Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 48 (1957)

Heft: 7

Artikel: Thermonukleare Reaktionen als Energiequelle

Autor: Kroms, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060596

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

48. Jahrgang Nr. 7 Samstag, 30. März 1957

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Thermonukleare Reaktionen als Energiequelle

Von *A. Kroms*, Boston

621.039.42 : 539.17

Die Atomtechnik von heute ist auf einer Art der Kernreaktionen — der Spaltung von Atomkernen schwerer Elemente — aufgebaut worden. Es gibt z. Z. zwei Ausgangsstoffe für diese Reaktionen: Uran und Thorium, die in der Erdkruste ungleichmässig verteilt und durch verschiedene Ballaststoffe sehr verdünnt sind. Deshalb wird in letzter Zeit einem anderen Typ der Kernreaktionen — der Verschmelzung von Atomkernen leichter Elemente — viel Beachtung geschenkt. Kernumwandlungen dieser Art stellen erheblich schwierigere technische Probleme als die Spaltung der schweren Atomkerne, weil die Verwandlung der leichten Atomkerne äusserst hohe Temperaturen benötigt. Die Kernreaktionen, die sich nur bei hohem Temperaturniveau vollziehen, werden *thermonukleare* Reaktionen genannt. Wenn es gelingen würde, diese Reaktionen in Energieanlagen auszunützen, dann wäre der Menschheit eine praktisch unerschöpfbare Energiequelle zur Verfügung gestellt, weil die leichten Elemente überall reichlich vorhanden sind. Im Vergleich mit dieser Energiequelle sind alle anderen technisch verwertbaren Energiequellen, einschliesslich Uran und Thorium, so gering, dass sie bedeutungslos werden. Die Erfolge in der praktischen Ausnützung der thermonuklearen Reaktionen könnten daher die Lebensverhältnisse der Menschheit gänzlich verändern.

Während der Atomenergiekonferenz in Genf 1955 wurde von den Vertretern einiger Länder zum ersten Male die Tatsache ofiziell bestätigt, dass Versuche im Gange sind, die regelbaren thermonuklearen Reaktionen für Energiezwecke technisch zu verwirklichen. Dieses Problem wurde zuerst von dem indischen Physiker *Bhabha* erwähnt, wonach die Delegierten von England, den USA und Russland zugaben, dass die wissenschaftlichen Institutionen dieser Länder mit der Lösung des Problems beschäftigt sind. In einigen späteren Tagungen und Veröffentlichungen der Atomenergiekommissionen Englands und der USA wird ebenfalls angedeutet, dass Versuche auf diesem Gebiet sehr eifrig durchgeführt werden. Die Wissenschafter sind überzeugt, dass die Energieerzeugung auf Grundlage der Umwandlung von leichten Atomkernen durchaus möglich ist, obgleich hier noch viel an Forschungs- und Konstruktionsarbeit zu leisten sei.

In der nachfolgenden Abhandlung ist eine Übersicht über die thermonuklearen Reaktionen, Schwierigkeiten in ihrer Verwirklichung und schliesslich über Wege, die zur Erreichung des erwähnten Zieles erprobt werden, gegeben. Zum leichteren Verständnis sollen vorerst einige Grundbeziehungen der Kernumwandlung erörtert werden.

I

Vorgänge, in welchen sich die Atomkerne verwandeln, werden Kernreaktionen genannt. Diese Reaktionen können Energie entweder befreien oder verbrauchen. Nach dem Gesetz der Äquivalenz der Masse und der Energie vermindert sich im ersten Fall die Masse des Reagenten, wogegen im zweiten Fall sie sich vergrössert. Für die Energieversorgung sind jene Kernumwandlungen von Bedeutung, bei denen Materie in Energie umgesetzt wird. Der Energiegewinn wird dabei von dem Charakter der Kernreaktionen bedingt. Diese Umwandlungen entsprechen folgenden Beziehungen:

1. *Masse.* Die Einheiten: 1 g und der Massenwert.

Die Masseneinheit der Atome oder der Massenwert ist gleich $^1/_{16}$ der Masse des Sauerstoffatoms $({}_8O^{16}) = 1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g; daraus ist 1 g $= 6{,}02 \cdot 10^{23}$ Massenwert.

Die Masse der Atombestandteile:

	Massenwert
a) des Protons (p oder ${}_1p^1$):	$m_p = 1{,}00758$
b) des Neutrons (n oder ${}_0n^1$):	$m_n = 1{,}00894$
c) des Elektrons (e oder ${}_1e^0$):	$m_e = 0{,}00055$

Die Atomzahl in 1 g der Materie ist

$N = \dfrac{L}{M_a}$, wobei $L = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ (die Atomzahl in einem Gramm-Atom, Loschmidtsche Zahl) und M_a die Atommasse (in Massenwerten) bedeuten.

2. *Energie.* Die Einheiten: erg, MeV, kWh.

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ erg} = 4{,}45 \cdot 10^{-20} \text{ kWh}$$

3. Das *Masse-Energie*-Gesetz:

$$W = M c^2 \qquad [\text{erg}]$$

worin M [g] die Masse und $c = 3 \cdot 10^{10}$ [cm/s] die Lichtgeschwindigkeit bedeuten.

Daraus folgt:

a) der Energiewert der Atommasseneinheit

$$W_0 = 1{,}66 \cdot 10^{-24} \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 0{,}00149 \text{ erg} = \\ = 931 \text{ MeV} = 4{,}15 \cdot 10^{-17} \text{ kWh}$$

b) Energiewert der 1-g-Masse

$$W = 1 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 9 \cdot 10^{20} \text{ erg} = 5{,}61 \cdot 10^{26} \\ \text{MeV} = 2{,}5 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 25 \text{ GWh}$$ [1])

Einem Massenverlust von ΔM [g] entspricht also der Energiegewinn

$$W = \Delta M \cdot c^2 = 25 \cdot \Delta M \quad [\text{GWh}]$$

Energie wird in exothermischen chemischen Reaktionen und in Kernreaktionen befreit. Die spezifische Energieausbeute ist bei diesen beiden Vorgängen von verschiedener Grössenordnung. Da die chemischen Reaktionen nur das Energieniveau der Elektronen verändern, sind die dabei befreiten Energiemengen so gering, dass es praktisch gar nicht möglich ist, den Massenverlust des Ausgangsstoffes zu messen. Bei Kernumwandlungen dagegen werden viel grössere Beträge der Reagentenmasse in Energie umgesetzt. Bei der Spaltung der schweren Atomkerne (z. B. Urankerne) geht ungefähr 0,001 der Ausgangsmasse in Energie über, wobei eine spezifische Energieausbeute von

$$2{,}5 \cdot 10^7 \cdot 10^3 \cdot 0{,}001 = 2{,}5 \cdot 10^7 \text{ kWh/kg} = 25 \text{ GWh/kg}$$

zu erreichen ist. Da 1 kg guter Steinkohle ungefähr 7000/860 = 8,15 kWh der Verbrennungsenergie ergibt, übertrifft die Energieausbeute des Kernspaltstoffs $2{,}5 \cdot 10^7 / 8{,}15 = 3 \cdot 10^6$mal diejenige des Brennstoffes guter Qualität.

Der spezifische Energieertrag der Kernreaktionen W [kWh/kg] hängt von der Art des Reagenten und des Reaktionsverlaufs ab. Der Massenwert der Atome ist immer kleiner als die Summe der Massenwerte seiner Bestandteile — der Nukleonen (Protonen und Neutronen) und Elektronen. Dieser Unterschied

$$\Delta m = Z\,(m_p + m_e) + Y\,m_n - M_a$$

wird Massenverlust oder Massenschwund genannt, wobei Z die Zahl der Protonen, oder die Ordnungszahl des chemischen Elements, Y die Neutronenzahl und M_a die Atommasse bezeichnen. Die Gesamtzahl der Nukleonen im Atomkern $A = Z + Y$ wird Massenzahl des Atoms genannt. Dem Massenschwund Δm entspricht die *Bindungsenergie*, die bei der Bildung der Atomkerne befreit wird. Um einen Atomkern in seine Bestandteile teilen zu können, muss eine Energiemenge von aussen hinzugefügt werden, die der Bindungsenergie gleich ist. Die Bindungsenergie beträgt also

$$W = 931\,(N \cdot \Delta m) \quad [\text{MeV/g}]$$

nach Einsetzung von $N = \dfrac{6{,}02 \cdot 10^{23}}{M_a}$ [Atome/g] ergibt sich hieraus

$$W = 5{,}61 \cdot 10^{26} \left(\frac{\Delta m}{M_a}\right) [\text{MeV/g}] = 2{,}5 \cdot 10^7 \left(\frac{\Delta m}{M_a}\right) [\text{kWh/g}],$$

wobei $\Delta m/M$ den relativen Massenschwund bedeutet.

