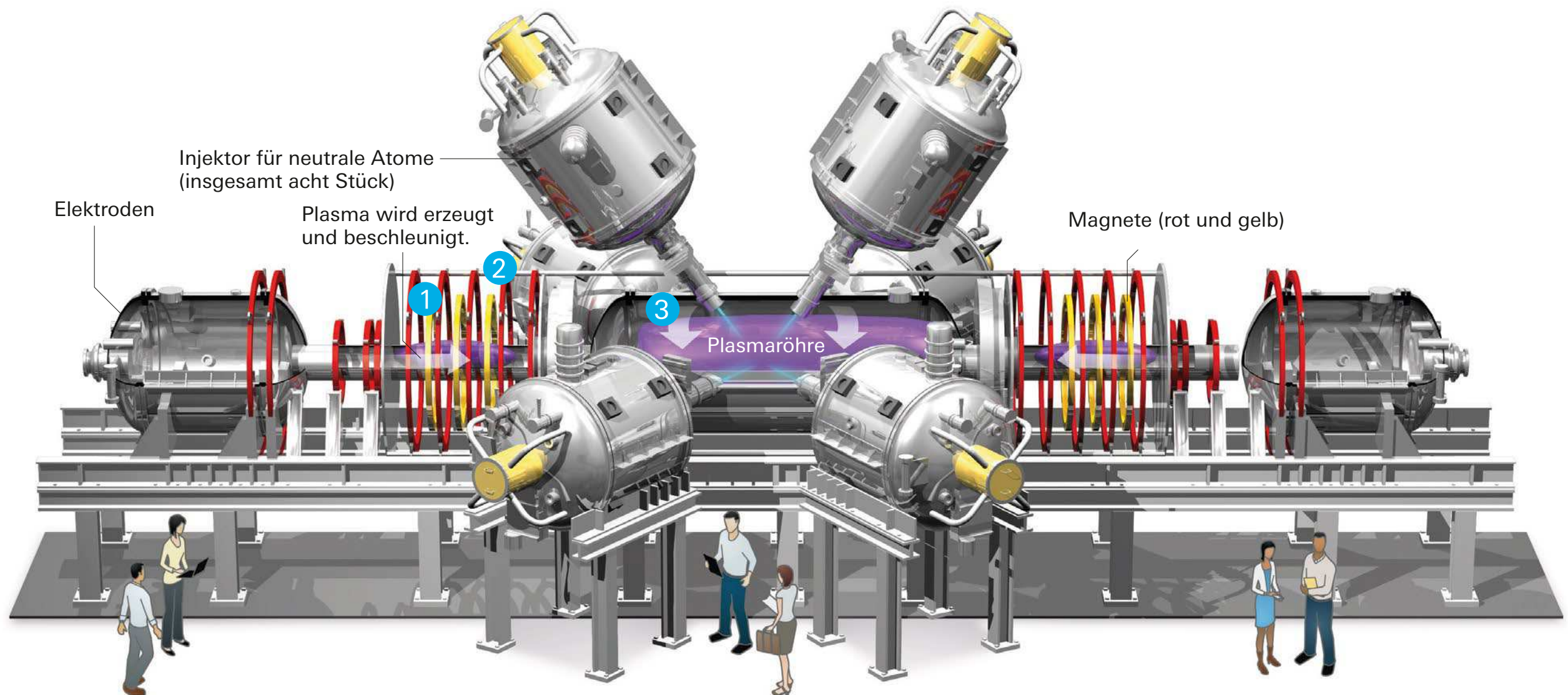
samt Inhalt binnen 100 Nanosekunden (3). Ein weiteres Magnetfeld hindert den Brennstoff daran, nach oben und unten aus dem Zylinder zu entweichen (4). Zu Beginn der Implosion heizt ein grüner Laser mit einer Leistung von einer Billion Watt durch einen Blitz von zehn Nanosekunden Dauer (5) den Brennstoff so stark auf, dass er zusammen mit der Wirkung der Implosion die erforderliche Temperatur erreicht. Daraufhin setzt die Fusion ein und produziert einen Schauer energiereicher Neutronen. In einem kommerziellen Fusionskraftwerk müsste der ganze Prozess mehrmals pro Minute stattfinden.



