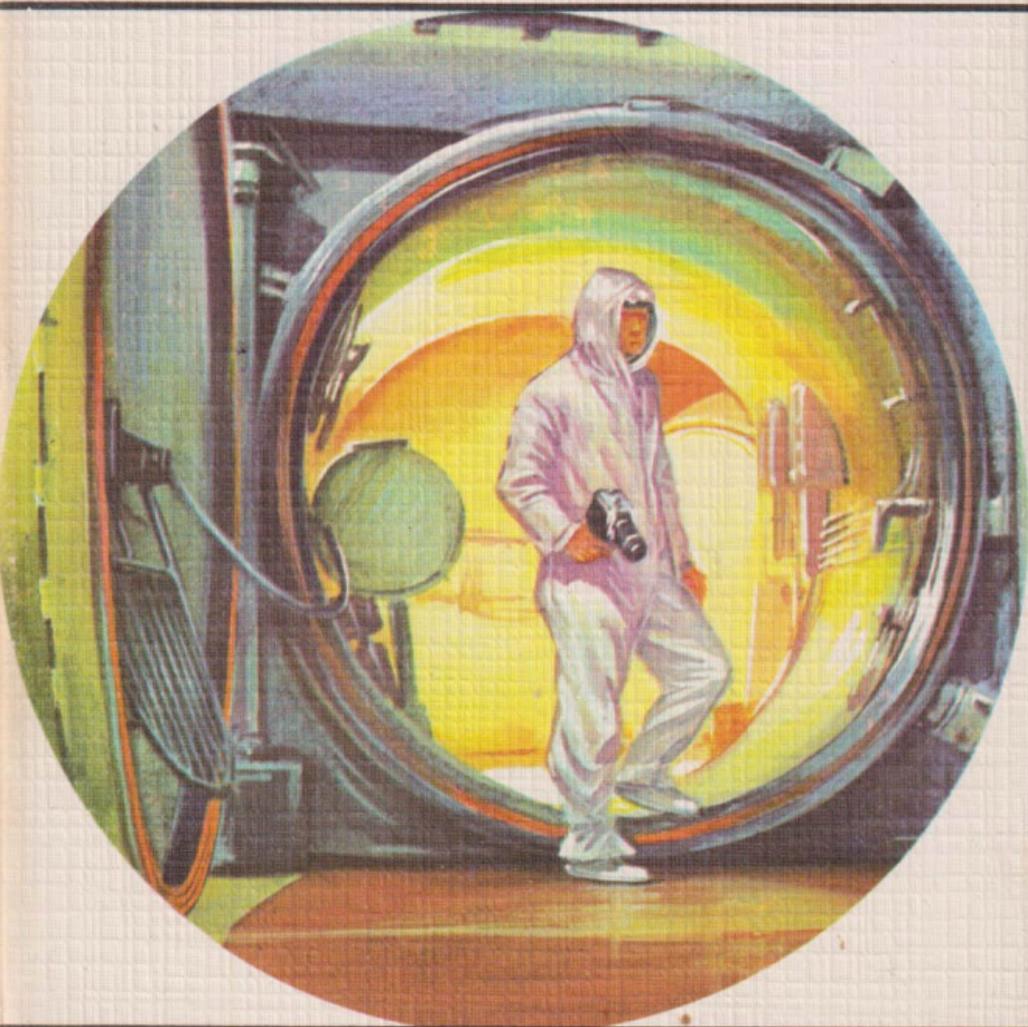


akzent

Helmut Lindner

Kraftquell Kernenergie



Helmut Lindner

Kraftquell Kernenergie

Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Der Autor, Studiendirektor Helmut Lindner,
ist an der Ingenieurhochschule Mittweida tätig.

Illustrationen: Adelhelm Dietzel
und Hans-Jürgen Ehricht

1. Auflage 1975

1.-20. Tausend. Alle Rechte vorbehalten.

© *Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin,*

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig, 1975

VLN 212-475/13/75 LSV 3279

Redaktionsschluß: 15. 11. 73

Lektor: Anselm Heybey

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typografie: Hans-Jörg Sittauer

Gesamtherstellung: GG Interdruck Leipzig

Printed in the German Democratic Republic

Best.-Nr.: 6533486

EVP 4,50 Mark

Inhalt

Energie für die Zukunft

Dem Atom auf der Spur

- Bausteine der Atome 10
- Elemente und Nuklide 12
- Kerne, die von selbst zerfallen 13
- Kleines ABC der Strahlen 14
- Wie lange lebt ein Kern? 18

Das Geheimnis der Kernenergie

- Einsteins Vermächtnis 21
- Die Kernspaltung 24
- Die gefährliche Seite 26
- Die Neutronen sind zu schnell 28
- Die Bändigung der Kettenreaktion 31
- Durchgehen unmöglich! 33
- Wohin mit der Wärme? 34

Die Kernkraftwerke der ersten Generation

- Es wird kritisch 38
- Der Veteran und seine Söhne 41
- Die englische Linie 45
- Tücken des Kernbrennstoffs 48
- Die Geburt des Plutoniums 50
- Die teuersten Fabriken der Welt 53
- Der Gigant am Don 56

Kraftwerke bei uns 59

Woanders wird auch nur mit Wasser gekocht 62

Reaktoren auf hoher See 69

Wirtschaftlich und sicher

Die Heizkraft des Kernbrennstoffs 72

Gewolltes und unerwünschtes Gift 76

Sicherheit an erster Stelle 79

Umweltgefährdung? 84

Was kostet der Atomstrom? 88

Die Kernkraftwerke der zweiten Generation

Kraftwerke, die sich selbst versorgen 93

Guter Start für schnelle Brüter 96

Rohrpost mit Brennstoff 101

Mit glühenden Turbinen 104

Synthetisches »Erdgas« aus Kernenergie 107

Minireaktoren 109

Strom für den Weltraum 114

Auf dem Weg zur Kernfusion

Die Sonne bringt es an den Tag 119

Harte Bedingungen 121

Unsichtbare Wände 123

Der Reaktor der Zukunft 126

Energie für die Zukunft

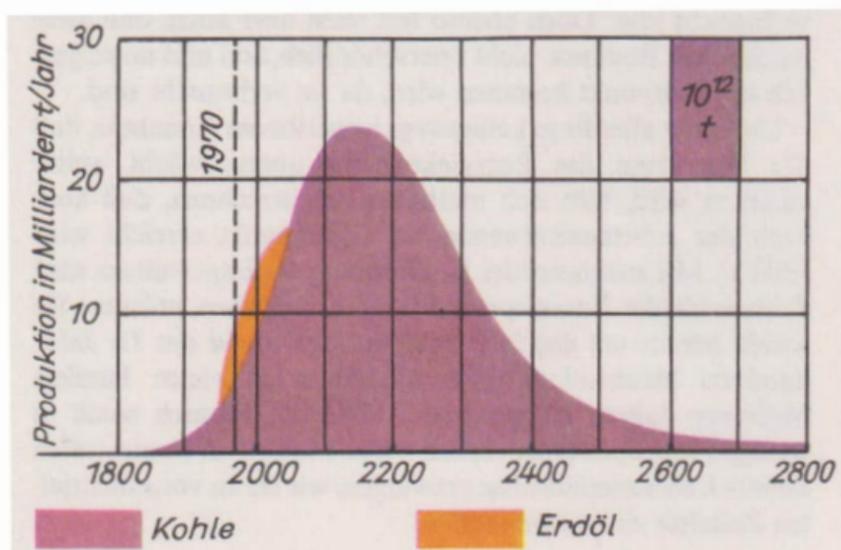
Wir leben in einer Zeit gesellschaftlicher Umwälzungen und eines wirtschaftlich-technischen Wachstums, wie es die Menschheit noch nicht erlebt hat. Diese Entwicklung spiegelt sich im Energiebedarf wider, der in den letzten Jahrzehnten sprunghaft gestiegen ist und noch in keinem Land der Welt voll befriedigt werden kann. Die Kapazität der Kraftwerke nimmt im Weltmaßstab jährlich um 8 % zu und verdoppelt sich innerhalb von 8,7 Jahren. Es wachsen die Weltkohleförderung jährlich um 3,6 % und die Gewinnung von Erdöl und Erdgas um 7 %. Noch harren auch gewaltige Lagerstätten an fossilen Brennstoffen und ungebändigte Wasserkräfte ihrer Erschließung. Die Schätzungen der Weltvorräte klaffen jedoch weit auseinander. Optimisten veranschlagen sie mit $7,5 \cdot 10^{12}$ (7500 Mrd.) t Kohle und $0,3 \cdot 10^{12}$ t Erdöl und Erdgas. Gewiß, das ist viel, und sie werden auch heute und morgen noch nicht verbraucht sein. Doch ebenso fest steht aber auch, daß diese natürlichen Bestände nicht unerschöpflich sind und unweigerlich der Zeitpunkt kommen wird, da sie verbraucht sind.

Unter der allerdings keineswegs beweisbaren Annahme, daß das Wachstum des Energiekonsums ungeschwächt weiter anhalten wird, läßt sich mathematisch errechnen, daß kurz nach der Jahrtausendwende ein Gipfelpunkt erreicht wird (Bild 1). Mit zunehmender Erschöpfung der Lagerstätten wird dann auch die Energieproduktion zurückgehen müssen. Sie würde bereits um das Jahr 2600 auf den Stand des 19. Jahrhunderts herabsinken. Was die Natur in vielen hundert Millionen Jahren aufspeicherte, hätte der Mensch somit in wenigen Jahrhunderten verheizt. Der Mangel an Brennstoffen könnte Lebensverhältnisse erzwingen, wie sie im vorindustriellen Zeitalter einmal bestanden.

Allerdings hängt die Frage einer vernünftigen Ausnutzung der natürlichen Bodenschätze ganz entscheidend von der jeweiligen Gesellschaftsordnung ab, und es ist dann sehr fraglich, ob derart düstere Prognosen überhaupt berechtigt sind. Vor allem aber wurde schon lange, ehe sich die ersten Zeichen einer kommenden Energieknappheit ankündigten, der Ausblick auf eine völlig neue Energiequelle sichtbar, die Energie aus dem Innern der Atome. Seit der Entdeckung der Radioaktivität am Anfang dieses Jahrhunderts und im Zuge der weiteren Entwicklung der Kernphysik hat der Mensch eine Energiequelle erschlossen und heute schon zur technischen Reife gebracht, die ihm geradezu unerschöpfliche Reserven anbietet – die Kernenergie.

Die Kernenergie hat ihren Siegeszug bereits begonnen. In den hochindustrialisierten Ländern deckt sie heute schon einen ansehnlichen Teil des Energiebedarfs. Die Zahl der Kernkraftwerke wächst von Jahr zu Jahr stark an. Von 1971 bis 1978 wird sich nach der von der IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation) geführten Statistik die Anzahl der mit Kernenergie betriebenen Großkraftwerke verdreifachen und die von ihnen gelieferte elektrische Leistung versiebenfachen (Bild 2). Es besteht kein Zweifel, daß sich dieser rasante Auf-

Bild 1. Jährliche Förderung und Gesamtverbrauch an fossilen Brennstoffen bis zum Jahr 2800 (Schätzwerte)



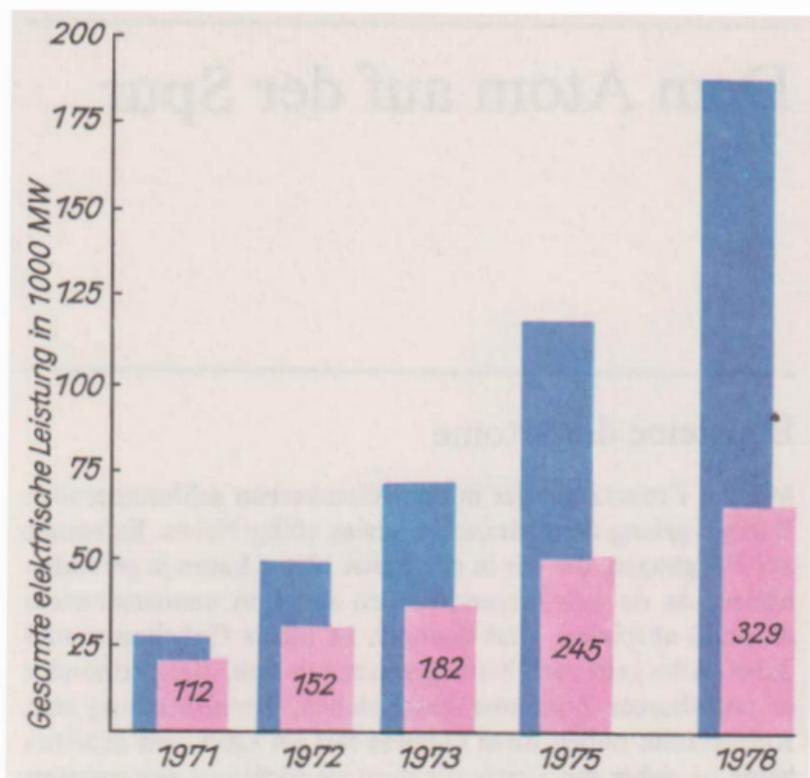


Bild 2. Die Entwicklung der mit Kernenergie betriebenen Großkraftwerke der Welt bis 1978
 Anzahl der Kraftwerke (rosa) und deren gesamte elektrische Leistung (blau)

schwung fortsetzen wird. Er wird dem Menschen eine sorgenfreie und unbegrenzte Entfaltung all seiner materiellen und kulturellen Kräfte ermöglichen – vorausgesetzt, daß es ihm gelingt, auch die gesellschaftlichen Bedingungen einer unge störten und friedlichen Entwicklung zu sichern.

Dem Atom auf der Spur

Bausteine der Atome

Mit der Freisetzung der in den Atomkernen schlummernden Energie gelang dem Menschen etwas völlig Neues. Es beruht auf Vorgängen, die wir in der freien Natur kaum je gefunden hätten, da sie sich nirgendwo von selbst in nennenswertem Ausmaß abspielen. Und dennoch ist nichts Geheimnisvolles dabei. Alles geht nach Naturgesetzen vor sich, die miteinander in unlösbarem Zusammenhang stehen. Kernforschung und Kerntechnik haben diese Gesetze fest im Griff und arbeiten heute so sicher mit ihnen, als seien sie nicht erst seit wenigen Jahrzehnten, sondern schon seit Jahrhunderten bekannt.

Wenn es hierbei lediglich um die Atome ginge, so wäre es überhaupt nichts Neues. Die ganze Chemie ist seit eh und je nichts anderes als die Kunst, Atome in immer neuen Kombinationen und Methoden miteinander zu verbinden. Hier geht es vielmehr um den *Atomkern*. Sein Durchmesser beträgt nur ein Hunderttausendstel der aus negativen Elektronen bestehenden Atomhülle. Wir erinnern uns, daß die Elektronen die kleinsten Träger negativer elektrischer Ladung sind. Der Kern dagegen setzt sich ausschließlich aus den elektrisch neutralen *Neutronen* und den elektrisch positiven *Protonen* zusammen. Beide Teilchen tragen den gemeinsamen Namen *Nukleonen*, d. h. Kernteilchen. Dem Betrage nach ist die positive Ladung des Protons genau gleich der negativen Ladung des Elektrons, obwohl seine Masse 1836mal so groß ist. Da das Atom als Ganzes elektrisch neutral ist, muß die Anzahl der in der Hülle kreisenden Elektronen gleich der Anzahl der im Kern enthaltenen Protonen sein. Sie entspricht der *Kernladungszahl*.

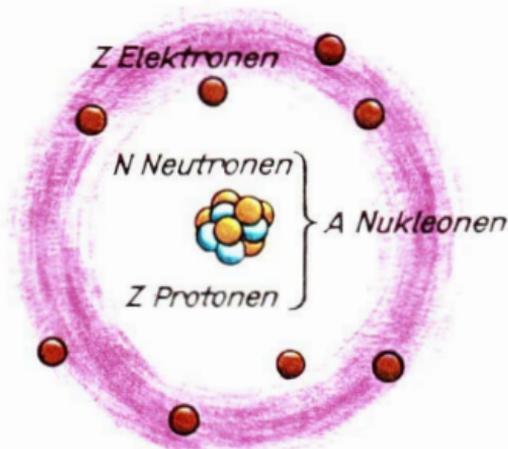
Da es uns auf die genauere Anordnung der Teilchen nicht

weiter ankommt, ist es daher ein Leichtes, die Zusammensetzung vieler bekannter Atomkerne sofort anzugeben. Wer sich nur ein klein wenig mit Chemie befaßt hat, kennt bereits das *Periodensystem der Elemente*. Hier sind alle chemischen Grundstoffe fast ausschließlich nach ihrer relativen Atommasse A_r angeordnet und laufend durchnummeriert. Damit erhält jedes Element seine Ordnungszahl Z . Als der russische Chemiker Mendelejew dieses System im Jahre 1869 entdeckte, war über den Bau der Atome noch nicht das geringste bekannt. Und doch hat er bereits damals den Schlüssel gefunden, mit dem sich der Aufbau jedes beliebigen Atomkerns sofort angeben läßt; denn die Ordnungszahl Z ist nichts anderes als die Kernladungszahl, d. h. die Anzahl der Protonen. Zusammen mit der Anzahl N der gleichzeitig im Kern enthaltenen Neutronen ergibt sie die *Massenzahl* A , die in den meisten Fällen gleich der auf den nächsten ganzzahligen Wert gerundeten relativen Atommasse A_r ist. Es gilt also immer (Bild 3a) die Gleichung

$$Z + N = A.$$

Daß die relativen Atommassen keine ganzen Zahlen sind, läßt sich nun keineswegs als eine Art Schönheitsfehler des Systems abtun. Gerade diese Abweichungen sind von größter Wichtigkeit und lassen sich auf zwei Ursachen zurückführen. Die eine führt mitten auf das Grundproblem der Kernenergie hin und wird uns noch sehr beschäftigen. Auf die andere können wir sofort eingehen.

Bild 3a. Schematischer Aufbau eines Atoms



Elemente und Nuklide

Der chemische Charakter eines Elements und zugleich seine Stellung im Periodensystem ist eindeutig durch seine Ordnungszahl Z festgelegt. Damit liegt zwar die Anzahl der Protonen fest, nicht aber die Anzahl N der Neutronen. Es ist also sehr wohl möglich, daß sich die Kerne ein und desselben chemischen Elements durch ihre Neutronenzahlen N unterscheiden. Man spricht dann von den *Isotopen* des betreffenden Elements.

So existieren denn tatsächlich 3 unterschiedliche Sauerstoffkerne, die neben den »vorschriftsmäßigen« 8 Protonen noch 8 bzw. 9 oder 10 Neutronen enthalten. Es sind die 3 Sauerstoffisotope $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$ und $^{18}_8\text{O}$, deren Mengenverhältnisse sich wie 99,76 : 0,04 : 0,20 verhalten. Die soeben benutzte Symbolik erlaubt es, sie eindeutig zu unterscheiden. Links oben vor dem chemischen Zeichen steht die Massenzahl A , links unten die Ordnungszahl Z . Die Differenz ergibt dann die Anzahl der Neutronen.

Ganz allgemein bezeichnet man daher einen Stoff, dessen Kerne eine bestimmte Anzahl von Protonen und Neutronen enthalten, als ein *Nuklid* (*Kernart*). Um den in der Kernphysik manchmal zu Irrtümern führenden Begriff des chemischen Elements zu vermeiden, können wir daher sagen:

Isotope sind Nuklide mit gleicher Ordnungszahl Z , aber unterschiedlicher Massenzahl A .

Das gegenseitige Mengenverhältnis der in einem Element enthaltenen Isotope liegt bis auf geringfügige Schwankungen fest, ganz gleich an welchem Ort auf der Erde man es auch findet. Da die Isotope eines Elements sich in ihren chemischen Eigenschaften völlig gleichen, lassen sie sich auch nicht auf chemischem Wege trennen. Nur mit äußerst kostspieligen Verfahren, unter Ausnutzung kleinster physikalischer Unterschiede, z. B. der etwas abweichenden Siedepunkte, Dichten oder Diffusionsgeschwindigkeiten, gelingt es, Isotope voneinander zu trennen.

Noch zwei wichtige Beispiele für Isotopie seien hier erwähnt. Das erste betrifft das leichteste aller Elemente, den Wasserstoff mit den 3 Isotopen ^1_1H , ^2_1D (Deuterium) und ^3_1T (Tritium). Ausnahmsweise benutzt man hier besondere chemische Zeichen für dasselbe Element (Bild 3b). Das Deuterium ist Bestandteil des „schweren Wassers“ (D_2O), das mit einem

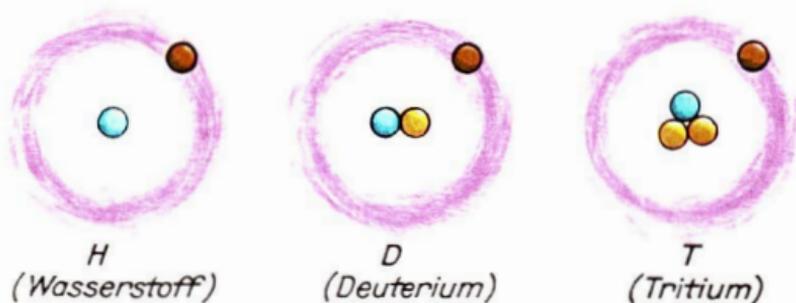


Bild 3b. Die drei Isotope des Wasserstoffs

Anteil von 0,015 % im gewöhnlichen Wasser enthalten ist. Dagegen kommt das unbeständige Tritium nur in verschwindend geringen Spuren in der freien Atmosphäre vor. Es ist mit der Halbwertszeit $T_{1/2} = 12$ Jahre radioaktiv und zerfällt nach der Gleichung ${}^3_1\text{T} \longrightarrow {}^3_2\text{He} + {}^0_{-1}\text{e}$.

Das für die Gewinnung von Kernenergie bei weitem wichtigste Element ist das Uran. Seine natürlichen Isotope sind ${}^{238}_{92}\text{U}$ (99,274 %), ${}^{235}_{92}\text{U}$ (0,720 %) und ${}^{234}_{92}\text{U}$ (0,006 %), von denen das zweite noch im Brennpunkt unseres Interesses stehen wird. Mitunter schreibt man dafür auch einfach U 238, U 235 und U 234.

Damit wird auch verständlich, daß die relativen Atommassen der meisten Elemente keine ganzen Zahlen sein können. Es handelt sich ja um Mischungen von Isotopen, weshalb sich für die relativen Atommassen nur Durchschnittswerte ergeben können.

Kerne, die von selbst zerfallen

Etwa 1 500 verschiedene Nuklide sind heute bekannt. Davon kommen ungefähr 300 in der Natur vor, und 1 200 wurden künstlich hergestellt. Die Zahl der theoretisch denkbaren Kerne wird auf 3 000 geschätzt. So respektabel diese Zahlen auch sind, so lassen sie doch die Frage offen, weshalb es hier überhaupt Grenzen gibt. Wäre es nicht denkbar, daß jedes Element beliebig viele Isotope haben könnte?

Alle Erfahrungen sprechen dagegen. Sobald die Anzahl der im Kern vorhandenen Protonen oder Neutronen einseitig

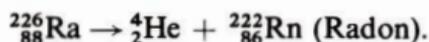
überhandnimmt, verliert der Kern seine Stabilität. Er zerfällt – um es einmal ganz grob auszudrücken – wie ein Schneeball, in den man eine Menge Steinchen hineingepackt hat. Die Wirkung der den Kern zusammenhaltenden Kräfte ist nur begrenzt. Sie haben nichts mit elektrischen Kräften zu tun und werden erst wirksam, wenn sich die Nukleonen fast unmittelbar berühren. Von allgemeinen Regeln und Erfahrungswerten abgesehen, läßt sich auch keine genaue Ordnungs- oder Massenzahl angeben, von der an ein Kern instabil wird und damit zum Zerfall neigt.

Daß es derart instabile Kerne in der Natur überhaupt gibt, war die große Entdeckung von Marie und Pierre Curie. Bei ihrer Suche nach der Ursache einer von den Verbindungen des Urans ausgehenden Strahlung entdeckten sie 1898 nicht nur die neuen Elemente *Polonium* und *Radium*, sondern auch die wesentlichsten Vorgänge, die sich bei deren Zerfall abspielen. Sie sind aufs engste mit den dabei ausgesandten Strahlungen verbunden. Allgemein spricht man hier von der Erscheinung der *Radioaktivität*.

Kleines ABC der Strahlen

Wie schon die Curies feststellten, sind die von radioaktiven Nukliden ausgehenden Strahlen von dreierlei Art. Sie tragen noch heute die provisorischen Bezeichnungen Alpha-, Beta- und Gammastrahlen. Wie wir jedoch jetzt wissen, besteht die *Alphastrahlung* aus einzelnen, mit großer Geschwindigkeit dahinfliegenden Heliumkernen ${}^4_2\text{He}$. Entsprechend der Ordnungszahl $Z = 2$ tragen sie 2 positive Ladungseinheiten. Die von ihnen durchquerte Luft wird stark ionisiert, wodurch sie ihre Energie schnell einbüßen. Ihre Reichweite beträgt daher nur wenige Zentimeter. Sie vermögen kaum ein in den Weg gestelltes Blatt Papier zu durchdringen.

Nachdem der betreffende Kern ein α -Teilchen abgegeben hat, ist er von Grund auf verändert. Sehen wir uns als recht bekanntes Beispiel den Zerfall des Radiums an (Bild 4a). Er vollzieht sich nach der Gleichung



Mit dem Verlust zweier Ladungseinheiten muß zwangsläufig

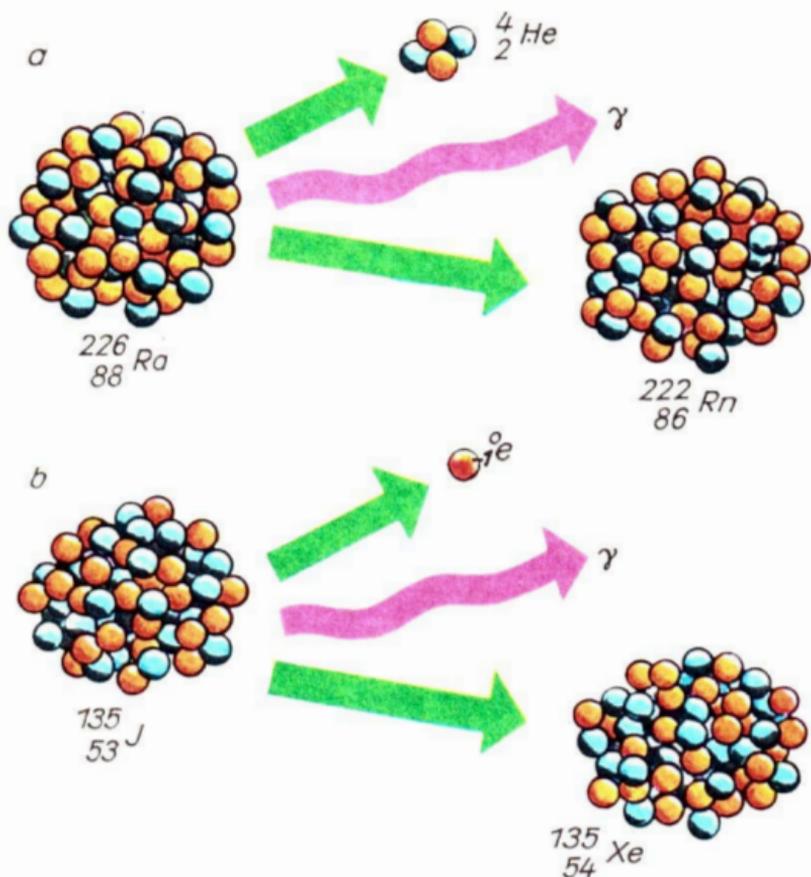
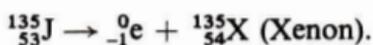


Bild 4. Kernumwandlung durch a) Alphastrahlung
b) Betastrahlung

ein neues Element entstehen. Ein Blick ins Periodensystem sagt uns sofort, daß es sich um das Edelgas Radon handelt. Es ist seinerseits wiederum radioaktiv und findet sich in den heilkräftigen Quellwässern der Radiumbäder gelöst vor.

Auch die *Betastrahlung* ist eine Korpuskularstrahlung und besteht aus zahlreichen, mit großer Energie ausgeschleuderten freien Elektronen, die bekanntlich je eine negative Elementarladung tragen. Als Beispiel für einen Betazerfall sei hier das bei der Kernspaltung entstehende radioaktive Isotop des Jods genannt (Bild 4b):



Auch hier können wir mit Leichtigkeit feststellen, daß die Rechnung aufgeht. Wegen der im Vergleich zu den Nukleonen sehr kleinen Masse trägt das Elektron die Massenzahl 0. Die Ordnungszahl des Xenons ist mit $Z = 54$ gegenüber der des Jods um eine Einheit erhöht, da das gleichzeitig erscheinende Elektron die Ladung -1 trägt und auf beiden Seiten der Gleichung dieselbe Gesamtladung $Z = 53$ erscheinen muß.

Wie aber kann ein Elektron aus dem Kern herausfliegen, wenn nur Protonen und Neutronen darin enthalten sind? Es bleibt nur eine Erklärung. Das Neutron wandelt sich in ein Proton um, und der Betaprozeß ist gleichsam eine interne Angelegenheit des Neutrons:



(Das auf der rechten Gleichungsseite stehende Symbol $\bar{\nu}$ bedeutet ein Antineutrino, ein Elementarteilchen mit der Massenzahl und Ladung Null. Es spielt bei unseren weiteren Betrachtungen keine Rolle.)

Die Reichweite der Betastrahlen in Luft kann bis zu mehreren Metern betragen. Selbst Aluminiumblech von mehreren Millimetern Dicke können die Elektronen unter Umständen noch durchdringen. Im einzelnen hängt das von der jeweiligen, für jeden Betastrahler typischen Energie der Teilchen ab.

Hierfür hat sich eine recht anschauliche Maßeinheit eingebürgert, das *Elektronenvolt*. Stellen wir uns eine evakuierte Röhre mit zwei Elektroden vor, zwischen denen die Spannung 1 V besteht! Ein an der Oberfläche der Kathode startendes Elektron wird dann vom elektrischen Feld erfaßt und mit zunehmender Geschwindigkeit zur Anode hin beschleunigt. Wenn es dort ankommt, hat es eine bestimmte Bewegungsenergie angenommen, die in unserem Fall mit 1eV bezeichnet wird. Die Betaeilchen des soeben betrachteten Jods 135 haben z. B. die Energie 2,5 MeV (Megaelektronenvolt). Sie bewegen sich so schnell, als hätten sie eine Anodenspannung von 2,5 Mill. V durchlaufen. Noch größer ist sogar die Energie der Alphateilchen des zuerst erwähnten Radiums. Sie beträgt 4,8 MeV. Das sind immerhin Zahlen, die uns aufhorchen lassen. Mit ihnen öffnet sich eine Welt mit gänzlich neuen Dimensionen. Wir stehen zum ersten Mal jenen riesenhaften Energiebeträgen gegenüber, wie sie für die Kernenergie charakteristisch sind.

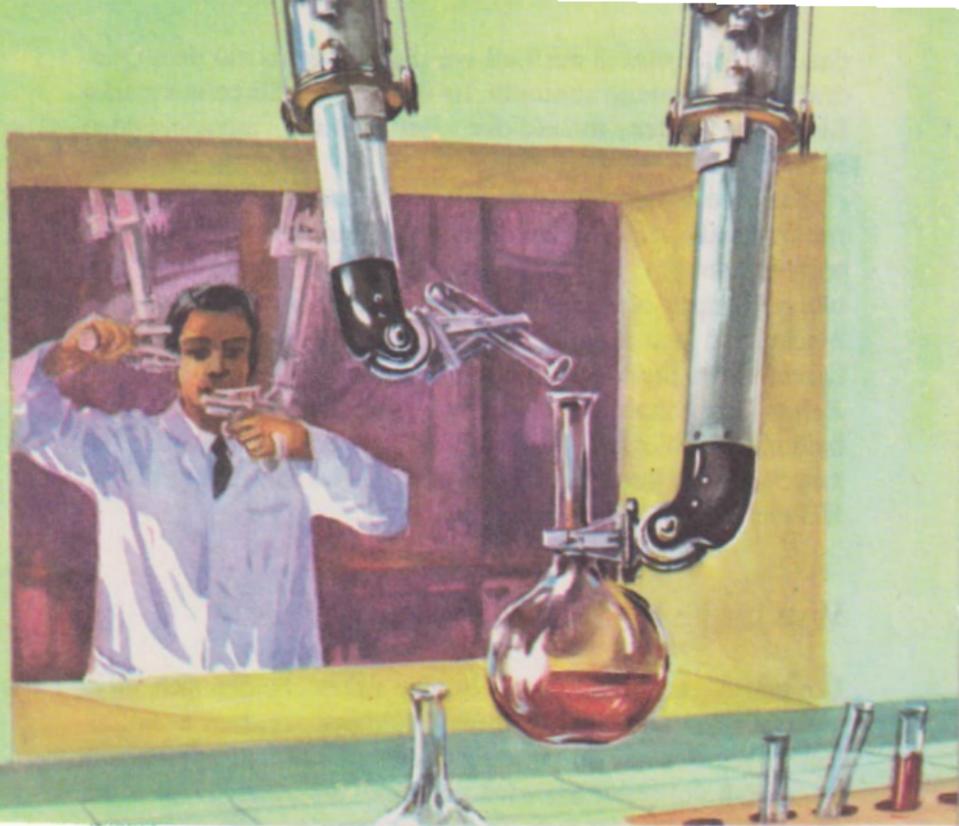


Bild 5. Mechanische Hände zur Handhabung starker Aktivitäten

Mit der Emission eines Alpha- oder Betateilchens ist die Umwandlung des Kerns zumeist noch nicht beendet. Es ist zwar ein neuer Kern entstanden, aber das ganze Gefüge der Nukleonen ist dabei aus dem Gleichgewicht geraten. Der Kern befindet sich noch in einem *angeregten Zustand* und hat einen Betrag an überschüssiger Energie, den er noch loswerden muß. Das geschieht in Form einer besonderen Strahlung, der *Gammastrahlung*. Sie wird praktisch gleichzeitig mit dem Alpha- oder Betateilchen ausgesandt, ist also fast immer deren Begleiterscheinung. An der Zusammensetzung des Kerns ändert sie nichts mehr.

Ebenso wie das Licht oder die Röntgenstrahlung ist die Gammastrahlung elektromagnetischer Natur. Lediglich ihr Energiegehalt ist tausendfach größer und für alle lebenden Organismen äußerst gefährlich. Günstig ist allein der Umstand,

daß ihre Intensität in der Luft wie die des Lichts mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Im übrigen gewähren nur starke Bleipanzern oder meterdicke Betonwände ausreichenden Schutz.

Ganz besonders müssen sich die Menschen vorsehen, die mit radioaktiven Stoffen arbeiten. Handelt es sich nur um geringe Mengen, so reichen *Handschuhkästen* aus. Das sind bleigepanzerte Kästen, in die man mit Schutzhandschuhen hineingreift und zugleich von oben durch ein Bleiglasfenster hineinblickt. Stark strahlende Objekte aber werden in *heißen Zellen* gehandhabt, in denen *mechanische Manipulatoren* arbeiten. Im Blickfeld meterdicker Schutzfenster werden sie mittels eines komplizierten Systems von Drahtzügen und Hebeln aus der Ferne bewegt (Bild 5).

Wie lange lebt ein Kern?

Die einzelnen radioaktiven Nuklide unterscheiden sich nicht nur nach Art und Energie ihrer Strahlung, sondern in auffallender Weise auch durch die Zeitdauer, innerhalb deren sich ihr Zerfall vollzieht. Sie wird mit Hilfe der *Halbwertszeit* $T_{1/2}$ ausgedrückt. Das ist jene Zeit, in der von irgendeiner vorgegebenen Menge eines Radionuklids genau die Hälfte zerfallen ist. Beim Radium beträgt sie etwa 1600 Jahre. Das daraus hervorgehende Radon hat eine Halbwertszeit von nur 3,8 Tagen, das erwähnte Jod 135 eine von 6,7 Stunden.

Grob betrachtet läuft der Zerfallsprozeß durchaus kontinuierlich ab. Doch sind es in jedem Augenblick immer nur einzelne Kerne, die davon erfaßt werden. Niemand aber vermag vorauszusagen, wann ein bestimmter Kern zerfallen wird. Erst hinterher, mit Stoppuhr und Zählgerät, läßt sich feststellen, daß sich soundsoviele Kerne umgewandelt haben; hieraus kann man dann die Halbwertszeit berechnen. Es ist ein Vorgang rein statistischer Art. Bei genaueren Messungen bemerkt man auch, wie unregelmäßig er vor sich geht. Die Anzahl der je Zeiteinheit registrierten Zerfälle ist nicht konstant, sondern schwankt mehr oder weniger um einen Mittelwert, der sich um so genauer ergibt, je länger die Messung ausgedehnt wird.