Diese Beziehungen sollen am Beispiel des *Heliumatoms* $_2He^4$ ($Z = 2$; $Y = 2$; $M_a = 4{,}00280$) erläutert werden:

$$\Delta m = 2 \cdot (1{,}00758 + 0{,}00055) + \\ + 2 \cdot 1{,}00894 - 4{,}00280 = 0{,}03134 \text{ (Massenwerte)}$$

und die Bindungsenergie

$$\frac{931 \cdot 0{,}0313}{4} = 29{,}2 \quad \text{MeV/Nukleon}$$

Bei der Bildung des Heliums aus den Elementarbestandteilen der Materie wird also eine Energiemenge von

$$2{,}5 \cdot 10^7 \frac{0{,}03134}{4{,}00280} = 1{,}95 \cdot 10^5 \text{ kWh/g}$$

befreit.

Die Bindungsenergie je Nukleon W_b hängt von der Grösse und der Struktur der Atomkerne ab (Fig. 1). Die Energiekurve steigt im Bereich leichter Elemente rasch und erreicht die Höchstwerte von 8,0...8,7 MeV/Nukleon im Bereich $A = 40...100$. Bei höheren A-Werten sinkt die Kurve allmählich und weist bei Uran die Bindungsenergie von ungefähr 7,4 MeV/Nukleon auf. Die Atomkerne mittel-

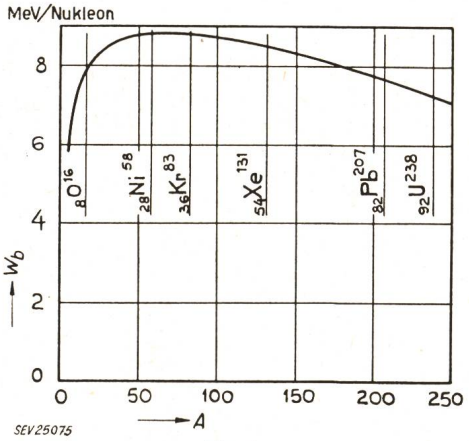

Fig. 1
Bindungsenergie der Atomkerne
W_b Bindungsenergie; A Massenzahl
O Sauerstoff; Ni Nickel; Kr Krypton; Xe Xenon; Pb Blei; U Uran

schwerer Elemente weisen also die grössten Bindungskräfte auf; sie bilden den stabilsten Atombereich.

Energie wird bei jenen Kernumwandlungen befreit, welche Atomkerne ergeben, die eine höhere Stabilität als die Kerne des Ausgangsmaterials aufweisen. Laut der Energiekurve sind zwei Arten solcher energieliefernden Reaktionen möglich:

a) Spaltung schwerer Atomkerne in mittelschwere Bruchstücke, z. B. Zersetzung des Urans oder des Thoriums;

[1]) GWh (Gigawattstunde) = 10^6 kWh.

b) Verschmelzung sehr leichter Atomkerne, z. B. Bildung von Helium aus Wasserstoff.

In beiden Fällen stehen die Reaktionsprodukte näher bei dem stabilen Bereich des Elementsystems als die Ausgangskerne. Wenn es dabei gelingt, solche Umstände zu schaffen, dass die Reaktionen sich von selbst fortsetzen, dann sind die *Kettenreaktionen* der Kernumwandlung verwirklicht worden. Die Voraussetzung zur Erreichung der Kettenreaktionen hängt von der Grösse und Zusammensetzung der zu verwandelnden Atomkerne ab. Dabei ist das Verhältnis zwischen der Neutronen- und der Protonenzahl von grosser Bedeutung:

$$Y/Z = A/Z - 1$$

Bei leichten Elementen ist Y/Z ungefähr 1,0, bei schweren Elementen dagegen $> 1{,}0$. Bei $Y/Z > 1{,}5$ fangen die schweren Atomkerne von selbst zu zerfallen an; dieser Prozess, die Radioaktivität, dauert so lange, bis der Atomkern einen stabilen Zustand erreicht hat. Die schweren Elemente der Urangruppe sind radioaktiv; sie verwandeln sich allmählich in Blei (Pb). Es ist deshalb erheblich leichter, Uranatome zu zersetzen als Atomkerne der leichten Elemente zu verwandeln. Aus diesem Grunde werden in Atomkraftwerken vorläufig nur die Kernumwandlungen der schweren Elemente als Energiequelle ausgenützt; die technischen Probleme, die von den Kernreaktionen dieser Art gestellt werden, sind im allgemeinen bereits gelöst worden. Die Reaktionen der anderen Art — die Umwandlung leichter Atomkerne — benötigen aber ganz neue Ideen, weil sie nur bei äusserst hohen Temperaturen (Millionen °C) zustande kommen. Sie sind als lawinenartige, explosive Vorgänge für militärische Zwecke technisch verwirklicht worden. Die Energieversorgung benötigt aber gleichmässige, kontrollierbare Kernumwandlungen, die je nach Bedarf geregelt werden können, die Anlagen nicht gefährden und Energie in gewünschter Form abgeben. Die Wissenschafter versuchen, solche Reaktionen in Laboratorien zu verwirklichen, um Massnahmen zu finden, dass sie zur Energieversorgung ausgenützt werden können.

II

Die Kernumwandlungen verlaufen folgendermassen:

Ein bewegliches Teilchen der Materie (p, n, α o. a.) stösst gegen einen Atomkern und gibt ihm mehr oder weniger von seiner Energie ab. Bei dem Zusammenstoss eines solchen Erregungs- oder Stossteilchens mit dem Atomkern können zwei Vorgänge — Streuung oder Einfang — stattfinden. Die Wahrscheinlichkeit dieser Vorgänge hängt von vielen Faktoren (der relativen Geschwindigkeit, der Masse und der elektrischen Ladung des Stossteilchens und des Atomkerns, der Struktur des Atomkerns u. a.) ab. Die Stossteilchen sind verschiedener Art:

a) elektrisch geladene Teilchen:
   Protonen p oder $_1H^1$ (Kern des Wasserstoffatoms);
   Deuteronen d oder $_1H^2$ (Kern des schweren Wasserstoffatoms);
   α-Teilchen α oder $_2He^4$ (Kern des Heliumatoms);
b) neutrale Teilchen: die Neutronen n oder $_0n^1$;
c) schliesslich können Kernumwandlungen durch γ-Quanten (γ-Strahlung) verursacht werden.

Die Streuung erfolgt bei geringer Energie des Stossteilchens; es wird vom Atomkern zurückgeschlagen und gibt dabei einen Teil seiner Energie dem getroffenen Kern ab. Die übermittelte Energie ist vom Stosswinkel und der Massenzahl des Atomkerns abhängig. Die schweren Atomkerne können nur wenig beschleunigt werden, weshalb das Stossteilchen mit ungefähr der gleichen Geschwindigkeit zurückprallt und seine Energie sich nur unbedeutend verändert. Trifft das Teilchen dagegen einen leichten Atomkern, dann setzt es das Atom in Bewegung und verliert selbst die Geschwindigkeit; in diesem Fall wird ein grosser Energieanteil dem Atomkern abgegeben und das Teilchen wirksam abgebremst. Die kinetische Energie des Stossteilchens verwandelt sich in die Anregungsenergie des Kerns und wird durch γ-Quant abgestrahlt.