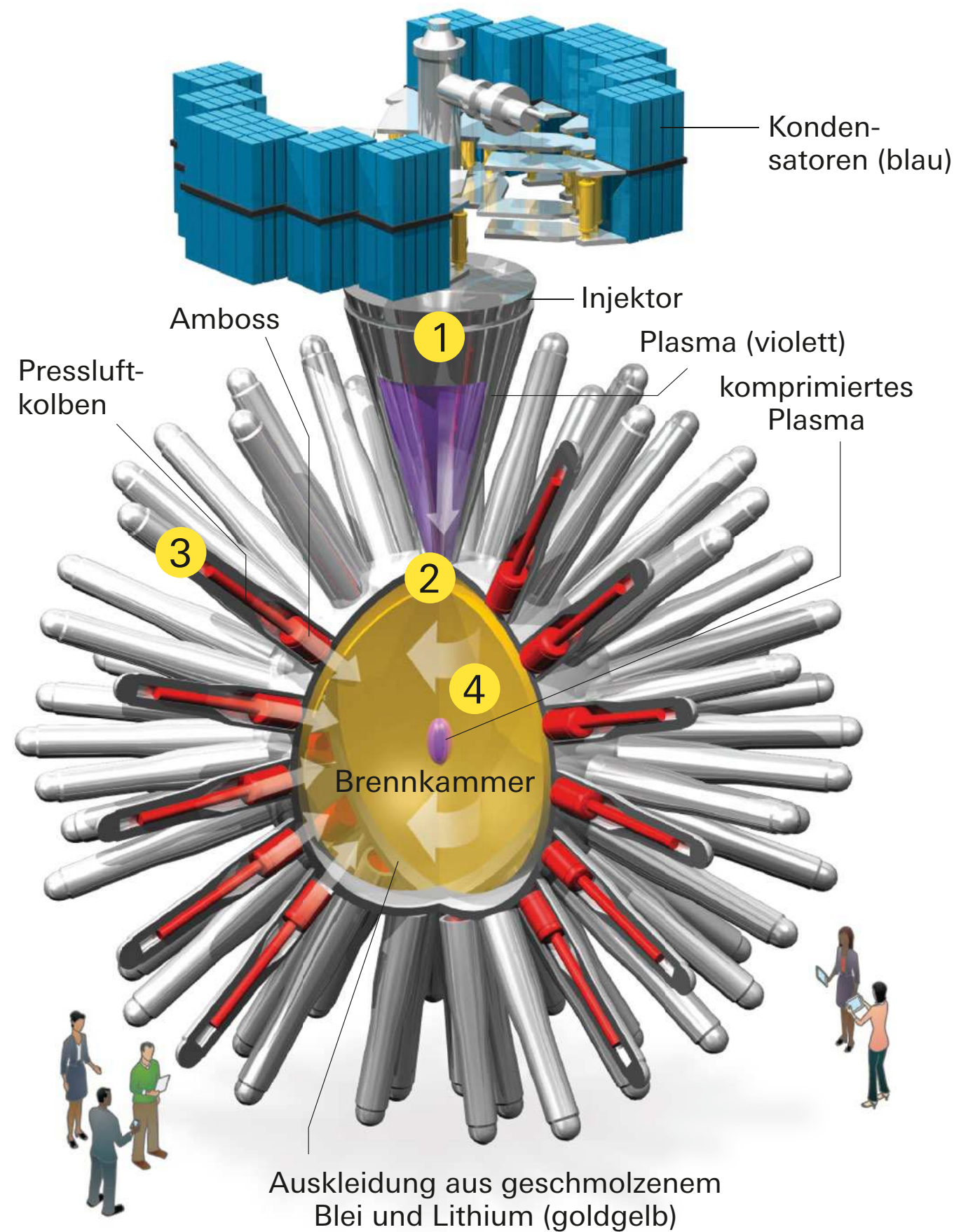
## Tri Alpha: Das Ionenkarussell

Ein kurzer, intensiver Stromstoß erzeugt ein Magnetfeld in den Spulen (1, gelb) beiderseits des Reaktorkerns. Dieses wiederum verwandelt ein Wölkchen gasförmigen Brennstoffs in ein Plasma aus Bor-Ionen und Protonen. Andere Elektromagnete (rot) halten das Plasma am Ort fest, während ein sehr starkes, entgegengerichtetes Magnetfeld eine Mikrosekunde lang einwirkt und dadurch einen elektrischen Strom innerhalb des Plasmas induziert (2). Dieser Kreisstrom erzeugt seinerseits ein torusförmiges Magnetfeld, das wie ein Käfig das Plasma am Auseinanderfliegen hindert. Daraufhin beschleunigt ein weiterer Stromstoß durch