Hier haben wir noch davon abgesehen, daß die Zahl der

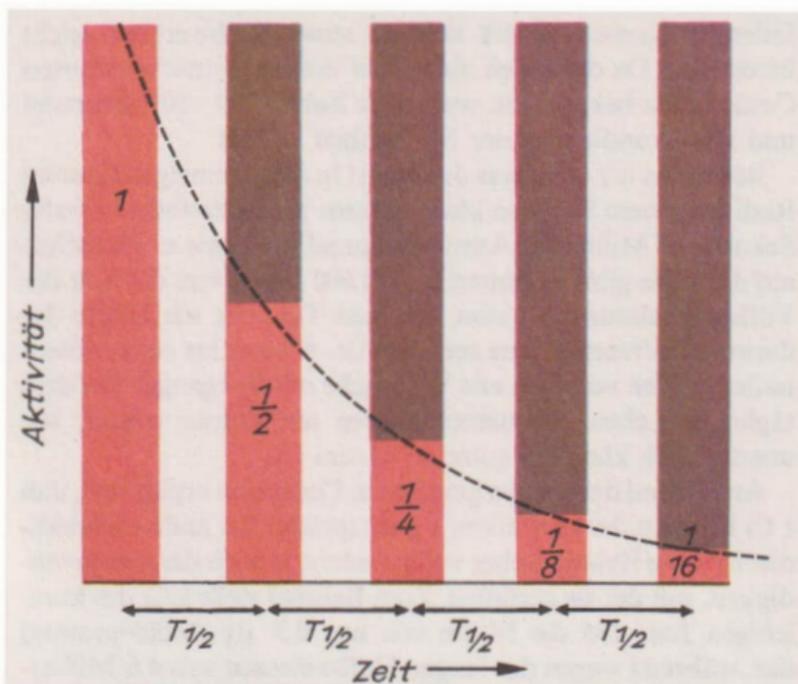


Bild 6. Abnahme der Aktivität nach Ablauf je einer Halbwertszeit $T_{1/2}$

Zerfälle mit der Zeit abnehmen muß. Denn nach Ablauf einer Halbwertszeit kann von der anfangs vorhandenen Menge an Kernen nur noch die Hälfte im ursprünglichen Zustand sein. Nach Ablauf einer weiteren Halbwertszeit ist dann noch ein Viertel der anfänglichen Menge übrig, und so geht der Bestand in den weiteren Zeitintervallen auf ein Achtel, ein Sechzehntel usw. zurück. Auf diese Weise entsteht die auf Bild 6 gezeigte Kurve, die sich der Zeitachse immer mehr nähert, sie aber – wenigstens theoretisch – niemals erreicht. Sie veranschaulicht den Abfall der *Aktivität*.

Unter der Aktivität versteht man die Menge einer radioaktiven Substanz, nicht etwa in Kilogramm oder Gramm, sondern ausgedrückt durch die Anzahl der je Zeiteinheit zerfallenden Kerne. Aus historischen Gründen rechnet man heute noch mit dem *Curie*.

1 Ci (Curie) ist diejenige Menge eines Radionuklids, in dem je Sekunde $3,700 \cdot 10^{10}$ Zerfallsakte stattfinden.

Dies entspricht etwa der Anzahl der in 1 g Radium in 1 s zer-

fallenden Kerne und läßt sich aus seiner Halbwertszeit leicht berechnen. Da diese Zeit aber nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit bekannt ist, wurde die Zahl $3,700 \cdot 10^{10}$ gerundet und zur Grundlage dieser Maßeinheit erklärt.

Bedenken wir aber, was das heißt! In einem einzigen Gramm Radium, einem Stück so klein wie eine Linse, zerfallen in jeder Sekunde 37 Milliarden Atome, zehnmal soviel wie es Menschen auf der Erde gibt. Es dauert etwa 1 600 Jahre, von der Zeit der Völkerwanderung bis zum heutigen Tag, ehe die Hälfte der darin enthaltenen Kerne zerfallen ist. Angesichts solch riesenhafter Zahlen versagen alle Vergleiche mit Vorgängen aus dem täglichen Leben. Sie demonstrieren nur immer wieder, wie unermeslich klein ein einzelnes Atom ist.

Auf Grund der soeben genannten Definition ergibt sich, daß 1 Ci Radium der Masse von 1 g entspricht. Bei anderen Nukliden ist diese Relation aber völlig anders, je nach der Geschwindigkeit, mit der sie zerfallen. Zum Beispiel stellt 1 Ci des kurzlebigen Jods 135 die Masse von nur $0,3 \mu\text{g}$ (Mikrogramm) dar, während wegen der langen Halbwertszeit von 4,6 Milliarden Jahren 3 t Uran 238 aufzuwiegen wären, um 1 Ci zu erhalten.

Das Geheimnis der Kernenergie

Einsteins Vermächtnis

Die in den radioaktiven Strahlungen steckenden beachtlichen Energiemengen legen den Gedanken nahe, Radionuklide als Energiequellen zu verwenden. Schon Marie Curie fiel es auf, daß ein Radiumpräparat stets um einige Grade wärmer als seine Umgebung ist. Zusammen mit seinen Zerfallsprodukten entwickelt 1 g Radium in einer Stunde 170 Kalorien. Bedenkt man aber den hohen Preis des Radiums, der bei 100 000 Mark je Gramm liegt, so kann von einem wirtschaftlichen Energiegewinn keine Rede sein. Für die Zwecke der Großtechnik kommt diese Art von Kernenergie jedenfalls nicht in Frage.

Um die Herkunft der in den heutigen Großkraftwerken gewonnenen Energie zu verstehen, müssen wir vielmehr die relativen Atommassen noch einmal unter die Lupe nehmen. Im Periodensystem finden wir beispielsweise das Edelgas Helium ${}^4_2\text{He}$ mit dem Zahlenwert 4,00261 verzeichnet. Die Beimischung des Isotops ${}^3_2\text{He}$ ist so gering, daß sie vernachlässigt werden kann. Nun wissen wir aber, daß sich das Atom ${}^4_2\text{He}$ aus 2 Protonen, 2 Neutronen und 2 Elektronen zusammensetzt, deren Massen ebenfalls sehr genau bekannt sind. Nichts ist dann einfacher, als die Massen dieser Teilchen zusammenzuzählen. Wir erhalten die folgende Rechnung

$$\begin{aligned} & 2 \text{ Protonen} + 2 \text{ Neutronen} + 2 \text{ Elektronen} \\ & 2 \cdot 1,00728 + 2 \cdot 1,00866 + 2 \cdot 0,00055 = 4,03298 \end{aligned}$$

und sehen sofort, daß etwas nicht zu stimmen scheint. Die soeben genannte Masse des Heliumatoms ist merklich kleiner als die Summe seiner Bestandteile. Wir stehen vor der Tatsache des *Massendefekts* (Bild 7). Auch bei allen übrigen Atomen des

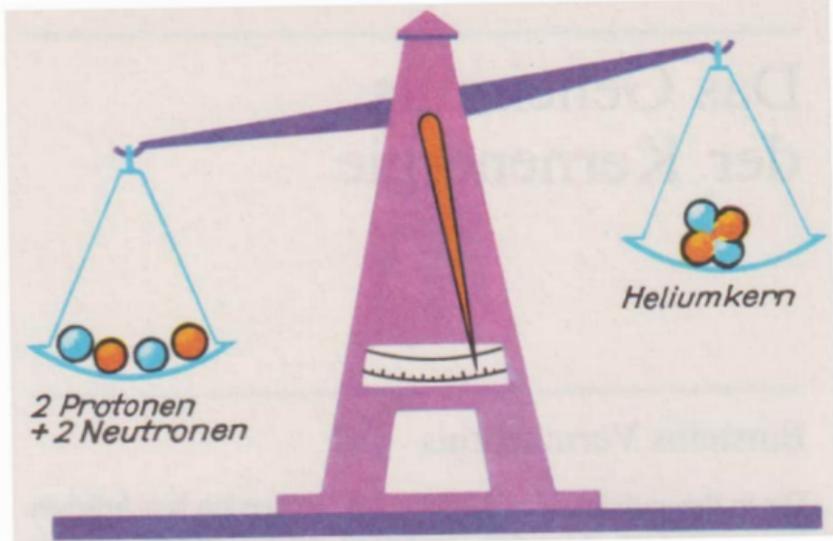


Bild 7. Der Massendefekt: Die Masse eines Atomkerns ist kleiner als die Summe der Massen seiner einzelnen Nukleonen.

Periodensystems kommt man zu ganz ähnlichen Ergebnissen. Bei der Entstehung eines Atoms aus seinen einzelnen Teilchen geht immer ein wenig Masse verloren.

Dabei sind Vorgänge dieser Art nicht einmal selten und spielen sich ganz offen vor unseren Augen ab. Der Schauplatz des Geschehens ist das Innere der Sonne und fast aller übrigen Fixsterne. Unaufhörlich werden dort Helium- und größere Atomkerne aus den Elementarteilchen des Urplasmas gebildet. Da aber in der Welt nichts verschwinden kann, drängt sich die Frage auf, was denn mit diesem Massendefizit geschieht.

Die Antwort steckt in der speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins. Bereits im Jahre 1905 entdeckte er die wahrhaft magische Formel

$$W = mc^2,$$

in Worten: Energie ist Masse mal Quadrat der Lichtgeschwindigkeit. Sie besagt zweierlei:

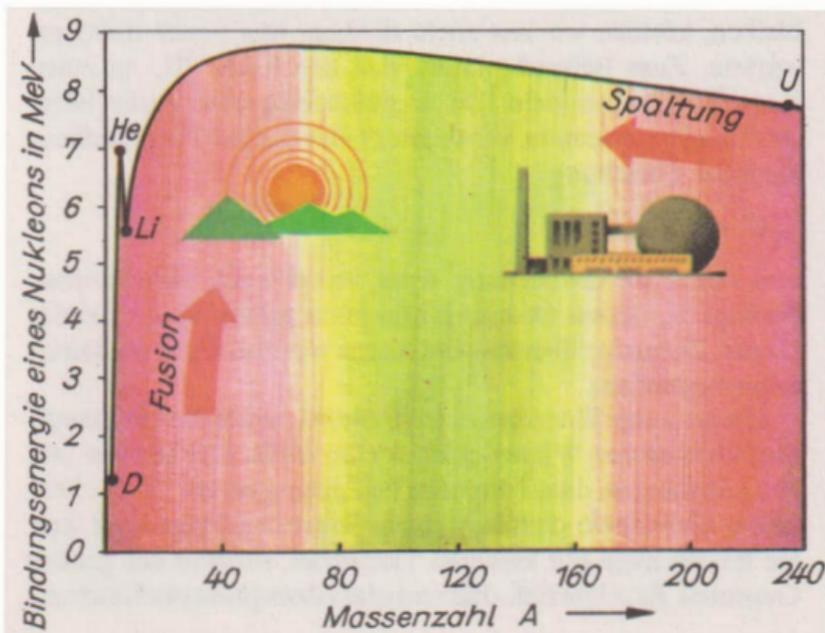
1. *Jegliche Art von Masse stellt gleichzeitig eine Energiemenge dar.*
2. *Man erhält theoretisch den Wert der Energie W in Wattsekunden, wenn man die in Kilogramm ausgedrückte Masse m mit der Größe $c^2 = (300 \cdot 10^6 \text{ m/s})^2$ multipliziert.*

Für jedes Kilogramm verlorengender Masse muß als Gegenwert in irgendeiner Form die Energie 25 Mrd. kWh erscheinen.

So entpuppt sich die Sonne als eine gewaltige »Heliumfabrik«. Im Gegensatz zu allen anderen Fabriken, die immer nur Energie verschlingen, hat sie aber die erstaunliche Eigenschaft, Energie in verschwenderischer Fülle zu produzieren. Eine nicht minder einfache Rechnung ergibt dann, daß bei der Bildung von 1 kg Helium rund 185 Mill. kWh frei werden müssen.

Leider ist uns dieser Weg zur Gewinnung von Kernenergie heute noch verwehrt. Er läuft darauf hinaus, einzelne Teilchen oder ganz leichte Kerne zu größeren Kernen zu verschmelzen. Prinzipiell spiegelt sich das im linken aufsteigenden Ast der auf Bild 8 wiedergegebenen Kurve wider. Sie gibt den Betrag der *Bindungsenergie* an, mit der ein einzelnes Nukleon im Atomkern bei zunehmender Massenzahl A gebunden ist. Bis etwa zur Massenzahl $A = 50$ müßte es demnach theoretisch möglich sein, durch Verschmelzung leichter Kerne zu schweren gewaltige Energiemengen freizusetzen.

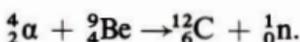
Bild 8. Die Bindungsenergie eines Nukleons in Abhängigkeit von der Massenzahl



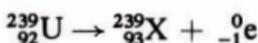
Die Kernspaltung

Um Kernenergie zu gewinnen, gibt es aber noch eine andere Möglichkeit. Sie besteht darin, einen schweren Kern in zwei leichtere zu spalten. Fürs erste besehen, scheint die Kernspaltung unmöglich zu sein; denn um einen Kern in seine Bestandteile zu zerlegen, müßte man zwangsläufig den gleichen Energiebetrag aufwenden, der beim umgekehrten Vorgang der Kernverschmelzung frei wird. Von diesem Standpunkt aus betrachtet, ist das Unternehmen also völlig hoffnungslos. Wenn es dennoch zum Erfolg führte, so liegt es an einigen merkwürdigen Eigenschaften gewisser schwerer Atomkerne, die niemand vorausszusehen vermochte.

Es begann mit den Experimenten des italienischen Physikers *Enrico Fermi*. Aus einem Gemisch von Radium und Beryllium hatte er eine kleine Neutronenquelle zusammengestellt. Sie arbeitete mittels der vom Radium emittierten Alphateilchen (S. 14) nach folgender Gleichung:



Mit diesen Neutronen bestrahlte er um das Jahr 1934 eine Reihe schwerer Kerne, unter anderem auch Uranmetall. Wenn wir daran denken, daß Neutronen elektrisch neutral sind und nach dem Eindringen in den Atomkern vielleicht darin steckenbleiben, können wir uns leicht denken, was Fermi dabei erwartete. Zum Beispiel könnte sich der Kern ${}^{238}_{92}\text{U}$ in einen Kern ${}^{239}_{92}\text{U}$ umwandeln. Da er gleichzeitig eine starke Betastrahlung beobachtete, vermutete er eine weitere Umwandlung nach der Gleichung

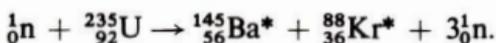
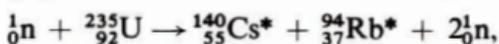


und damit die Entstehung eines bisher noch unbekanntes Nuklids X, dessen Ordnungszahl noch größer ist als die des Urans. Derartige überschwere Kerne werden heute als *Transurane* bezeichnet.

Um genauere Einzelheiten zu studieren, wiederholten daraufhin die deutschen Wissenschaftler *Otto Hahn*, *Lise Meitner* und *Fritz Straßmann* diese Versuche und gelangten am 17. 12. 1938 zu der Gewißheit, daß man einem Irrtum nachgegangen war. Sie fanden nicht nur keinerlei Transuran, sondern das genaue Gegenteil. Es zeigte sich, daß nach der Absorption des Neutrons

der Kern des Urans in zwei mittelschwere Bruchstücke zerfällt, z. B. in Barium und Krypton oder Cäsium und Rubidium usw. Immer ergänzen sich die Ordnungszahlen der beiden Spaltstücke zu $Z = 92$. Da sich in der bestrahlten Probe sehr viele Spaltprodukte nachweisen lassen, erfolgt die Spaltung nicht in zwei symmetrisch gleiche Hälften, sondern je nach Zufall durchaus verschiedenartig, meistens etwa im Verhältnis 2:3.

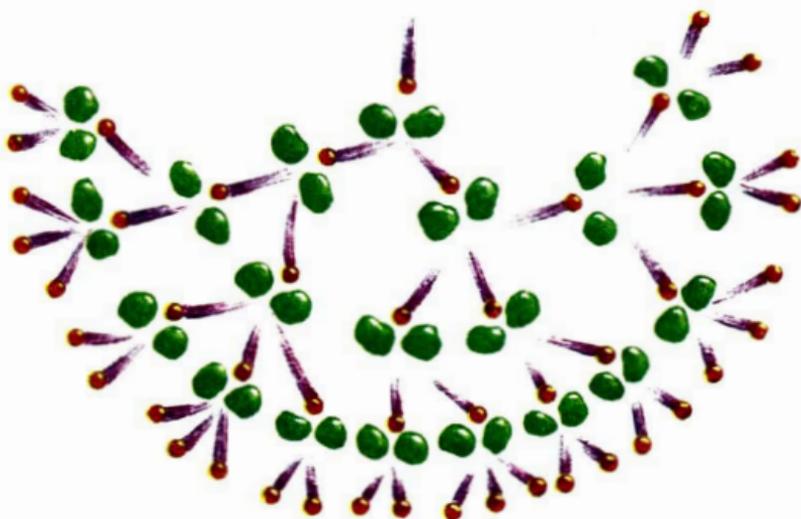
Nur zwei der vielen möglichen Beispiele seien hier herausgegriffen:



Durch Addieren der Ordnungszahlen auf der rechten Seite können wir leicht bestätigen, daß die Anzahl der anfänglich vorhandenen 92 Protonen unverändert bleibt; ebenso auch die Anzahl der 144 Neutronen. Die beigefügten Sternchen sollen bedeuten, daß die entstehenden Spaltprodukte radioaktiv sind.

Wieso hierbei Energie freigesetzt wird, zeigt ein nochmaliger Blick auf Bild 8. Bei der Spaltung des Urankerns bewegen wir uns vom rechten Ende der Kurve her nach links. Wir be-

Bild 9. Schematischer Verlauf der Kernspaltung



merken dabei, daß die Bindungsenergie eines Nukleons in den Spaltprodukten größer ist als im Urankern. Dementsprechend ist die relative Atommasse der entstehenden Bruchstücke insgesamt ein wenig kleiner als die des Urans. Der Gegenwert dieses Massendefekts erscheint im wesentlichen als kinetische Energie (Bewegungsenergie), indem die bei der Spaltung entstehenden Bruchstücke mit großer Gewalt auseinanderfliegen (Bild 9). Die Bewegung überträgt sich zwangsläufig auch auf die übrigen Atome des Materials, das sich dadurch stark erwärmt; denn Wärme ist nichts anderes als die Energie sich ungeordnet bewegender Moleküle und Atome.

Gegenüber den Vorgängen der Radioaktivität sind die hier entwickelten Wärmemengen unvergleichlich größer. Ohne uns in allzuviel Zahlenwerten und Einzelrechnungen zu verlieren, sei nur gesagt, daß der Massendefekt knapp ein Tausendstel der Masse des spaltbaren Materials beträgt und je kg einen Energiegewinn von rund 20 Mill. kWh erreicht.

Die gefährliche Seite

Die Kernspaltung wurde kurz vor Ausbruch des zweiten Weltkrieges entdeckt. Wie ein Lauffeuer ging die Nachricht durch alle führenden physikalischen Institute der Welt. Schnell begriff man, welche riesigen Energiemengen frei werden müssen, wenn die Fermischen Versuche im Kilogramm-Maßstab ausgeführt würden. Ebenso frühzeitig erkannten alle Beteiligten auch die Schwierigkeiten, die einem solchen Vorhaben im Wege standen.

Als erstes mußten sie feststellen, daß für die Spaltung allein das nur mit 0,72 % im Uran enthaltene Isotop $^{235}_{92}\text{U}$ in Frage kommt. Das weitaus überwiegende $^{238}_{92}\text{U}$ hat lediglich die Eigenschaft, Neutronen zu absorbieren, ohne sich zu spalten. Es wirkt gleichsam als Neutronenfalle, so daß für die eigentliche Spaltung nur noch ein kleiner Rest an Neutronen zur Verfügung steht.

Um so bedeutender war daher die im Jahre 1939 von Joliot-Curie gemachte Entdeckung, derzufolge bei jedem Spaltakt außer den mittelschweren Bruchstücken noch mehrere Neutronen, im Durchschnitt etwa 2,43, frei werden. Das liegt am Verhältnis der Zahl der Neutronen zu derjenigen der Pro-

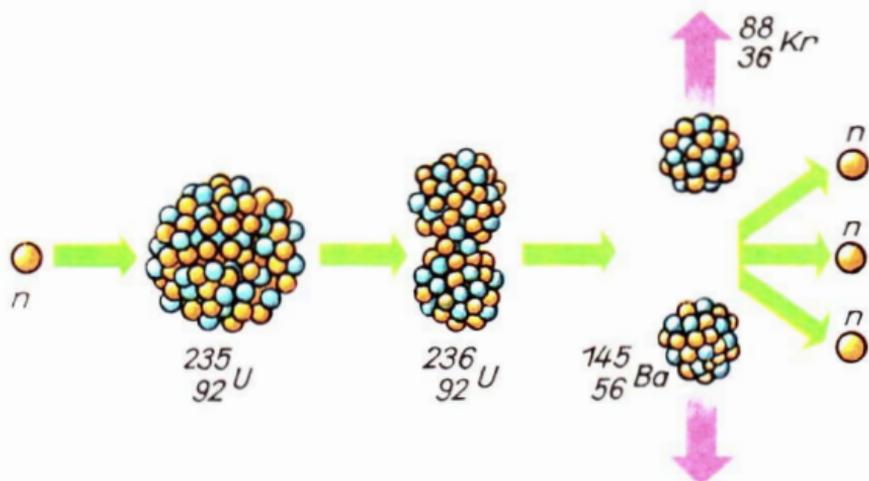


Bild 10. Schema einer Kettenreaktion im Uran 235

tonen. Während es bei den leichteren Kernen, z. B. Sauerstoff, noch 1 : 1 beträgt, verschiebt es sich immer mehr zugunsten der Neutronen und hat beim Uran den Wert 1,38 : 1. So muß dann bei der Spaltung immer ein Überschuß an Neutronen vorhanden sein. Ein Teil von ihnen wird bei der Spaltung frei. Er kann seinerseits auf andere Urankerne treffen und sie zur Spaltung veranlassen. Daraus geht eine neue »Generation« von Neutronen hervor, und so geht es weiter. Man nennt das eine *Kettenreaktion*. Bild 10 vermittelt einen ungefähren Eindruck für den Fall, daß ausschließlich reines spaltbares Material U 235 vorliegt und kein einziges Neutron verlorengeht.

Nun ist aber zu bedenken, daß die Atomkerne im Verhältnis zu ihren von der Größe der Atomhülle her bestimmten Abständen winzig klein sind. Ein Neutron muß daher meist eine beträchtliche Strecke zurücklegen, ehe es auf einen Kern trifft. Ist das Uranstück zu klein, werden daher die meisten Neutronen danebenfliegen und aus der Probe entweichen. Der Radius der *kritischen Masse*, in der eine Kettenreaktion beginnen kann, liegt bei reinem spaltbarem Material in der Größenordnung von einigen Zentimetern.

Solange die Kettenreaktion selbst läuft, muß für jedes zur Spaltung verbrauchte Neutron mindestens ein neues Neutron für den Fortgang der Reaktion zur Verfügung stehen. Der *Vermehrungsfaktor* k muß mindestens gleich 1 sein. Von den

rund 2,5 Neutronen, die bei jedem Spaltakt durchschnittlich frei werden, dürfen nicht mehr als 1,5 in Verlust geraten.

Was wir soeben beschrieben haben, ist der Ablauf einer *ungesteuerten Kettenreaktion*. Einmal in Gang gesetzt, greift sie wie in einer detonierenden Sprengladung blitzschnell um sich in einem Ausmaß, das alles bisher Gekannte weit in den Schatten stellt. So geschah es zum ersten Mal, als am 16. Juli 1945 die erste Atombombe bei Alamogordo in der Wüste New Mexico gezündet wurde. Ihre Wirkung kam der Sprengkraft von 20000 t Trinitrotoluol gleich, was dem vollständigen Zerfall von 1 kg U 235 entspricht. Es ist ein beschämendes Zeugnis der Verantwortungslosigkeit, daß eine der größten Entdeckungen der Geschichte sogleich zur Tötung Hunderttausender Menschen mißbraucht wurde, wie es 1945 in Hiroshima und Nagasaki geschah.

Im Prinzip besteht die Kernspaltungsbombe aus einzelnen, räumlich getrennten Teilen spaltbaren Materials, von denen jeder für sich unterhalb der kritischen Masse liegt. Zum beabsichtigten Zeitpunkt werden sie durch eine chemische Sprengladung aufeinandergeschossen. Damit wird die Masse überkritisch, und eine ebenfalls eingebaute starke Neutronenquelle setzt im gleichen Augenblick die Kettenreaktion in Gang.

Die Neutronen sind zu schnell

Ein etwa faustgroßes Stück aus reinem Uran 235 ist ebenso harmlos wie ein Bleiklumpen. Das gleiche Material oberhalb der kritischen Masse stellt den gefährlichsten Sprengstoff dar, der sich je in der Hand des Menschen befand. Fast sieht es so aus, als wälte hier das kompromißlose Gesetz »Alles oder nichts!« Der Ruf nach friedlicher Nutzung der im Uran schlummernden Energie fordert aber einen ganz anderen Hergang. Die Kettenreaktion soll so langsam wie möglich ablaufen und nach Belieben zu steuern und zu unterbrechen sein. Sie soll möglichst alle guten Eigenschaften eines chemischen Verbrennungsvorgangs haben.

Zum Glück hält die Natur wieder einige Nebenumstände bereit, die diesem Wunsch entgegenkommen. Sie ermöglichen

es, anstelle von hochprozentigem spaltbarem Material mit *Kernbrennstoff* von sehr geringer Anreicherung, ja sogar mit gewöhnlichem Natururan auszukommen. Das liegt wiederum an dem besonderen Verhalten der Neutronen. Wie wir schon sahen, verläuft nicht ein Spaltakt wie der andere. Die dabei freiwerdenden Neutronen weisen die unterschiedlichsten Energiewerte aus. Die meisten liegen bei einigen MeV. Wie die folgende Übersicht zeigt, handelt es sich um sogenannte *schnelle Neutronen*.

Einteilung der Neutronen:

1. schnelle Neutronen	$W = 1 \text{ MeV} \dots 10 \text{ MeV}$
2. mittelschnelle Neutronen	$W = 1 \text{ keV} \dots 1 \text{ MeV}$
3. langsame Neutronen	$W = 0 \text{ eV} \dots 1 \text{ keV}$
4. epithermische Neutronen	$W = 1 \text{ eV} \dots 100 \text{ eV}$
5. thermische Neutronen	$W = 0,025 \text{ eV}$

Die hier zuletzt genannten Neutronen haben eine Geschwindigkeit, die etwa der von Wasserstoffatomen bei Zimmertemperatur entspricht.

Schnelle Neutronen werden aber bevorzugt von den Kernen des U 238 und U 235 eingefangen, ohne diese zu spalten. Nehmen wir z. B. Natururan an, so gehen die meisten der frei werdenden Neutronen für die Spaltung verloren. Der Vermehrungsfaktor bleibt unterhalb von 1, die Kettenreaktion kann nicht in Gang kommen.

Die Verhältnisse ändern sich jedoch bei langsamen, ganz besonders bei thermischen Neutronen. In diesem Zustand werden sie vom U 238 nur noch ganz geringfügig absorbiert und von den Kernen des U 235 geradezu begierig angezogen, um sich von ihnen spalten zu lassen.

Um all diese Vorgänge zahlenmäßig besser zu erfassen, wurde ein anschauliches Maß eingeführt, der *Wirkungsquerschnitt*. Als Einheit gilt 1 barn, das ist etwa der Querschnitt eines Atomkerns.

Die Fläche 1 barn beträgt 10^{-24} cm^2 . Obwohl Atomkerne kein scharf definiertes Volumen haben, kann ihr Radius mit etwa

$$r = 1,4 \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

angegeben werden. Für den Sauerstoffkern folgt hieraus mit $A = 16$ der Radius $r = 3,9 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ und der kreisförmig ge-

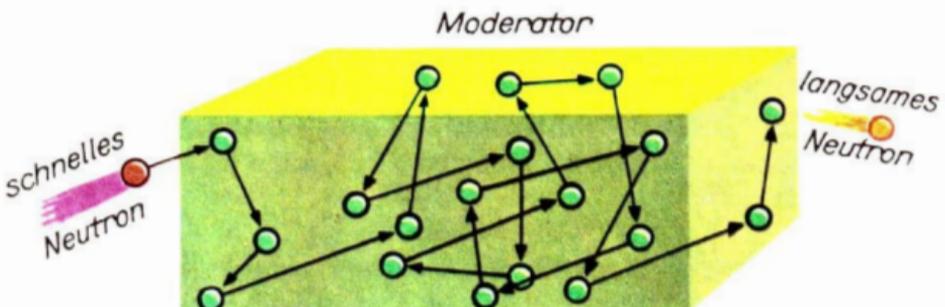
dachte Querschnitt $0,5 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 0,5 \text{ barn}$ bzw. für den Urankern mit $A = 92$ der Wert $2,3 \text{ barn}$.

Für thermische Neutronen ist beispielsweise der Einfangsquerschnitt des U 238 gleich $2,8 \text{ barn}$ und der Spaltquerschnitt des U 235 gleich 590 barn . Das soll heißen, die Kerne des U 235 üben eine solche Anziehungskraft auf Neutronen aus, daß sie auch noch die in größerem Abstand vorüberfliegenden Neutronen an sich reißen. Es ist gleichsam so, als sei ihr Querschnitt einige hundertmal so groß wie ihr geometrischer Querschnitt.

Wir verstehen nunmehr sofort, worauf es ankommt. Die bei der Spaltung frei werdenden Neutronen müssen so schnell wie möglich auf thermische Geschwindigkeit abgebremst werden, ehe sie mit den Kernen des U 238 reagieren können. Fermi und Hahn bedienten sich dabei eines Kunstgriffes von genialer Einfachheit, der auch heute noch überall angewandt wird. Er beruht auf den Gesetzen des elastischen Stoßes. Prallt ein Neutron mit einem leichteren Atomkern zusammen, so übergibt es ihm einen Teil seiner Bewegungsenergie und büßt selbst entsprechend an Geschwindigkeit ein. Mehrere solcher aufeinanderfolgender Stöße können es fast bis zum Stillstand abbremsen (Bild 11). Wird daher das spaltbare Material in ein geeignetes Medium, einen sogenannten *Moderator*, eingebettet, so werden dessen Kerne die überschüssige Energie der Neutronen in der gewünschten Weise abfangen.

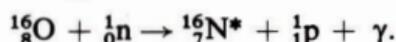
Besonders gut als Moderatoren eignen sich Stoffe mit möglichst kleiner Kernmasse, wie z. B. Wasserstoff. Leider hat er den Nachteil, daß seine Kerne viele Neutronen einfangen und dabei Deuteriumkerne bilden. Dennoch wird in den mei-

Bild 11. Wirkung eines Moderators



sten Kernkraftwerken gewöhnliches Wasser als Moderator verwendet. Frei von diesem Nachteil ist das schwere Wasser (Deuteriumoxid). Leider ist es sehr kostspielig und findet daher nur gelegentlich Verwendung.

Ebenso absorbiert auch der im Wasser bzw. Wasserdampf enthaltene Sauerstoff Neutronen, vorwiegend nach der Gleichung



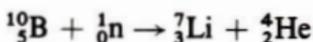
Dadurch wird das Wasser radioaktiv, zu einem β -Strahler mit der Halbwertszeit 7,3 Sekunden. Kohlenstoff in Form reinsten Graphits hat diesen Mangel nicht. Wegen seiner bedeutend größeren Kernmasse $A = 12$ ist die Bremswirkung allerdings weniger gut. Um ein Neutron auf thermische Geschwindigkeit abzubremesen, genügen in Wasserstoff im Mittel 19 Zusammenstöße, im Graphit sind dagegen 118 Stöße erforderlich.

Die Bändigung der Kettenreaktion

Eine Vorrichtung, in der eine steuerbare Kettenreaktion ablaufen kann, nennt man einen *Kernreaktor*.

Sein wichtigster Inhalt, das spaltbare Material, ist meist in Form einzelner langer Stäbe angeordnet. Obwohl wir genau wissen, daß die von ihm produzierte Wärme nicht das geringste mit dem landläufigen Begriff der Verbrennung zu tun hat, spricht man der Einfachheit halber vom *Kernbrennstoff*, der sich in den *Brennelementen* befindet.

Noch fehlt uns aber gerade dasjenige Mittel, mit dem es möglich wird, in den mit Urgewalt um sich greifenden Prozeß der Kernspaltung einzugreifen. Es müßte etwas sein, das die frei umherschwirrenden Neutronen mit einem Schlag beseitigen kann, sie blitzartig aufsaugt wie ein Schwamm. Tatsächlich gibt es solche Stoffe. Sie haben ein extrem großes Absorptionsvermögen für Neutronen. Besonders gut eignen sich Cadmium, dessen Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen 2550 barn beträgt, oder auch Bor mit 755 barn. Das darin enthaltene Isotop B 10 wandelt sich nach der Gleichung



in Lithium und gasförmiges Helium um.

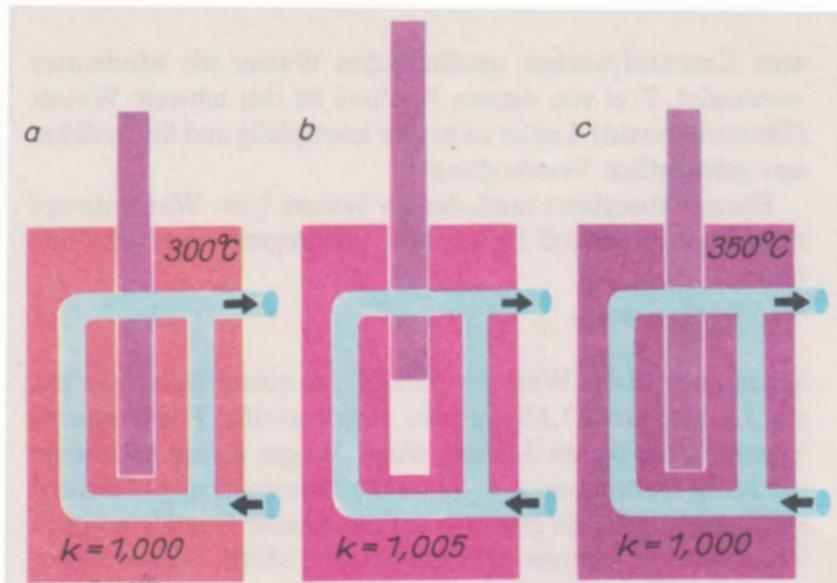


Bild 12. Einregeln des Reaktors auf höhere Leistung (Schema)

a) Stationärer Zustand bei niedriger Leistung

b) Kurzzeitige Vergrößerung des Vermehrungsfaktors k durch vorübergehendes Herausziehen des Steuerstabes

c) Stationärer Zustand bei erhöhter Leistung

Aus solch neutronenabsorbierendem Material werden dann Bleche oder *Steuerstäbe* hergestellt. Mehr oder weniger tief in den Reaktorkern hineingesenkt, können sie die Kettenreaktion mit Leichtigkeit drosseln oder bei Bedarf vollständig unterbrechen. Aus den genannten Zahlen ist jedenfalls zu entnehmen, wie heftig diese Stoffe die Neutronen verschlingen.

An dieser Stelle müssen wir uns aber vor einem falschen Vergleich hüten. Die Steuerstäbe wirken keineswegs etwa so wie die Drosselklappe oder das Absperrventil, womit man die Leistung einer Dampfmaschine zu regeln pflegt. Die Steuerstäbe des Kernreaktors befinden sich – ganz gleich, ob die Leistung 10 kW oder 10 MW beträgt – stets in derselben Stellung. Erst wenn sich die Leistung des Reaktors *ändern* soll, müssen die Stäbe verschoben werden. Werden sie herausgezogen, so vergrößert sich der Vermehrungsfaktor k und damit die Stärke des Neutronenflusses (Bild 12). Hat sich nach einigen Sekunden die gewünschte Leistung eingestellt, müssen die Steuerstäbe wieder in ihre Ausgangslage zurückgefahren werden, damit die nunmehr gestiegene Leistung konstant

bleibt und der Vermehrungsfaktor wieder den Wert $k = 1,000$ erreicht.

In einem modernen Kernkraftwerk sind die Steuerstäbe z. B. aus zahlreichen einzelnen Stahlröhrchen von einigen Millimetern Dicke und mehreren Metern Länge aufgebaut, in die pulverförmiges B_4C (Borkarbid) eingefüllt ist. Die Röhrchen sind ihrerseits zu einem größeren Paket vereinigt, das sich in Längsrichtung zwischen den Brennelementen bewegen kann. Jeder Steuerstab hat seinen eigenen, durch eine Gewindespindel vermittelten elektromechanischen Antrieb. Für das sich im Laufe der Zeit bildende Helium muß in den Röhrchen genügend freier Raum bleiben. Der schließlich entstehende Gasdruck begrenzt die Lebensdauer dieser Steuerstäbe auf etwa zehn Jahre.

Durchgehen unmöglich!

Die Steuerstäbe werden mechanisch angetrieben, womit auch zwangsläufig eine gewisse Trägheit ihrer Bewegung verbunden ist. Werden sie auch schnell genug reagieren, um die Kettenreaktion in allen gefahrdrohenden Fällen unter Kontrolle zu halten? Glücklicherweise steht die Frage nicht auf des Messers Schneide. Denn wiederum sind es natürliche Umstände, die uns hilfreich unter die Arme greifen.