Bei dem Einfang dringt das Stossteilchen in den Atomkern ein und bildet einen neuen Kern. Die Energie, die dazu benötigt wird, hängt von der Art des Stossteilchens und des Atomkerns ab. Die elektrisch geladenen Teilchen müssen das elektrische Feld des Kerns durchdringen und benötigen deshalb einen hohen Energieinhalt, bzw. eine hohe Geschwindigkeit, um den Atomkern erreichen zu können. Die neutralen Teilchen (n) können dagegen bei viel geringerer Energie eingefangen werden. So werden von den Atomkernen des U 235 schon die thermischen Neutronen eingefangen, die einen Energieinhalt von nur ungefähr 0,025 eV haben.

Das eingefangene Stossteilchen gibt dem Atomkern seine kinetische Energie ab und befreit eine gewisse Bindungsenergie, weil nach Anlagerung des Stossteilchens der Atomkern sich in einen neuen Kern verwandelt; die freigesetzte Energie stammt aus der Differenz zwischen der Bindungsenergie des ursprünglichen und des neuentstandenen Atomkerns. Dadurch besitzt der neue Atomkern einen Energieüberschuss, welcher den getroffenen Kern verwandelt, weshalb er Zwischen- oder Übergangskern genannt wird. Diese Verwandlungen können sich folgendermassen vollziehen:

a) durch Emission von Kernteilchen p, n, α, β o. a.;
b) durch γ-Strahlung (γ-Quant);
c) durch Zerspaltung des Atomkerns in mehrere Bruchstücke.

Die Kernumwandlungen erfolgen in verschiedenen Kombinationen und innerhalb sehr unterschiedlicher Zeitspannen, bis schliesslich ein stabiler Endkern erreicht wird.

Die erwähnten Umwandlungen können schematisch so dargestellt werden:

Atomkern + Stossteilchen → Übergangskern → Endkern (oder Endkerne) + hinausgeschleuderte Teilchen (n, p, α, β,) + γ-Strahlung.

Der Zeitabschnitt zwischen den beiden Reaktionsphasen hängt von der Stabilität des Über-

gangskerns ab. In einigen Fällen verwandelt sich der Übergangskern gleich nach seiner Entstehung (in 10^{-14}s oder schneller), in anderen dagegen vollzieht sich diese Umwandlung langsamer. Die kinetische Energie der hinausgeschleuderten Teilchen oder Kernfragmente bildet den überwiegenden Teil der befreiten Kernenergie, die sich als Wärmeenergie äussert. Die grössten Energiemengen werden bei einer weitgehenden Umwandlung der Atomkerne, z. B. bei der Zerspaltung der Atomkerne in mehrere Splitter, befreit.

Zur Spaltung eines Atomkerns ist eine Mindestenergie erforderlich, welche dem Kern in Form von kinetischer und Bindungsenergie zugeführt werden kann. Kerne, bei denen die kinetische Energie von untergeordneter Bedeutung ist, werden spaltbare Kerne genannt. Sie können mittels langsamer (energiearmer) Stossteilchen zersetzt werden. Hierher gehören einige schwere Elemente, vor allem U235, Pu239 und U233, bei denen die Anlagerungsenergie eines Neutrons zur Spaltung ausreicht. Die benötigte Spaltungsenergie (Schwellenergie) beträgt bei U235 ungefähr 6 MeV, bei Pb bereits 10 MeV, bei W sogar 14 MeV. Durch Beschiessung mit schnellen Protonen, α-Teilchen, o. a., können alle schweren Kerne gespalten werden. Dieser Vorgang lässt sich aber zur Energiegewinnung nur dann ausnützen, wenn der Aufwand zur Ermittlung der Stossteilchen geringer als die Energieausbeute von den erreichten Kernumwandlungen ist.

Die Kernreaktionen werden also durch die Art der Stoss- und der Emissionsteilchen gekennzeichnet. Man bezeichnet sie deshalb mit den Symbolen dieser Teilchen; so wird z. B. die (p, n)-Reaktion durch ein Proton ausgelöst, wobei der getroffene Kern ein Neutron hinausschleudert; die (n, γ)-Reaktion bedeutet, dass sie von einem Neutron angeregt wird und den Energieüberschuss als γ-Strahl abgibt.

Im allgemeinen ist es sehr schwierig, Kernreaktionen aufrechtzuerhalten, weil die Atomkerne äusserst klein, die Bindungskräfte zwischen den Nukleonen dagegen sehr gross sind. Der Durchmesser der Atomkerne ist ungefähr 10000mal kleiner als der Durchmesser der Elektronenorbiten. Ein Atomkern gibt dem ankommenden Stossteilchen also eine allzu geringe Zielfläche, weshalb die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen mit einem Kern zusammenstossen wird, sehr gering ist. Ausserdem hält das kräftige elektrische Feld des Kerns die elektrisch geladenen Stossteilchen (p, α) zurück; zum Durchdringen dieses Feldes benötigen die Stossteilchen sehr grosse Geschwindigkeiten. Es sind noch eingehende Forschungen über die Struktur und die inneren Kräfte der Atomkerne durchzuführen, um die Vorgänge der Kernumwandlungen wissenschaftlich erklären zu können. Die zurzeit verfügbaren Kenntnisse reichen dazu nicht aus. Man nimmt an, dass sich zwischen den Nukleonen zwei Kraftfelder befinden (Fig. 2):

a) Die elektrisch geladenen Protonen suchen sich voneinander zu entfernen und dadurch den Kern zu zersetzen;

b) Die Massen der Nukleonen ziehen sich an und bilden ein Adhäsionsfeld, das die Nukleonen zusammenhält. Die Stärke dieser beiden Kraftfelder verändert sich je nach dem Abstand von dem Kern, wobei das elektrische Feld in grösseren Abständen, das Adhäsionsfeld dagegen in der Nähe des Kernes überwiegt. Die elektrisch geladenen Teilchen können in den Atomkern nur dann eindringen, wenn sie fähig sind, das elektrische Feld zu durchdringen und sehr nahe zum Atomkern zu gelangen. Neutronen bedürfen dagegen einer viel geringeren Geschwindigkeit, um den Einfang zu verwirklichen.

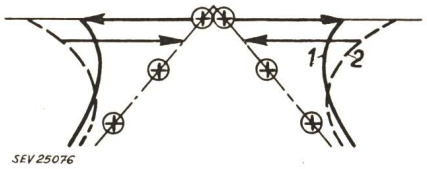

Fig. 2
Innere Kräfte des Atomkerns
1 abstossende Kräfte der elektrischen Ladungen
2 Adhäsionskräfte der Nukleonenmassen

Die Stossteilchen zur Auslösung der Kernumwandlungen können auf verschiedenem Wege ermittelt werden:

1. Bei dem Kernzerfall werden Nukleonen (n, p) oder Bruchstücke mit einem so grossen Energieinhalt hinausgeschleudert, dass er zur Umwandlung anderer Atomkerne ausreicht. Dies geschieht bei der Spaltung schwerer Atomkerne, wobei sich in gewissen Verhältnissen (n, n)-Kettenreaktionen entwickeln.

2. In besonderen Apparaten (Zyklotronen, Synchrotronen u. a.) werden elektrisch geladene Teilchen beschleunigt und auf eine so grosse Geschwindigkeit gebracht, dass die Kernumwandlung im beschossenen Stoff verursacht werden kann.

3. Die Temperatur des Reagenten wird soweit erhöht (in Millionen °C), dass die Atomkerne bei ihrem Zusammenstossen das elektrische Feld überwinden und miteinander verschmelzen. Solche thermonukleare Reaktionen verlaufen zwischen den leichten Atomkernen auf der Sonne und anderen energieliefernden Himmelskörpern; sie stellen die Energiequelle ihrer gewaltigen Ausstrahlungen dar.

III

Die Kernumwandlungen einiger schwerer Elemente bilden bekanntlich die energetische Grundlage der Atomkraftanlagen, die zurzeit gebaut und erprobt werden. Um über die Aussichten der technischen Ausnützung der thermonuklearen Reaktionen urteilen zu können, müssen diese Reaktionen mit der Umwandlung der schweren Atomkerne verglichen werden.