das erste Magnetsystem die beiden Plasmaringe in Richtung Zentrum, wo sie mit ungefähr einer Million Stundenkilometer aufeinanderprallen und eine größere, heißere röhrenförmige Struktur bilden (3). Um die Fusion zu zünden, muss das Plasma eine Temperatur von 3,5 Milliarden Grad Celsius erreichen. Acht Injektoren spritzen neutrale Atome tangential an die Plasmaröhre, was einerseits Brennstoff nachliefert und andererseits eine stabile Rotation der Plasmaröhre aufrechterhält. Die Fusion soll über Stunden oder Tage hinweg andauern. Die Energie wird über extrem schnelle Heliumkerne und Röntgenstrahlen abgeführt.







### General Fusion: Der Plasmahammer

Ein Injektor, betrieben durch einen Stromstoß aus zahlreichen Kondensatoren, schießt eine ringförmige Plasmawolke aus Deuterium und Tritium durch einen Trichter (1) in die Brennkammer, wobei der Brennstoff stark komprimiert wird (2). Dort schlagen annähernd 200 große, pressluftgetriebene Kolben synchron mit 200 Stundenkilometern auf ebenso viele Ambosse (3) und lösen eine Stoßwelle aus. Diese wandert durch eine Mischung aus flüssigem Blei und Lithium (4), die im Inneren der Brennkammer rotiert (und wegen dieser Rotation in Fortsetzung des Trichters einen Hohlraum lässt). Im Zentrum der Brennkammer läuft die Stoßwelle auf einen Punkt zusammen und komprimiert dadurch das Plasma auf einen Druck von mehr als 5 Millionen Atmosphären bei einer Temperatur von 150 Millionen Grad Celsius. Das schafft für den Bruchteil einer Sekunde die Bedingungen für eine Fusion. Das flüssige Metall absorbiert sowohl die Neutronen als auch die Wärmeenergie, die durch die Fusion frei werden. Im Produktionsbetrieb müsste der Hammer einmal pro Sekunde zuschlagen.

wenn wir bei der Größe vom ITER landen, haben wir ein Problem.«

### **»Die Physik hat jede Menge Gelegenheit, uns in den Arsch zu beißen«**

Sowie irgendein Fusionsreaktor eine Zündung erreicht, werden die Sektkorken knallen – und dann fängt die Arbeit erst richtig an. Am Ende muss ein solches Gerät nicht nur irgendwie Strom produzieren, sondern zu Preisen, die mit denen der erneuerbaren Quellen konkurrieren können. Das werde den riesigen Tokamaks wie ITER wahrscheinlich nie gelingen, sagt Dennis Whyte, Chef des Plasma Science and Fusion Center am Massachusetts Institute of Technology. Denn diese Maschinen fressen zu viel von der erzeugten Energie gleich wieder für den Eigenbedarf auf. Die kleinen Start-ups haben zwar von Anfang an mehr an die praktische Realisierung gedacht als die Großen, aber auch auf sie warten noch eine Menge ungelöster Probleme.

So leidet zum Beispiel MagLIF darunter, dass bis auf Weiteres jeder Schuss einen Teil des Materials zerstört. Die Fusion von Deuterium und Tritium setzt den größten Teil ihrer Energie in Form schneller Neutronen frei, die in den Stahl eindringen und die ge-

troffenen Atome in radioaktiv verwandeln. Jede Anlage, die mit diesem Brennstoff arbeitet, muss die schnellen Neutronen dazu bringen, an Stelle ihres Zerstörungswerks nützliche Arbeit zu leisten. Aber für die Wissenschaftler dort ist Schadensbegrenzung bislang kein Vorrangthema – und ihre Vorstellung, wie sie die Schussfolge von mehrmals pro Woche auf mehrmals pro Minute hochsetzen wollen, bestenfalls vage. HyperV und Magneto-Inertial Fusion Technologies, eine kleine Firma in Tustin südlich von Los Angeles, erkunden mit Fördermitteln von ARPA-E andere Wege zur Lösung des Neutronenproblems, sind damit aber noch nicht weit gekommen.