Die bei der Spaltung entstehenden Neutronen werden nämlich nicht gleichzeitig frei. Den bei dem eigentlichen Spaltakt emittierten *prompten Neutronen* folgt ein kleiner Bruchteil (0,76 %) *verzögerter Neutronen* mit einem Zeitabstand bis zu fast 60 s. Ist der Vermehrungsfaktor beispielsweise $k = 1,005$ und gäbe es nur die prompten Neutronen, so würde die freigesetzte Energie innerhalb von 1 s auf das 150fache anwachsen. Kein Steuermechanismus könnte dem folgen. Wegen der verspäteten Neutronen geht es jedoch bedeutend langsamer. In unserem Fall wächst die Energieproduktion in 1 s erst auf das 1,5fache, womit eine mechanische Regelung ohne weiteres möglich wird.

Äußerst wichtig für die Betriebssicherheit aber sind die *Temperatureffekte*. Bekanntlich nimmt mit steigender Temperatur die Dichte des Wassers ab. Wird nun als Moderator Wasser verwendet und steigt die Leistung des Reaktors plötzlich an,

so nimmt die in der Volumeneinheit befindliche Wassermenge gleichsam ab. Seine Wirkung als Moderator und die Anzahl der thermischen Neutronen geht augenblicklich zurück. Ein anderer selbstregulierender Einfluß ist dadurch gegeben, daß der Absorptionsquerschnitt des U 238 mit steigender Temperatur stark zunimmt.

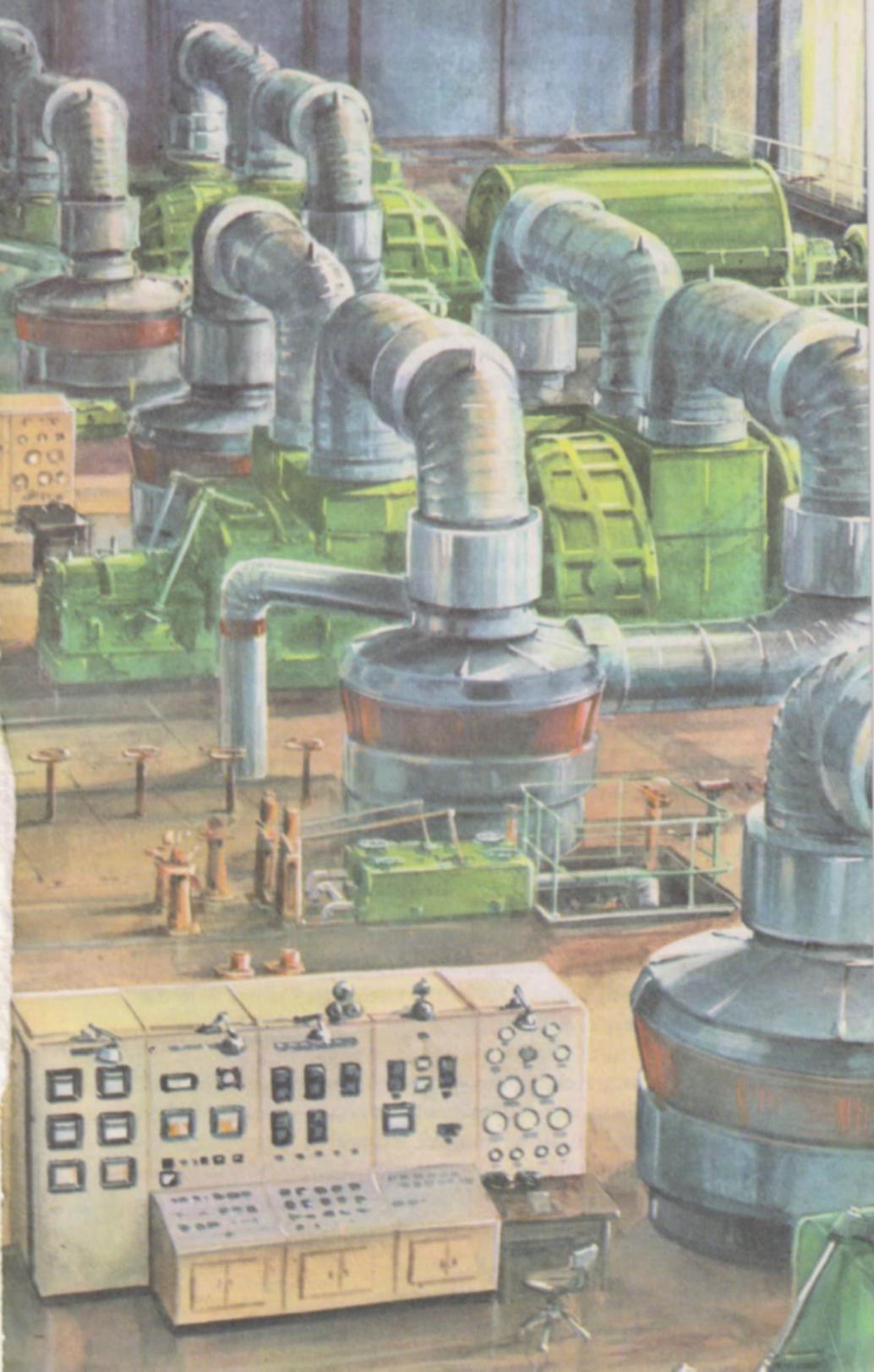
Noch stärker wirken sich bei Reaktoren, die mit siedendem Wasser arbeiten, die zahlreichen Dampfbläschen aus. Erhöht sich die Temperatur, so verdrängen sie noch mehr Wasser als zuvor, der Vermehrungsfaktor geht zurück. Dieser *negative Dampfblasenkoeffizient* gestattet es auch, die Leistung eines Reaktors besonders einfach zu regeln. Wird z. B. durch Verstellen der Umwälzpumpen der Wasserkreislauf beschleunigt, so werden die Dampfblasen schneller aus dem Reaktorkern herausgespült. Die Neutronenvermehrung nimmt zu, die Leistung steigt, und zwar so lange, bis sich der Dampfblasengehalt wieder erhöht hat. Allein durch dieses Verfahren läßt sich die Nennleistung des Reaktors zwischen 70 % und 100 % schnell und bequem regeln.

Unter normalen Verhältnissen ist somit ein etwaiges »Durchgehen« des Reaktors praktisch ausgeschlossen. Er regelt sich von selbst, sein Vermehrungsfaktor stellt sich im stationären Betrieb selbsttätig genau auf $k = 1,000$ ein. Als besonderer Schutz sind zudem an den verschiedensten Stellen der Anlage Signalgeber eingebaut. Im Fall eines plötzlich irgendwo auftretenden Schadens wirkt das betreffende Signal auf ein System von *Sicherheitsstäben*, die automatisch in den aktiven Kern des Reaktors fallen. Hierzu können auch die beschriebenen Steuerstäbe dienen, die dann zum Zweck der *Schnellabschaltung* mit einem hydraulisch wirkenden Mechanismus in den Reaktorkern geschossen werden und die Reaktion im Bruchteil einer Sekunde zum Stillstand bringen.

Wohin mit der Wärme?

Zum überwiegenden Teil wird die Kernenergie unmittelbar in Form von Wärme frei. Im Mittelpunkt der Brennelemente eines modernen Kraftwerkreaktors herrschen Tempe-

Bild 13. Turbinensaal des Kernkraftwerkes Nowo-Woronesh



raturen um 2500°C . Auch die nicht unbeträchtliche Gammastrahlung wird größtenteils noch innerhalb des Reaktors, besonders in der Wandung des Druckkessels, absorbiert und in Wärme umgesetzt.

In der ersten Zeit, als Reaktoren noch vorwiegend Studien- und Versuchsobjekte waren, galt diese Wärme als lästiges Nebenprodukt. Sie wurde durch intensive Kühlung beseitigt, das Kühlwasser in den nächsten Fluß geleitet oder allenfalls zur Speisung einer Warmwasserheizanlage verwertet. In einem Kernkraftwerk kommt es aber gerade darauf an, sie möglichst verlustlos aufzufangen und in elektrische Energie umzuwandeln. Dafür bieten sich die in vielen Jahrzehnten zu höchster technischer Reife entwickelten Dampfturbinen an. In altbewährter Bauweise sind sie mit dem Generator auf gemeinsamer Welle gekoppelt. Für die Wirkungsweise eines solchen *Turbogenerators* ist es im Prinzip gleichgültig, woher er seinen Dampf bekommt. In der Bauweise weicht er vom entsprechenden Aggregat eines konventionellen Wärmekraftwerkes nicht im geringsten ab (Bild 13). Mit diesem rein maschinentechnischen Teil des Kernkraftwerkes brauchen wir uns daher nicht weiter zu beschäftigen.

Somit handelt es sich zunächst darum, die im Reaktor anfallende Wärme zur Erzeugung von Wasserdampf heranzuziehen. In vielen Fällen geschieht es indirekt, indem das ganze Innere des Reaktors, besonders jene Stellen, die sich am stärksten erhitzen, in ununterbrochenem Strom von einem Wärmeträger umspült werden. Mit relativ niedriger Temperatur tritt er in den Reaktorkern ein und verläßt ihn wieder, aufgeheizt auf einige hundert Grad. Der Wärmeträger wirkt so als *Kühlmittel* und durchströmt dabei einen *Dampferzeuger*, der wie ein Dampfkessel von zahlreichen Rohren durchzogen ist (Bild 14). Diese enthalten das zu verdampfende Wasser, das somit einen zweiten Kreislauf bildet. Der hier entstehende Dampf wird der Turbine zugeleitet.

Deshalb ist auch die Frage, bis zu welchem Grade die bei der Kernspaltung freigesetzte Wärme ausgenutzt werden kann, gar kein Problem der Kernphysik, sondern der klassischen Wärmetheorie. Seit über hundert Jahren ist das Gesetz bekannt. Ihm zufolge hängt der *maximal mögliche Wirkungsgrad* einer Wärmekraftmaschine allein von der oberen und unteren Arbeitstemperatur T_1 bzw. T_2 des arbeitenden Mediums – hier

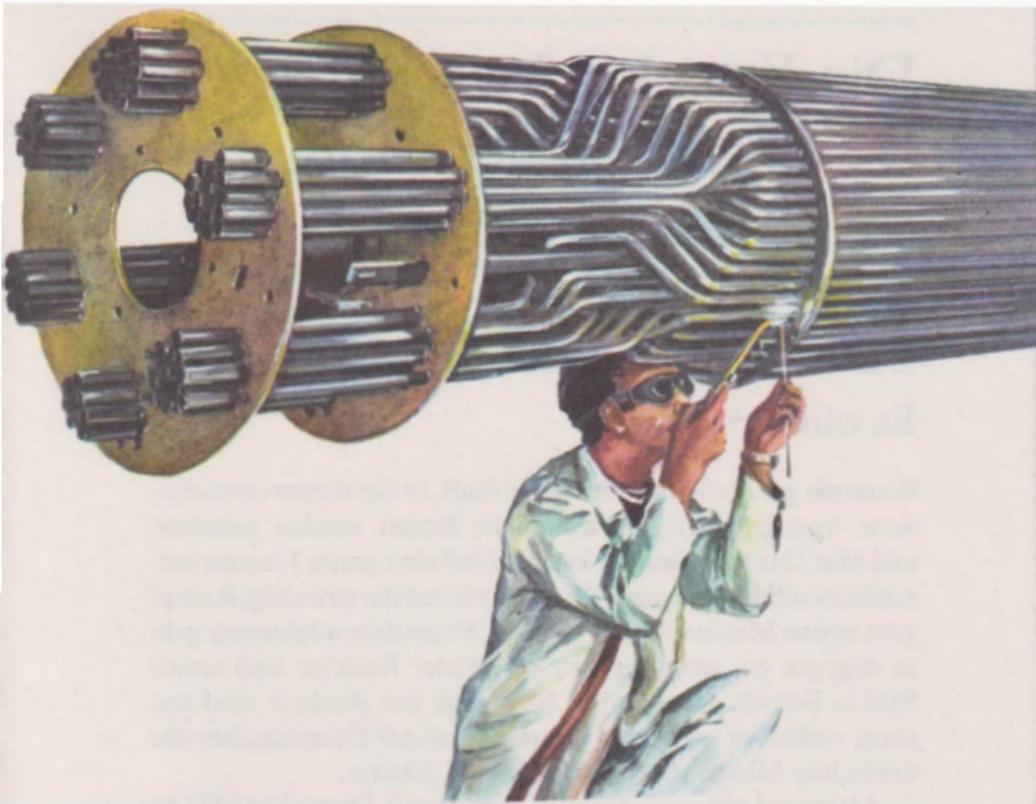


Bild 14. Dampferzeuger eines modernen Kernkraftwerkes in der Montage

ist es der Dampf – ab. (Für den theoretischen thermodynamischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine gilt die Gleichung $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.) Legen wir den aktuellen Fall eines modernen Kerngroßkraftwerkes mit $T_1 = 500 \text{ K}$ ($223 \text{ }^\circ\text{C}$) und $T_2 = 298 \text{ K}$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) zugrunde, so folgt daraus ein maximaler Wirkungsgrad von 40%, dem ein praktischer Wert von etwa 35% entspricht. Daher muß man bei einem Kernkraftwerk stets zwischen der primär hervorgebrachten *Wärmeleistung* P_{therm} und der von den Generatoren gelieferten *elektrischen Leistung* P_{el} unterscheiden, die je nach dem erzielten Wirkungsgrad 30 bis 35% der Wärmeleistung beträgt.

Die Kernkraftwerke der ersten Generation

Es wird kritisch

Wenn ein großes Schiff vom Stapel läuft, ist das immer eine feierliche Angelegenheit. Schwungvolle Reden werden gehalten, und eine Dame schleudert zum Schluß eine ganze Flasche aufschäumenden Sekts gegen den Bug, worauf der gewaltige Rumpf zum ersten Mal ins Wasser gleitet. Wesentlich nüchterner geht es dagegen zu, wenn ein neu errichteter Reaktor zum ersten Mal in Betrieb gesetzt wird. Man sagt, der Reaktor wird *kritisch*, wobei wir uns daran erinnern, daß bei Überschreiten der kritischen Menge die Kettenreaktion einsetzt.

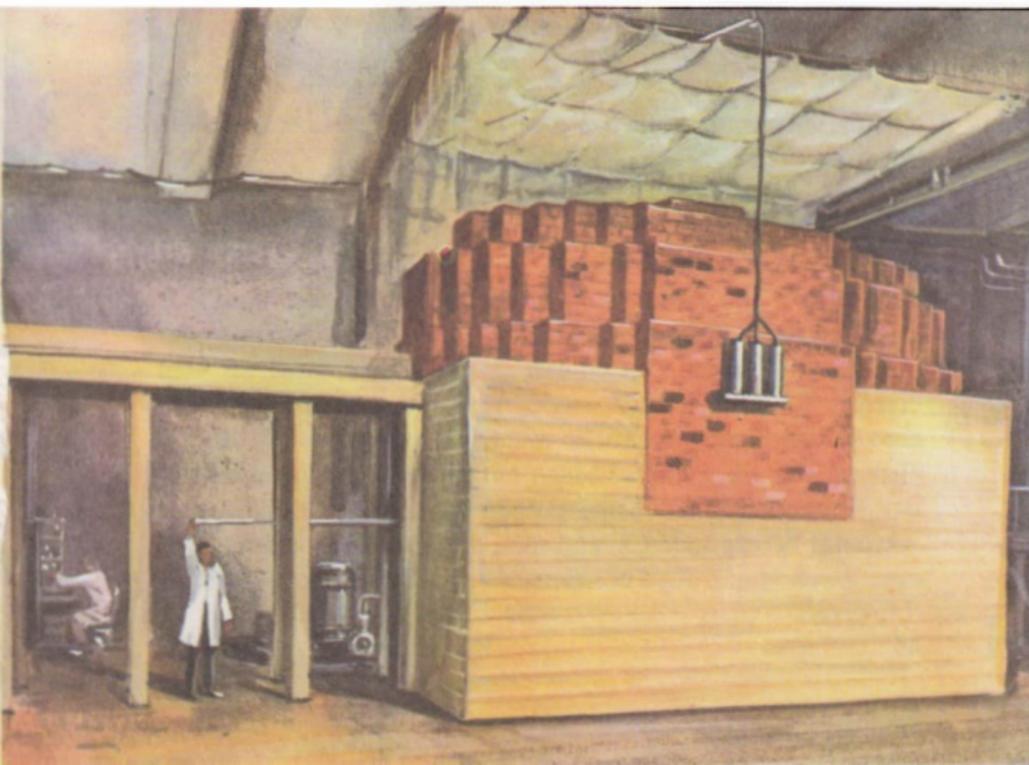
Als unter Leitung von Enrico Fermi am 2. Dezember 1942 der erste Kernreaktor der Welt unter der großen Tribüne des Chikagoer Stadions aus einzelnen Graphitziegeln und dazwischengelegten Uranstücken aufgebaut wurde (Bild 15), hatten die Beteiligten noch keine rechte Vorstellung davon, wie alles ablaufen würde. Mit zunehmender Größe rückte der kritische Zustand immer näher. Würde es schließlich mit einer schrecklichen, alles vernichtenden Explosion enden, mit der dann jede Hoffnung, auf diesem Weg jemals zum Ziel zu gelangen, ein für allemal begraben war? Oder würde sich gar nichts rühren und die Kettenreaktion aus noch unbekanntem Gründen gar nicht stattfinden? Für alle Fälle waren viele mit Cadmiumlösung gefüllte Eimer bei der Hand, um die etwa zu plötzlich einsetzende Reaktion sofort im Keim zu ersticken. Ein Mitarbeiter stand außerdem mit einer Axt bereit, um notfalls das Seil zu kappen, an dem ein Sicherheitsstab hing. Als aber der mit ungeheurer Spannung erwartete Augenblick erreicht war, verlief alles in der friedlichsten Weise, wie man es sich nicht schöner denken konnte. Der riesige Graphitblock wurde äußerst lang-

sam wärmer. Lediglich die in den Reaktor versenkten Meßgeräte zeigten an, daß der Neutronenfluß mit einem Mal mächtig answoll und die Kettenreaktion in Gang kam. Mit den in den Reaktor hineingeschobenen Cadmiumstäben ließ sie sich in bester Weise konstant halten und nach Belieben zum Stillstand bringen.

Technische Daten des ersten funktionsfähigen Kernreaktors der Welt CPI (Chikago Pile 1)

Inbetriebnahme	2. 12. 1942
Leistung, thermisch	200 W
Brennstoff, Art	Natururan
–, Menge	6,2 t
Moderator	Graphit in Blöcken
Kühlmittel	ohne
Maße des Reaktors	7,5 m · 7,5 m · 5,8 m
Steuerung	1 Steuerstab, 2 Sicherheitsstäbe aus Cadmium
Baukosten	2 Mill. Dollar
Außerbetriebsetzung	1. 3. 1943

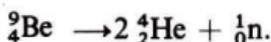
Bild 15. Erster Reaktor von Fermi



Wenn eine Kettenreaktion in Gang kommen soll, setzt das allerdings eines voraus: Es müssen wenigstens ein paar freie Neutronen vorhanden sein, die den Anfang machen. Woher sollen diese aber kommen? In allen stabilen und auch radioaktiven Kernen sind sie mit gewaltigen Kräften an die übrigen Nukleonen gebunden. Das ist ja auch der Grund, weshalb sie erst im Jahre 1932 entdeckt wurden. Man braucht daher am Anfang eine *Neutronenquelle*, um die Reaktion einzuleiten. Später haben die sowjetischen Physiker Flerow und Petrashak gefunden, daß sich Uran mit der unvorstellbar langen Halbwertszeit von $0,8 \cdot 10^{16}$ Jahren von selbst spaltet. Diese *Spontanspaltung* liefert in 1 kg Uran je Sekunde von selbst etwa 8 Neutronen. Das würde im Prinzip vollkommen ausreichen, den Reaktor in Gang zu setzen. Doch ist dieser Neutronenfluß viel zu klein, um ihn meßtechnisch verfolgen zu können, da es vor allem darum geht, das Erreichen des kritischen Punktes unter genauester Kontrolle zu halten. Auch im Betrieb muß die Multiplikation der Neutronen laufend überwacht werden. Dies ist der Grund, weshalb künstliche Neutronenquellen im Reaktor unentbehrlich sind. In großen Reaktoren gibt es sogar mehrere. Anstelle der früher verwendeten Art (S. 24) werden in Leistungsreaktoren vorwiegend Antimon-Beryllium-Quellen eingesetzt. Sie gehören zum Typ der *Photo-Neutronen-Quellen*. Das Antimon 124 verwandelt sich durch Betazerfall in Tellur 124, das eine starke Gammastrahlung abgibt:



Erst diese Gammaquanten veranlassen den Be-Kern zum Zerfall nach dem Schema



Das hierzu benötigte Antimon 124 muß zuvor hergestellt werden, indem die zunächst mit gewöhnlichem Antimon 123 gefüllte Quelle in einem anderen Reaktor mit Neutronen bestrahlt wird. Wenn das einmal geschehen ist, wird sie vom eigenen Reaktor immer wieder reaktiviert. Äußerlich sieht eine solche Neutronenquelle nicht viel anders als ein Brennelement aus. Ein mehrere Meter langes Stahlrohr ist innen mit Beryllium ausgekleidet und enthält zwei Antimonstäbe. Die Aktivität beträgt 500 Ci, und man kann sich ausrechnen, was eine gleich starke Radium-Beryllium-Quelle kosten würde!

Der Veteran und seine Söhne

Aufbau und Ingangsetzung eines Kernreaktors sind heute schon längst kein Problem mehr. Vielmehr steht eine derartige Vielfalt von spaltbaren Materialien, Moderatoren und Kühlmitteln zur Verfügung, daß es schwerfällt, sich hier noch zurechtzufinden. Die verschiedensten Kombinationen und Varianten sind wohl denkbar. Doch sind sorgfältige Forschungsarbeiten und mitunter recht kostspielige Vorstudien erforderlich, wenn ein bestimmtes Objekt realisiert werden soll. Viele Projekte sind bereits auf dem Papier stehengeblieben, da sie dem Wettbewerb mit anderen Entwürfen aus ökonomischen und technologischen Gründen schon im Ansatz nicht standhalten konnten.

Vor allem mußten in der ersten Zeit genügend Erfahrungen im Verhalten von Reaktoren im Dauerbetrieb, ihre Energiebilanz, die Eigenschaften der Strukturelemente und Werkstoffe sowie das Regelverhalten an relativ kleinen Einheiten studiert werden. In aller Welt entstanden daher zahlreiche *Forschungsreaktoren*. Reaktoren mit dem alleinigen Zweck der Energiegewinnung bezeichnet man dagegen als *Leistungsreaktoren*. Auch hier gibt es die unterschiedlichsten Typen. Zwar lief die Entwicklung nach dem zweiten Weltkrieg in den einzelnen Ländern etwa gleichzeitig an. Aber je nach den wirtschaftlichen und technischen Verhältnissen ging sie getrennte Wege und führte zu stark voneinander abweichenden Grundkonzeptionen.

Das *erste Kernkraftwerk der Welt* entstand in Obninsk (UdSSR) und wurde am 27. 6. 1954 kritisch. Sein Kern ist aus Graphit als Moderator gemauert und von 128 senkrechten Arbeitskanälen durchzogen. In der Mitte jedes Kanals verläuft ein Stahlrohr, in dem das als Kühlmittel dienende Wasser zirkuliert. Der ringförmige Zwischenraum zwischen jedem Rohr und dem Graphitkern ist mit relativ stark angereichertem Uran ausgefüllt (Bild 16). Alle Wasserröhren münden oben in eine Sammelleitung und bilden ein zusammenhängendes System. Die obere Temperatur des Wassers beträgt 270 °C, sein Druck 100 at. Es gibt seine Wärme in einem geschlossenen Kreislauf an mehrere Dampferzeuger ab, die je Stunde 40 t Dampf an die Turbine liefern. Auf diese Weise kann kein radioaktives Wasser in den Turbinenkreislauf gelangen.

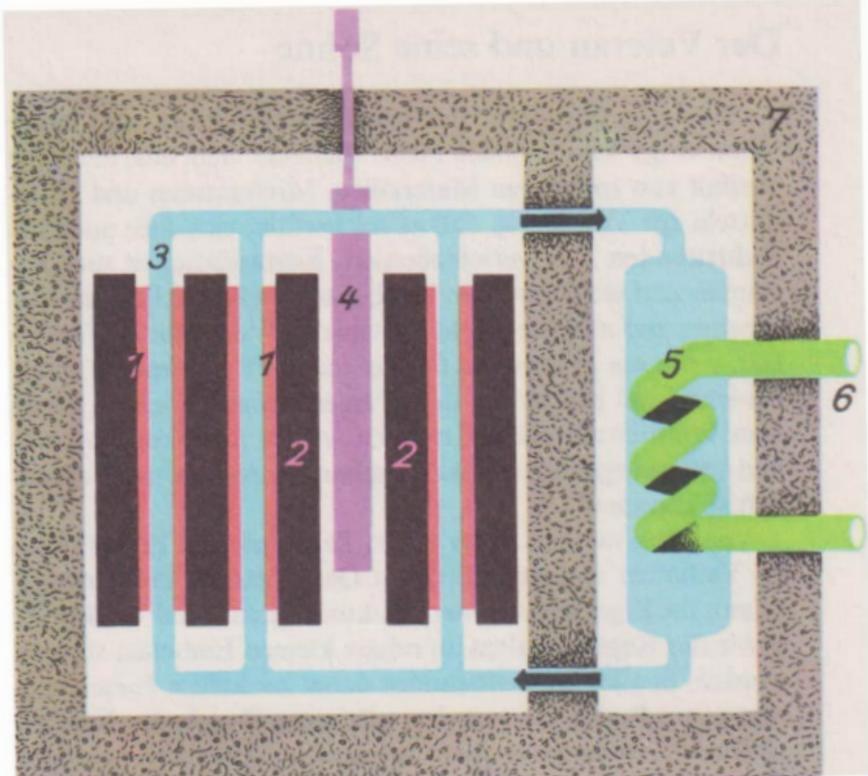


Bild 16. Schema des Druckröhrenreaktors (DRR)
 1 - Brennelemente, 2 - Graphit, 3 - Druckröhren, 4 - Steuerstab,
 5 - Dampferzeuger, 6 - Dampfkreislauf zur Turbine, 7 - Abschirmung

Erstes Kernkraftwerk der Welt in Obninsk (UdSSR)

Inbetriebnahme	27. 6. 1954
Leistung, thermisch	30 MW
–, elektrisch	5 MW
Brennstoff, Art	Uran-Molybdän-Legierung
–, Menge	0,55 t
–, Anreicherung mit U 235	5%
Brennelemente, Anzahl	128
Abbrand	8 MWd/kg U
Steuerstäbe, Anzahl	22
–, Material	Borkarbid
Moderator	Graphit
Kernvolumen	3 m ³
gesamte Graphitmasse	21,1 t

Kühlmittel	Wasser
–, Durchsatz	300 t/h
–, Druck	100 at
– obere Temperatur	260–270 °C
Sekundärkreislauf	
–, Durchsatz	40 t/h
–, Druck	12,5 at
–, Temperatur	255–260 °C
Leistungsdichte des Kerns	10 MW/m ³

Die hier angeführten Zahlen geben uns wichtige Hinweise. Wie ein Blick in eine technische Dampftabelle lehrt, hat Wasser von 260 °C den Dampfdruck 50 at. Unterhalb dieses Druckes würde das Wasser sieden, d. h. unter Blasenbildung aufwallen

Bild 17. Kernkraftwerk Belojarsk



und sich allmählich in Dampf verwandeln. Da der Druck im Rohrsystem aber 100 at beträgt, unterbleibt die Dampfbildung. Es handelt sich um einen *Druckröhrenreaktor*. Seine Leistung mit $30 \text{ MW}_{\text{th}}$ bzw. 5 MW_{el} nimmt sich im Vergleich zu den heute üblichen Dimensionen noch recht bescheiden aus. Aber es war das erste Studienobjekt, der erste Durchbruch auf dem Weg zur friedlichen Gewinnung von Kernenergie.

Der heutige Veteran tut seine treuen Dienste nun schon über zwanzig Jahre. Inzwischen lieferte er wertvolle Erfahrungen für den Bau der eigentlichen Großkraftwerke. Sie führten in gerader Linie zum Komplex von Belojarsk in der Nähe von Swerdlowsk am Ural (Bild 17). Da er ebenfalls mit Druckröhren arbeitet, können wir das inzwischen eingetretene Wachstum anhand der folgenden technischen Daten selbst beurteilen.

Kernkraftwerk Belojarsk II (UdSSR)

Inbetriebnahme	1967
Leistung, thermisch	560 MW
–, elektrisch	200 MW
Brennstoff, Art	Uran-Molybdän-Legierung
–, Menge	50 t
–, Anreicherung mit U 235	3%
Abbrand	10 MWd/kg U
Brennelemente, Anzahl	1000
Steuerstäbe	122
Moderator	Graphit
Kernvolumen	244 m ³
gesamte Graphitmasse	140 t
Kühlmittel	Wasser
Kühlmittel, Durchsatz	5 500 t/h
–, obere Temperatur	400 °C
–, Druck	132 at
Dampfkreislauf	
–, Überhitzertemperatur	508 °C
–, Druck	110 at
Leistungsdichte des Kerns	2,3 MW/m ³
thermischer Wirkungsgrad	35,7%

Erstaunlich hoch ist vor allem der thermische Wirkungsgrad der Anlage. Wie wir uns erinnern, hängt dieser in erster Linie

von der oberen Temperatur des in die Turbine eintretenden Wasserdampfes ab. In anderen Ländern hat man schon daran gedacht, die Dampftemperatur in ölgefeuerten Überhitzern zu erhöhen. In Belojarsk aber wurde zum ersten Mal der Schritt gewagt, die Überhitzer direkt in den Reaktor einzubauen.

Die englische Linie

Eine ganz andere Entwicklung im Kernkraftwerksbau hatte sich inzwischen in Großbritannien angebahnt. Hier begann man von vornherein mit der Verwendung von reinem natürlichem Uranmetall. Sein Gehalt an U 235 ist aber so gering, daß gewöhnliches Wasser als Moderator und Kühlmittel nicht zu verwenden ist. Es absorbiert zuviel Neutronen. Man moderiert daher besser mit Graphit und kühlt mit CO₂-Gas. Seine Kühlwirkung nimmt mit wachsendem Gasdruck zu. Deshalb wird es unter dem Druck einiger Atmosphären umgewälzt. Damit haben wir den Typ des *Gas-Graphit-Reaktors* vor uns (Bild 18).

Der Ahnherr dieses Typs ist das Kraftwerk von Calder Hall (Cumberland). Wir stellen es hier vor, weil es eine ganze Serie ähnlicher Kraftwerke einleitete, die nach und nach verbessert wurden. Bis zum Jahre 1959 wurde Calder Hall selbst auf eine Leistung von 200 MW_{el} erweitert (Bild 19).

Kernkraftwerk Calder Hall (Großbritannien), Station A

Inbetriebnahme	17. 10. 1956
Anzahl der Reaktoren	2
Leistung, thermisch je Reaktor	235 MW
–, elektrisch je Reaktor	46 MW
Brennstoff, Art	Natururan
–, Menge je Reaktor	130 t
Brennelemente, Anzahl je Reaktor	1 696
Abbrand	3 MWd/kg U
Steuerstäbe, Anzahl	160
–, Material	Stahlröhren mit Borfüllung
Moderator	Graphit

Graphitmenge je Reaktor	1 146 t in 58000 Blöcken
Kühlmittel	CO ₂ -Gas
- , Durchsatz	3 500 t/h
- , obere Temperatur	336 °C
- , Druck	7 at
Kernvolumen	580 m ³
Dampfkreislauf, Temperatur	313 °C
- , Druck	14,8 at
Leistungsdichte des Kerns	0,4 MW/m ³

Nicht weniger als 11 solcher Kraftwerke mit bis zu 1200 MW_{el} haben die Engländer auf der Basis von Natururan erbaut. Sie hoffen, damit unabhängig von den amerikanischen Anreiche-

Bild 18. Schema des graphitmoderierten gasgekühlten Reaktors (GGR)

1 - Brennelemente, 2 - Graphit, 3 - Steuerstäbe, 4 - Kühlgas, 5 - Steuerstabantrieb, 6 - Dampferzeuger, 7 - zur Turbine, 8 - Druckgefäß, 9 - Abschirmung

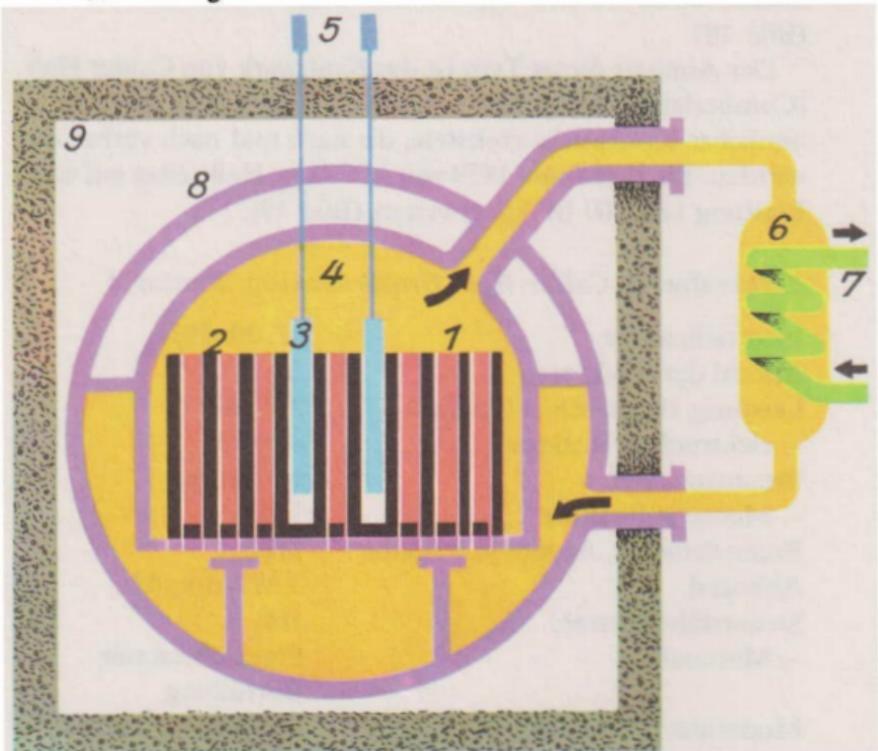




Bild 19. Kernkraftwerk Calder Hall

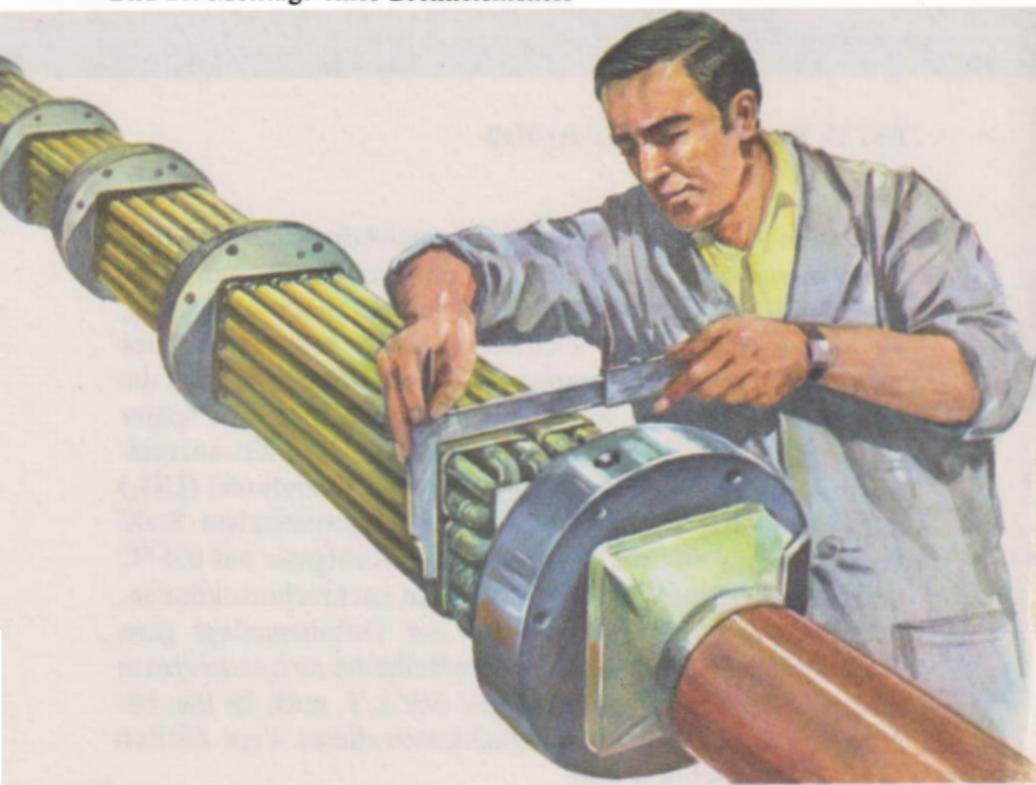
rungsanlagen zu sein. Um die Neutronenverluste auf ein Minimum zu reduzieren, war man aber gezwungen, für den Kernbrennstoff Hülssen aus Magnox, einer Magnesiumlegierung, zu verwenden. Dieses leichtschmelzbare Material erlaubt wiederum nur Gastemperaturen bis höchstens 410 °C. Um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern, entschloß man sich später doch noch dazu, den Brennstoff mit 1,5% Uran 235 anzureichern. Nunmehr konnte der in Form von Urandioxid (UO_2) verwendete Brennstoff in Rohre aus nichtrostendem Stahl eingeschlossen und die Temperatur des Kühlgases auf 655 °C gesteigert werden. Wie wir (S. 37) leicht nachrechnen können, steigt dadurch der Wirkungsgrad der Turbinenanlage ganz beträchtlich. So entstand die weitere Reihe der *fortgeschrittenen gasgekühlten Graphitreaktoren*, die sich z. T. noch im Bau befinden. Die Entwicklungsmöglichkeiten dieses Typs dürften aber damit erschöpft sein.