1. Die schweren Atomkerne enthalten einen erheblichen Neutronenüberschuss ($Y/Z > 1{,}5$); sie weisen deshalb eine geringe Stabilität auf und können mittels der ziemlich langsamen Neutronen zersetzt werden. Bei ihrer Zerspaltung werden einige überschüssige Neutronen befreit, die unter gewissen Voraussetzungen eine (n, n)-Reaktion fortsetzen. Diese Kettenreaktion kann verwirklicht werden, wenn es gelingt, im Reagenten eine positive Neu-

tronenbilanz aufrecht zu erhalten; die Neutronenausbeute muss dabei so gross sein, dass die Reaktionskette fortgesetzt und die Neutronenverluste durch verschiedene Nebenreaktionen oder Diffusion nach aussen gedeckt werden können. Das spezifische Neutronenaufkommen hängt von dem Spaltstoff ab, weshalb die Intensität der Reaktion durch die Veränderung der Neutronenverluste geregelt wird.

Das einzige in der Natur vorkommende Material, bei dem die Anlagerungsenergie eines Neutrons zur Spaltung ausreicht, ist das Uranisotop U235. Bei ihm ist die zur Auslösung einer Spaltung erforderliche Schwellenergie 5,0...5,6 MeV. Die Energie, die bei der Anlagerung eines Neutrons frei wird, ist 6,4 MeV; sie übertrifft also die Schwellenergie, weshalb U235 bereits mit langsamen oder thermischen Neutronen gespalten werden kann. Deshalb ist U235 der Ausgangsstoff in der heutigen Atomtechnik. Um die Neutronenverluste in den unproduktiven Nebenreaktionen herabzusetzen, werden die Neutronen mittels besonderer Bremsstoffe (D_2O, Graphit, H_2O u. a.) rasch bis zur thermischen Geschwindigkeit abgebremst. Leider ist U235 ein seltenes Isotop, weil das natürliche Uran nur 0,7 % U235 enthält. Für die Zersetzung des Isotops U238 werden schnelle, energiereiche Neutronen benötigt. Doch kann durch den Resonanzeinfang dem U238-Kern ein mittelschnelles Neutron (bei $\approx$ 0,1 MeV) angelagert werden, wodurch ein neues Element Plutonium (Pu239) entsteht, das mittels der thermischen Neutronen spaltbar ist. Ähnlich kann ein anderer Spaltstoff U233 durch Anlagerung von Neutronen zu Thorium (Th232) erzeugt werden. Diese Vorgänge werden Brutreaktionen genannt; sie verlaufen schematisch so:

$$
\begin{array}{l}
{}_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239} \rightarrow {}_{93}Np^{239} \rightarrow {}_{94}Pu^{239} \\
\qquad\qquad\qquad\quad \downarrow \beta \qquad\quad \downarrow \beta \\
{}_{90}Th^{232} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{90}Th^{233} \rightarrow {}_{91}P^{233} \rightarrow {}_{92}U^{233} \\
\qquad\qquad\qquad\quad \downarrow \beta \qquad\quad \downarrow \beta
\end{array}
$$

Die Schwellenergie S und die befreite Bindungsenergie B für ein anzulagerndes Neutron sind für die erwähnten schweren Elemente in Tabelle I angegeben. Die Elemente, bei denen $S < B$, sind mit thermischen Neutronen spaltbar.

Es ist zu erwarten, dass es möglich sein wird, mittels der Brutvorgänge die sämtlichen Vorräte an U und Th als Energiequelle auszunützen.

Schwellen- und Bindungsenergie

Tabelle I

Material	S [MeV]	B [MeV]
U235	5,0...5,6	6,4
U238	4,9...5,3	4,8
Pu239	5,0...5,6	6,4
U233	4,9...5,5	6,6
Th232	5,2...5,6	5,1

Die Zerspaltung des U235-Kerns verläuft:

$$
{}_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{236} \rightarrow \text{Zerfallprodukte}
$$
$$
(\text{Xe, Mo, La, u. a.}) + 2 \text{ (oder 3) } {}_{0}n^{1}
$$

Ein Beispiel der Massenbilanz dieser Reaktion:

Vor der Reaktion	Nach der Reaktion
U235 — 235,124	Mo 95 — 94,945
${}_{0}n^{1}$ — 1,00894	La 139 — 138,955
U236 — 236,13294	2 ${}_{0}n^{1}$ — 2,01788
	Σ = 235,91788

Der Massenschwund beträgt in diesem Fall $\Delta m = 0{,}215$ oder 0,091 % der Ausgangsmasse, dem ein Energiegewinn von $931 \cdot 0{,}215 = 200$ MeV entspricht. 1 kg U235 kann also theoretisch

$$
\frac{10^3 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}{235{,}124} 200 \cdot 4{,}45 \cdot 10^{-20} = 2{,}3 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 23 \text{ GWh}
$$

befreien.

Jeder zersetzte Atomkern ergibt 2...3 Neutronen, die vorwiegend einen Energieinhalt von 1...2 MeV haben und die Reaktion fortsetzen; die überschüssigen Neutronen können dabei zur Erzeugung von Pu239 oder U233 im Brutvorgang ausgenützt werden. Die Zerfallprodukte sind mittelschwere Atomkerne, mit $A = 80...150$; sie sind sehr radioaktiv und müssen aus dem Reaktor periodisch entfernt werden, weil sie die Neutronenbilanz verschlechtern.

Die technische Ausnützung dieser Kernreaktionen wird durch mehrere Umstände begünstigt:

a) Kernumwandlungen können bei jeder Temperatur durchgeführt werden, wodurch die Materialprobleme wesentlich erleichtert werden; die Kettenreaktionen beginnen, wenn die kritische Masse erreicht wird, d. h. wenn die positive Neutronenbilanz aufrechterhalten werden kann.

b) Die Reaktionen können einfach geregelt werden, indem man die Neutronenverluste in Ballaststoffen oder durch Diffusion verändert.

Einige andere Umstände beschränken aber die Anwendung dieses Reaktionstyps:

a) Der Gehalt an schweren Spaltstoffen ist in der Erdkruste gering; da diese Elemente in ihren Lagerstätten sehr verdünnt sind, ist ihre Erzeugung kostspielig.

b) Da die Reaktionen von selbst beginnen, sobald die kritische Masse erreicht wird, ist immer Vorsorge zu treffen, dass die Reaktion unter Kontrolle bleibt.

c) Die Zerfallprodukte häufen sich im Energieträger an und müssen nach einer gewissen Betriebsperiode chemisch verarbeitet werden, obgleich nur ein Bruchteil des vorhandenen Spaltstoffes tatsächlich verbraucht worden ist; die hohe Radioaktivität der Zerfallprodukte erschwert ihre Entfernung.

Die erwähnten Nachteile, vor allem die beschränkten Reserven der Spaltstoffe, zwingen Wege zu suchen, wie eine andere Art der Kernreaktionen — die Umwandlung der leichten Atomkerne — technisch auszunützen wäre.

2. Aus der Kurve der Bindungsenergie (Fig. 1) ist zu ersehen, dass die Verschmelzung leichter Atomkerne grosse Energiebeträge je Nukleon befreien kann. Da die leichten Elemente sehr verbreitet sind, stellen sie eine praktisch unerschöpfbare Energiequelle dar, wenn es nur gelingen würde, diese Kernumwandlungen technisch auszunützen.

Die Umstände bei der Umwandlung der leichten Atomkerne sind anders als bei der Zerspaltung der schweren Kerne, weil:

a) die leichten Atomkerne eine höhere Stabilität besitzen und deshalb Stossteilchen einen wesentlich grösseren Energieinhalt benötigen;

b) die Umwandlungen leichter Kerne keine sekundäre Stossteilchen (z. B. Neutronen) ergeben, welche die Reaktion fortsetzen könnten.

Zur Verwirklichung dieser Kernreaktionen sind also andere Quellen der energiereichen Stossteilchen erforderlich. Dafür kommen entweder Beschleunigungsanlagen der Atompartikel oder sehr hohe Temperaturen in Frage.