Die Firma Tri Alpha geht dem Ärger aus dem Weg, indem sie Protonen mit Boratomen fusioniert. Dabei entstehen drei Heliumkerne, auch Alphateilchen genannt – daher der Name der Firma –, sowie Röntgenstrahlen, aber kaum Neutronen. Nur stecken jetzt 80 Prozent der Energie in den Röntgenstrahlen.

Im Prinzip könnte man mit speziellen photovoltaischen Zellen an der Innenwand des Reaktors die Röntgenphotonen in elektrischen Strom verwandeln, sagt Binderbauer. Aber solche Zellen gibt es noch nicht.

Also greifen die Tri-Alpha-Leute notgedrungen auf das Prinzip der Dampfmaschine zurück: Die Röntgenstrahlen heizen eine Kühlflüssigkeit, welche die Energie als Wärme abführt.

General Fusion bleibt beim Deuterium-Tritium-Gemisch, obgleich Tritium geringfügig radioaktiv, extrem selten und entsprechend teuer ist. Laberge will die Energie der schnellen Neutronen mit einem Gemisch aus geschmolzenem Blei und Lithium abfangen, das die Innenwände des Reaktors entlangzirkuliert. Dabei reagieren einige Neutronen mit Lithium zu Helium und Tritium. Letzteres wäre dann als Brennstoff zu verwenden.

Auf dem Reißbrett ist das eine elegante Lösung; nur hat bisher niemand ein solches System gebaut. Noch weiß keiner, wie viel Tritium eine solche Anlage erbrüten würde, sagt Hsu. Und Laberge fürchtet, dass von dem flüssigen Metall durch die Stoßwelle der 200 Kolben Spritzer ins Plasma fliegen. »Das ist wie Wasser ins Feuer«, gibt er zu; die Temperatur der Schmelze ist so niedrig, dass die Fusionsreaktion erlöschen würde.

Nachdem ITER und NIF aus ihrem Schleichtempo nicht herauskommen, »ist



es Zeit, dass wir all unsere Physik zusammennehmen und nach Alternativen suchen«, sagt Whyte. Darunter sind Variationen des Tokamak-Designs, die diesen Riesen donut kleiner machen oder ihn zu einer sonderbaren Form namens Stellarator verdröseln. »Am liebsten würde ich einen sehr kompakten Tokamak, das Konzept von General Fusion, einen kleinen Stellarator und eine Maschine von Typ Tri Alpha gegeneinander ins Rennen schicken – und dann sehen, wer gewinnt.«

Wenn das Rennen in den USA stattfindet, dann jedenfalls nicht mit Staatsgeld. Der Kongress ist in diesem Punkt von Jahr zu Jahr zugeknöpfter, auch wenn Hsu nicht müde wird, für den Erfolgsfall das goldene Zeitalter heraufzubeschwören. »Wenn auch nur eines dieser innovativen Konzepte den Durchbruch schafft, dann haben wir in 20 Jahren für ein paar Milliarden Dollar die Fusionsenergie nutzbar gemacht.«

Kann sein, kann auch nicht sein. Binderbauer drückt es etwas drastischer aus: »Die Physik, die wir noch nicht kennen, ist nicht wenig. Und deswegen hat sie jede Menge Gelegenheit, uns in den Arsch zu beißen.«

Aber die Aussichten sind einfach verlockend. Eine neue Energiequelle, die sich

nicht von einer Windflaute oder bewölktem Himmel beeindrucken lässt, keinen Ausbau des Stromnetzes erfordert, keinen Missbrauch für militärische Zwecke befürchten lässt, auch bei einem Totalversagen das Nachbardorf nicht radioaktiv verstrahlt oder gar pulverisiert und am Ende günstiger zu haben ist als eine Windfarm – wäre das nicht noch ein paar Probeschüsse wert?