Tücken des Kernbrennstoffs

Vom eigentlichen Ursprung der Kernenergie, dem spaltbaren Uran, haben wir bis jetzt nur am Rande gesprochen. Wir müssen das Versäumte aber nachholen, weil es mit der einfachen Feststellung seiner Spaltbarkeit noch längst nicht getan ist.

Das Uran ist durchaus kein seltenes Metall. Fast alle am Aufbau der Erdkrinde beteiligten Gesteine bis zum gewöhnlichen Straßenpflaster enthalten einige Gramm je Tonne. Große Lagerstätten von Uranerzen finden sich in allen Erdteilen. In der günstigsten Preisklasse, die dem gegenwärtigen Weltmarktpreis von etwa 20 Rubel je kg U_3O_8 -Konzentrat entspricht, wurden die gewinnbaren Reserven der Welt (ohne die sozialistischen Länder) im Jahre 1971 auf 90 000 t geschätzt. Etwa gleich groß werden die Vorräte des ebenfalls verwertbaren

Bild 20. Montage eines Brennelementes



Thoriums veranschlagt, von dem noch die Rede sein wird. Die fortlaufende Neuentdeckung neuer Erzlager und die hier noch gar nicht mitgerechneten Vorkommen mit geringerem Uran-gehalt stellen den Energiebedarf noch für viele Jahrhunderte sicher. Zudem befindet sich ein geradezu unerschöpflicher Vorrat von 4 Mrd. t Uran in den Weltmeeren, in Form von gelösten Salzen. Es ließe sich hieraus zu einem Preis von etwa 50 Rubel je kg extrahieren. Da die Rohstoffkosten im Endpreis der Kernenergie nur eine Nebenrolle spielen, wäre das ohne weiteres noch tragbar.

Mit seiner Dichte von $19,04 \text{ g/cm}^3$ ist Uran fast so schwer wie Gold. Es schmilzt bei $1132 \text{ }^\circ\text{C}$ und ist ein so unedles Metall, daß es bei hoher Temperatur an der Luft verbrennt. Seine eigene Radioaktivität – es ist ein Alphastrahler mit der Halbwertszeit 4,6 Milliarden Jahre – spielt praktisch keine Rolle.

Zur Gewinnung von Kernenergie ist reines Uranmetall aber nur schlecht geeignet. Es hat die metallurgisch recht unangenehme Eigenschaft, je nach der Temperatur in drei unterschiedlichen Modifikationen aufzutreten. Bis zu $660 \text{ }^\circ\text{C}$ befindet es sich in der α -Phase. Bis zu $770 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt es in der spröden und harten β -Phase und jenseits dieser Temperatur in der weichen, leicht verformbaren γ -Phase vor. Die Folge davon ist, daß sich Uranmetall bei den im Reaktor herrschenden hohen Temperaturen außerordentlich leicht verändert, es quillt, verformt sich und zerbröckelt.

Nachdem man sich viele Jahre lang mit den Tücken des Urans herumgärgert hatte, ging man schließlich von der Verwendung des reinen Metalls ganz ab und verwendet heute fast ausschließlich *keramische Brennstoffe*, d. h. Uranoxid UO_2 und Urankarbid UC_2 . UO_2 ist ein braunes Pulver, das nach Formen zu Tabletten oder kleinen Zylindern (Pellets) von der Dichte $10,5 \text{ g/cm}^3$ und dem Schmelzpunkt $2800 \text{ }^\circ\text{C}$ gesintert wird. Sie werden dann in dünnwandige Rohre aus Stahl oder Zircaloy (Zirkon + Zinn + geringe Zusätze von Eisen, Chrom und Nickel) gefüllt. Ein mittelgroßes Kernkraftwerk verschlingt mehrere Millionen solcher Pellets. Sie füllen viele tausend *Brennstoffstäbe* von mehreren Metern Länge. In größeren Bündeln zusammengefaßt, bilden diese die *Brennelemente* (Bild 20).

Diese UO_2 -Stückchen quellen nur noch geringfügig und sind gegenüber Wärmebeanspruchung sehr widerstandsfähig.

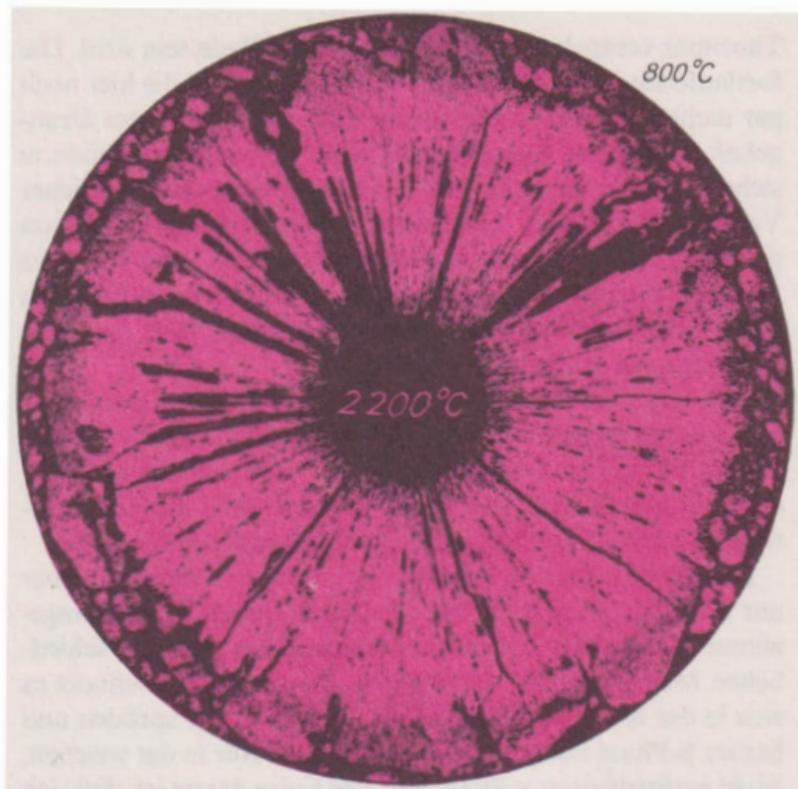


Bild 21. Querschnitt durch ein teilweise ausgebranntes (U, Pu)O₂-Pellet (Durchmesser 8 mm)

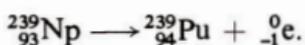
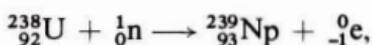
Schon nach kurzer Bestrahlungszeit zeigen sie eine »ananasartige« Struktur mit einem zentralen Kanal (Bild 21). Von der heißen Mittelzone wandert der Brennstoff an die etwa 800 °C heiße Randzone. Um einen allzugroßen Wärmestau und das Schmelzen des Oxids zu verhindern, darf der Rohrdurchmesser höchstens 8 bis 15 mm betragen.

In Stahlröhren verpacktes Uranoxid bildet auch die Grundlage der neuen Baureihe der englischen gasgekühlten Reaktoren, von denen wir auf S. 45 schon gesprochen haben.

Die Geburt des Plutoniums

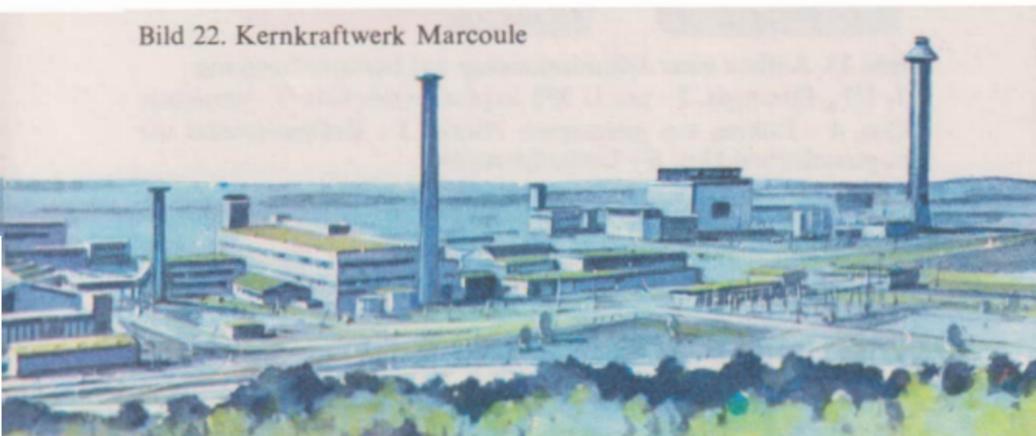
An sich haben wir schon davon gehört, daß Uran 238 die Eigenschaft hat, Neutronen zu absorbieren, ohne sich zu spal-

ten. Was aber wird daraus? Die folgenden Gleichungen bringen es zum Ausdruck:



Im ersten Schritt bildet sich unter Abgabe eines β -Teilchens das neue Element *Neptunium* mit der Halbwertszeit 2,3 Tage und im zweiten Schritt unter nochmaliger β -Umwandlung das *Plutonium*. Hier endlich sehen wir die Entstehung zweier *Transurane* vor uns, wie sie Fermi bei seinen Experimenten gefunden zu haben glaubte. Sie wurden aber erst im Jahre 1940 nachgewiesen. Das Plutonium ist ein α -Strahler mit der Halbwertszeit 24 300 Jahre. Das ist an sich nichts Besonderes. Seine geradezu schicksalhafte Bedeutung liegt aber darin, daß es ebenso leicht spaltbar ist wie das Uran 235. Zu einem gewissen Teil wird das entstandene Pu 239 schon während des Reaktorbetriebes gespalten, womit es einen kleinen Beitrag zur Energieproduktion liefert. Seine Menge nimmt jedoch langsamer zu, als der gleichzeitige Verbrauch an U 235 ausmacht. Ein Kraftwerk von 2000 MW_{th} produziert jährlich etwa 200 kg Plutonium (Bild 22). Das stellt einen respektablen Wert dar, da es zur Herstellung frischer Brennelemente verwendet werden kann. Darüber hinaus wurden inzwischen Mittel und Wege gefunden, einen beträchtlichen Teil des im Natururan enthaltenen U 238 zielgerichtet in Pu 239 zu verwandeln. Es hat schon Pessimisten gegeben, die der Energiegewinnung aus

Bild 22. Kernkraftwerk Marcoule



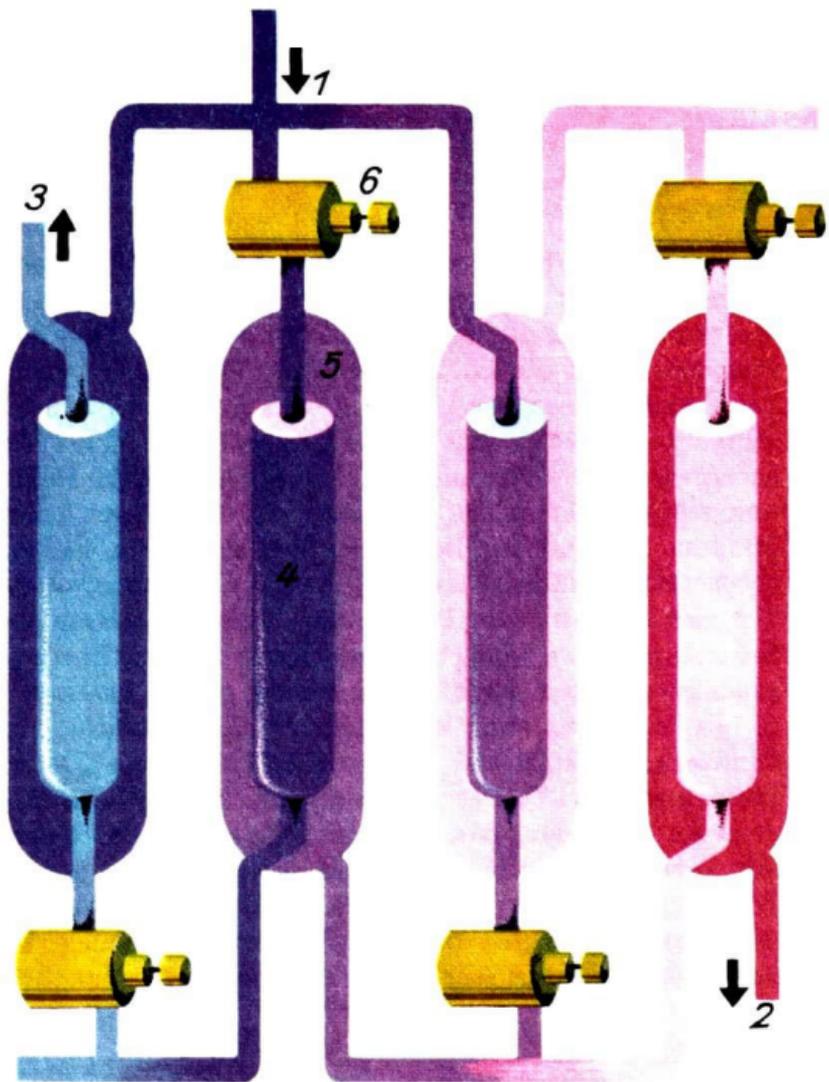


Bild 23. Aufbau einer Diffusionsanlage zur Isotopentrennung
 1- UF_6 -Frischgas, 2 - mit U 235 angereichertes Gas, 3 - verarmtes Gas, 4 - Röhren aus gesintertem Nickel, 5 - Diffusionsraum mit angereichertem Gas, 6 - Umlaufpumpen

der Uranspaltung eine Lebenschance von nur wenigen Jahrzehnten geben wollten. Sie haben nicht mit dem Plutonium gerechnet.

Die Technologie des Plutoniums ist noch schwieriger als die des Urans. Es ist nicht nur äußerst giftig, sondern muß wegen seiner harten α - und γ -Strahlung sehr vorsichtig ge-

handhabt werden. Unterhalb seines Schmelzpunktes von $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ existiert es in fünf verschiedenen Modifikationen. Bei Erwärmung dehnt es sich sehr stark und äußerst unregelmäßig aus. Somit eignet sich das reine Metall zur Herstellung von Brennelementen noch schlechter als Uranmetall. Sehr gut bewährt haben sich jedoch Tabletten und Stäbe aus gesintertem $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$ mit ähnlichen Eigenschaften wie UO_2 .

Die teuersten Fabriken der Welt

Nur noch ältere Reaktoren werden mit natürlichem Uran betrieben. Der aktive Kern aller modernen Kernkraftwerke besteht aus mehr oder weniger stark mit $\text{U } 235$ *angereichertem Material*. Die Herstellung dieses wertvollen Stoffes ist daher ein Angelpunkt neuzeitlicher Kerntechnik. Als das Problem mit einem riesenhaften Aufwand an Menschen und Material in denkbar kurzer Zeit gelöst wurde, geschah es leider nur zur Demonstration militärischer Gewalt. Die drei mit einem Kostenaufwand von 10 Milliarden Mark in den USA errichteten Fabriken gehören zu den teuersten, die je gebaut wurden. Sie arbeiten heute noch und produzieren nahezu das gesamte spaltbare Material der kapitalistischen Welt, wenn man von den sehr kleinen Anlagen Großbritanniens und Frankreichs absieht. Inzwischen ist ein Riesengeschäft daraus geworden.

Hier wird ausschließlich nach der *Diffusionsmethode* gearbeitet. Das Uranmetall wird zunächst in gasförmiges Uranhexafluorid UF_6 verwandelt. Der geringfügige Unterschied in der relativen Atommasse bewirkt, daß die leichtere Komponente $\text{U}(235)\text{F}_6$ ein klein wenig schneller durch poröse Wände diffundiert als die schwere Komponente $\text{U}(238)\text{F}_6$. Die technischen Einzelheiten des Verfahrens werden streng geheimgehalten. Nur grobe Anhaltspunkte sind im Laufe der Zeit durchgesickert. Unter leichtem Überdruck strömt das Gas durch poröse Röhren, die wahrscheinlich aus gesinterem Nickelpulver bestehen. Der Faktor, um den die anfängliche Konzentration des $\text{U } 235$ von Stufe zu Stufe zunimmt, ist der *Trennfaktor*. Da er bei diesem Verfahren nur ganz wenig über dem Wert 1 liegt, müssen etwa 2000 Stufen hintereinandergeschaltet werden, um auf eine Anreicherung von 3% zu kommen. Das Urangas verläßt die Anlage mit einem Restgehalt von 0,2% $\text{U } 235$.

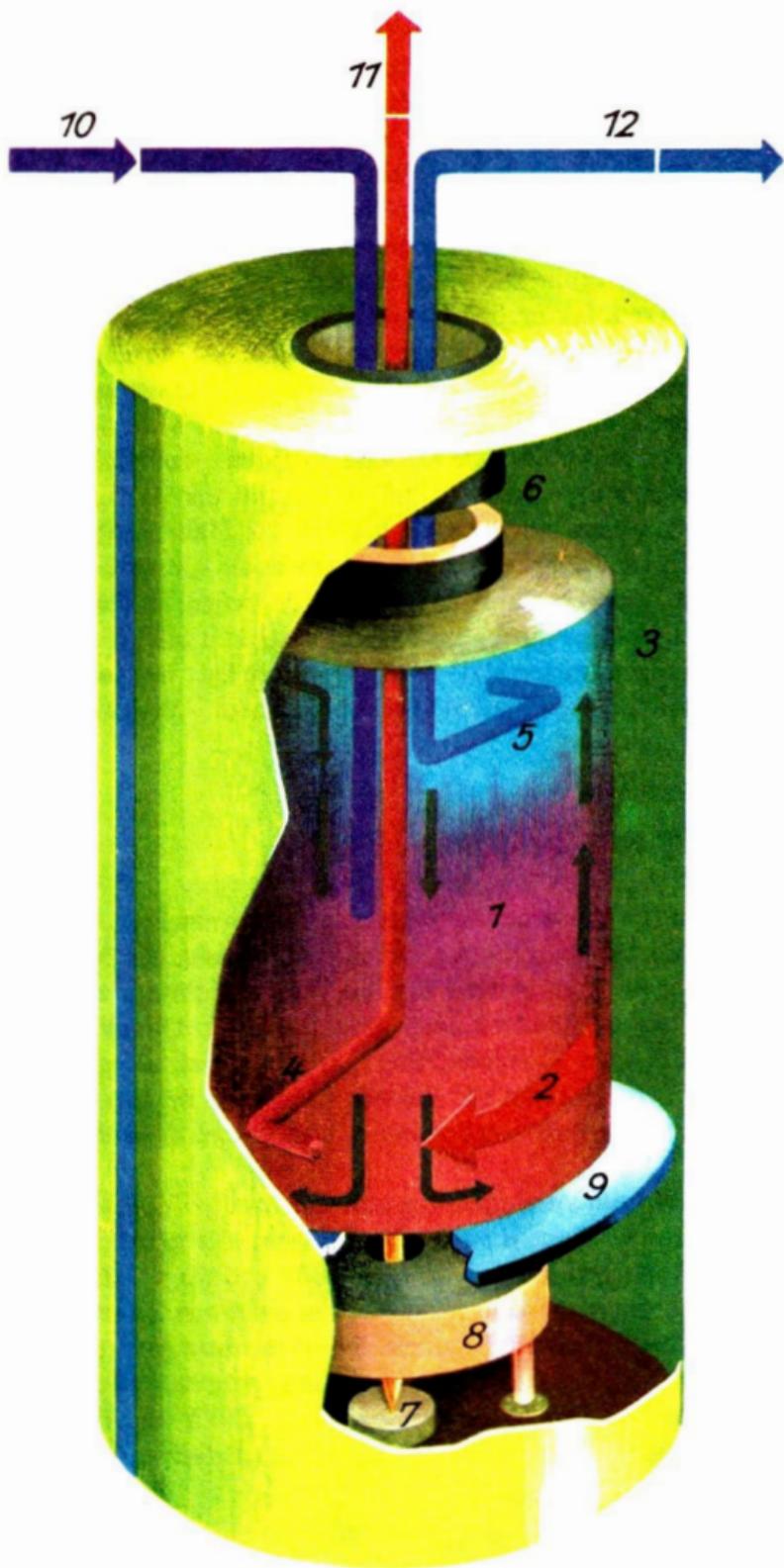
Bild 23 zeigt, wie die an U 235 angereicherte Fraktion dem Kompressor der nächsten Stufe zugeführt wird, während der an U 235 verarmte Teil zum Kompressor einer vorausgehenden Stufe strömt.

Der minimale Dichteunterschied zwischen U 235 und U 238 ließ auch schon frühzeitig an die Verwendung von Zentrifugen denken. Würde man einen versierten Chemotechniker beauftragen, das Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch der Luft damit zu trennen, so wäre die Antwort bestenfalls ein mitleidiges Lächeln. In Anbetracht des schlechten Verhältnisses der Molekulargewichte (32 : 28) und der entgegenwirkenden Diffusion wäre der Trenneffekt mehr als dürftig. Total aussichtslos muß daher das Beginnen erscheinen, UF_6 -Gas in seine beiden Komponenten zu zerlegen. Um so mehr muß man dann den Optimismus und den zähen Fleiß bewundern, mit dem schon seit dem zweiten Weltkrieg Versuche zur Konstruktion von *Gaszentrifugen* unternommen wurden. Nach vielen Verbesserungen sind sie nunmehr zu ernsthaften Konkurrenten der Diffusionszellen herangereift. Allein in den Jahren 1958 bis 1972 wurden im kapitalistischen Ausland über 200 Millionen Mark in das Entwicklungsprogramm gesteckt. Es kennzeichnet die verzweifelten Anstrengungen, das amerikanische Monopol zu Fall zu bringen.

Im Prinzip handelt es sich um einen einfachen Hohlzylinder von etwa 1,5 m Länge, der mit einer Drehzahl von etwa 60 000 U/min um seine Längsachse rotiert. Das UF_6 -Gas gelangt durch ein berührungsfrei in das Innere ragende Rohr in den Zylinder. Mit zwei weiteren feststehenden Röhren, deren offene Enden dem rotierenden Gasstrom entgegengerichtet sind, werden die beiden Fraktionen entnommen (Bild 24). Während der Rotation wird durch ein Heiz- und Kühlsystem das Gas gezwungen, am Zylindermantel aufzusteigen und an der Achse nach unten zu sinken. Dadurch reichert sich die schwere Komponente im oberen und die leichte Komponente

Bild 24. Schema der Gaszentrifuge

1 - Rotor, 2 - Drehsinn, 3 - Vakuum, 4 - Staurohr für angereicherte Komponente, 5 - Staurohr für verarmte Komponente, 6 - Ringmagnete, 7 - Spitzenlager, 8 - feststehende Wicklung des Motors, 9 - Läufer des Motors, 10 - Frischgaszufuhr, 11 - angereichertes Gas, 12 - verarmtes Gas



im unteren Teil des Zylinders an. Alle weiteren Einzelheiten sind auch hier streng geheim. Die auf Bild 24 angegebene Konstruktion entspricht einem früheren in der UdSSR entwickelten Modell. Es rotiert auf einer Nadelspitze und wird oben durch Magnete freischwebend gehalten. Der Antrieb geschieht durch einen Elektromotor, dessen Rotor mit dem Zentrifugenkörper fest verbunden ist, während die Wicklung samt Stromzufuhr außerhalb des Rotors fest steht.

Der Trennfaktor der Gaszentrifuge ist mit 1,2 bis 1,3 je Stufe dem der Diffusionszelle weit überlegen. Für eine 3%ige Anreicherung genügen bereits 10 bis 20 hintereinandergeschaltete Einheiten. Wegen des sehr kleinen Materialdurchsatzes müssen aber viele tausend Rotoren parallelgeschaltet werden. Da die Trennleistung zudem mit der 4. Potenz der Umfangsgeschwindigkeit wächst, ist das Hauptproblem die Haltbarkeit der Maschine. Bei extremster Geschwindigkeit muß sie mehrere Jahre lang ununterbrochen laufen. Dabei sind Lagerung, Antrieb und Zerreißfestigkeit höchsten Beanspruchungen ausgesetzt. Was hier erreicht werden kann, wird durch die Qualität der eingesetzten Werkstoffe bestimmt.

Der Gigant am Don

Erst mit der Verwendung angereicherten Urans ist es möglich geworden, für Reaktoren gewöhnliches Wasser, den billigsten aller Rohstoffe, zu nutzen. Da das Wasser nicht nur ein guter Moderator ist, sondern auch gleichzeitig den Dampf für die anzutreibenden Turbinen liefert, bietet es sich als geradezu ideales Betriebsmittel an. Bei den meisten in der letzten Zeit gebauten Großkraftwerken hat es sich immer mehr durchgesetzt.

Eine weitere Vereinfachung und gleichzeitige Verkleinerung des Reaktorvolumens wird erreicht, wenn der ganze Reaktor mit Wasser gefllt wird. Wegen des Fortfalls des Graphitmoderators zirkuliert es nicht mehr in einzelnen Rhren, sondern frei zwischen den Brennelementen in einem geschlossenen Kreislauf (Bild 25). Es handelt sich um den heute weltweit verbreiteten Typ des *Druckwasserreaktors (DWR)*. In ihm verdichtet sich bereits ein so hohes Maß an Erfahrung und Be-

triebssicherheit, daß nunmehr mit dem serienmäßigen Bau großer Kraftwerksblöcke begonnen werden konnte.

Wegweisend war hier das im September 1964 in Betrieb gesetzte Kraftwerk von Nowo-Woronesh am Don (UdSSR). Mit einer Wärmeleistung von 760 MW liefert es eine elektri-

Bild 25. Schema des Druckwasserreaktors (DWR)

1 - Brennelemente, 2 - Steuerstäbe, 3 - Wasser, 4 - Druckbehälter, 5 - Dampferzeuger, 6 - Dampfkreislauf zur Turbine, 7 - Abschirmung

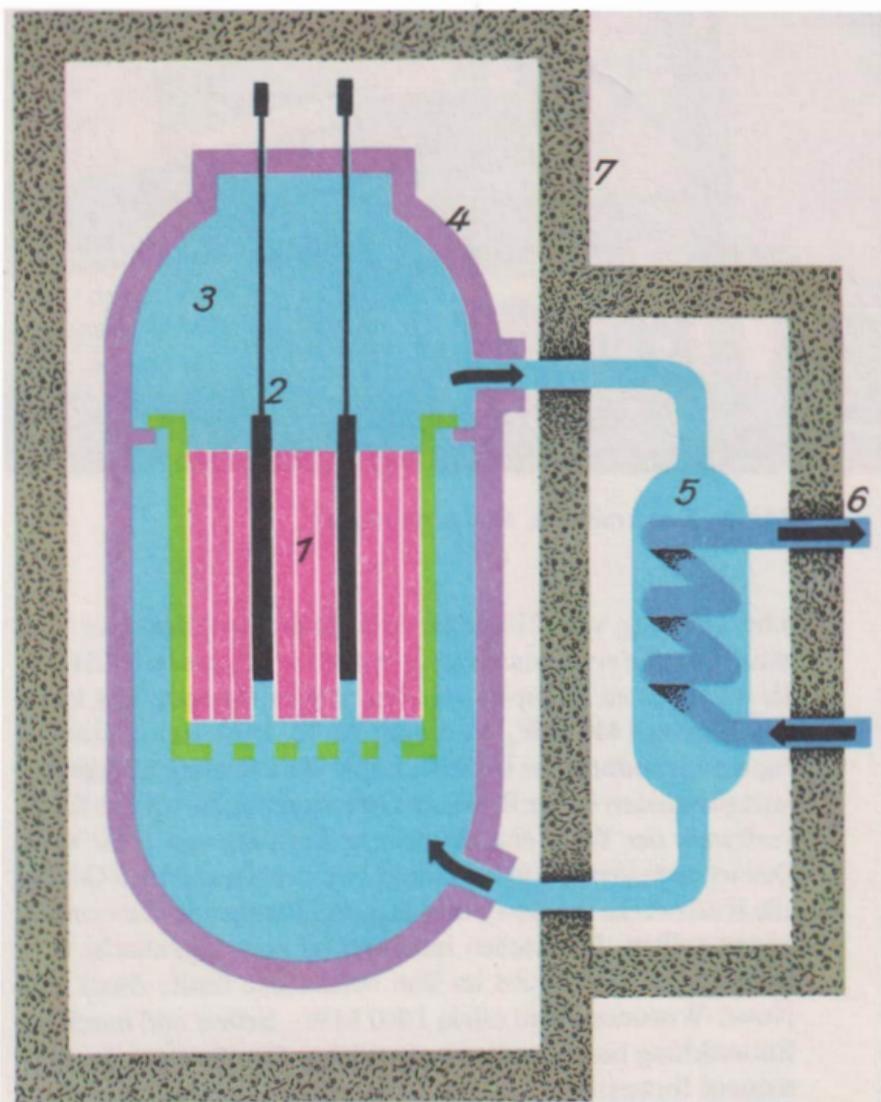




Bild 26. Kernkraftwerk Nowo-Woronesh

sche Leistung von 210 MW. Inzwischen hat sich hier eine ganze Familie von Druckwasserreaktoren angesiedelt (Bild 26). Sie bilden einen Komplex von vier großen Blöcken. Der letzte von ihnen mit 440 MW_{el} wurde am 30. 12. 1972, zum 50. Jahrestag der Gründung der UdSSR, seiner Bestimmung übergeben. Jetzt produziert dieser Riese am Don, zugleich das größte Kernkraftwerk der Welt, eine elektrische Leistung von 1 500 MW. Das ist ebensoviel, wie nach dem Leninschen GOELRO-Plan alle Kraftwerke der Sowjetunion zusammengenommen einmal leisten sollten. Inzwischen reifen schon neue gigantische Projekte heran. Der bereits im Bau befindliche fünfte Block von Nowo-Woronesh wird allein 1000 MW_{el} liefern und damit die Entwicklung besonders wirtschaftlicher Großkraftwerke konsequent fortsetzen.

Kernkraftwerke bei uns

Die eingangs geschilderte Zunahme des internationalen Energieverbrauches kennzeichnet auch die Elektrizitätswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik. Allein auf der Grundlage fossiler Brennstoffe – hier ist es fast ausschließlich die Braunkohle – läßt sich dieses Wachstum aber nur noch begrenzte Zeit aufrechterhalten. Daher wurde bereits auf dem VI. Parteitag der SED die Forderung gestellt, im Zeitraum der Generalperspektive bis 1980 eine neue Energiequelle, d. h. die Kernenergie, zu erschließen. Mit dem Bau und der bereits am 19. 5. 1966 erfolgten Inbetriebnahme ihres ersten Kernkraftwerkes in Rheinsberg (Bild 27) am Stechlinsee hat sich die DDR in die ersten etwa zehn Staaten der Erde eingereiht, in denen die industrielle Nutzung der Kernenergie begonnen hat.

Hinsichtlich seiner technischen Konzeption arbeitet das Kernkraftwerk Rheinsberg mit einem Druckwasserreaktor und ähnelt auch in seinen wärmetechnischen Werten dem soeben besprochenen Typ von Nowo-Woronesh so sehr, daß wir uns

Bild 27. Kernkraftwerk Rheinsberg



anhand der folgenden Typenbeschreibung über die Einzelheiten leicht orientieren können.

Kernkraftwerk Rheinsberg (DDR)

Inbetriebnahme	9. 5. 1966
Leistung, thermisch	265 MW
–, elektrisch	70 MW
Brennstoff, Art	UO ₂
Anreicherung mit U 235	1 bis 2%
Brennstoff, Menge	18 t
Moderator und Kühlmittel	Wasser
Kühlmitteltemperatur	265 °C
Kühlmitteldruck	100 at
Dampfkreislauf, Temperatur	230 °C
–, Druck	32 at
Brennelemente, Anzahl	132
Abbrand der Erstbeschickung	10 MWd/kg U
Reaktordruckgefäß, Höhe	18,7 m
–, Durchmesser	2,85 m

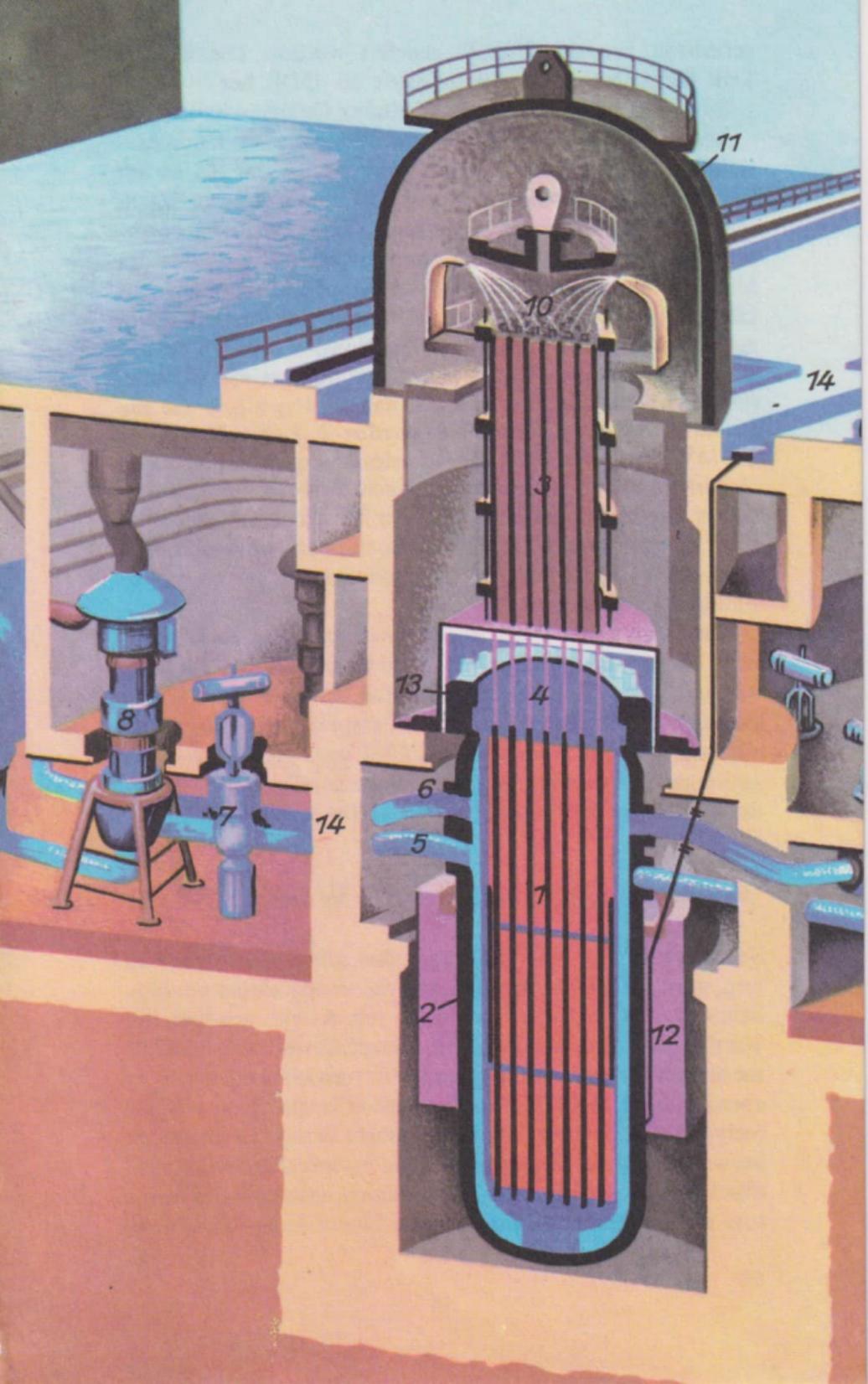
Mit der Errichtung des Kernkraftwerkes Rheinsberg wurden in der Hauptsache drei Ziele verfolgt:

1. Sammlung umfassender Betriebserfahrungen und Gewinnung ausreichender Grundlagen zum Bau weiterer Kernkraftwerke,
2. Versuche zur Ermittlung der Leistungsgrenzen der Gesamtanlage sowie der installierten Einzelausrüstungen,
3. Ausbildung von Kadern für weitere in der DDR zu errichtende Kernkraftwerke.

Das Werk wurde in kameradschaftlicher Zusammenarbeit sowjetischer Spezialisten und Fachleuten der DDR erbaut, wie auch die wichtigsten Teile, z. B. der Reaktor und der Turbo-

Bild 28. Schnitt durch den Druckwasserreaktor WWER 440 des Kernkraftwerkes „Bruno Leuschner“

1 - Reaktorkern, 2 - Reaktordruckgefäß, 3 - Antriebe für Steuer- und Sicherheitsstäbe, 4 - Antriebsstangen, 5 - Wassereintrittsleitung, 6 - Wasseraustrittsleitung, 7 - Hauptabsperrschieber, 8 - Hauptumwälzpumpe, 9 - Dampferzeuger, 10 - elektrische Zuleitungen, 11 - Schutzhaube, 12 - biologischer Schild, 13 - Reaktordeckel, 14 - Betonabschirmung



generator, von der UdSSR geliefert wurden. Die übrigen Teile der Anlage stellte die Industrie der DDR her.