Die moderne Physik verfügt über Apparate, in denen die Atomkerne oder ihre Teilchen so grosse Geschwindigkeiten erreichen, dass sie die Umwandlung der getroffenen Kerne auslösen können. Da hier nur Teilchen mit elektrischer Ladung in Frage kommen (p, α, d), benötigen sie einen besonders hohen Energieinhalt, um das elektrische Feld der beschossenen Atomkerne überwinden zu können. Mit dem Fluss der künstlich beschleunigten Stossteilchen sind verschiedene Kernumwandlungen verwirklicht worden. Der erste Versuch fand im Jahre 1932 in der Universität Cambridge statt, als die Physiker *Cockroft* und *Walton* einen Lithiumfilm mit dem Protonenfluss beschossen (Fig. 3). Die Kernumwandlung erfolgte laut der Gleichung

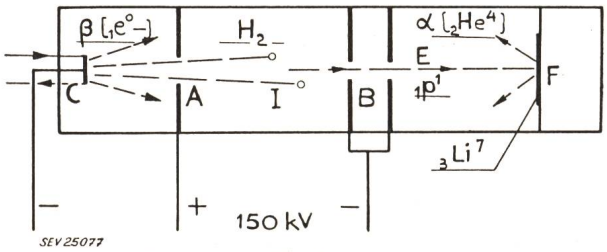

Fig. 3
Der Cockroft-Walton-Versuch
C beheizte Kathode; *A* Anode; *I* Ionisationsraum; *B* Beschleunigungskathode; *E* Protonenstrahl; *F* Lithiumfilm α Heliumkern; β Elektron; p Proton; H_2 Wasserstoff; $_3Li^7$ Lithium

$$_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow {}_4Be^8 \rightarrow 2\ {}_2He^4 + 17{,}1\ \text{MeV}$$

Um die Beschleunigungsapparate zur Energieerzeugung ausnützen zu können, muss eine positive Energiebilanz erreicht werden, d. h. die Energieabgabe der ausgelösten Kernumwandlungen muss den Energiebedarf zur Beschleunigung der Stossteilchen übertreffen. Die gegenwärtigen Beschleunigungsanlagen können diese Forderung nicht erfüllen. Wenn bei niedriger Temperatur ein Stoff mit schnellen Stossteilchen beschossen wird, dann verlieren diese viel Energie in den Elektronenorbiten der Atome und werden nach dem Durchlaufen einer kurzen Strecke soweit abgebremst, dass sie nicht mehr fähig sind, das elektrische Feld der Atomkerne zu überwinden. Da der Kerndurchmesser im Vergleich mit den Elektronenorbiten äusserst klein ist, besteht nur eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass das Stossteilchen von einem Atomkern eingefangen und die Kernumwandlung auslösen wird. Obgleich die Energieabgabe einer jeden Kernumwandlung die Beschleunigungsenergie des entsprechenden Stossteilchens bei weitem übertrifft, sind doch die Verluste an Stossteilchen so gross, dass ein Nettoverlust an Energie entsteht. Aus diesem Grunde können die Beschleunigungsanlagen zur Energieerzeugung nicht angewandt werden. Sie sind aber zur Erforschung des inneren Aufbaus der Materie von entscheidender Bedeutung und können neue Wege zur Befreiung der Kernenergie andeuten. Deshalb werden in allen technisch entwickelten Ländern grosse Mittel zum Bau von kräftigen Beschleunigungsanlagen für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt. Wenn es gelingen würde, mit dem Fluss der energiereichen Teilchen so viele Kernumwandlungen auszulösen, dass ein Energieüberschuss entsteht, dann wäre ein Energieaggregat geschaffen, dessen Energieabgabe durch die Flußstärke der Stossteilchen bequem geregelt werden könnte. Die Atomtechnik bedarf aber noch eines langen Entwicklungswegs, um eine derart ideale Energieerzeugungsanlage schaffen zu können. Deshalb müssen Atomenergieanlagen vorerst auf Grundlage der selbständig verlaufenden Kettenreaktionen errichtet werden.

Kettenreaktionen der leichten Atomkerne bedürfen Temperaturen im Bereich von Millionen °C. Bei so hohen Temperaturen werden die Gase ionisiert, d. h. sie bestehen aus positiv geladenen Ionen und freien Elektronen; ein solcher Zustand der Gase wird Plasma genannt. Die Atomkerne einer Gasplasma besitzen genügend kinetische Energie, um beim Zusammenstoss mit anderen Atomkernen die Kernumwandlungen verursachen zu können. Die Reaktion wird mittels der dabei befreiten Wärmeenergie fortgesetzt, weshalb Reaktionen dieser Art *thermonuklear* genannt werden. Um eine thermonukleare Reaktion zu veranlassen, muss eine äussere Energiequelle vorhanden sein, mittels der das benötigte Temperaturniveau erreicht wird. Um die eingeleitete Reaktion in Gang zu halten, muss innerhalb des Reagenten eine positive Energiebilanz gewährleistet werden, d. h. die Wärmeverluste nach aussen dürfen die Energieausbeute der Reaktion nicht überschreiten. Dies setzt voraus, dass auch bei dieser Kernreaktion eine Mindestmenge des Reagenten, d. h. die kritische Menge, vorhanden ist. Diese Mindestmenge hängt von der spezifischen Energieausbeute innerhalb des Energieträgers (MW/m^3) und den Verhältnissen der Wärmeabfuhr ab; diese werden durch die spezifische Oberfläche (m^2/m^3) des Reaktionsraums, der Temperatur und der Wärmeleitfähigkeit des Reagenten bedingt.

Die Temperatur kennzeichnet die mittlere kinetische Energie der Moleküle oder der Atome. Die tatsächlichen Geschwindigkeiten einzelner Atome sind verschieden. Die Verteilung der Atome je nach ihrer thermischen Energie W wird mittels der Maxwellschen Häufigkeitskurve ausgedrückt (Fig. 4). Es gibt daher keine bestimmte Temperaturgrenze, unterhalb der die thermonuklearen Kernumwandlungen unmöglich wären. Das Temperaturniveau beeinflusst aber die Intensität des Reaktionsverlaufs in sehr hohem Masse. Je höher die Temperatur, desto mehr Atome besitzen die Geschwindigkeit, die zu den Kernumwandlungen führen kann; bei hohen

Temperaturen nimmt die Energieausbeute der thermonuklearen Reaktionen rasch zu. Diese Beziehungen sind in Fig. 4 schematisch dargestellt worden, wobei $a = f(W)$ die relative Verteilung der Atomkerne, $b = \varphi(W)$ die Wahrscheinlichkeit der Kernumwandlung und $c = ab = \psi(W)$ den Anteil der Atomkerne verschiedenen Energieinhalts, die sich an der Kernreaktion beteiligen, bedeuten.

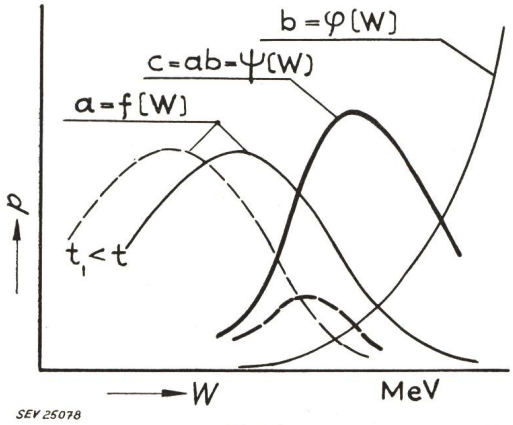

Fig. 4
Temperatureinfluss auf Kernreaktionen

W kinetische (thermische) Energie der Kerne; $a = f(W)$ Häufigkeitskurve der thermischen Energie; $b = \varphi(W)$ Fähigkeit der Kernumwandlungen; $c = \psi(W)$ Verteilung der Kernumwandlungen; p Wahrscheinlichkeit; t Temperatur

Je höher die Temperatur, umso mehr verschiebt sich die Kurve $a = f(W)$ nach rechts und die Ordinaten c vergrössern sich.