(Spektrum der Wissenschaft, Februar 2017)

Slutz, S. A. et al.: Scaling Magnetized Liner Inertial Fusion on Z and Future Pulsed-Power Accelerators. In: Physics of Plasmas 23, 022702, Februar 2016

Waldrop, M. M.: Plasma Physics: The Fusion Upstarts. In: Nature 511, S. 398–400, 24. Juli 2014

Spektrum  
der Wissenschaft

KOMPAKT

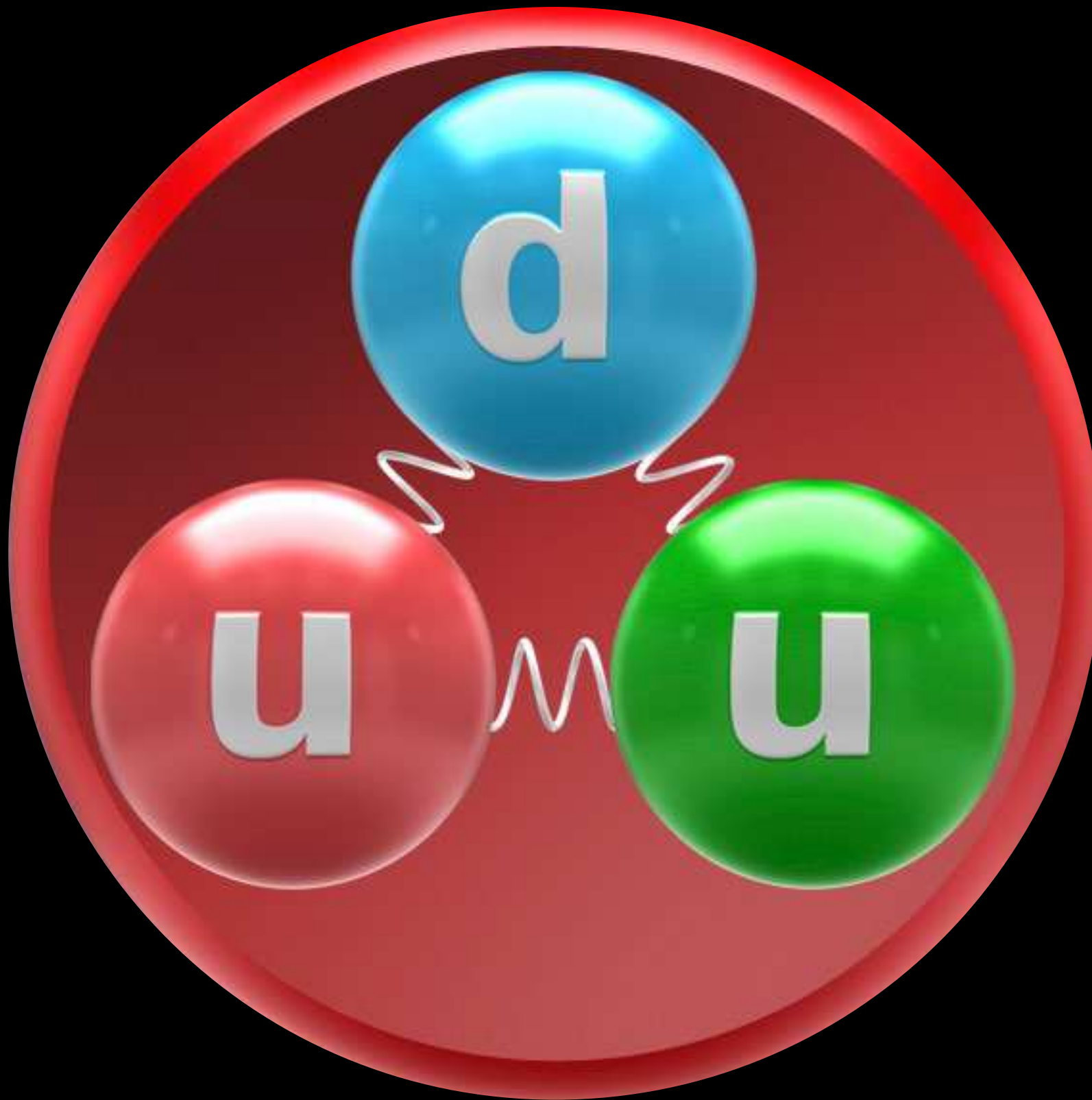
# THERMO-DYNAMIK

Von Ordnung und Unordnung

Zweiter Hauptsatz | Wie aus Chaos  
Ordnung entsteht  
Stabile Verbindungen | Heute kochen wir  
Elemente-Suppe!  
Zeitkristalle | Bizarre Materie  
in endloser Schwingung

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99



## KERNFUSION

# Exotische Teilchen verschmelzen mit noch mehr Power

von Lars Fischer

Auch subatomare Teilchen können verschmelzen und dabei Energie freisetzen. Das Ergebnis ist vor allem theoretisch interessant: Sind neue Arten von Materie möglich?