Eine noch höhere Stufe sozialistischer Gemeinschaftsarbeit – sowohl in technischer als auch in ökonomischer Hinsicht – stellt das Kernkraftwerk »Bruno Leuschner« dar. Es ist am Südufer des Greifswalder Boddens bei Lubmin gelegen, dessen reichliches Kühlwasserangebot auch für die weiteren vorgesehenen Baustufen ausreicht, ohne daß die aus Gründen des Umweltschutzes noch zugebilligte Temperaturerhöhung um ein Grad ausgeschöpft wird. Es handelt sich wiederum um einen Druckwasserreaktor vom Typ Nowo-Woronesh, womit auch die technischen Daten weitgehend mit den soeben angeführten übereinstimmen, mit Ausnahme derjenigen, die die Leistung betreffen; denn hier werden 2 Turbosätze zu je 220 MW_{el} betrieben (Bild 28). Oberstes Prinzip beim Bau waren Sicherheit und Strahlenschutz. Nach Berechnungen sowjetischer Ingenieure entfallen 70% der Kosten auf Sicherheits-einrichtungen, von denen die meisten doppelt vorhanden sind. Mehrere tausend Meß- und Sicherheitskanäle sorgen für die ständige Kontrolle des Betriebes.

Aber auch dieses Werk ist nur einer der ersten Schritte auf dem Wege zum langfristigen Strukturwandel der Energiewirtschaft der DDR. Vorgesehen sind bereits weitere Werke gleich großer Leistung. Ungeahnte Perspektiven eröffnen sich auf noch höherer Ebene, indem 1972 vom RGW die internationale Wirtschaftsvereinigung »Interatomenergo« gegründet wurde, der acht sozialistische Staaten angehören.

Woanders wird auch nur mit Wasser gekocht

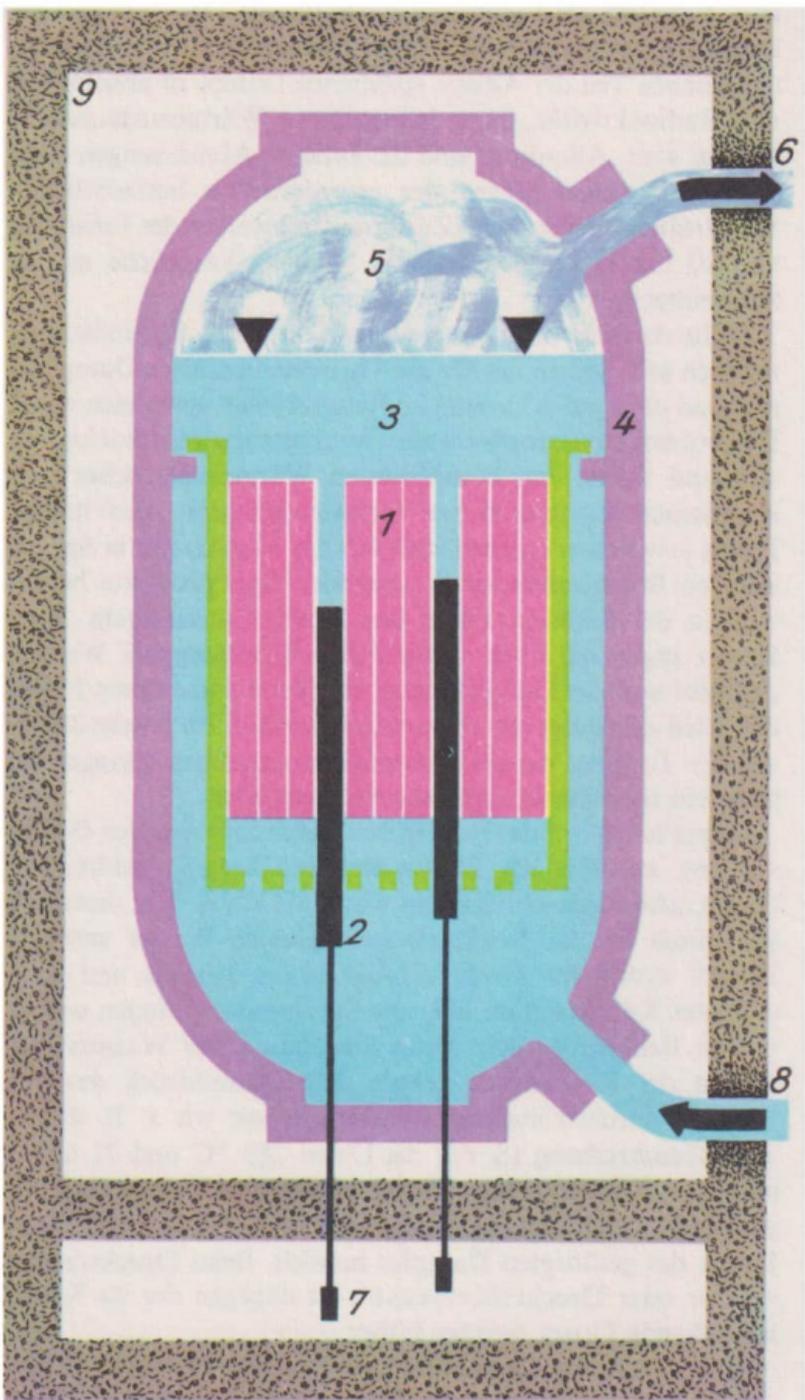
Sehen wir einmal ganz großzügig über alle Einzelheiten hinweg, so ist ein Kernkraftwerk nicht viel anders als ein gewöhnliches Dampfkraftwerk, das nicht mit Kohle, sondern mit Uran geheizt wird. In ununterbrochenem Strom quillt die Wärme aus den Brennstoffstäben und wird vom kühlenden Wasser ebensoschnell abgeführt. In den soeben besprochenen Reaktortypen steht es unter besonders hohem Druck. Er übersteigt bei weitem den der Wassertemperatur entsprechenden Dampfdruck, um die Bildung von Wasserdampf innerhalb des Reaktors mit Sicherheit zu unterbinden. Damit kann das Wasser

seine Funktion als Kühlmittel voll entfalten. Das Volumen des Druckgefäßes bleibt relativ klein, und der in den maschinentechnischen Teil der Anlage strömende Dampf ist absolut frei von Radioaktivität, da er in separaten Wärmeaustauschern erzeugt wird. Allerdings sind die äußeren Abmessungen eines solchen Reaktors wegen der erforderlichen beträchtlichen Wandstärke begrenzt. Das Zusammenschweißen der Teilstücke von 10 bis 12 cm Dicke stellt höchste Ansprüche an die Schweißtechnik.

Sollte da nicht noch ein weiterer Schritt der Vereinfachung möglich sein, indem der für die Turbinen benötigte Dampf direkt und ohne jeden Umweg im Reaktorgefäß gewonnen wird? Das brächte eine entscheidende Herabsetzung des Druckes mit sich und würde den komplizierten Wärmeaustauscher mit samt seinen unvermeidlichen Verlusten ersparen. Auch hat die Praxis inzwischen ergeben, daß sich die ohnehin nur in Spuren aus den Brennelementen austretenden Spaltprodukte bevorzugt in der flüssigen Phase des Wassers ansammeln. Zum Schutz gegen die noch verbleibende Strahlung des Wasserdampfes muß die Dampfleitung zur Turbine und deren Hochdruckteil allerdings gut abgeschirmt werden. Im Niederdruckteil der Turbine, wo die Dampfdichte erheblich geringer ist, kann ein besonderer Strahlenschutz entfallen.

Damit haben wir das Prinzip des *Siedewasserreaktors (SWR)* vor uns, ein Typ, der in den letzten Jahren in zahlreichen Großkraftwerken verwirklicht wurde (Bild 29). Der unmittelbar durch das im Reaktorkessel siedende Wasser erzeugte Dampf strömt im *Direktkreislauf* in die Turbine und nach erfolgter Kondensation über die Speisewasserpumpen wieder in den Reaktor zurück. Beim Siedepunkt des Wassers entspricht der Kesseldruck gerade dem Dampfdruck des den Reaktor durchströmenden Wassers. Lesen wir z. B. in der Typenbeschreibung (S. 68) die Daten 285 °C und 71 at, so können wir anhand einer Dampftabelle ohne weiteres bestätigen, daß es sich um den Siedepunkt und den dazugehörigen Druck des gesättigten Dampfes handelt. Beim Druckwasserreaktor oder Druckröhrenreaktor ist dagegen der im Kessel herrschende Druck weitaus höher.

Übrigens stellen die abkürzenden Bezeichnungen DWR und SWR heute nicht immer die richtigen Unterscheidungsmerkmale beider Reaktortypen heraus. Einerseits haben wir soeben



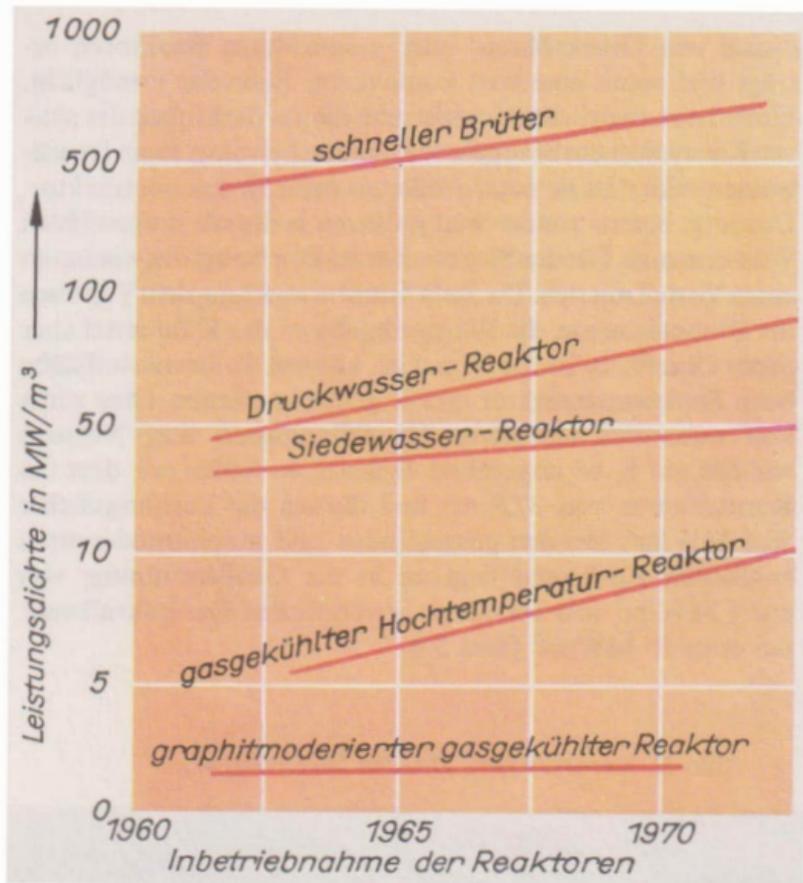


Bild 30. Entwicklung der Leistungsdichte (bezogen auf das Reaktorvolumen) verschiedener Reaktortypen

festgestellt, daß auch im SWR das Wasser unter Druck, und zwar dem Sättigungsdruck des Dampfes, steht, und andererseits läßt man auch in hochbelasteten Kanälen eines modernen DWR das Sieden an der Oberfläche einzelner Brennelemente zu.

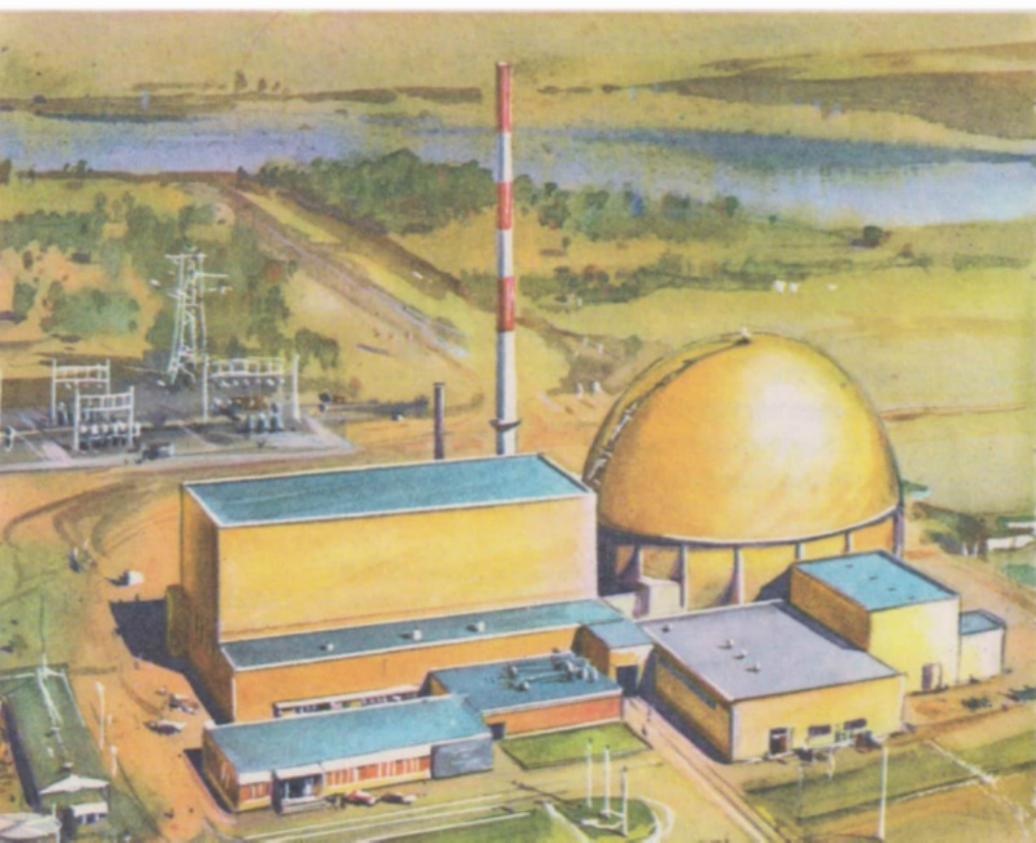
Sehen wir uns die technischen Daten moderner Druckwasser- und Siedewasserreaktoren genauer an, so fällt vor allem deren hohe *Leistungsdichte* auf, die ein Mehrfaches der Leistungs-

Bild 29. Schema des Siedewasserreaktors (SWR)

- 1 - Brennelemente, 2 - Steuerstäbe, 3 - Wasser, 4 - Druckbehälter,
- 5 - Dampf, 6 - zur Turbine, 7 - Steuerstabantrieb, 8 - Speisewasser,
- 9 - Abschirmung

dichte von Druckröhren- oder gasgekühlten Reaktoren be-
trägt und somit eine weit kompaktere Bauweise ermöglicht.
Unter Leistungsdichte versteht man die auf die Einheit des akti-
ven Kernvolumens bezogene thermische Leistung. Beim Druck-
wasserreaktor ist sie noch größer als beim Siedewasserreaktor.
Das folgt bereits aus der weit größeren je Stunde umgewälzten
Wassermenge. Für den Siedewasserreaktor bringt das wiederum
einen Vorteil mit sich. Da die Wärmeentwicklung dem Volumen
der Brennelemente, die Wärmeabgabe an das Kühlmittel aber
deren Oberfläche proportional ist, können die Brennstoffstäbe
beim Siedewasserreaktor dicker gemacht werden. Dies wirkt
sich wesentlich auf deren Herstellungspreis aus. Nehmen
wir das auf S. 68 angeführte Beispiel, so finden wir dort ein
Kernvolumen von $37,8 \text{ m}^3$ und daraus die Leistungsdichte
 $50,6 \text{ MW/m}^3$. Bei den gasgekühlten und graphitmoderierten
englischen Reaktoren liegt sie in der Größenordnung von
nur 1 MW/m^3 und bei einem gewöhnlichen Dampfkraftwerk
um etwa 10 MW/m^3 (Bild 30).

Bild 31. Kernkraftwerk Dresden bei Chikago



Vergleich einiger technischer Daten von Druckwasser- (DWR) und Siedewasserreaktoren (SWR) (bei einer angenommenen Leistung von 2000 MW_{th})

	DWR	SWR
Reaktordruck	160 at	70 at
Kühlmitteltemperatur	300 °C	280 °C
Dampfdruck vor der Turbine	52 at	67 at
Kühlwasser-Umwälzmenge	48000 t/h	28000 t/h
Wärmeaufnahme des Kühlmittels	37 kcal/kg	60 kcal/kg
Leistungsdichte des Reaktorkerns	85 MW/m ³	50 MW/m ³
Leistungsdichte des Brennstoffs	30 MW/t	22 MW/t
Brennstabdurchmesser	10,5 mm	14,3 mm

Alle am Aufbau eines Reaktors beteiligten Werkstoffe müssen daher weit höheren wärmetechnischen Beanspruchungen gewachsen sein, als es im Kraftwerksbau von ehemals notwendig war. Dazu kommen noch die mannigfachen durch die starke radioaktive Strahlung hervorgerufenen Veränderungen. Nur eine auf dem höchsten und modernsten Stand befindliche metallurgische Industrie kann den Anforderungen gerecht werden.

Als eines der ersten Objekte mit Siedewasserreaktor entstand bereits im Jahre 1960 das Kraftwerk von Dresden, südl. von Chicago, USA (Bild 31). Es liefert die elektrische Leistung 200 MW, weicht aber hinsichtlich seines Aufbaus noch von dem auf Bild 28 skizzierten und heute allgemein üblichen Bauweise ab, insofern als der eigentliche Reaktor vollständig mit Wasser gefüllt ist. Er steht aber in direkter Verbindung mit einem zweiten Druckgefäß, einem »Dampfdom«, wo sich der Dampf getrennt ansammelt. Reaktor, Dampfkessel und alle zugehörigen Hilfseinrichtungen sind in dem auf Bild 31 besonders auffallenden kugelförmigen Schutzgehäuse untergebracht, dessen Durchmesser nicht weniger als 58 m beträgt.

Ein wesentlich moderneres Großkraftwerk dieses Typs ist das von Würgassen a. d. Weser (Bild 32). Trotz seiner gegenüber dem amerikanischen Reaktor 3fachen Leistung beträgt der Durchmesser des kugelförmigen Schutzbehälters nur 27 m. Er befindet sich im Innern des Reaktorgebäudes.



Bild 32. Kernkraftwerk Würgassen

Kernkraftwerk Würgassen a. d. Weser (BRD)

Inbetriebnahme	22. 10. 1971
Leistung, thermisch	1912 MW
–, elektrisch	670 MW
Brennstoff, Art	UO ₂
–, Menge	86 t
–, Anreicherung mit U 235	2,6%
Brennelemente, Anzahl	444
Stäbe je Element	49
Abbrand	27,5 MWd/kg U
Steuerstäbe, Anzahl	109
Absorbermaterial	B ₄ C (Borkarbid)
Moderator und Kühlmittel	Wasser
Dampf Temperatur	285 °C
Dampfdruck	71 at
Dampfdurchsatz im Kern	26 500 t/h

Dampferzeugung	3 522 t/h
Leistungsdichte	50,6 MW/m ³
Druckgefäß, Durchmesser und Höhe	5,3 m bzw. 19,8 m
–, Masse	555 t
aktiver Kern, Durchmesser und Höhe	3,63 m bzw. 3,66 m
Sicherheitsbehälter, Durchmesser	27 m

Reaktoren auf hoher See

Zum Antrieb von Landfahrzeugen sind Kernreaktoren heute noch viel zu schwer und auch noch nicht einfach genug. Sie erweisen ihre Rentabilität erst im Bereich hoher und höchster Leistungen. Damit eignen sie sich aber gerade für Schiffe mit großer Tonnage. Diese sind auch ohne weiteres in der Lage, die wegen der notwendigen Abschirmung sehr schweren Reaktoren aufzunehmen und gewinnen dabei gleichzeitig beträchtlich an Laderaum, da sie keine Kohle oder Öl mitzuführen brauchen.

Das erste Überwasserschiff der Welt, das ausschließlich mit Kernenergie angetrieben wird, durchpflügt seit September 1959 die Regionen des nördlichen Eismeer. Es ist der sowjetische Eisbrecher »Lenin« (Bild 33). Mit seiner Wasserverdrängung von 16 000 t trägt er Reaktoren von zusammen 3 000 t in seinem Rumpf. Er kann drei Jahre lang auf Fahrt bleiben, ohne den Kernbrennstoff zu erneuern. Seine Aufgabe ist vor allem, die nordwestlichen Häfen der Sowjetunion eisfrei zu halten.

Das Schiff hat drei Druckwasserreaktoren, von denen ständig einer in Reserve ist. Sie liefern 44 000 PS an die drei Schiffsschrauben. Mit einem einzelnen Reaktor kann er noch mit halber Fahrt laufen. Die weiteren Daten ersehen wir aus der folgenden Übersicht.

Eisbrecher »Lenin« (UdSSR)

Inbetriebnahme	September 1959
Länge	134 m
Breite	27,6 m
Wasserverdrängung	16 000 t
Geschwindigkeit	18 Knoten (sm/h)
Reaktoren (DWR), Anzahl	3

Leistung, thermisch	90 MW
– an den Wellen	32,5 MW bzw. 44000 PS
Brennstoff, Art	UO ₂
–, Anreicherung mit U 235	5%
Abbrand	10 MWd/kg U
Moderator, Kühlung	Wasser
Dampftemperatur	310 °C
Dampfdruck	200 at
Dampfdurchsatz	204 t/h
Masse der Reaktoren	3020 t
Masse der Maschinenanlage	2750 t

Bild 33. Eisbrecher » Lenin «



Auch der zweite sowjetische Eisbrecher »Arktika« hat schon die ersten Probefahrten hinter sich. Der besonders vervollkommnete Strahlenschutz ist so konstruiert, daß keinerlei radioaktiver Dampf ins Meerwasser gelangen und sich die Mannschaft in allen Räumen des Schiffes frei bewegen kann. Ohne Vergrößerung des Schiffes konnten zusätzliche Ballasttanks eingebaut werden, mit denen sich die Lage des Schiffes beim Eisbrechen verändern läßt.

Im übrigen ist man noch dabei, Erfahrungen mit kernkraftgetriebenen Schiffen zu sammeln. 85 Millionen Mark hat der Bau des amerikanischen 20000-t-Frachters »Savannah« gekostet. Nach kaum zehnjähriger Betriebszeit mußte er wieder aus dem Dienst gezogen werden. Ebenfalls ein Zuschußobjekt ist der Erztransporter »Otto Hahn« (BRD), der seit 1968 im Dienst ist. Er hat einen Druckwasserreaktor und kostete 53 Millionen Mark. Bis jetzt sieht es so aus, als ob der Antrieb mit Kernenergie sich nur bei ganz großen Einheiten wirklich rentieren wird.

Von ganz anderen Gesichtspunkten her ist der Bau kernkraftgetriebener Unterseeboote und Flugzeugträger bestimmt. Sie warten zwar mit recht stolzen Leistungen auf. Beispielsweise durchlief im Jahr 1958 das erste amerikanische Atom-U-Boot »Nautilus« – ohne ein einziges Mal aufzutauchen und z. T. unter dem ewigen Eis des Nordpols – die Route Pearl Harbour-Island. Zwei Jahre später umrundete das Schwesterschiff »Triton« in 24 Tagen auf 67000 km langer Nonstopfahrt unter Wasser die Erde. Nicht geringere Leistungen im Dienste der arktischen Forschung sind auch von sowjetischen U-Booten bekannt geworden. Um so bedenklicher stimmen aber die mit Langstreckenraketen bestückten US-amerikanischen Atom-U-Boote, die als rein militärische Objekte unter dem Spiegel der Ozeane kreuzen. Denken wir daher an die Mahnung Otto Hahns:

»Möchten die ungeheuren Möglichkeiten, die mit der Verwertung der Kernumwandlung verbunden sind, zum Segen der Menschheit und nicht zu ihrer Vernichtung führen!«

Wirtschaftlich und sicher

Die Heizkraft des Kernbrennstoffs

Rein technisch gesehen, ist der Betrieb eines Kohlekraftwerkes viel weniger problematisch. In unaufhörlichem Fluß wandert immer neue Kohle in die Feuerung, während zugleich die Asche entfernt wird. Eine über lange Zeit hinweg kontinuierliche Energieproduktion ist gesichert. Anders steht es mit den Brennelementen eines Kernkraftwerkes. Die Konzentration an spaltfähigem Material nimmt vom ersten Augenblick an laufend ab, und die Verschlackung, worunter man die sich anhäufenden Spaltprodukte versteht, nimmt gleichzeitig zu. Da aber der Vermehrungsfaktor auch am Anfang nicht größer als 1,000 sein darf, würde der Reaktor schon nach kurzer Zeit stillstehen. Ein allzu häufiges Auswechseln und Regenerieren der Brennstoffelemente verbietet sich aber, da diese Arbeiten sehr zeitraubend und kostspielig sind und immer einen mehrwöchigen Stillstand der ganzen Anlage nach sich ziehen.

Der Ausweg besteht darin, dem Reaktor von Anfang an eine beträchtliche *Reaktivitätsreserve* mitzugeben. Diese ist wiederum dadurch begrenzt, daß der Reaktor im Gefahrenfall jederzeit sicher abschaltbar sein muß. Nach allgemein üblicher Regel muß das auch dann noch gewährleistet sein, wenn der wirksamste Steuerstab dabei versagen sollte.

Unter *Reaktivität* versteht man im allgemeinen den über 1 hinausgehenden Betrag des Vermehrungsfaktors k . Im typischen Fall eines Siedewasserreaktors ist z. B. im kalten Zustand $k = 1,26$ und im heißen Zustand $k = 1,20$. Die hiermit gegebene beträchtliche Reaktivitätsreserve ist durch besondere Kompensationsstäbe oder -bleche und die am Anfang voll

eingefahrenen Steuerstäbe abgebunden. In dem Maße, wie die Reaktivität im laufenden Betrieb abnimmt, werden diese dann nach und nach aus dem Reaktorkern herausgezogen, bis aus den Brennelementen nichts mehr herauszuholen ist.

Wie weit nun der eingesetzte Kernbrennstoff ausgenutzt werden kann, ist aus der Höhe des *Abbrandes* ersichtlich. Hierunter versteht man die Energiemenge, die 1 kg des eingesetzten Brennstoffs zu liefern vermag, bis er ausgewechselt werden muß. Der Abbrand wird ausgedrückt in Megawatt-Tagen pro Kilogramm (MWd/kg U). Da 1 MW gleich 1000 kW ist und 1 Tag 24 Stunden hat, gilt die Beziehung: 1 MWd = 24000 kWh.

Natürliches Uranmetall gestattet einen Abbrand bis zu 3 MWd/kg U. Weit mehr aber kann mit angereichertem Brennstoff gewonnen werden. Bei einem modernen Kernkraftwerk rechnet man mit 25 bis 30 MWd/kg U, also etwa 700000 kWh je Kilogramm Uran. Was aber bedeutet diese Zahl? Wir können sie mit dem Energiebetrag vergleichen, der bei der Spaltung von 1 kg reinem Uran 235 zu erwarten ist. Auf S. 26 fanden wir 20 Mill. kWh/kg U 235. Da der Brennstoff etwa 1/30 davon hergibt, könnten wir hieraus auf einen Gehalt an U 235 von etwa 3% schließen. Die Rechnung stimmt allerdings nicht genau. Das im Brennstoff enthaltene U 235 wird nämlich nicht vollständig abgebaut, sondern bei einer Anreicherung von z. B. 3% nur bis auf einen Rest von 1%.

Die hier genannte Höhe des Abbrandes entspricht ungefähr einem wirtschaftlichen Optimum. Ein kleinerer Abbrand, bedingt durch schwächere Anreicherung, würde die Benutzungsdauer der in der Herstellung sehr teuren Brennstoffelemente verkürzen und auch häufiges Auswechseln notwendig machen. Ein höherer Abbrand führt wiederum zu unnötiger Verteuerung des Brennstoffs, da die Anreicherungskosten nicht linear, sondern progressiv mit der Anreicherung anwachsen. Eine zu lange Lebensdauer der Brennelemente vergrößert auch deren Anfälligkeit gegen Korrosion, Strahlenschäden und den Druck der sich bildenden gasförmigen Spaltprodukte.

In welcher Weise sich die Zusammensetzung des Kernbrennstoffs mit zunehmender Betriebsdauer verändert, ersehen wir aus Bild 34. Es stellt die Konzentration des U 235 im natürlichen Uran in Abhängigkeit vom Abbrand dar. Unter Abbrand ist dabei die laufend entnommene Energiemenge zu verstehen.

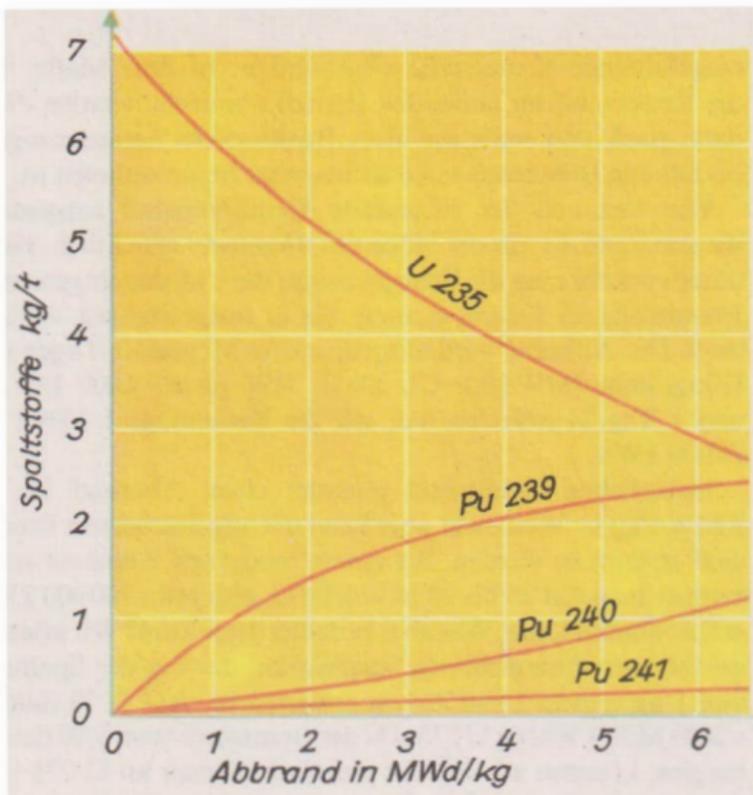
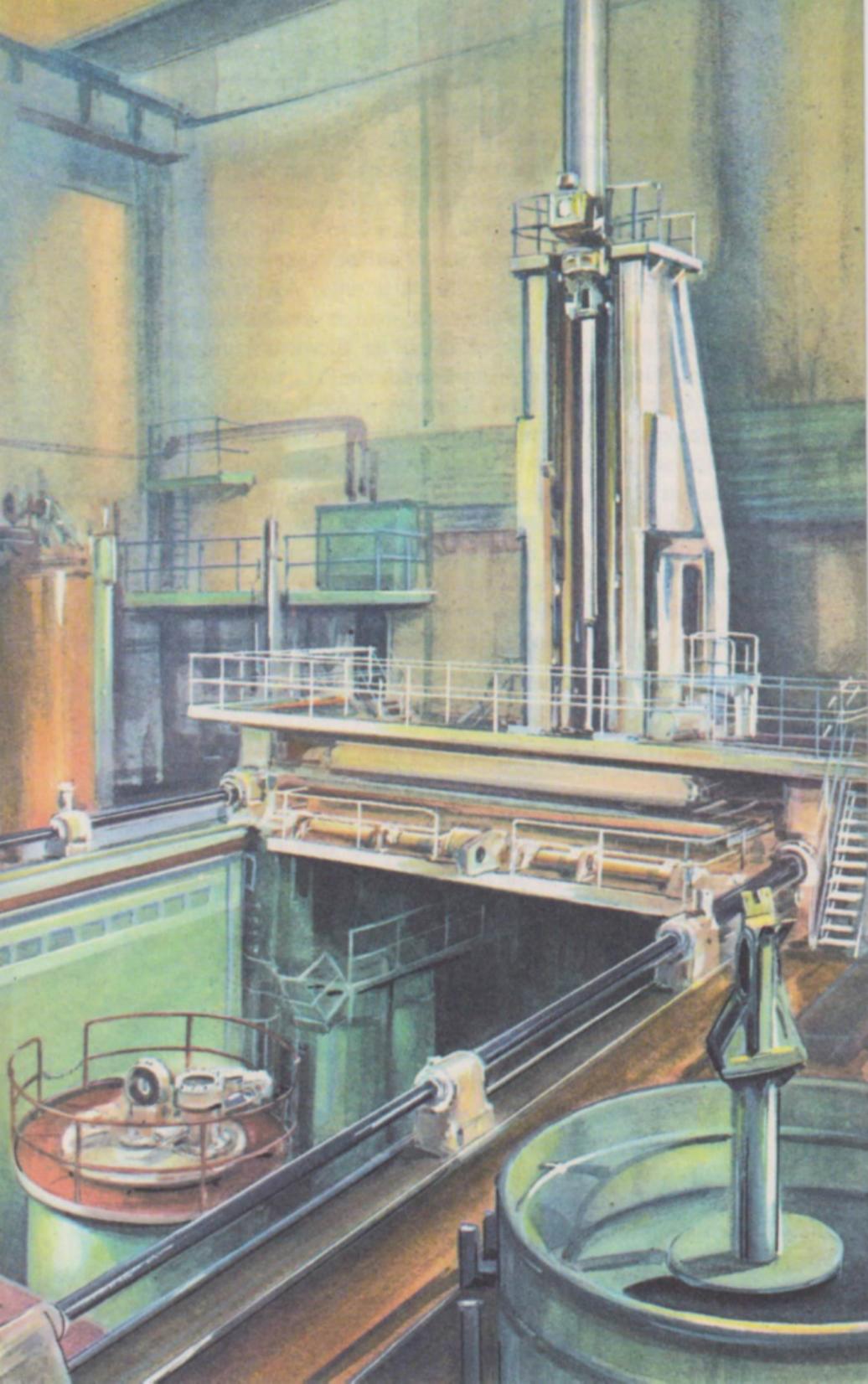


Bild 34. Die Konzentration der Spaltstoffe U 235 und Pu 239 in Abhängigkeit vom Abbrand in einem thermischen Reaktor mit Natururan

Der Gehalt an U 235 nimmt aber langsamer ab, da das gebildete Plutonium 239 in zunehmendem Maße an der Spaltung teilnimmt. Die Menge des Pu 239 wächst dabei so lange, bis sich Neubildung und Verbrauch die Waage halten. Die noch nebenher entstehenden Isotope Pu 240 und 241 spielen in diesem Zusammenhang keine besondere Rolle.

Mit dem Rückgang der Reaktivität müßte zwangsläufig auch die Leistung des Reaktors abnehmen. Um das zu verhindern, treten jetzt die Steuerstäbe in Aktion. Sind sie am Ende voll ausgefahren, so bleibt nichts anderes übrig, als die Reaktivität des Reaktorkerns wieder aufzufrischen. Neue Brennelemente müssen zugeladen und verbrauchte ausgeladen werden (Bild 35). Hierbei heißt es aber, mit dem kostbaren Brennstoff

Bild 35. Lademaschine im Kernkraftwerk Rheinsberg



so sparsam wie möglich umzugehen. Die Brennstoffkosten für ein 600 MW_{e1}-Kraftwerk belaufen sich immerhin auf etwa 25 Millionen Mark im Jahr!

Eine besondere Aufgabe entsteht dabei dadurch, daß der Ausbrand der Elemente nicht gleichmäßig vor sich geht. In der Mittelzone des Reaktorkerns, wo die Leistungsdichte am größten ist, sind sie am stärksten erschöpft. Nur diese werden vollständig entfernt und die weiter außen liegenden, noch nicht völlig verbrauchten, in die Mitte gesetzt. Allein die äußere Ringzone wird mit frischen Elementen beschickt. Um bei großen Reaktoren aber nicht zuviel Elemente umladen zu müssen, wird häufig nach einem anderen Programm verfahren. Die stärker verbrauchten Elemente werden gleichmäßig über den ganzen Kern verteilt, und nur die vollständig erschöpften werden ausgeladen. Auf diese Weise stellt sich im Laufe der Jahre ein *Gleichgewichtskern* mit einer bestimmten mittleren Reaktivität her, die natürlich niedriger ist als die des *Erstkerns*. All das wird nach Möglichkeit so aufeinander abgestimmt, daß die Beschickungsperiode gerade ein Kalenderjahr beträgt und die Arbeiten dann vorgenommen werden, wenn der saisonbedingte Energiebedarf am niedrigsten ist.

Gewollte und unerwünschte Vergiftungen

Die wichtigste Eigenschaft der Steuerstäbe ist die Gründlichkeit, mit der sie einer Kettenreaktion den Garaus machen können. Ähnlich wie die Sicherungen in einem Stromnetz erfüllen sie ihre Aufgabe bei der Schnellabschaltung des Reaktorsystems im Gefahrenfall. Das allein erfordert schon umfangreiche technische Hilfseinrichtungen. Mit der weiteren Aufgabe, die für den Abbrand benötigte Reaktivitätsreserve zu binden und im laufenden Betrieb allmählich freizugeben, wird diesen Organen eine Doppelfunktion aufgebürdet. Mechanisch unabhängig von der elektromagnetisch ausgelösten und über Ventile gesteuerten hydraulischen Einschubautomatik muß noch ein langsamer, von Motoren getriebener Steuervorschub eingebaut sein. Prinzipiell und technisch ist das Problem wohl perfekt gelöst. Gleichwohl bringt diese Lösung auch einige Nachteile mit sich. An einzelnen Stellen des immerhin einige

Kubikmeter großen Reaktorkerns treten unerwünschte Leistungsüberhöhungen auf. Man hat sich daher überlegt, welche anderen Wege es noch gibt, die langsamen und örtlich unterschiedlichen Reaktivitätsänderungen unter Kontrolle zu bringen.