Die Temperatur wird in jedem Körper durch das Gleichgewicht zwischen dem Gewinn und dem Verlust an Wärmeenergie bestimmt. Die Wärmeausstrahlung nimmt im Verhältnis der Oberfläche F des Körpers und der vierten Potenz der absoluten Temperatur T (bei Temperatur der Umgebung $T_0 = 0$) zu. Falls der Energieertrag der Kernreaktionen dem Reagentenvolumen V proportional ist, kann die Energiebilanz angenähert folgendermassen ausgedrückt werden (angenommen, dass an jeder Stelle des Körpers dieselbe Temperatur herrscht):

$$W = w\,V = k\,F\,T^4$$

worin w (MW/m³) die spezifische Energieausbeute und k den Umrechnungskoeffizienten bedeuten. Daraus folgt

$$T = \frac{1}{k_1}\sqrt[4]{\frac{wV}{F}}$$

Für einen kugelförmigen Körper ist $V/F = r/3$ (r Radius) und $T = k_2\sqrt[4]{wr}$. Je grösser r, umso höher ist T bei einem gegebenen w-Wert. Deshalb können in sehr grossen Massen des Reagenten auch die langsamen Kernvorgänge eine so hohe Temperatur aufrechterhalten, dass der Verlauf der Reaktion gewährleistet werden kann. Wenn die Beziehung zwischen der Energieausbeute und der Temperatur $w = F(T)$ bekannt ist, dann kann die kritische Menge (bzw. das Volumen) des Reagenten errechnet werden. In Fig. 5 sind zwei Gruppen der Kurven eingetragen, wobei die Kurven $w = F(T)$ die verfügbare und die Kurven $w = \Phi(T)$ die benötigte Energieausbeute je nach der Temperatur T bei verschiedenen r-Werten darstellen. Der Schnittpunkt beider Kurven K entspricht der kritischen Menge des Reagenten, die zur Aufrechterhaltung der Kernreaktion benötigt wird. Um die Reaktion bei einer kleinen Menge des Reagenten fortsetzen zu können,

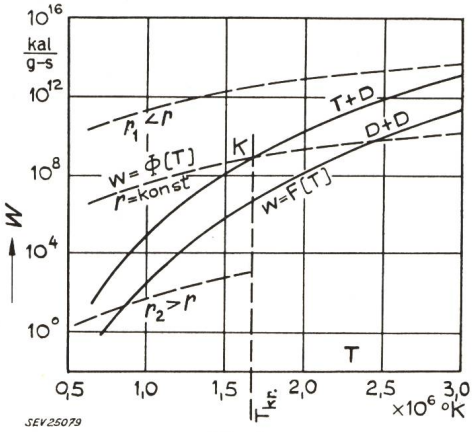

Fig. 5
Energiebilanz der thermonuklearen Reaktionen

T Temperatur des Reagenten; $w = F(T)$ Energieausbeute der Kernreaktionen; $w = \Phi(T)$ Wärmeabgabe nach aussen; r_1, r_2 Radius des Reaktionsraumes; K kritischer Punkt; $T_{kr.}$ kritische Temperatur (bei $r_2 > r_1$, $T_{kr.2} < T_{kr.1}$)

müssen die spezifische Energieabgabe w und die Temperatur T sehr hohe Werte annehmen. Dies stellt schwierige Probleme bei der technischen Ausnützung der thermonuklearen Reaktionen.

IV

Bei der Betrachtung der Schwierigkeiten, die mit der technischen Ausnützung der thermonuklearen Reaktionen verknüpft sind, wird die Frage gestellt, wie diese Kernumwandlungen auf der Sonne und auf den Sternen verlaufen und ob Forschungen über diese Vorgänge nicht wertvolle Hinweise bezüglich der Lösung der erwähnten Probleme geben können. Im Weltall verlaufen die thermonuklearen Umwandlungen ununterbrochen in riesigem Umfang und stellen die Strahlungsquelle der Himmelskörper dar. Die Art dieser energieliefernden Reaktionen hängt von den verfügbaren Elementen und der herrschenden Temperatur innerhalb der einzelnen Himmelskörper ab. Die Reaktionen gehören vorwiegend zum (p, α)-Typ, d. h. die Stossteilchen sind Protonen oder Kerne des Wasserstoffatoms ($_1H^1$), die bei hohen Temperaturen in Kerne der vorhandenen leichten Elemente eindringen und in den meisten Fällen Heliumkerne bilden. Man unterscheidet mehrere Stufen dieser Kernreaktionen:

1. Die Reaktionen zwischen den Protonen und Deuteronen

$$_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_1H^2 + {}_1e^0\,(+)$$

und

$$_1H^2 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^3 + \gamma\text{-Strahlung}$$

verlaufen bei Temperaturen von 1...2 Millionen °C, weil die elektrischen Ladungen der beteiligten Kerne

gering sind. Man nimmt an, dass diese Reaktionen in neuen roten Sternen stattfinden, die eine geringe Dichte und verhältnismässig niedrige Temperaturen haben.

2. Bei Temperaturen im Bereich von 3...7 Millionen °C entwickeln sich die Reaktionen zwischen den Protonen und Atomkernen des Li, Be oder B:

$$_3Li^6 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + {}_2He^3$$
$$_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow 2\,{}_2He^4$$
$$_4Be^9 + {}_1H^1 \rightarrow {}_3Li^6 + {}_2He^4$$

und

$$_5B^{11} + {}_1H^1 \rightarrow 3\,{}_2He^4$$

3. Die Reaktion

$$_5B^{10} + {}_1H^1 \rightarrow {}_6C^{11} + \gamma\text{-Strahlung}$$

verlangt eine Temperatur, die sich der Temperatur der meisten weiss-gelben Sterne nähert. Im allgemeinen ist die Wahrscheinlichkeit der Kernumwandlungen, welche γ-Quanten anstatt der α- oder β-Emission abgeben, gering, weshalb sie hohe Temperaturen verlangen.

4. Nachdem die leichten Elemente, D, Li, Be und B in den erwähnten Reaktionen verbraucht worden sind und die Temperatur innerhalb der Himmelskörper bis auf 20...25 Millionen °C angestiegen ist, nimmt eine langsame Reaktion zwischen den Protonen an Bedeutung zu, die mit Hilfe der Katalysatoren verläuft und als Endprodukt Helium ($_2He^4$) ergibt. Durch diese Reaktion wird die lange Dauer und die Gleichmässigkeit der Ausstrahlungen erklärt. Zu dieser Entwicklungsgruppe der Himmelskörper gehört die Sonne. *H. Bethe* und *C. von Weizacker* haben die Energievorgänge der Sonne erforscht und sind zu den Schlussfolgerungen gekommen, dass die wichtigste Energiequelle der Sonnenstrahlung eine (p, α)-Kernreaktion ist, die in einem geschlosse-

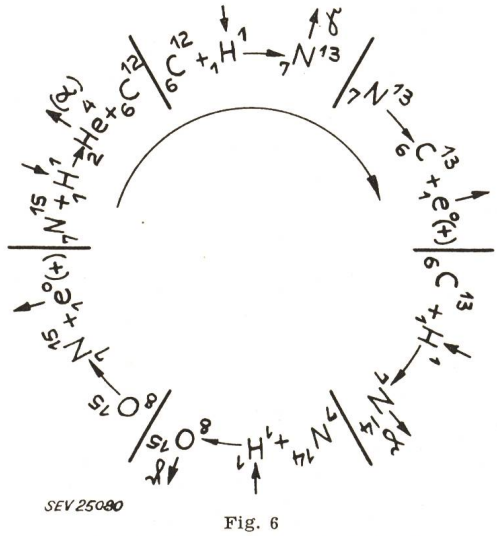

Fig. 6
Die zyklische Kernreaktionskette der Sonne

nen Kreislauf verläuft und nach sechs nacheinanderfolgenden Umwandlungen in ihren Ausgangszustand zurückkehrt (Fig. 6). Als Katalysatoren beteiligen sich in dieser Reaktionskette C und N, die sich ständig regenerieren. Das Endergebnis kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$_6C^{12} + 4\,{}_1H^1 \rightarrow {}_6C^{12} + {}_2He^4 + 2\,{}_1e^0\,(+) + \gamma\text{-Strahlung}$$