**E**in subatomares Gegenstück der Kernfusion setzt so viel Energie frei wie die Verschmelzung von Wasserstoff – und bei manchen Teilchen womöglich sogar das Zehnfache davon. Das berichten Marek Karliner von der Tel Aviv University und Jonathan L. Rosner von der University of Chicago jetzt in »Nature«. Sie zeigen auf Grund theoretischer Überlegungen, dass zwei schwere  $\Lambda_c$ -Baryonen miteinander zu energieärmeren Teilchen verschmelzen und dabei überschüssige Bindungsenergie zwischen den Quarks als kinetische Energie freisetzen. Der Vorgang ähnelt zum Beispiel der Verschmelzung von zwei Helium-3-Kernen, bei der ein Teil der Bindungsenergie zwischen den Protonen und Neutronen frei wird. Beide Prozesse setzen etwa zwölf Millionen Elektronvolt frei. Wie die Forscher vorrechnen, könnte der gleiche Prozess mit einem schwereren Quark jedoch mehr als zehnmal so viel Bindungsenergie freisetzen. Als technische Energiequelle kann man den Prozess aber wohl nicht nutzen.

Seit der Erkenntnis, dass Holz brennt, hat die Menschheit den Großteil ihres Energiebedarfs aus der Bindungsenergie

der Materie gedeckt: Kohlenstoffreiches Material lagert sich mit Sauerstoff in energieärmere Produkte um; Uran und Plutonium zerfallen mit Neutronen zu leichteren Kernen; und in Sternen verschmelzen Wasserstoff und andere leichte Kerne. Bei all diesen Reaktionen wird Bindungsenergie zwischen den jeweiligen Bausteinen frei. Nun haben Karliner und Rosner das Prinzip auf die subatomare Ebene ausgeweitet: Baryonen bestehen aus Quarks, und wie die Forscher nun berichten, können einige Baryonen ihre Quarks so umsortieren, dass dabei große Mengen Bindungsenergie frei werden.

Allerdings funktioniert das nur mit schweren Quarks –  $\Lambda_c$  enthält neben einem up- und einem down-Quark ein charm-Quark, das schwerer ist als Protonen oder Neutronen. Zwei dieser Teilchen reagieren zu einem Neutron und einem  $\Xi_{cc}^{++}$ -Baryon, das aus zwei charm-Quarks und einem up-Quark besteht. Die Bindungsenergie zwischen den Quarks steigt mit deren Masse an: Die gleiche Reaktion mit  $\Lambda_b$ -Teilchen, die statt der charm-Quarks schwerere bottom-Quarks enthalten, würde demnach etwa die zehnfache Energie freisetzen. Wegen der sehr geringen Lebensdauer aller

beteiligter Teilchen ist der Prozess für technische Anwendungen aber wohl nicht geeignet.

Dafür hat er wichtige theoretische Konsequenzen, wie die beiden Physiker berichten: Zum einen könnte damit das Rätsel der Tetraquarks gelöst sein, Teilchen aus vier Quarks. Möglicherweise sind die klassischen Quarks einfach zu leicht, so dass die Bindungsenergie nicht ausreicht. Mit charm- oder bottom-Quarks sind diese Reaktionen wohl möglich – solche Tetraquarks wurden auch bereits entdeckt. Die hohe Bindungsenergie schwerer Quarks führt außerdem eventuell dazu, dass eine ganz neue Klasse von daraus aufgebauter Materie denkbar ist, die vergleichsweise stabil ist. ↩

(Spektrum.de, 02.11.2017)





Im Abo nur  
**0,92 €**  
pro Ausgabe

Jetzt bestellen!  
**Das wöchentliche  
Wissenschaftsmagazin**  
als Kombipaket im Abo:  
Als App und PDF

**HIER ABONNIEREN!**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.