Die Grundidee ist wieder einmal so einfach wie das berühmte Ei des Columbus. Das neutronenabsorbierende Mittel, wie z. B. Bor 10, kann dem Brennstoff von Anfang an mitgegeben werden. Da die neutronenhungrigen Kerne des Bors nach dem Einfang des ersten Neutrons bereits unwirksam werden, nimmt die Konzentration dieses Absorbers laufend ab. Man spricht daher von einem *brennbaren Gift*, was natürlich nicht wörtlich zu verstehen ist. Es läßt sich dabei so einrichten, daß der Vermehrungsfaktor und damit auch die Energieproduktion genau konstant bleiben. Wird das Gift dem Kernbrennstoff beigegeben, so kann es gerade an jenen Stellen verstärkt eingesetzt werden, wo sonst Leistungsüberhöhungen zu erwarten sind. Dieses Verfahren hat sich bei Siedewasserreaktoren und gasgekühlten Systemen bewährt. Bei der *flüssigen Vergiftung* dagegen wird der Moderator mit einem wasserlöslichen Neutronenabsorber versetzt. Auf diese Weise kann bei Druckwasserreaktoren mehr als die Hälfte der Steuerstäbe und zugehörigen Antriebseinrichtungen eingespart werden. An ihre Stelle tritt eine Regeleinrichtung, die über Dosierungspumpen je nach Bedarf Giftlösung oder reines Wasser in Umlauf setzt.

Von der Vielzahl weiterer geeigneter Giftstoffe sei nur noch das interessante Dysprosium 160 erwähnt. Es ist ein wahrer Neutronenvielfraß und brennt nur sehr langsam ab. In einer Kette von nicht weniger als sieben Gliedern entsteht nach jedem Neutroneneinfang ein abermals absorbierendes Nuklid.

Etwas völlig anderes aber hat es mit einer Vergiftung des Reaktors auf sich, die durchaus unerwünscht ist. Sie rührt von Spaltprodukten her, die z. T. Neutronen stark absorbieren und die Radioaktivität in produktiver Weise herabsetzen. Kostbarer Kernbrennstoff geht verloren, um sie dennoch aufrecht zu erhalten. Der Hauptanteil dieses Vorgangs rührt vom Edelgas Xenon 135 her, das zur berüchtigten *Xenonvergiftung* des Reaktors führt. Es entsteht durch Betazerfall aus dem mit der Halbwertszeit 6,7 Stunden zerfallenden Spaltprodukt Jod 135.

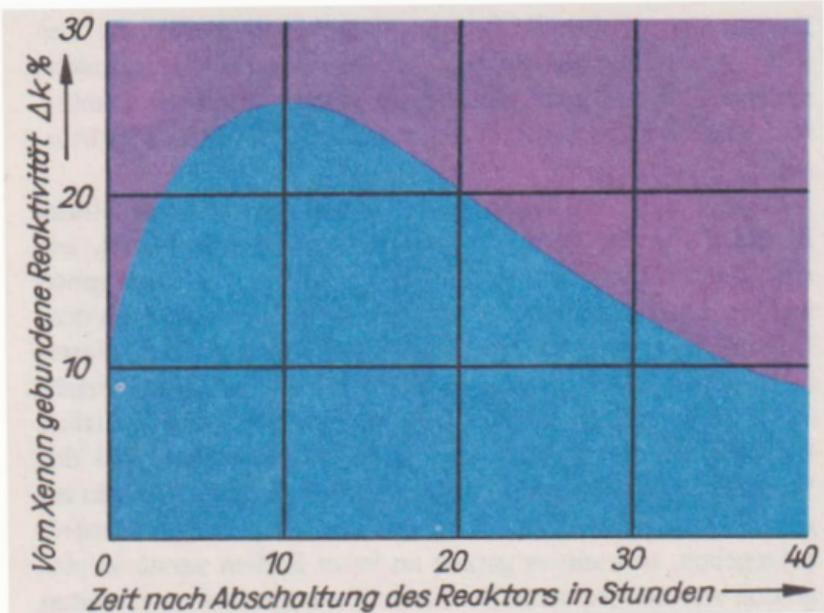
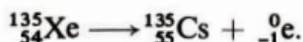
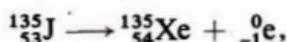


Bild 36. Verlauf der Xenonvergiftung nach Abschaltung eines Reaktors

Mit der Halbwertszeit 9,2 Stunden wandelt es sich seinerseits durch Betazerfall in Cäsium 135 um:



Hieraus ersehen wir, daß Xenon ein wenig langsamer verschwindet, als es vom Jod nachgeliefert wird. Im Laufe der Zeit sammelt sich bei konstanter Leistung daher eine bestimmte Gleichgewichtsmenge an, die sich fortan nicht mehr ändert. Da nun das Xenon für thermische Neutronen den enormen Wirkungsquerschnitt 3,5 Mill. barn hat, bindet es einen nicht unbeträchtlichen Teil der vorhandenen Reaktivitätsreserve, indem es Neutronen absorbiert und dabei in ein Nuklid von geringem Wirkungsquerschnitt übergeht.

Wenn jetzt der Reaktor aus irgendwelchen Gründen abgeschaltet werden muß, geht die Xenonproduktion aus dem einmal vorhandenen Jod noch viele Stunden lang weiter. Da jetzt aber keine freien Neutronen mehr vorhanden sind, steigt die Xenonmenge weit über die im Gleichgewicht bestehende Kon-

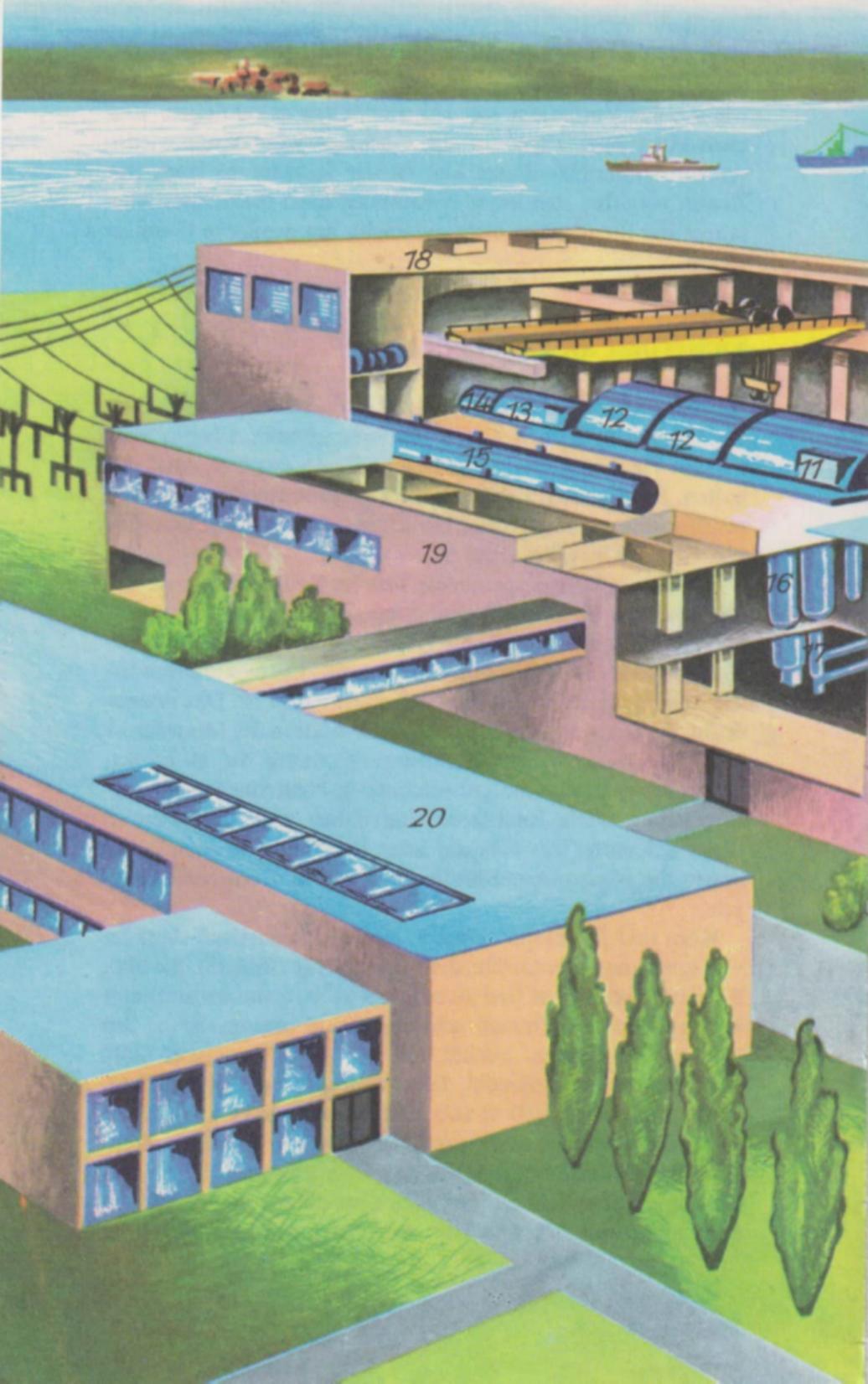
zentration an. Nach etwa zehn Stunden erreicht sie ein Maximum (Bild 36), um dann infolge des eigenen Betazerfalls ebenso wie die des Vorläufers Jod 135 allmählich abzuklingen. Erst nach etwa zwei Tagen ist die Gleichgewichtsmenge wieder erreicht. Innerhalb dieser Zeit ist der Reaktor so stark mit Xenon vergiftet, daß unter Umständen auch maximales Ausfahren der Steuerstäbe nicht ausreicht, ihn wieder in Gang zu setzen.

Sicherheit an erster Stelle

Aufbau und Verhaltensweise der Kraftwerksreaktoren haben wir hier nur in groben Zügen studieren können. Ebenso kurz müssen wir uns auch in der Beschreibung der äußeren Teile halten. Einen ersten Eindruck ihrer gegenseitigen Anordnung gewährt uns am besten der Einblick in das Innere eines modernen Kernkraftwerkes (Bild 37).

Der aktive, energispendende Teil des Reaktors, jenes komplizierte, aus Brennstoff- und Steuerstäben sowie Kontroll- und Regelorganen aufgebaute Herzstück der Anlage, bildet den *Reaktorkern*. Er wird durchspült vom wärmeabführenden Medium, das heute meist gewöhnliches Wasser ist. Das Wasser erfüllt in diesem Falle gleichzeitig die Funktion des Moderators und *Reflektors*. Dieser ist notwendig, damit die in großen Scharen aus dem Kern entweichenden Neutronen nicht verlorengehen. Viele Reaktoren sind daher noch besonders in dicke Schichten aus Graphit oder Beryllium eingepackt, an denen die Neutronen abprallen und in den Kern zurückkehren.

Kern und Reflektor stehen in einem kesselartigen Behälter von imponierender Größe, dem *Druckgefäß* (Bild 38). Bis über 5 m im Durchmesser und 20 m in der Höhe kann der mitunter mehrere hundert Tonnen schwere Koloß messen. Er ist aus bestem, mit Chrom, Nickel und Molybdän legiertem Stahl spannungsfrei geschmiedet, denn Wandung und Nähte müssen einem Druck von 100 at (bei Druckwasserreaktoren 150 at) und gleichzeitig einer Temperatur von 300 °C standhalten. Dazu hat er noch die starke, aus dem Kern kommende Gammastrahlung aufzunehmen, die seine über 10 cm dicken Wände noch mehr aufheizt. Das sind Anforderungen, die weit über



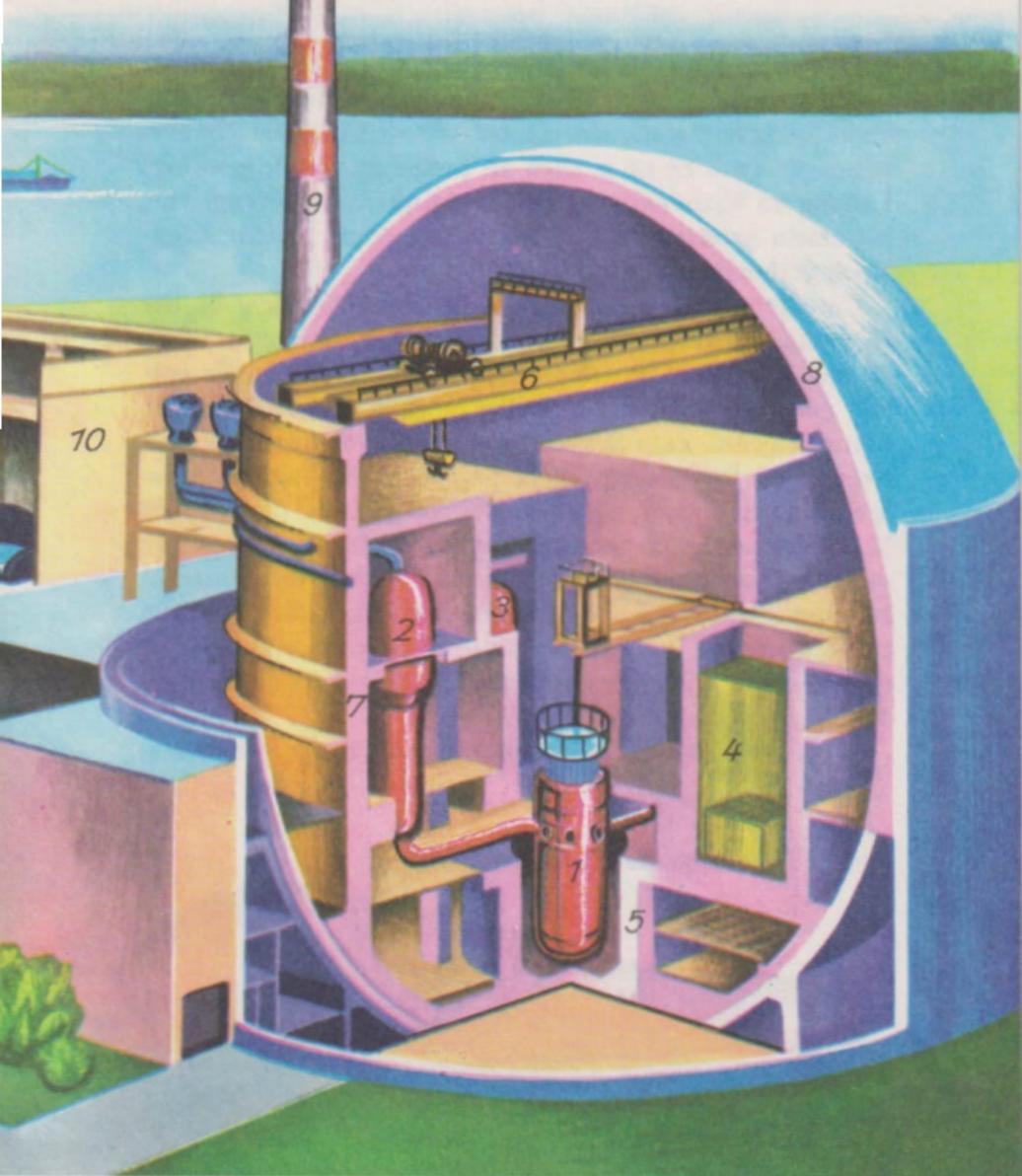


Bild 37. Gesamtanlage eines Kernkraftwerkes mit Druckwasserreaktor

1 - Reaktor, 2 - Dampferzeuger, 3 - Druckhalter, 4 - Brennelement-Lagerbecken, 5 - biologischer Schild (2 m Beton), 6 - Lademaschine, 7 - Abschirmung (1,5 m Beton), 8 - Sicherheitsbehälter (56 m Durchmesser, Stahl), 9 - Abluftkamin, 10 - Maschinenhaus, 11 - Turbine (Hochdruckteil), 12 - Turbinen (Niederdruckteil), 13 - Generator, 14 - Erregermaschine, 15 - Niederdruckvorwärmer, 16 - Hochdruckvorwärmer, 17 - Speisewasserpumpe, 18 - Transformatorenhaus, 19 - Betriebs- und Schaltanlagegebäude, 20 - Nebenanlagegebäude

das bisher im Kesselbau übliche Maß hinausgehen. Besonders streng sind daher auch die Vorschriften für die Herstellung und Überprüfung, die ein Höchstmaß an Sicherheit gewährleisten müssen. Es ist ja auch zu bedenken, welche gewaltige Ladung an Radioaktivität der Reaktorkern beherbergt, die, bei einem größeren Unfall freigesetzt, einen ganzen Landstrich verheeren könnte.

Um die zuletzt genannte Gefahr auszuschließen, ist der eigentliche Reaktor mitsamt allen aktivitätsführenden Teilen oftmals in einem *Sicherheitsbehälter* untergebracht. Er enthält auch die Räume zur Aufbewahrung der verbrauchten Brennelemente. Zum Schutz vor der Strahlung und zur Entziehung der Nachwärme stehen sie im *Brennelement-Lagerbecken* unter Wasser, natürlich nicht so eng, daß die kritische Masse erreicht wird. Die abgebrannten Elemente müssen hier mehrere Monate ablagern. Erst wenn die durch die darin enthaltenen Spaltprodukte verursachte Radioaktivität weit genug abgeklungen ist, können sie zur Aufbereitung und Wiedergewinnung des nicht verbrauchten U 235 und Pu 239 in Bleicontainern versandt werden.

In einigen neueren Kernkraftwerken besteht der Sicherheits-

Bild 38. Druckgefäß für ein Kernkraftwerk



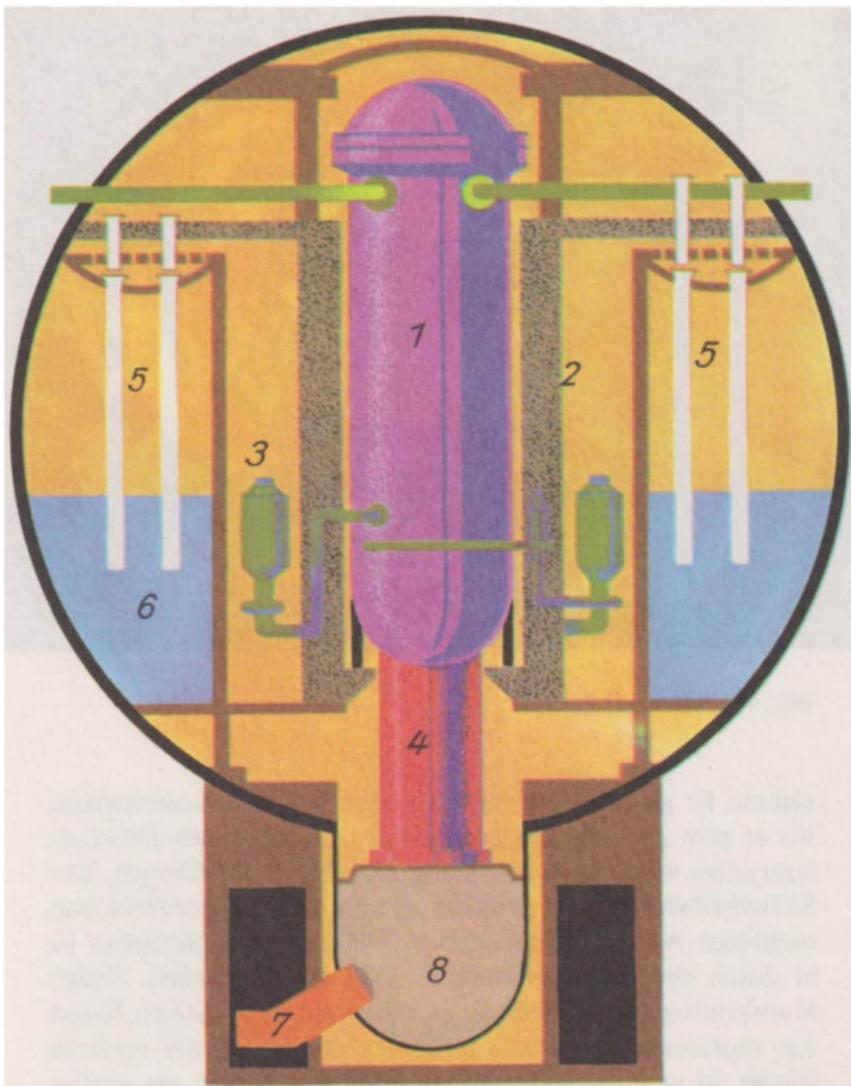


Bild 39. Sicherheitsbehälter eines Siedewasserreaktors mit Druckabbausystem

1 - Druckgefäß, 2 - biologischer Schild, 3 - Kreislumpumpe für Kühlmittelumlauf, 4 - Steuerstabantrieb, 5 - Rohre zur Ableitung entweichenden Dampfes, 6 - Wasservorlage, 7 - Schleuse, 8 - Bodenwanne

behälter (Bild 39) aus einer doppelwandigen Hohlkugel von 30 m Durchmesser. Der Druckbehälter des Reaktors ist dabei nochmals von einem System von Druckkammern umgeben, das bei einem etwaigen Unfall den entweichenden Dampf auf-

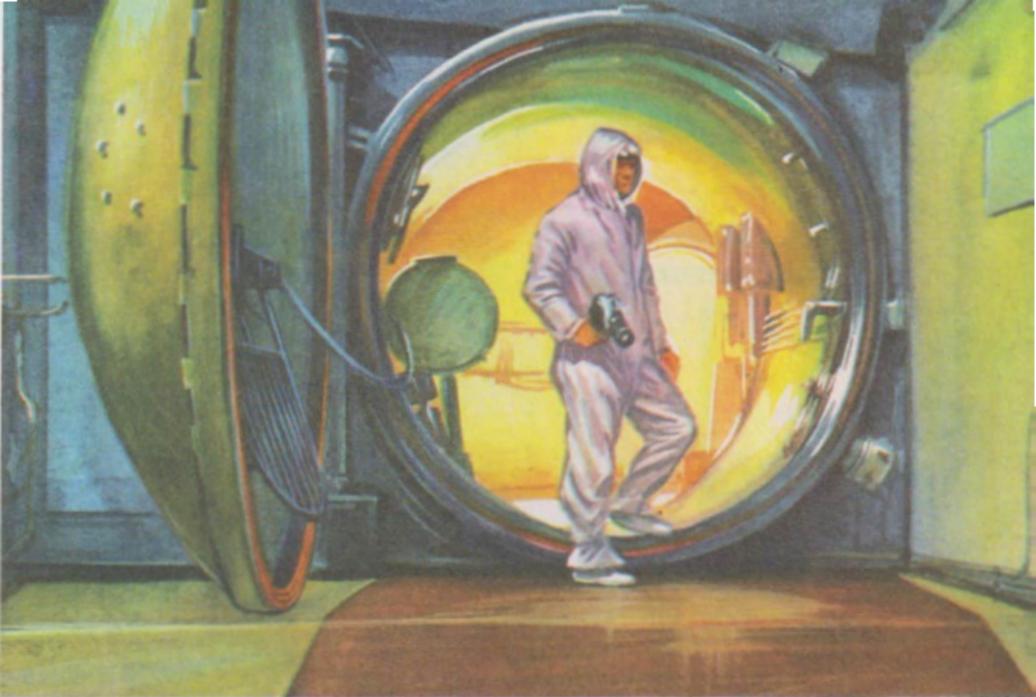


Bild 40. Personenschleuse

nimmt. Er gelangt dann durch Rohre in eine Wasservorlage, wo er zum größten Teil kondensiert. Durch dieses *Druckabbausystem* wird der gefährlichste Druckstoß abgefangen. Der Sicherheitsbehälter ist gasdicht und mit einem Überdruck von mehreren Atmosphären geprüft. Während des Betriebes ist er durch eine Personenschleuse (Bild 40) zugänglich. Vielen Kernkraftwerken verleiht er in Form einer mächtigen Kugel ein repräsentatives und markantes Aussehen, bei anderen wieder ist er äußerlich nicht zu erkennen und in ein großes Reaktorgebäude eingebaut.

Umweltgefährdung?

Wenn von der Sicherheit eines Reaktors gesprochen wird, meint man aber meist gar nicht die hohen Drücke und Temperaturen; an diese hat man sich bei den herkömmlichen Dampfkraftwerken schon längst gewöhnt und findet nichts mehr Besonderes dabei. Viel mehr Sorgen bereiten die möglicher-

weise auftretenden radioaktiven Strahlungen. Gewisse Vorstellungen einer besonderen Umweltgefährdung durch radioaktive Abgase oder gar Ideenverbindungen mit der fürchterlichen Wirkung einer Atombombe drängen sich auf. Könnte nicht durch irgendeinen Unfall oder ein verhängnisvolles Zusammentreffen unglücklicher Zufälle eine Katastrophe ausgelöst werden? Stimmt es etwa nicht, daß Kernkraftwerke immer nur in entlegenen und menschenleeren Gegenden erbaut werden, um hier kein allzu großes Risiko einzugehen?

Um es gleich vorwegzunehmen: Nichts von alledem ist zu befürchten! Kernkraftwerke gehören zu den sichersten und solidesten Energiequellen, die von Menschenhand je geschaffen wurden. Noch nicht ein einziger der vielen hundert bis zum heutigen Tage erbauten Reaktoren ist explodiert. Wegen ihres ungewöhnlich hohen Sicherheitsgrades gelten Reaktoren heute als standortunabhängig, d. h., sie können ohne Risiko auch in Großstädten und anderen Ballungszentren errichtet werden. Ihr Sicherheitsgrad soll sogar noch höher als der herkömmlicher Kraftwerke liegen, da seit Anbeginn ihrer Entwicklung besonders harte Maßstäbe hinsichtlich ihrer Betriebs- und Umweltsicherheit angelegt wurden.

Die Wirkung radioaktiver Strahlen auf lebende Organismen und vor allem auf den Menschen ist ähnlich jener, die auch von Röntgenstrahlen hervorgerufen wird. Mehr oder weniger starke, äußerst schwer oder gar nicht heilbare Verbrennungen, lebensgefährliche und lebensverkürzende Veränderungen des Blutes (z. B. Leukämie), Entstehung bösartiger Geschwülste und tiefgreifende, nicht reparable Schädigungen der Erbsubstanz sind nur einige der verhängnisvollen Folgen. Dabei kommt es wiederum darauf an, welches spezielle Organ der Strahlung ausgesetzt wird und wie groß die (in MeV ausgedrückte) Energie der einwirkenden Strahlung ist. All das gehört ins Gebiet der Strahlenbiologie und Strahlenmedizin.

Wesentlich für derartige Betrachtungen ist die Maßeinheit, mit der man die auf einen Körper einwirkende *Strahlendosis* auszudrücken pflegt. Sie wird in *rem* gemessen. (*rem* ist die Abkürzung für »roentgen equivalent man«.) Da es uns nur auf vergleichende Überlegungen ankommt, soll hier eine ausschließlich anschauliche Erklärung gegeben werden:

1 Ci Radium erzeugt in 1 Stunde auf einen im Abstand von 1 m befindlichen Körper die Strahlendosis 1 rem.

Die auf die Zeiteinheit bezogene Dosis wird als *Dosisleistung* bezeichnet, und wir können demzufolge auch sagen:

1 Ci (d. h. 1 g) Radium erzeugt im Abstand von 1 m die Dosisleistung 1 rem/h.

Zur groben Orientierung über die Wirkung radioaktiver Strahlungen mögen folgende Angaben dienen:

Erste feststellbare Veränderung an einzelnen Organen bei kurzzeitiger Bestrahlung	5 rem
Beginn von Blutveränderungen	25 rem
50 % tödliche Wirkung bei kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung	400 rem
100 % tödliche Wirkung bei kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung	600–800 rem
Gesetzlich zulässige obere Grenze für beruflich mit Strahlenquellen arbeitende Personen pro Jahr	5 rem
Natürliche Strahlenbelastung durch Umwelteinflüsse im Laufe eines Menschenlebens	10–40 rem

Stellen wir diesen Zahlen die von der Gammastrahlung im Kern eines Reaktors erzeugte Dosisleistung gegenüber, so liegt diese in der Größenordnung von 1 Mrd. rem/h! Erst jetzt können wir ermesen, welch gewaltige Aufgabe die *biologische Abschirmung* eines Reaktors zu bewältigen hat. Wenn auch schon der Reaktor selbst einen großen Teil der Strahlung absorbiert, so beträgt sie an der Außenwand des Druckbehälters immer noch mehr als 100000 rem/h. Nur ein zusätzlicher Panzer von ganz außergewöhnlicher Stärke kann ausreichenden Schutz bieten. Meist wird Schwerbeton, d. h. ein stark mit Eisen- und Bariummineralien durchmischter Beton dazu verwendet. Zugleich wirkt sein Wassergehalt auf die biologisch ebenfalls sehr gefährlichen Neutronen moderierend. Die Dicke eines solchen Betonpanzers liegt im allgemeinen bei etwa 3 m. An der Außenwand ist die Gammadosisleistung auf weniger als ein Zehntel rem/h gesunken (Bild 41).

Was der Betonmantel an Strahlung verschluckt, ist immerhin noch rund 2% der Reaktorleistung und kommt wiederum in Form von Wärme zum Vorschein. Zahlreiche mit Kühlwasser gespeiste Rohre durchziehen sein Inneres, damit er nicht zu heiß werden kann.



Bild 41. Kontrollmessung im Scaphander

Schließlich mag es noch auffallen, daß Kernkraftwerke auch einen Schornstein haben. Er raucht aber nicht und verpestet die Luft nicht mit Schwefeldioxid oder anderen giftigen Gasen. Er dient lediglich zur Abführung der Reste an radioaktiven Gasen, die sich in äußerst geringer Konzentration an einigen Stellen des Kraftwerkes ansammeln. Dabei handelt es sich unter anderem um Luft mit geringem Gehalt an Argon 41, die zwischen Druckgefäß und biologischem Strahlenschutz radioaktiv wird. Auch Abgase können aus den dampfführenden Teilen der Turbinenanlage entweichen, doch sind hier besondere Vorkehrungen getroffen, sie zu absorbieren oder so lange zurückzuhalten, bis die meist nur kurzlebigen Komponenten zerfallen sind.

Diesen und noch vielen weiteren Maßnahmen ist es zu danken, daß von einer Umweltgefährdung durch Kernreaktoren wahrlich nicht die Rede sein kann. Stichproben an modernen Kernkraftwerken ergaben in der Umgebung Dosisleistungen

um 0,005 mrem (Millirem) pro Jahr! Selbst wenn im schlimmsten Fall angenommen wird, daß 1% der Brennelemente leck geworden sind (bei einem solchen Schaden würde der Reaktor sofort stillgelegt), ergeben die Berechnungen an der Umzäunung des Kraftwerkes kaum 5 mrem pro Jahr. In einem gebirgigen Land, wie z. B. in der Schweiz, beträgt dagegen die durch den natürlichen Gehalt des Gesteins an radioaktiven Mineralien hervorgerufene Strahlenbelastung rund 200 mrem pro Jahr. Die von einem Kernkraftwerk herrührende Strahlen»gefährdung« verschwindet demgegenüber vollständig.

Es ist nicht einmal schwer, den Spieß herumzudrehen. Wie sich mit Leichtigkeit nachweisen läßt, enthält die Flugasche von Kohlekraftwerken und Eisenbahnen einen natürlichen Radiumgehalt von einigen Ci je Tonne. Die durch ein Kohlekraftwerk hervorgerufene radioaktive Verunreinigung der Umwelt kann 400mal so groß sein wie bei einem Kernkraftwerk. Das sind keine demonstrativ herausgegriffenen Einzelfälle. Sie sollen nicht dazu dienen, gegen die altbewährten Kohlekraftwerke zu Felde zu ziehen. Sie zeigen nur, daß die Kernenergie zu den saubersten Energiequellen gehört und es wirklich keinen Grund zu Befürchtungen gibt.

Was kostet der Atomstrom?

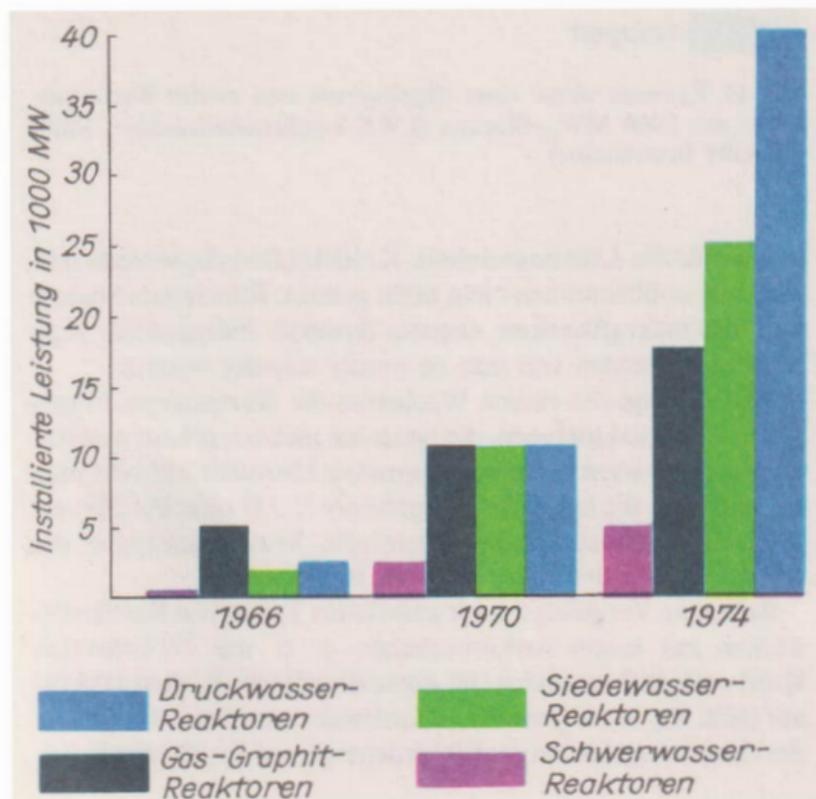
Es mag zunächst recht nahe liegen, die herkömmliche Art der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen weit billiger einzuschätzen als die aus Kernenergie. Der vom offenen Feuer umspülte Dampfkessel hat keine Geheimnisse zu verbergen und kann von jedem tüchtigen Heizer bedient werden. Ungleich komplizierter ist der Aufbau eines Kernreaktors mit all seinen Hilfseinrichtungen, und nur Menschen mit bester wissenschaftlich-technischer Qualifikation können ein solches Werk bedienen. Muß hier die produzierte Energie nicht viel teurer sein?

Von Anfang an aber waren sich alle Beteiligten darüber im klaren: In einer modernen Volkswirtschaft kann die Kernenergie nur dann eine Chance haben, wenn sie mindestens ebenso billig und rentabel ist wie die bisherigen Energiequellen. In den fünfziger Jahren unseres Jahrhunderts war es noch nicht so weit. Die ersten in England erbauten Großkraftwerke

entstanden zwar unter dem Zeichen der dort immer knapper werdenden Kohlenvorräte. Doch hätten sie nicht das einträgliche Rüstungsgeschäft mit dem Plutonium im Rücken gehabt, so wären sie auf dem Energiemarkt nicht konkurrenzfähig gewesen. Der bekannte Londoner Kernphysiker Sir Douglas Cockcroft sagte es unumwunden: »Diese Kernenergie-Pionierstationen waren ursprünglich zur Erzeugung von Plutonium für militärische Zwecke geplant mit Elektrizität als Nebenprodukt. Man erwartete nicht, daß sie wettbewerbsfähige Energielieferanten sein würden.«

Den Wendepunkt brachten erst die Jahre 1965/66. Selbst die Experten waren überrascht, als es mit den neuen Siedewasserreaktoren gelang, die Stromerzeugungskosten der Steinkohlekraftwerke zu unterbieten. Das betrifft nicht nur die laufenden Betriebsausgaben, sondern auch die Investitions-

Bild 42. Die erste Generation der Kernkraftwerke
Das Wachstum der in der Welt installierten elektrischen Leistung



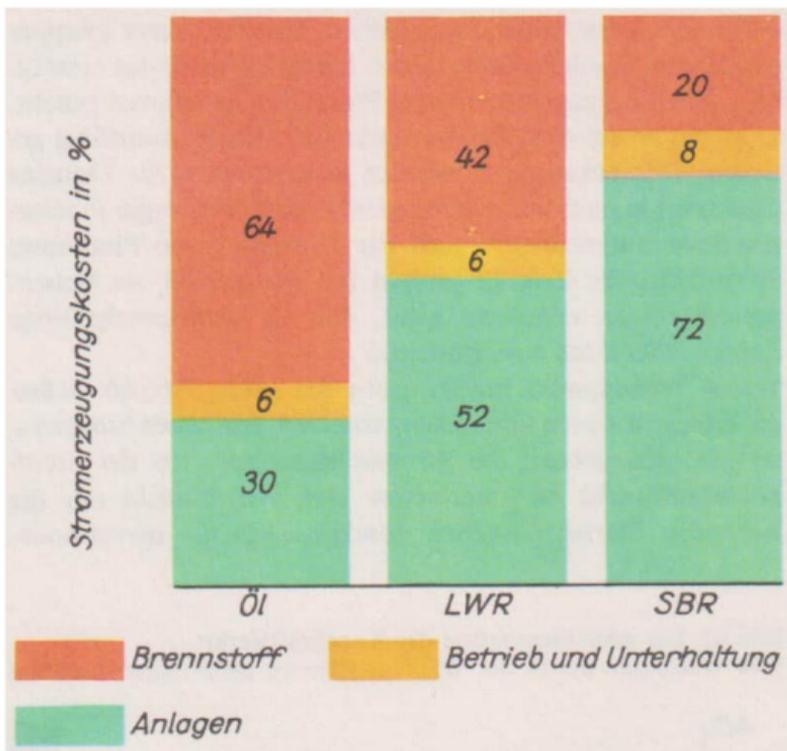


Bild 43. Kostenstruktur eines ölgefeuerten und zweier Kernkraftwerke mit 1000 MW_e-Blöcken (LWR-Leichtwasserreaktor, SBR-schneller Brutreaktor)

kosten für die Leistungseinheit. Kohlekraftwerke werden deshalb in Großbritannien nicht mehr gebaut. Rauchende Schloten von Wärmekraftwerken, ehemals Symbole industriellen Aufschwungs, werden von nun an immer seltener werden.