Es ist überraschend, dass dieser Kreislauf sogar bei der Temperatur, die innerhalb der Sonne ungefähr 20 Millionen °C beträgt, langsam verläuft und eine spezifische Energieabgabe von nur 2 erg oder $1{,}25 \cdot 10^6$ MeV/g-s aufweist. Dieser Energieertrag kann die hohen Temperaturen und Ausstrahlungen dank der ungeheuren Masse der Sonne und der Sterne aufrechterhalten. Innerhalb so grosser Körper können nur die langsamen Reaktionen dieser Art dauernd verlaufen, weil bei höheren Energieausbeuten sie sich lawinenartig entwickeln und eine gewaltige Explosion verursachen würden. Unterhalb eines jeden cm² der Sonnenoberfläche befinden sich ungefähr 33 000 t der Materie, wobei der Reaktionsverlauf durch diese Masse geregelt wird: eine Temperaturerhöhung bringt eine entsprechende Ausdehnung der Masse mit sich, wodurch sich die Reaktion verlangsamt; die gravitationsbedingte Kompression verhindert dagegen eine Temperatursenkung.

In technischen Energieanlagen sind die thermonuklearen Reaktionen in ganz anderen Verhältnissen zu verwirklichen. Hier soll man mit sehr kleinen Mengen des Reagenten arbeiten, weshalb ihre kritische Masse möglichst klein sein soll. Deshalb müssen solche Kernreaktionen ausgewählt werden, die bei relativ geringen Temperaturen hohe spezifische Energieausbeute ergeben; dies erleichtert das Erreichen der benötigten Anfangstemperatur und das Ingangsetzen der Kernreaktion. Als Reagenten kommen für diese Reaktionen vor allem die schweren Isotope des Wasserstoffes in Frage, weil sie eine geringe elektrische Ladung besitzen und weil die Anwesenheit der zusätzlichen Neutronen die Stabilität ihrer Kerne vermindert.

Zur technischen Ausnützung können verschiedene thermonukleare Reaktionen in Betracht kommen. Die wichtigsten Reagenten sind:

1. die Wasserstoffisotope:
   das Deuterium D oder $_1H^2$ ($Y/Z = 1$)
   und das Tritium T oder $_1H^3$ ($Y/Z = 2$);
2. die Lithiumisotope: $_3Li^6$ und $_3Li^7$

Einige Beispiele der Reaktionen sind in Tabelle II angegeben. Als sekundäre Reaktionen werden jene bezeichnet, in denen die Produkte der primären Reaktionen ($_0n^1$, $_1H^3$) sich beteiligen.

Kernumwandlungen leichter Elemente

Tabelle II

Nr.		Reaktionsverlauf	Energieausbeute MeV
1	Primäre Reaktion	$_1H^2 + {}_1H^2 = {}_2He^3 + {}_0n^1$	4,0
2		$_1H^2 + {}_1H^2 = {}_1H^3 + {}_1H^1$	3,3
3		$_3Li^6 + {}_1H^2 = {}_4Be^7 + {}_0n^1$	3,4
4		$_3Li^6 + {}_1H^2 = 2\,{}_2He^4$	22,4
5	Sekundäre Reaktion	$_1H^2 + {}_1H^3 = {}_2He^4 + {}_0n^1$	17,6
6		$_3Li^6 + {}_0n^1 = {}_1H^3 + {}_2He^4$	4,8
7		$_3Li^7 + {}_0n^1 = {}_3Li^8$	2,0

Das Deuterium stellt den wichtigsten Ausgangsstoff für die thermonuklearen Reaktionen dar, weil es in der Natur ziemlich verbreitet ist. Der Gehalt

an schwerem Wasser beträgt in natürlichem Wasser etwa 0,014 %, d. h. ein Atom des Deuteriums kommt auf jede 7000 Atome des gewöhnlichen Wasserstoffs. Doch sind die Reserven des Deuteriums in den Wassermassen der Ozeane so ungeheuer, dass das Deuterium eine praktisch unerschöpfbare Energiequelle sichern kann. Der Tritiumkern mit zwei Neutronen ist unstabil, weshalb das Tritium der beste Reagent für die thermonuklearen Kernumwandlungen ist. Tritium kommt aber in der Natur nicht vor und kann praktisch nur als Produkt einiger Kernreaktionen erzielt werden. Lithium ist ziemlich weit verbreitet, es besteht aus zwei Isotopen: $_3Li^7$ (93 %) und $_3Li^6$ (7 %), die beide als Reagenten dienen können. Auch die schwereren Elemente, Be und B, können als Ausgangsstoffe für thermonukleare Reaktionen verwendet werden, doch besitzen ihre Atomkerne grössere elektrische Ladungen und benötigen deshalb höhere Temperaturen.

In der Regel verlaufen in Reagenten gleichzeitig verschiedene thermonukleare Reaktionen, wobei die primären Reaktionen von den sekundären begleitet werden. Bei einigen primären Reaktionen entstehen Tritiumkerne oder Neutronen, die sogleich weitere Kernumwandlungen verursachen. Die energiereichen Neutronen der thermonuklearen Reaktionen können auch zur Spaltung schwerer Atomkerne verwertet werden. Die Produkte der Umwandlung von leichten Atomkernen weisen nur eine kurzfristige Radioaktivität auf. Die thermonuklearen Reaktionen befreien aber sehr energiereiche Neutronen, weshalb während des Reaktionsverlaufs mit einer sehr starken Neutronenstrahlung zu rechnen ist. Nimmt man an, dass im Deuterium die Reaktionen Nr. 1 und 2 der Tabelle II mit gleicher Geschwindigkeit verlaufen, dann befreit sich je 7,3 MeV ein Neutron, dessen Energieinhalt ungefähr 3 MeV beträgt; die Neutronenenergie bildet also in diesem Fall 40 % der gesamten Energieausbeute. In der sekundären Reaktion Nr. 5 beträgt die Neutronenenergie sogar 80 % des Energieertrags. Bei der Uranspaltung werden dagegen 2...3 Neutronen mit einem Energieinhalt von nur 5...6 MeV, oder 2,5 % des gesamten Energieaufkommens von 200 MeV, befreit. Die thermonuklearen Reaktoren müssen also sehr sorgfältig gegen die Neutronenstrahlung abgeschirmt werden. Die Entfernung der Reaktionsprodukte stellt aber keine Probleme auf, was als ein wichtiger Vorteil der thermonuklearen Reaktionen anzusehen ist.

Die Energieausbeute der thermonuklearen Reaktionen hängt von der Art der Kernumwandlungen ab. Aus Tabelle II ist zu ersehen, dass diese Energiebeträge sehr verschieden sind. So wird z. B. bei gleichlaufenden primären Reaktionen Nr. 1 und 2, einschliesslich die sekundäre Reaktion Nr. 5, je fünf Deuteriumatome $4 + 3{,}3 + 17{,}6 = 24{,}9$ MeV befreit. Dann könnte 1 kg des umgesetzten Deuteriums (Atomgewicht $M_A = 2{,}0147$) eine Energiemenge von

$$W = \frac{24{,}9 \cdot 10^3 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}{5 \cdot 2{,}0147} 4{,}45 \cdot 10^{-20} =$$
$$= 6{,}65 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 66{,}5 \text{ GWh}$$

ergeben. Deuterium, das sich in 1 kg des schweren Wassers befindet ($A = 2 \cdot 2 + 16 = 20$), könnte in diesem Fall $66{,}5 \cdot 4/20 = 13{,}3$ GWh abgeben. Wenn man annimmt, dass 20 % dieser Energie in elektrische Energie umgesetzt werden kann, dann beträgt die Energieerzeugung $13{,}3 \cdot 0{,}20 = 2{,}66$ GWh/kg. Zur Abscheidung eines kg von D_2O aus natürlichem Wasser mittels Elektrolyse werden ungefähr 10000 kWh verbraucht. Der Energiegewinn in den Kernreaktionen könnte also 250mal den Energiebedarf zur Aufbereitung des Ausgangsstoffes übertreffen. Dies beweist, dass die Vorräte an Deuterium in den Wassermassen der Ozeane tatsächlich eine unübersehbare Energiequelle enthalten, wenn es nur gelingen würde, regelbare Kernumwandlungen des Deuteriums technisch zu verwirklichen.