Bild 42 zeigt das rapide Wachstum der Kernenergie-Erzeugung jener Reaktortypen, die heute am meisten gebaut werden. Sie repräsentieren die *erste Generation*. Darunter versteht man die Anlagen, die lediglich das spaltbare U 235 oder Pu 239 verbrennen. Deutlich ist das stürmische Vorwärtstreiben der Druck- und Siedewasserreaktoren zu erkennen.

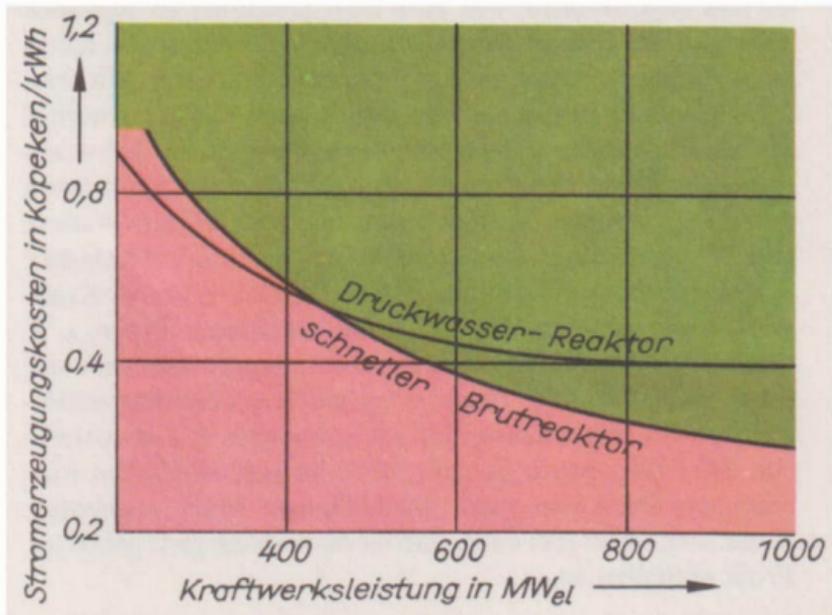
Bei einem Vergleich der verschiedenen Typen von Kernkraftwerken mit einem herkömmlichen, z. B. mit Öl beheizten Kraftwerk fällt zunächst die unterschiedliche Kostenstruktur auf (Bild 43). Im ölgefeuerten Kraftwerk entfallen zwei Drittel der Gestehungskosten der Elektroenergie auf das Heizmaterial,

während die Anlagen nur mit 30% beteiligt sind. Im Kernkraftwerk sind die Anlagen verständlicherweise wesentlich teurer, wogegen die Brennstoffkosten mit nur 20 bis 40% beteiligt sind. Das mag immer noch recht hoch erscheinen, wenn wir uns daran erinnern, welche gewaltige Energie schon in einem einzigen Kilogramm Uran 235 enthalten ist. Es ist aber zu bedenken, daß die Aufbereitung und Anreicherung des Brennstoffs sehr aufwendige technologische Prozesse voraussetzen.

Bei beiden Kraftwerksarten hängt aber der Preis für die erzeugte Kilowattstunde noch entscheidend von der Leistung des Werkes ab. Je größer sie ist, desto niedriger sind die Gestehungskosten der Kilowattstunde. Das geht besonders eindringlich aus dem nach sowjetischen Berechnungen gezeichneten Diagramm (Bild 44) hervor. Wir ersehen hieraus, daß in den sozialistischen Ländern sorgfältige Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit eine ausschlaggebende Rolle bei der Errichtung von Kernkraftwerken spielen.

Schließlich kommt es noch auf die *Benutzungsdauer* des Werkes an, die durch Reparaturen, Umladungen der Brennelemente oder unvorhergesehene Störungen beeinträchtigt wer-

Bild 44. Stromerzeugungskosten sowjetischer Kernkraftwerke *



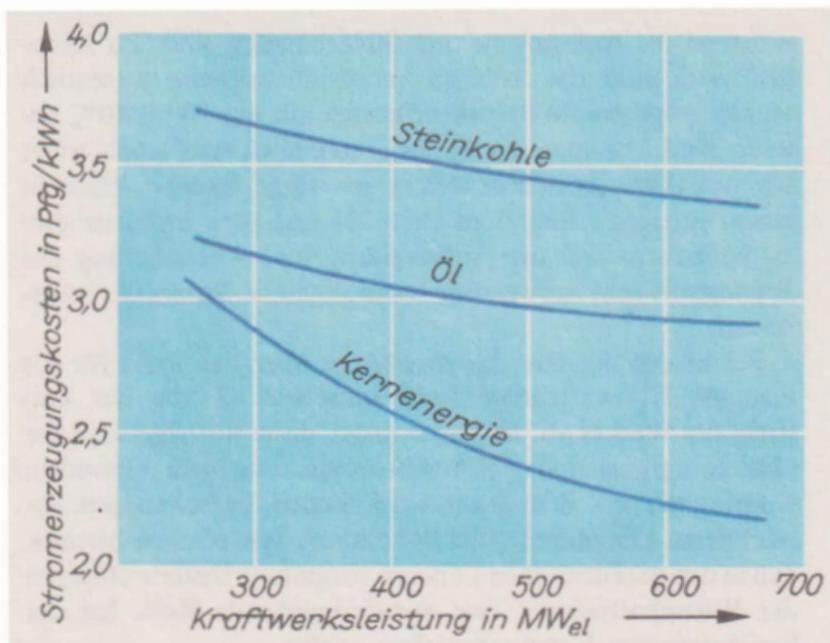


Bild 45. Stromerzeugungskosten für 1 kWh verschiedener Kraftwerke

den kann. Denn ein Kraftwerk verschlingt auch dann Geld, wenn es stillsteht. Bei Kernkraftwerken werden allgemein etwa 6 500 Nutzungsstunden im Jahr (1 Jahr = 8 760 Stunden) als real angenommen, was auch dem Schaubild 45 zugrunde gelegt wurde. Hier ist die eindeutige Überlegenheit der Kernkraft vor allem bei den großen Blöcken zu erkennen. Mit etwa 2,12 Pfennigen ist die Kilowattstunde eines Kernkraftwerkes um mehr als einen halben Pfennig billiger als die Kilowattstunde eines Ölkraftwerkes. Somit kostet der Atomstrom heute schon 20% weniger als der Strom aus ölgefeuerten Werken und 34% weniger als der Strom auf der Basis von Steinkohle! Allgemein aber geht die Tendenz zur Errichtung großer Kraftwerkblöcke mit über 600 MW_{el}. Bei bestimmten Typen, z. B. den Siedewasserreaktoren, liegen die Anlagekosten heute nur noch etwa 10% über denen eines gleich großen Steinkohlekraftwerkes. Ein schlüsselfertiges komplettes Kernkraftwerk von 600 MW_{el} wurde im Jahre 1968 im kapitalistischen Ausland zum Preis von rund 300 Millionen Mark angeboten, wobei man sicher sein kann, daß hierin noch ein ganz gehöriger Profit enthalten ist.

Die Kernkraftwerke der zweiten Generation

Kraftwerke, die sich selbst versorgen

Alle bisher betrachteten Reaktorarten verdanken ihre Rentabilität allein dem Isotop U 235. Man muß sich wundern, daß hier überhaupt von einem Nutzen gesprochen werden kann; denn nicht einmal 1 % des mühsam gewonnenen Natururans ist spaltbar. Der Rest von 99 % ist gleichsam unverdaulich, die Reaktoren der ersten Generation können nichts damit anfangen. Immerhin haben sie den Beweis erbracht, daß die Energie aus Kernkraftwerken billiger sein kann als die der Kohlekraftwerke. Im Grunde genommen aber sind sie Uranverschwender ersten Ranges. Welch gewaltigen Fortschritt brächte es dagegen mit sich, wenn es gelänge, auch das Uran 238 mit zu verbrennen! Allein die Uranvorräte würden sich mit einem Schlag um den Faktor 50 bis 100 erweitern. Wenn auch heute noch nirgends Mangel an Uran besteht, wäre dann die Versorgung mit Kernbrennstoff, zumindest für die nächsten Jahrhunderte, auch bei ungehemmtem Wachstum der Energiewirtschaft gesichert.

Theoretisch ist das hier angeschnittene Problem schon längst gelöst. Wir haben ja bereits gesehen, wie sich das Uran 238 in spaltbares Pu 239 umwandeln läßt. Man muß es nur verstehen, mit dem U 238 richtig umzugehen. Teilweise erfolgt die Umwandlung schon im gewöhnlichen Reaktor (S. 74). Das Verhältnis der gebildeten Plutoniummenge zur Menge des verbrauchten Spaltstoffes bezeichnet man dabei als *Konversionsrate* K . Bei thermischen Reaktoren liegt K zwischen 0,5 und 0,8, d. h., die Erzeugung von Pu 239 ist stets geringer als der gleichzeitige Verbrauch von U 235. Wenn dagegen mehr neuer Spaltstoff erzeugt als verbraucht und der Faktor K somit

größer als 1 wird, spricht man vom *Brüten* und nennt den Faktor K *Brutrate* oder *Brutfaktor*.

Es fragt sich nur, wie es am besten gelingen kann. Zwei Wege stehen offen. Der eine zielt dahin, die Neutronenbilanz des Grundvorganges zu verbessern. Wir erinnern uns bei dieser Gelegenheit daran, daß bei jedem Spaltakt im Durchschnitt 2,43 Neutronen frei werden. Aber von je sechs Neutronen, die sich an die Kerne des U 235 anlagern, führen nur fünf zur Spaltung und eins geht durch Absorption nutzlos verloren. Damit beträgt die *effektive Spaltneutronenzahl* nicht 2,43, sondern nur 2,1. Wir haben aber auch bemerkt, daß alle Wirkungsquerschnitte sehr stark von der Energie, d. h. der Geschwindigkeit der Neutronen abhängen. In diesem Fall tritt nun eine merkliche Erhöhung der effektiven Spaltneutronenzahl ein, wenn der Reaktor nicht mit moderierten (thermischen oder epithermischen), sondern mit ungebremsten (schnellen) Neutronen betrieben wird. Dann steigt die effektive Spaltneutronenzahl bei U 235 auf 2,23 bzw. bei Pu auf 2,7 an.

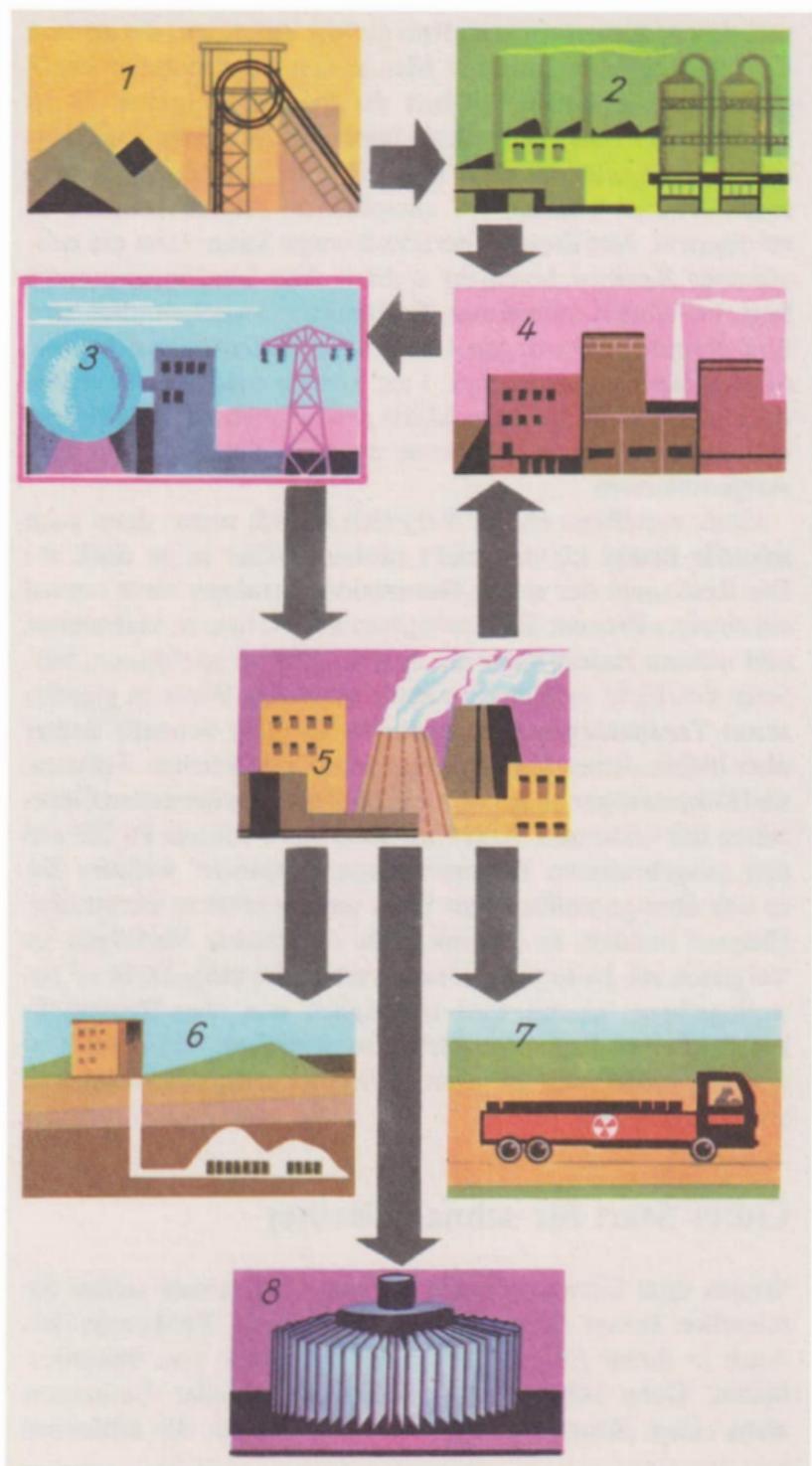
Der zweite Weg zur Erhöhung der Konversionsrate besteht darin, möglichst viele Neutronen in das Uran 238 zu schießen, ohne jedoch den übrigen Fortgang der Kettenreaktion zu gefährden. Da das U 238 schnelle Neutronen besonders stark absorbiert, ergänzen sich beide Wege in willkommener Weise. Gleichzeitig kann auch der Moderator wegfallen, der ohnehin stets eine Quelle von Neutronenverlusten ist.

Daher tragen derartige Reaktoren die kurze Bezeichnung *schnelle Brutreaktoren* oder einfach *schnelle Brüter*. Mit ihnen ist die *zweite Generation* von Kernkraftwerken geboren. Optimisten rechnen damit, daß ab 1980 nur noch schnelle Brüter entstehen, die dann die heute noch dominierende erste Generation verdrängen werden.

Es kommt jedoch nicht nur darauf an, daß diese Reaktoren überhaupt brüten, d. h. mehr Spaltstoff erzeugen als sie selbst

Bild 46. Brennstoffkreislauf eines Brutreaktors

1 - Uranerzbergwerk, 2 - Aufbereitung und Anreicherung, 4 - Herstellung der Brennelemente, 3 - Kernkraftwerk, 5 - Aufbereitung der verbrauchten Brennelemente und Rückgewinnung von Plutonium, 6 - Lagerung nicht verwertbarer Spaltprodukte, 7 - verwertbare Radionuklide, 8 - Energiegewinnung aus langlebigen Radionukliden



verbrauchen, sondern vor allem auf die Zeitdauer, die sie zum Erbrüten einer bestimmten Menge von Spaltmaterial benötigen. Als Richtgröße gilt hier die *Verdoppelungszeit*. Es ist diejenige Zeit, die ein Reaktor benötigt, um seinen Eigenverbrauch an Spaltstoff nicht nur selbst zu reproduzieren (was einer Bruttoreate von $K = 1$ entsprechen würde), sondern zu verdoppeln. Mit dieser Überschußmenge kann dann ein neuerbauter Reaktor beschickt werden. Die Verdoppelungszeit liegt bei einem modernen Brutreaktor zwischen drei und fünf Jahren, und alle Anstrengungen laufen darauf hinaus, sie möglichst zu verkürzen. Fast könnte man hier an Kühe denken, die nicht nur mehr Milch produzieren als gewöhnliche Kühe, sondern noch das Futter dazu für sich und viele ihrer Artgenossinnen.

Ganz zutreffend ist der Vergleich freilich nicht; denn auch schnelle Brüter können nicht zaubern. Aber es ist doch so: Die Reaktoren der ersten Generation vermögen nicht einmal ein einziges Prozent des hineingesteckten Urans zu verbrennen und müssen zudem noch mit angereichertem spaltbarem Material beschickt werden, das auf kostspielige Weise in gigantischen Trennanlagen zubereitet werden muß. Schnelle Brüter aber liefern dieses Material ohne jeden zusätzlichen Aufwand und können sogar noch ihre alten Kollegen aus der ersten Generation mit versorgen. Allerdings muß das erbrütete Pu 239 aus den ausgebrannten Brennelementen extrahiert werden. Da es sich aber gegenüber dem Uran um ein anderes chemisches Element handelt, ist das mit Hilfe chemischer Verfahren im Vergleich zur Isotopentrennung verhältnismäßig leicht zu bewerkstelligen. Damit wird es möglich sein, den Brennstoffkreislauf eines Tages vollständig zu schließen, wenn man von dem nur noch geringfügigen Zufluß an frischem Natururan absieht (Bild 46).

Guter Start für schnelle Brüter

Wegen ihrer hervorragenden Brennstoffökonomie stellen die schnellen Brüter eine ganz neue Klasse von Reaktoren dar. Auch in ihrem Aufbau zeigen sie eine Reihe von Besonderheiten. Denn schon die Verwendung schneller Neutronen zieht einige Konsequenzen nach sich. Wegen des fehlenden

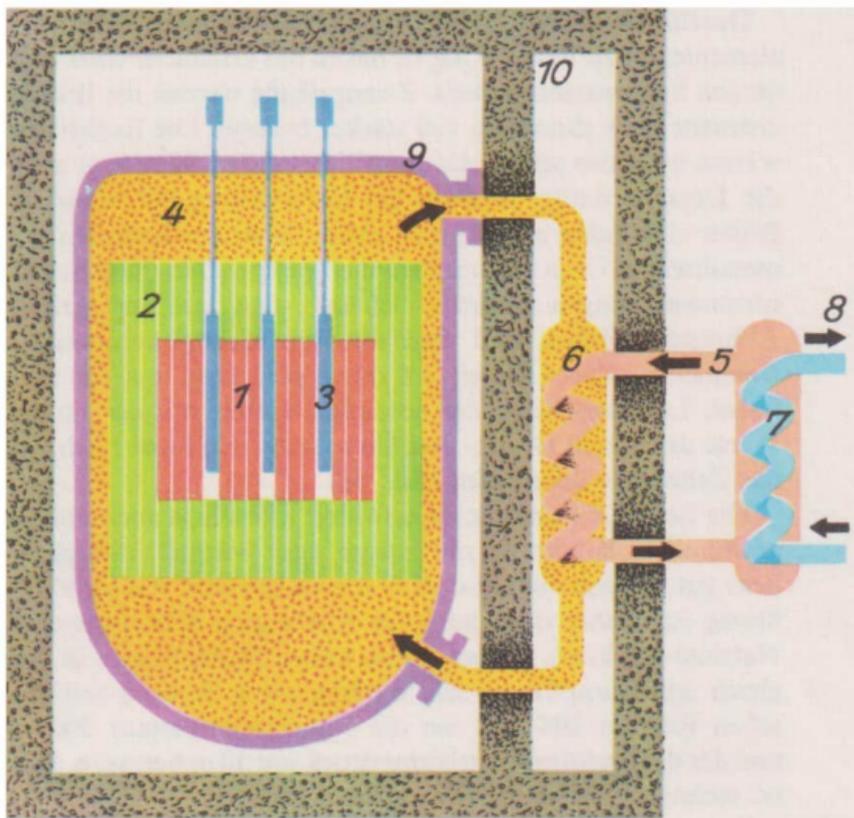


Bild 47. Schema des schnellen Brutreaktors (SBR)

1 - Spaltzone, 2 - Brutzone, 3 - Steuerstäbe, 4 - primärer Natriumkreislauf (radioaktiv), 5 - sekundärer Natriumkreislauf, 6 - Wärmeaustauscher, 7 - Dampferzeuger, 8 - zur Turbine, 9 - Druckbehälter, 10 - Abschirmung

Moderatoren könnten sie nämlich leicht aus dem Reaktor entweichen. Damit sie nicht wirkungslos verlorengehen, wird der Brutstoff, wie man in diesem Fall das umzuwandelnde U 238 nennt, in Form eines dicken Mantels um den Reaktorkern gebaut (Bild 47). Sowohl hier als auch im aktiven Kern des Reaktors spielt sich der Brutprozeß ab. Da außerdem der bei thermischen Reaktoren vorhandene Neutronenreflektor fehlt, wäre jetzt der im Kern noch verbleibende Neutronenfluß so schwach, daß die Kettenreaktion sofort zum Erliegen käme. Somit muß der Brennstoff im Kern viel stärker mit Spaltstoff angereichert werden, als es sonst üblich ist.

Das führt wiederum zu einem sehr hohen Abbrand der Brennelemente, bis zu 100 MW/kg U, das ist das Dreifache eines modernen Siedewasserreaktors. Zwangsläufig werden die Brennelemente auch thermisch viel stärker belastet. Die Reaktionswärme muß also sehr rasch abgeführt werden. Hier liegt auch die Ursache dafür, weshalb die Entwicklung der schnellen Brüter viele Jahre in Anspruch nahm. In Brennelementen aus metallischem Uran verursachen die Spaltprodukte und Strukturumwandlungen derartige Schäden, daß hier nur geringe Abbrände möglich sind. Erst die Entwicklung keramischer Brennstoffe führte weiter. All das ersieht man aus der sehr hohen Leistungsdichte der schnellen Brüter, mit der sie die Werte der besten Druck- und Siedewasserreaktoren noch um das Zehnfache übertreffen (Bild 30).

Die hohe Leistungsdichte erfordert allerdings auch außergewöhnliche Kühlmittel mit extrem guter Wärmeleitfähigkeit. Sehr gut hat sich metallisches Natrium bewährt, das ab 97 °C flüssig ist. Daher rührt auch die Abkürzung SNR (schneller Natrium-Reaktor). Wegen seines hohen Siedepunktes ist zugleich sein Dampfdruck sehr niedrig, wie z. B. beim sowjetischen Reaktor BN 350, wo die Natriumtemperatur 500 °C und der dazugehörige Sättigungsdruck nur 10 at betragen. Das ist technisch von außerordentlichem Vorteil. Ungünstig ist andererseits, daß Natrium unter dem Bombardement der Neutronen sehr leicht radioaktiv wird. Daher überträgt das im Primärkreislauf zirkulierende Natrium seine Wärme auf einen zweiten, nichtradioaktiven Natriumkreislauf. Erst dieser dient zur Heizung der zum Betrieb der Turbogeneratoren notwendigen Dampferzeuger.

Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung der schnellen Brüter in der Sowjetunion, wo der Bau entsprechender Kraftwerke an erster Stelle steht. Während es in den kapitalistischen Staaten um schnellstmögliche Konkurrenzfähigkeit der Kernenergie mit den herkömmlichen Energiequellen geht, wird in der Sowjetunion auf das langfristige Ziel einer optimalen Ausnutzung des Urans hingearbeitet. Dort ist man dabei, die erste Generation von Reaktoren gleichsam zu überspringen, und hat sich mit den großen Brutreaktoren bereits an die Spitze gesetzt.

Um die ersten Erfahrungen zu sammeln, wurde schon im Jahre 1958 der erste kleine, mit PuO_2 beladene Versuchs-

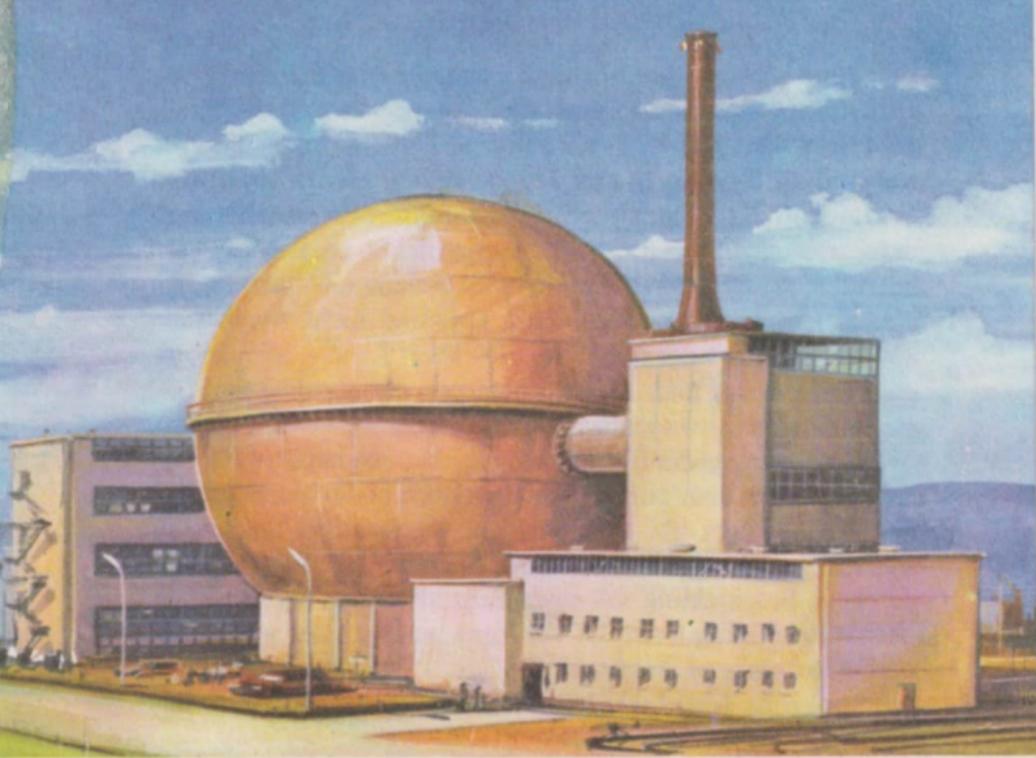


Bild 48. Versuchskraftwerk Dounreay

reaktor BR 5 in Betrieb gesetzt. Ihm folgte ein Jahr später das britische Versuchskraftwerk Dounreay in Nordschottland (Bild 48). Das erste Großkraftwerk der Welt aber, das nach dem Prinzip des schnellen Brütters arbeitet, ist der Reaktor BN 350 am Ufer des Kaspischen Meeres (Schewtschenko). Seine thermische Leistung von 1000 MW dient in erster Linie zur Entsalzung von Meerwasser mit einer Tagesleistung von 120000 t, so daß nur 150 MW_e ins Versorgungsnetz gespeist werden.

Der Reaktorkern sowie der Brutmantel sind in einheitlicher Weise aus 3,50 m langen, eng beieinanderstehenden Kassetten aufgebaut, die ihrerseits aus zahlreichen dünnen, nichtrostenden Stahlröhren bestehen. Die in der Mitte stehenden Kassetten bilden die Spaltzone und bestehen aus je 169 röhrenförmigen Brennelementen von nur 6,1 mm Durchmesser, in denen die Brennstofftabletten stecken. Ober- und Unterteil dieser Kassetten sowie die randwärts stehenden Kassetten bilden die

Brutzone, deren röhrenförmige Elemente Natururanoxid als Brutstoff enthalten. Zwischen den Brennelementen der Spaltzone zirkuliert das sehr dünnflüssige Natrium mit einer Geschwindigkeit bis zu 10 m/s. Nur so gelingt es, den gewaltigen Wärmefluß der Brennelemente aufzufangen und den Dampferzeugern zuzuführen. Die Leistungsdichte im Reaktorkern beläuft sich auf 800 MW/m^3 . Was sie bedeutet, sollte man sich einmal klarzumachen versuchen. Das sind nicht weniger als 800 kW je Liter oder reichlich 1000 PS je Liter – beinahe unglaublich, wenn man diese Zahlen mit der spezifischen Leistung eines Kraftwagenmotors vergleicht.

Die Leistungen des BN 350 werden aber von neueren Projekten bei weitem übertroffen. Von dem noch in der Vorbereitung begriffenen Werk BN 1000 sind nur wenige, aber um so aufsehenerregendere Daten bekannt. Die mit U-Pu-Karbid vorgesehene Beschickung soll einen Brutfaktor von 1,75 ermöglichen. Gleichzeitig sinkt die Verdoppelungszeit auf vier Jahre, der Wirkungsgrad steigt auf 40% an. Die Leistungsdichte in der Spaltzone wird 1000 MW/m^3 überschreiten.

Kernkraftwerk BN 350 Schewtschenko (UdSSR)

Inbetriebnahme	1972
Leistung, thermisch	1000 MW
–, elektrisch	350 MW
Brennstoff, Art	UO ₂
–, Anreicherung mit U 235	17–26%
–, Menge	7 t
Brennelemente, Anzahl	211
–, Hüllentemperatur	695 °C
Abbrand	46 MWd/kg U
Brutstoff, Art	UO ₂
–, Menge	40 t
Durchmesser der Spaltzone	1,5 m
Leistungsdichte der Spaltzone, maximal	800 MW/m^3
Kühlmitteldurchsatz (Natrium)	14 100 t/h
maximale Natriumgeschwindigkeit	10 m/s
Dampfkreislauf, Temperatur	435 °C
–, Druck	50 at
Brutfaktor	1,5
Verdoppelungszeit	8 Jahre

Rohrpost mit Brennstoff

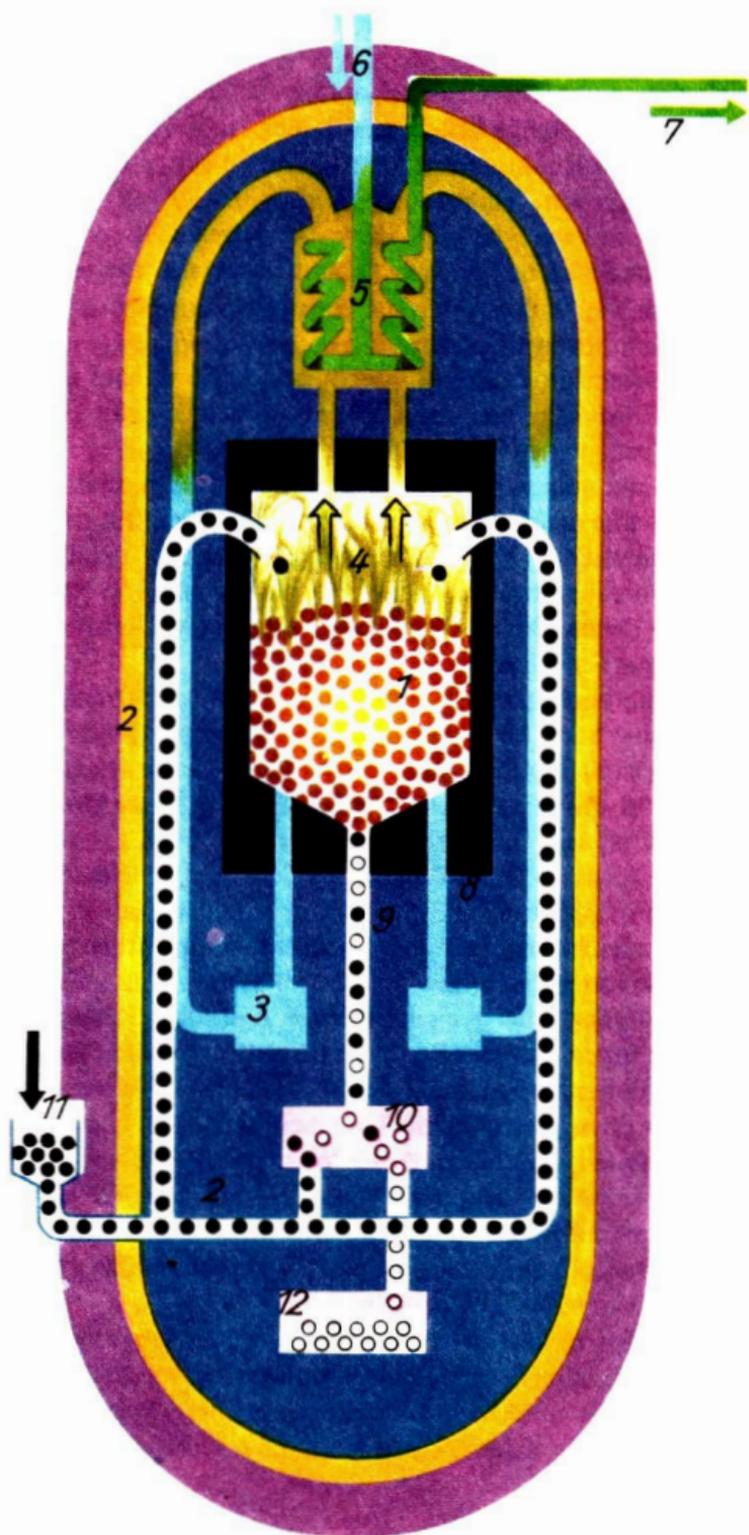
Der Hunger des Menschen nach immer mehr und billigerer Energie wird noch lange Zeit ungestillt bleiben. Bei allen Erfolgen im Bau von Reaktoren ist kein Grund zu satter Selbstzufriedenheit gegeben. Aufbau und Funktionsweise von Kernkraftwerken müssen viel einfacher, ihre Konstruktion noch robuster, ihre Sicherheit noch vollkommener und der erzeugte Strom noch viel billiger werden. Dem Erfindungsgeist und grundsätzlich neuen Ideen sind hier keine Schranken gesetzt. Selbst die schnellen Brüter in ihrer heutigen Form sind noch keine Ideallösungen und müssen darauf gefaßt sein, eines Tages von ganz neuen Typen überholt zu werden.

Eine absolut neue und vielversprechende Konzeption ist der *Hochtemperaturreaktor* (HTR) in seiner besonderen Form des *Kugelhaufenreaktors*. Er ist ein thermischer Reaktor und überwindet in überaus eleganter Weise eine ganze Reihe von Nachteilen, von denen sich die Reaktoren der ersten Generation nicht frei machen konnten.

Schon äußerlich besticht die gefällige Form der Brennelemente. Es sind harte Hohlkugeln aus Graphit in der Größe von Tennisbällen (60 mm Durchmesser) mit 1 cm Wandstärke. Der Hohlraum ist mit winzigen UC_2 -Kügelchen (0,5 mm Durchmesser) gefüllt, die ihrerseits nochmals mit einer Graphitschale umhüllt sind. Diese Technik der »coated particles« verbindet somit Brennstoff und Moderator zu einer Einheit und verhindert gleichzeitig auch bei höchsten Temperaturen das Entweichen von gasförmigen Spaltprodukten.

Etwa 100 000 solcher Kugeln füllen in regelloser Schüttung den hohlen Innenraum des Reaktors (Bild 49). Wie die Zugluft in einem Füllofen strömt das als Kühlgas dienende Helium von unten nach oben, nur mit dem Unterschied, daß es chemisch völlig inaktiv ist und lediglich die Wärme abführt, während sich die Brennstoffkugeln ganz von selbst auf helle Gelbglut heizen. Durch die Bestrahlung mit Neutronen wird das Helium auch nicht radioaktiv, ein großer Vorteil gegenüber den anderen bisher benutzten Kühlmitteln.

Das bei den Reaktoren üblicher Bauart mit längeren Betriebsstilllegungen verbundene umständliche Auswechseln und Umsetzen der Brennelemente fällt vollständig weg. Statt dessen durchwandern die Kugeln einen langsamen Kreislauf. Unten



gleiten sie durch ein Abzugsrohr in eine Entnahmevorrichtung. Hier werden sie Stück für Stück automatisch auf Abbrand und Beschädigung geprüft, sortiert und wie in einer Rohrpostanlage von oben wieder eingefüllt. Während ihrer Lebensdauer von zwei bis drei Jahren wandert jede Kugel drei- bis sechsmal durch den Reaktor. Der Abbrand läßt ohne weiteres Werte von 100 MWd/kg U und darüber hinaus zu. Zusammen mit dem ohnehin sehr sparsamen Brennstoffeinsatz liefert das einen weiteren Beitrag zur Senkung der Stromerzeugungskosten.