V

Die Hauptprobleme bei den thermonuklearen Reaktionen werden durch die äusserst hohen Temperaturen verursacht. Dabei müssen zwei Aufgaben gelöst werden:

1. die benötigte Anfangstemperatur muss erreicht, d. h. die Kernreaktion muss eingeleitet werden und

2. der Reaktionsvorgang muss geregelt und die befreite Energie wirksam ausgenützt werden.

Die nicht geregelten thermonuklearen Reaktionen sind für militärische Zwecke als explosive Vorgänge verwirklicht worden. Die Anfangstemperatur ist dabei mit Hilfe der Spaltungen von schweren Atomkernen (U235, Pu239) erreicht worden. Vorläufig ist dies der einzige Weg, die Kernumwandlungen der leichten Elemente in Ganz zu setzen. Für die Energieanlagen sind hiezu andere Massnahmen zu treffen. Man bemüht sich, in Laboratorien die hohen Temperaturen mit verschiedenen Mitteln zu erreichen; dazu verwendet man äusserst starke elektrische Impulse in Gasen leichter Elemente (D_2), Schwingungen höchster Frequenz u. a. Wenn es auf irgend einem Wege gelingen würde, ein solches Temperaturniveau zu erreichen, welches die Kernumwandlung einleitet, dann wäre das erste Problem gelöst. Man setzt voraus, dass Stromimpulse von $\geqq 10^6$ A Temperaturen von etwa 1 Million °C ergeben können; in diesem Temperaturbereich können sich bereits einige thermonukleare Reaktionen entwickeln.

Eine weitere Aufgabe ist, die eingeleitete Reaktion zu regeln und Energie abzuleiten. Dies wird vor allem dadurch erschwert, dass kein Werkstoff fähig ist, der Einwirkung so hoher Temperaturen standzuhalten; jeder Werkstoff verdampft in der Nähe der thermonuklearen Reaktionen. Dies verlangt neue Massnahmen, mittels welcher diese Reaktionen räumlich begrenzt werden können. Da bei hohen Temperaturen die Atome des Reagenten ionisiert sind, können sie mit Hilfe des magnetischen Feldes gerichtet werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Reaktion mittels des magnetischen Feldes von den Wänden des Reaktors fernzuhalten, um den Reaktorbehälter in gewissem Masse zu isolieren. Schon in den Beschleunigungsapparaten wird der Strahl der elektrisch geladenen Teilchen mit dem magnetischen Feld längs einer bestimmten Bahn

gerichtet, ohne dass er die Apparatewände berührt. In den Energiereaktoren könnte dieses Mittel auch angewandt werden, doch muss hier der Energieaufwand zur Schaffung des magnetischen Feldes möglichst niedrig sein, so dass die Anlage mit einem günstigen Wirkungsgrad arbeiten kann.

Die erwähnte Massnahme, den Reaktionsraum mit dem magnetischen Feld zu umhüllen, bietet theoretisch auch eine andere äusserst wichtige Möglichkeit, nämlich die Reaktionsenergie unmittelbar in der Form von elektrischer Energie nach aussen abzuleiten. Dadurch könnten die Wärmeumwandlung in mechanische Energie und die damit verbundenen grossen Verluste vermieden werden. Die unmittelbare Umsetzung der chemischen und der Kernenergie in elektrische Energie gehört zu den grössten Aufgaben der Energietechnik. Im letzten Kongress der UNIPEDE, in London, 1955, äusserte der Direktor der britischen Atomenergiekommission seine Überzeugung, dass es zukünftig gelingen wird, dieses Problem erfolgreich zu lösen, wodurch der gesamte Wirkungsgrad der Energieversorgung wesentlich verbessert werden kann.

Die Spaltung schwerer Atomkerne wird durch die Regelung der Neutronenbilanz (des Vermehrungsfaktors) kontrolliert. Diese Kernreaktionen besitzen eine Tendenz der Eigenregelung, weil bei höherer Temperatur der Einfangsquerschnitt der Spaltstoffe sich verringert. Bei thermonuklearen Reaktionen ist die Temperatur der Hauptfaktor, der die Reaktion begünstigt. In den grossen Materialmassen der Himmelskörper vollzieht sich auch eine Selbstregelung, weil die Kompressionsarbeit der Schwerkraft eine gelegentliche Temperatursenkung ausgleicht. Es scheint, dass in technischen Energieanlagen, in denen die Reaktion mit kleinen Mengen des Reagenten vorzunehmen ist, eine Regelung dieser Art unmöglich ist. Man kann sich hier eine Mengen- bzw. Füllungsregelung vorstellen, wobei die Energieabgabe durch die Veränderung der in den Reaktionsraum hineinzuspeisenden Reagentenmenge kontrolliert wird. Wäre es möglich, in einem Punkt die benötigte Temperatur aufrechtzuerhalten, dann könnte durch Zuführung kleiner Mengen des Reagenten eine regelbare Energiemenge befreit werden, die von der Reagentenmenge abhängig wäre. Wenn nur eine sehr geringe Reagentenmenge in den Reaktorkern hineingebracht wird, so kann sich die Kettenreaktion aber nicht entwickeln, weil die Energieabgabe nach aussen allzu schnell erfolgt. Die Reaktion könnte dann nur dadurch in Gang gehalten werden, dass die Temperatur mittels irgendeiner Massnahme (Schwingungen, elektrische Impulse) periodisch auf die benötigte Höhe gebracht würde und aufeinanderfolgende explosive Reaktionen auslösen könnte. Durch die Veränderung der Zeitfolge oder der Stärke dieser Explosionen würde die Leistung des Reaktors und die mittlere Temperatur im Reaktionsraum geregelt werden, wodurch die Materialprobleme leichter gemeistert werden könnten. Dann würde der Verlauf der Energieabgabe einen pulsierenden Charakter, ähnlich wie in Brennkraftmaschinen, aufweisen.

Wenn es gelingen würde, die beiden Hauptprobleme — das Erreichen der benötigten Anfangstemperatur und die Regelung des Reaktionsverlaufs — zu lösen, dann wären die technischen Grundlagen zum Bau von thermonuklearen Reaktoren geschaffen. Da die Reserven der leichten Elemente praktisch unerschöpfbar sind, könnten die Energiebedürfnisse der Welt fast ohne Beschränkungen befriedigt werden. Vorläufig werden aber nur die ersten Versuche in dieser Richtung durchgeführt.

Zusammenfassend kann die Lage in der Ausnützung der Kernenergie folgendermassen gekennzeichnet werden:

a) Die Einsetzung der thermonuklearen Reaktionen zur Energieversorgung ist in nächster Zukunft noch nicht zu erwarten, weshalb vorläufig die Spaltung von schweren Atomkernen zu diesem Zweck zu entwickeln ist. Kernkraftwerke dieser Art werden voraussichtlich am Ende dieses Jahrhunderts zum wichtigsten Energieerzeuger werden.

b) Zur erfolgreichen Ausnützung der thermonuklearen Reaktionen sind noch ausgedehnte theoretische Forschungen über die Struktur der Atomkerne nötig, die völlig neue Ideen zur Lösung dieses Problems ergeben können.

c) Wissenschafter und Techniker sind überzeugt, dass trotz aller Schwierigkeiten die Probleme der thermonuklearen Reaktionen zu lösen sind. Wenn es gelingen wird, solche Reaktoren technisch zu entwickeln, dann wird einer der grössten Träume der Menschheit auf technischem Gebiet verwirklicht werden.

Adresse des Autors:
A. Kroms, 12 Brainerd Rd., Boston 34, Mass. (USA).