Das Heliumgas erhitzt sich im Reaktor auf 850 °C. Bei den bereits in Betrieb befindlichen Versuchskraftwerken dieses Typs heizt es einen Dampferzeuger, der wiederum den Turbosatz speist.

Versuchskraftwerk in Jülich (BRD)

Inbetriebnahme	April 1966
Leistung, thermisch	46 MW
–, elektrisch	15 MW
Brennstoff, Art	U 235 als UC ₂ + U 233
–, Anreicherung	93%
–, Menge	52 kg bzw. 11 kg
Abbrand	10 MWd/kg U
Brutstoff	570 kg ThC ₂
Brennelementkugeln, Anzahl	100000
thermische Leistung je Kugel	2,4 kW
Reflektor	Graphit
Abschaltstäbe, Anzahl	4
Kühlmittel	Helium
–, Temperatur am Ausgang	850 °C
–, Temperatur am Eingang	175 °C
–, Druck	10 at
Dampf Temperatur	505 °C
Dampfdruck	75 at

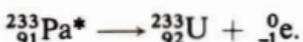
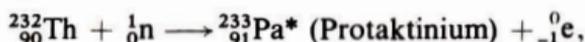
Bild 49. Schema des Kugelhaufenreaktors

1 - Reaktorkern, 2 - Brennelement-Kreislauf, 3 - Gebläse für Heliumkreislauf, 4 - erhitztes Heliumgas, 5 - Dampferzeuger, 6 - Wasserzufluß, 7 - zur Turbine, 8 - Reflektor, 9 - Kugelabzugsrohr, 10 - Prüf- und Sortiereinrichtung, 11 - Zugabe frischer Brennelemente, 12 - ausgebrannte und unbrauchbare Kugeln

Mit glühenden Turbinen

Die Erbauer des ersten Kugelhaufenreaktors sind nicht nur stolz auf den eleganten Mechanismus, der einen voll kontinuierlichen Betrieb über viele Jahre hinweg erlaubt. Ihr Ehrgeiz strebt nach höheren Zielen, und dazu gehört heute unbedingt das Brüten von neuem Spaltstoff. Natürlich gibt das mit den stark moderierenden coated particles und Graphitkugeln dann keinen schnellen, sondern einen *thermischen Brüter*. In den genannten Kenndaten des Atomversuchsreaktors Jülich ist der Brutstoff bereits angeführt. Es handelt sich um Thorium 232, das der Kugelfüllung beigemischt ist, und somit um einen *Thorium-Hochtemperaturreaktor* (THTR, Bild 50).

Das Thorium hat schon früher einmal eine gewisse Rolle gespielt. Sein Oxid bildete den leuchtenden Bestandteil des guten alten Gasglühstrumpfes. Es stammt aus dem Monazitsand, der in Brasilien und Vorderindien mächtige Lager bildet. Nun haben die Kernphysiker ein Auge darauf geworfen. In ganz ähnlicher Weise wie das Uran 238 hat das Thorium 232 die Eigenschaft, Neutronen einzufangen und sich durch nachfolgende zweimalige Abgabe eines Betateilchens in ein besonders leicht spaltbares Nuklid, das Uran 233, umzuwandeln:



An sich ist das schon deswegen höchst willkommen, weil hiermit eine wertvolle Ergänzung der vielleicht eines Tages knapper werdenden Uranvorräte gegeben ist. Nicht minder interessant ist indessen das Uran 233 selbst. Von zehn thermischen Neutronen, die auf die Kerne treffen, führen neun zur Spaltung, und nur eins wird ohne Spaltung absorbiert. Damit liegt die effektive Spaltneutronenzahl mit $\eta = 2,25$ wesentlich günstiger als beim U 235 mit nur $\eta = 2,1$. Im Spaltstoff U 233 finden daher weit mehr Spaltungen statt als in einer gleich großen Menge U 235. Daher ist gerade das Thorium für einen thermischen Brüter die gegebene Muttersubstanz.

Auf welche Weise hier Spalt- und Brutstoff eingesetzt werden, ob gemischt (wie beim genannten Atomversuchsreaktor Jülich) oder in getrennten Kugeln, ob der erbrütete Spaltstoff ohne besondere Aufbereitung im gleichen Kreislauf verheizt

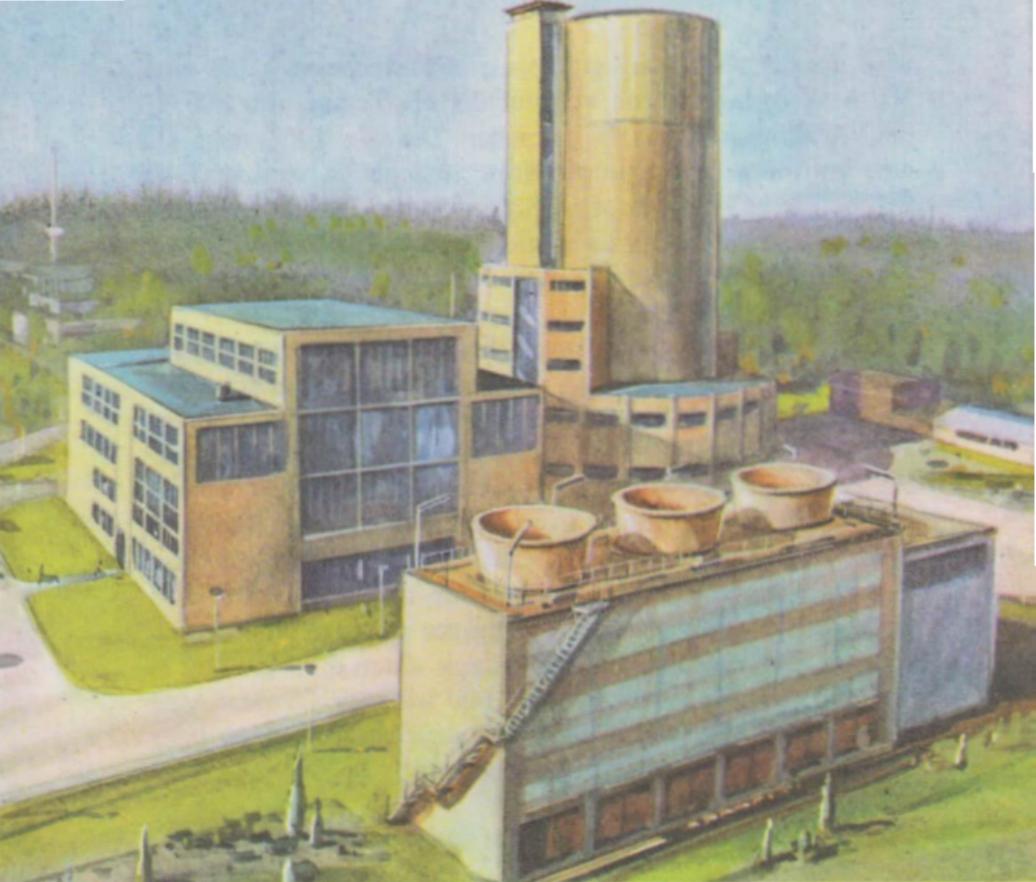


Bild 50. Atomversuchsreaktor Jülich

wird oder erst nach vorheriger Abtrennung, und viele weitere Fragen sind noch Gegenstand eifrigen Experimentierens. Man rechnet mit Konversionsraten von 0,8 bis 1, womit der Anschluß an den regelrechten Brüter erreicht wäre.

Die technischen und wirtschaftlichen Vorteile des THTR kommen schließlich erst richtig zur Geltung, wenn er mit einer *Heliumgasturbine* einen einzigen geschlossenen Kreislauf bildet. Dann ist das Kühlmittel Helium gleichzeitig das Arbeitsmittel der Turbine. Ein Dampferzeuger ist überflüssig. Da die Temperatur des Abgases höher liegt, wird ein Drittel der sonst notwendigen Kühlwassermenge eingespart, und für die Abwärme ergeben sich wertvolle Verwendungsmöglichkeiten, wie z. B. Meerwasserentsalzung, Fernheizung oder Anschluß an die chemische Industrie. Auch ohne diese zusätzliche Nutzung

wird aber der Wirkungsgrad wesentlich verbessert. Für eine 300 MW-Anlage würde sich mit der He-Temperatur 800 °C ein Wirkungsgrad von 45 % ergeben. Das sind 10 % mehr, als eine konventionelle Dampfturbine zu schaffen vermag. Daß sich bei dieser Temperatur die Schaufeln der Turbine auf heller Rotglut befinden, ist für die Fachleute nichts Aufregendes. Mit Gasturbinen derartiger Leistungen liegen schon recht gute Betriebserfahrungen vor.

Ein erstes Versuchskraftwerk dieser Art in Geesthacht bei Hamburg soll die Einzelheiten des Heliumbetriebes studieren helfen. Deutet sich damit schon an, daß der Umweg über die Dampfkraft eines Tages veraltet sein wird? Nirgendwo ist hier ein Ende der Entwicklung abzusehen. Schnelle Brüter und thermische Brüter in ihrer heutigen Form sind sicherlich nur Zwischenglieder. Von der Oberfläche her gesehen, mag das Gesamtbild noch verwirrend vielfältig und vom Widerstreit allzu vieler Meinungen und Hoffnungen getragen sein. Bedenken wir aber, daß sich die Kernenergie kaum dreißig Jahre in der Hand des Menschen befindet und wie viele Generationen es gedauert hat, bis sich die Wärmekraftmaschinen zu ihrer heutigen technischen Reife entwickelten!

Thorium-Hochtemperaturreaktor in Geesthacht (BRD)

Inbetriebnahme	1973
Leistung, thermisch	65 MW
–, elektrisch	24 MW
Brennstoff, Art	UO ₂
–, Menge	111 kg
–, Anreicherung	90 %
Brutstoff	ThO ₂ , 1000 kg
Brennelemente, Anzahl	657
gefüllt mit coated particles	
Abbrand	53 MWd/kg U
Moderator und Reflektor	Graphit
Kühlmittel	Helium
–, obere Temperatur	735 °C
–, Druck	25 at
–, Durchsatz	146 t/h
Wirkungsgrad	37 %
Drehzahl der He-Turbine	8000 U/min

Synthetisches »Erdgas« aus Kernenergie

Die von den Kernkraftwerken gelieferte Elektroenergie ist zwar volkswirtschaftlich von höchstem Wert, stellt in vielen Fällen aber nur ein Zwischenglied in einer mehrfachen Kette von Energieumwandlungen dar. Sehr oft verwandelt sie der Endverbraucher wieder zurück in Wärme. Welch unwirtschaftliches Vorgehen das ist, geht allein aus dem schlechten thermodynamischen Wirkungsgrad der Dampfturbinen hervor, die mit 65% Verlust arbeiten. Soweit es sich um Haushalte mit ihren kleinen Elektroherden und anderen Heizkörpern handelt, fällt das, im großen Rahmen betrachtet, nicht weiter ins Gewicht. Wichtiger sind die Großabnehmer, die chemische, keramische und metallurgische Industrie, mit ihrem gewaltigen Verbrauch von »Prozeßwärme« aller Art. Greifen wir allein den Zweig der Eisen- und Stahlgewinnung heraus! Ein mittleres Kernkraftwerk würde vollständig ausreichen, den Wärmebedarf eines mittleren Hüttenwerkes (ab 3 Mill. t Eisenerzeugung) zu decken. Geht man davon aus, daß in diesem Fall die Reaktorwärme ohne jeden Umweg über Dampfkreisläufe, Turbinen und Generatoren direkt genutzt werden könnte, so wäre dies mit Abstand der niedrigste Energiepreis, der für die Eisenindustrie je erreichbar war.

Der Verhüttungsprozeß könnte dann folgendermaßen ablaufen: Ein Niederschachtofen wird mit Eisenerz und Koks beschickt und indirekt mit dem aus einem Hochtemperaturreaktor stammenden Heliumgas von 1100 °C beheizt. Die Möglichkeit derart hoher Gasaustrittstemperaturen ist nach Versuchen mit dem Atomversuchsreaktor ohne weiteres gegeben, da für die coated particles in den kugelförmigen Brennelementen schon heute Temperaturen von 1250 °C erreichbar sind. Im Gegensatz zum gewöhnlichen Hochofenprozeß gehen hier Reduktion und Heizung getrennt vor sich. Dieses Verfahren hat sich bei der sogenannten Elektroverhüttung bereits in der Praxis bewährt, wobei die Wärmekosten mit denen des Hochofens noch eben konkurrieren können. Der Kostenfaktor Wärme könnte also mit Kernenergie noch ganz bedeutend gesenkt werden. Nach Durchlaufen des Verhüttungsprozesses hat das Helium noch eine Temperatur von 800 °C und betreibt noch nebenher ein Kraftwerk zur weiteren Energiegewinnung.

Nach eingehenden Untersuchungen der Experten scheint die grundsätzliche Durchführbarkeit des neuen Verhüttungsverfahrens mit angekoppeltem Kraftwerksteil sichergestellt.

Die Grundfragen der Energiegewinnung und -verteilung gehen aber nie zu Ende, und das Suchen nach immer neuen und besseren Wegen und Möglichkeiten wird nie aufhören. Was heute noch wissenschaftlich begründete Utopie zu sein scheint, kann morgen schon in den Bereich der Wirklichkeit treten. So schien mit dem Siegeszug der Elektrifizierung auch das Problem der Fernübertragung der Energie endgültig gelöst. Die großen elektrischen Verbundnetze beherrschen weithin das Feld. Aber still und unterirdisch zieht sich seit einiger Zeit ein zweiter Strom von Energie durch das Land. Es ist das unaufhörlich wachsende Netz der Ferngasleitungen, vom fernen Sibirien bis weit hinein nach Westeuropa. Noch günstiger auf kurzen Strecken aber sollen Hochdruckleitungen sein. Nach amerikanischen Erfahrungen ist der Energietransport in dieser Art achtmal billiger als über Hochspannungsleitungen. Damit erhält auch die Frage der Fernübertragung der Kernenergie einen unerhofft neuen Aspekt. Ihre Umwandlung in Elektroenergie erscheint z. T. nur noch historisch bedingt.

Der neue Weg besteht darin, die in einem Hochtemperaturreaktor erzeugte Wärme zur Herstellung von Synthesegas zu verwenden. Über das allgemeine Rohrleitungsnetz kann es Haushaltungen und Industrie weit preiswerter mit Wärmeenergie versorgen, als es die Elektroenergie vermag. Als Energieträger käme besonders der Hauptbestandteil des Erdgases, das Methan (CH_4), in Frage. Schon seit längerer Zeit laufen Versuche in Verbindung mit dem Kugelhaufenreaktor, ein solches synthetisches Heizgas herzustellen. Eine der sich besonders zur Verwendung von Braunkohle anbietenden Möglichkeiten besteht darin, mit dem aus dem Reaktor kommenden Helium Heißdampf von 1000°C zu erzeugen, der in einem Wirbelbett die staubförmige Kohle fast vollständig vergast. Deutlich ist zu erkennen, daß die Kernenergie nicht nur auf dem Sektor der Elektrifizierung ständig an Boden gewinnt, sondern in nicht allzuferner Zukunft auch viele andere Zweige der Technik durchsetzen und befruchten wird.

Minireaktoren

Verfolgen wir in Gedanken den Weg, der von der Kernenergie zur Elektroenergie führt, so ist er doch recht umständlich. In mehreren Kreisläufen wird die primär entstehende Wärme auf Wasserdampf übertragen, gelangt in den Hochdruckteil und dann in den Niederdruckteil einer Turbine, wo sie in mechanische Energie verwandelt wird, und schließlich in den Generator, der sie in Elektroenergie umformt. Jeder einzelne dieser Abschnitte ist gleichsam bis an die Zähne gerüstet mit einem Arsenal von Zubehör und Hilfseinrichtungen, wie Umwälz-, Speise- und Absaugpumpen, Dampfreinigern und Kondensatoren, elektrischen und mechanischen Registrier- und Anzeigegeräten aller Art. Muß das unbedingt so umständlich vor sich gehen, und gibt es wirklich keinen anderen Weg, die elektrische Energie unmittelbar aus der Wärmeenergie zu gewinnen?

Die Antwort hierauf liegt an sich schon längst bereit, man könnte sie eigentlich schon als museumsreif bezeichnen. Es ist der von dem Arzt und Physiker Seebeck, einem Freund Goethes, entdeckt thermoelektrische oder *Seebeckeffekt*. Im Nachlaß Goethes fand sich noch ein derartiges, aus zwei verschiedenen Metallen zusammengelötetes *Thermoelement*. Es zeigt noch deutliche Spuren von Ruß und beweist, daß unser berühmter Dichter die Sache schon einmal ausprobiert haben muß.

Ohne auf die Theorie der Erscheinung näher einzugehen, können wir von dem recht simplen Grundvorgang ausgehen. Zwei verschiedene Metallstreifen, ein sogenanntes Thermopaar, werden mit ihren beiden Enden zusammengelötet. Wird dann die eine Lötstelle erhitzt und die andere zugleich abgekühlt, so fließt ein elektrischer Strom durch den Kreis (Bild 51). Bei sehr kleinem elektrischen Widerstand kann der Thermostrom sogar Hunderte von Ampere erreichen. Muß dann der Gedanke nicht sehr nahe liegen, die Abwärme eines Reaktors zur Speisung einer Thermobatterie, wie man viele zusammengeschaltete Thermoelemente nennt, auszunutzen?

Im Prinzip geht das selbstverständlich auch. Es kommt aber nicht auf die Stromstärke, sondern auf die Leistung und den Wirkungsgrad an. Leider ist dieser bei Verwendung gewöhnlicher Metalle erschreckend gering und erreicht nicht einmal

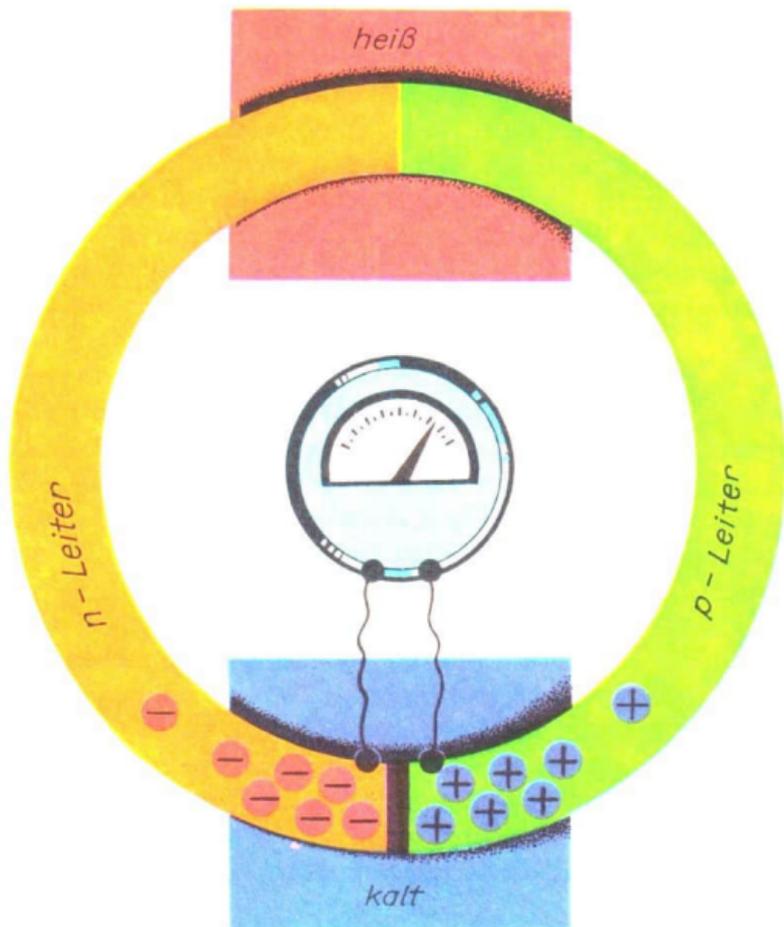


Bild 51. Schema eines thermoelektrischen Stromkreises aus Halbleitern

1%. In erster Linie hängt die entstehende Urspannung von der Art der Metalle (Seebeck-Koeffizient) und der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Lötstellen ab. Man muß also dafür sorgen, daß diese Temperaturdifferenz im Dauerzustand möglichst groß bleibt, was nur möglich ist, wenn das Wärmeleitvermögen der beiden Metalle sehr klein ist. Gleichzeitig aber muß der elektrische Widerstand möglichst klein sein, damit die entstehende elektrische Leistung nicht schon im Thermoelement selbst vernichtet, d. h. wieder in Stromwärme zurückverwandelt wird. Unglücklicherweise ist es aber gerade eine Grundeigenschaft aller Metalle, daß die Leit-

fähigkeiten für elektrischen Strom und Wärme ziemlich proportional zueinander verlaufen. Es gehen somit drei Größen in die Rechnung ein: der Seebeck-Koeffizient, das elektrische Leitvermögen und das Wärmeleitvermögen. Sie ergeben zusammen die *Effektivität* des betreffenden Thermopaars.

In langjährigen theoretischen und technologischen Untersuchungen ist es nun gelungen, zu berechnen, daß die höchsten Effektivitäten erreicht werden, wenn die Elektronenkonzentration im Material etwa 10^{18} je cm^3 beträgt. In den reinen Metallen liegt sie bei 10^{22} je cm^3 und in den reinen Halbleitern (z. B. Germanium) bei 10^{13} je cm^3 . Es handelt sich also um die Herstellung von Werkstoffen im Übergangsbereich zwischen Metallen und Halbleitern. Man kann sie aus reinen Halbleitern herstellen und bekommt entweder *p*-leitendes oder *n*-leitendes Material. Im erstgenannten findet sich ein starker Überschub an positiven und im zweiten ein starkes Überwiegen an negativen Ladungsträgern (Elektronen), die dann den Stromtransport bewirken. Die bisher größte Effektivität und damit der günstigste Wirkungsgrad bis zu 20% wurde mit Halbleitern vom Typ Wismuttellurid (Bi_2Te_3) erzielt, der ebenfalls als *p*- bzw. *n*-Typ optimiert werden kann. Ihre schlechte Wärmeleitung verdanken sie ihrem gleichsam aufgedunsenen Kristallgitter. Sie sind daher recht brüchig und weder walzbar noch ziehbar, sondern müssen als erschmolzene zylindrische Stäbchen verwendet werden.

So muß man sich denn mit recht geringen Wirkungsgraden begnügen und froh sein, daß es überhaupt auf diese Weise geht. Denn für wartungsfreie Stromquellen ohne bewegliche Teile und zugleich sehr langer Lebensdauer ist immer Bedarf vorhanden. Man braucht sie in der Raumfahrt, zur Versorgung abgelegener Wetterstationen, in der Tiefseeforschung und bei anderen ungewöhnlichen Gelegenheiten.

Besonders bekannt geworden ist das erste Exemplar dieser Art, der sowjetische Kleinreaktor »Romaschka« (»Kamille«, so genannt wegen seines Aussehens), erstmalig in Betrieb gesetzt am 14. 8. 1964. Es ist ein schneller Hochtemperaturreaktor, der mit hochangereichertem Urankarbid UC_2 als Brennstoff arbeitet. Rings um den Kern ist ein Mantel aus Thermoelementen gelegt, die aus einer *n*- bzw. *p*-leitenden Silizium-Germanium-Legierung bestehen. An den Kaltseiten sind Kühlbleche befestigt, die wie Stacheln eines Igels nach außen weisen

(Bild 52). Diese *Radiatoren* geben ihre Wärme durch Strahlung an den umgebenden Raum ab. Ein großer Vorzug ist die hohe Stabilität von Romaschka. Obwohl ein automatischer Regler vorhanden ist, tritt er praktisch nicht in Tätigkeit, da die Anlage keiner Regelung bedarf. Wärmeleistung und Temperatur bleiben wegen des sehr ausgeprägten negativen Temperaturkoeffizienten (S. 33) mit großer Genauigkeit konstant.

Kleinreaktor »Romaschka« (UdSSR)

Inbetriebnahme	14. 8. 1964
Leistung, thermisch	40 kW
Leistung, elektrisch	0,5 bis 0,8 kW
Brennstoff, Art	UC ₂
–, Menge	49 kg
–, Anreicherung	nahe 100 %
maximale Temperatur des Kerns	1 750 °C
Reflektor	Beryllium + Graphit
Kühlung	Abstrahlung der Radiatoren
Temperatur auf der Kernoberfläche	1 000 °C
Temperatur am Ansatz der Radiatoren	550 °C

Ein Jahr später wurde die amerikanische Stromquelle SNAP 10A kritisch. Sie ist für die Versorgung künstlicher Satelliten bestimmt und hat mit 0,5 kW_e, etwa die gleiche Leistung wie Romaschka. Sie arbeitet jedoch mit langsamen Neutronen. Ihr Brennstoff besteht aus hochangereichertem Uran, das homogen mit dem Moderator (Zirkonhydrid) vermischt ist. Die Thermoelemente bestehen ebenso wie bei Romaschka aus einer Silizium-Germanium-Legierung und sind durch flüssiges Natrium-Kalium thermisch mit dem Reaktorkern gekoppelt.

Kleinreaktor SNAP 10 A (USA)

Typ	Langsamneutronenreaktor
Inbetriebnahme im Weltraum	1965
Leistung, elektrisch	0,5 kW

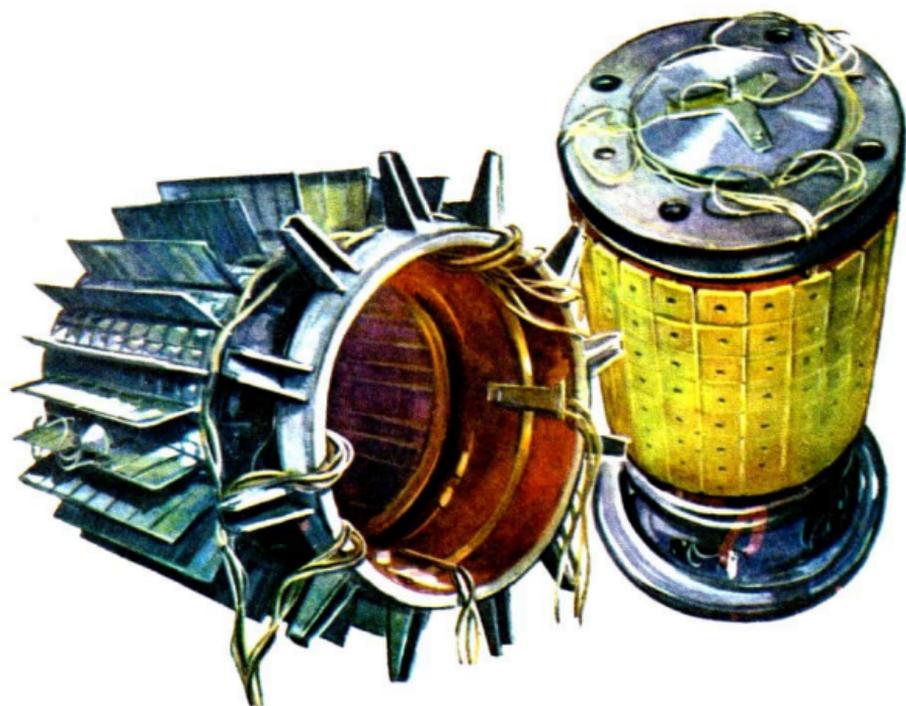


Bild 52. Kleinreaktor »Romaschka«

Brennstoff, Art	angereichertes Uran
Moderator	Zirkonhydrid (ZrH)
Temperatur an der Kernoberfläche	520 °C
Temperatur an der Kaltseite der Thermoelemente	340 °C
Gesamtmasse	90 kg
Gesamtvolumen	5,5 l

Es gibt noch einen anderen Weg, Wärme auf direktem Weg in elektrische Energie umzuwandeln. Verlockend einfach ist er, fast ebenso einfach wie das Thermoelement. Und man wundert sich zunächst, weshalb das Prinzip der thermoionischen Umwandlung noch keine größere praktische Bedeutung erlangt hat.

Bei den thermoionischen Reaktoren wird Wärme, die in unserem Falle durch Kernspaltung erzeugt wird, direkt in Elektroenergie umgewandelt. Dies wird mit folgender Anordnung erreicht: In einem Vakuum stehen sich in engem Abstand zwei

Elektroden gegenüber. Die eine, Emitter genannt, wird stark erhitzt und hat eine Wolframoberfläche; die gegenüberliegende Elektrode, der Kollektor, wird dagegen intensiv gekühlt. Der Emitter gibt einen starken Strom von Elektronen ab, die zum Kollektor fließen und einen äußeren Stromkreis speisen. Das Ganze funktioniert aber nur, wenn die Elektronenausstrittsarbeiten der beiden Elektroden verschieden groß sind. Da aber das Wolfram an der Emitteroberfläche zur Verdampfung neigt und sich dann auf dem Kollektor niederschlägt, hört der Stromfluß nach kurzer Zeit wieder auf. Bei Anwesenheit von Cäsiumdampf wird dieser unangenehme Effekt jedoch unterbunden, so daß ein Dauerstrom zustande kommt und die Spannung von etwa 1 V aufrechterhalten bleibt.

Gegenüber der Verwendung von Thermoelementen bietet der thermoionische Reaktor die Ausnützbarkeit höherer Temperaturen. Der Wirkungsgrad ist aber auch hier nicht besser. Vom energiewirtschaftlichen Standpunkt aus ist das natürlich unbefriedigend. Es gäbe aber viele Einsatzmöglichkeiten, wie z. B. in der Raumfahrt oder zur Versorgung von Wetterstationen in abgelegenen Gebieten, wo dieser Gesichtspunkt nur eine untergeordnete Rolle spielt. Leistungen von 20 bis 200 kW werden für realisierbar gehalten. Trotz allem aber ist dieses Projekt eine recht knifflige Angelegenheit, gespickt mit allen nur denkbaren herstellungs- und betriebstechnischen Schwierigkeiten. Eine Arbeitsgruppe in Westeuropa beispielsweise hat bereits die Waffen strecken müssen. Nach einem Aufwand von 50 Millionen Mark Entwicklungskosten mußte das Projekt im Jahre 1972 eingestellt werden.

Mit mehr Optimismus und Erfolg ist man jedoch in der Sowjetunion bei der Arbeit. Hier stellte Prof. Kusnezow den Reaktor *Topas* mit einer Leistung von 10 kW der Weltöffentlichkeit vor. Es ist also noch vollkommen offen, ob und in welcher Richtung die Entwicklung auf diesem Weg weitergehen wird.

Strom für den Weltraum

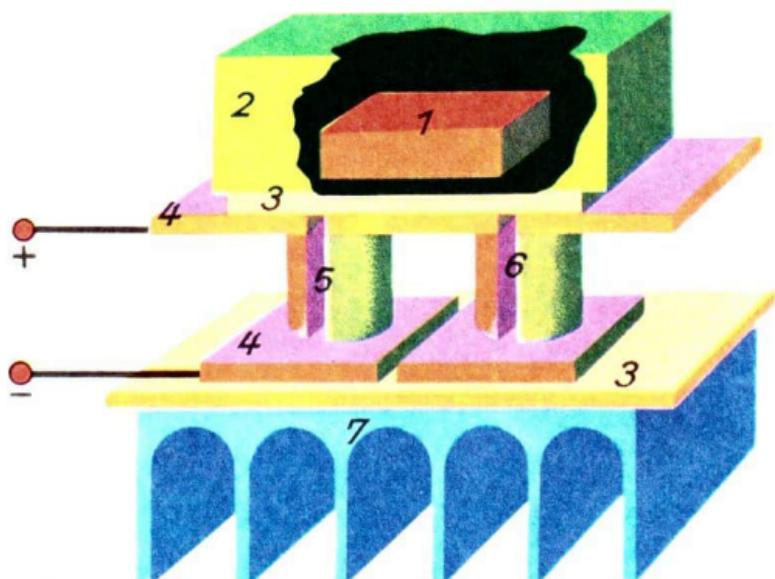
Von Natur aus sind Kernreaktoren große und schwere Brocken mit mächtigen Leistungen, wie geschaffen für die energiehungrige Großindustrie unserer Tage. Die im großen und

ganzen noch sehr unbeholfenen Gehversuche der z. T. noch nicht einmal tragbaren Kleinreaktoren haben wir soeben kennengelernt. Aggregate im Westentaschenformat oder gar noch kleinere kann es nicht geben, da sie ja mindestens die kritische Masse enthalten müssen, die sich selbst bei Verwendung guter Neutronenreflektoren, nicht unter eine gewisse Grenze drücken läßt. Aber es gibt ja auch noch Kernenergie ohne Kernspaltung! Sie steckt in jedem gewöhnlichen radioaktiven Atomkern. Wird die von ihm ausgehende Strahlung in einem festen Körper absorbiert, so setzt sich diese Energie in Wärme um. Mit Hilfe von Thermoelementen bekommt man dann auf einfachste Weise Elektroenergie, die in bestimmten Fällen vollkommen ihren Zweck erfüllen kann.

Aber selbst bei Leistungen von nur einigen Watt belaufen sich die benötigten Aktivitäten auf viele Tausende von Curie. Als höchstwillkommene Bezugsquelle bieten sich da die ausgedienten Brennelemente großer Kernreaktoren an. Sie enthalten eine reiche Auswahl an Spaltprodukten und Transuranen. Der sogenannte Atom Müll ist eine Fundgrube wertvollster Ener-

Bild 53. Schema einer Radionuklidbatterie

- 1 - Radionuklid, 2 - Absorber, 3 - Isolation, 4 - Metallbrücken, 5, 6 - Thermopaare, 7 - Radiatoren zur Kühlung



gieträger. Doch eignet sich nicht jedes beliebige Radionuklid dazu. Es soll ein möglichst starker α - oder β -Strahler sein, der wegen der kurzen Reichweite dieser Strahlenarten in der Umhüllung des Präparates eine vollständige Umwandlung in Wärme ermöglicht. Die begleitende γ -Strahlung soll dagegen möglichst schwach sein oder ganz fehlen, damit eine besondere Abschirmung entfallen kann. Schließlich soll im Interesse der Lebensdauer der Batterie die Halbwertszeit möglichst lang sein. Besonders gut bewährt haben sich deshalb der β -Strahler Strontium 90 ($T_{1/2} = 28$ Jahre) und die α -Strahler Polonium 210 ($T_{1/2} = 138$ Tage) sowie Curium 242 ($T_{1/2} = 163$ Tage). Für den langjährigen Einsatz im Weltraum kommen Plutonium 238 ($T_{1/2} = 81,4$ Jahre), Curium 244 ($T_{1/2} = 18$ Jahre), Cäsium 137 ($T_{1/2} = 30$ Jahre) oder Actinium 227 ($T_{1/2} = 22$ Jahre) in Frage.

Bild 53 zeigt den sehr einfachen Aufbau einer *Isotopenbatterie*. Die Aktivität befindet sich in einer starken Metallkapsel, in deren Wandung die Wärme entsteht. Durch unmittelbaren Kontakt steht sie mit der Warmseite der Thermobatterie in Verbindung. Deren Kaltseite ist gegebenenfalls mit Radiatoren versehen, die nach dem Außenraum weisen.

Bild 54. Sowjetische Nuklidbatterie Beta II für automatische Wetterstationen



Infolge ihres einfachen Aufbaus (Bild 54) stellen *Radionuklidbatterien*, wie man sie besser nennen sollte, keine schwierigen Probleme und haben sich schon seit vielen Jahren im praktischen Einsatz bewährt. Aus der langen Liste von Typen seien hier ganz willkürlich fünf Beispiele herausgegriffen.

Einige Radionuklidbatterien

Masse in kg	Name	Land	Leistung in Watt	Nuklid	Aktivität in 1000Ci	Zweck
2	SNAP3A	USA	2,7	Pu 238	1,6	Satellit Transit 4B
2000	SNAP 7B	USA	60	Sr 90	225	Navigationsboje
1600	Beta I	UdSSR	5,6	Ce 144	17,5	Wetterstation
3,2	Prototyp VII	UdSSR	9,65	Po 210	10	Arbeitsmodell
23	SNAP 27	USA	1500 _{th} 63 _{el}	Pu 238	600	Apollo 12 bis 16

Neben diesen ausgesprochen technischen Zwecken dienenden Batterien gibt es aber noch viel kleinere, nur wenige Zentimeter messende Miniaturausgaben. Im April 1970 wurde einem an schweren Herzrhythmusstörungen leidenden 58jährigen Patienten im Pariser Broussais-Krankenhaus die Bauchdecke geöffnet und der erste nukleare *Herzschrittmacher* implantiert. Siebzigmal in der Minute gibt er einen winzigen elektrischen Impuls ab. Er zwingt das Herz zu kräftigen und gesunden Kontraktionen und rettet dem Patienten noch für lange Zeit das Leben.

Es handelt sich hier um eine besonders kleine Nuklidbatterie mit Thermoelementen. Sie enthält 200 mg Pu 238 und braucht nur alle zehn Jahre einmal ausgewechselt zu werden. Die bisher verwendeten Schrittmacher mit elektrochemischen

Batterien machten alle ein bis zwei Jahre eine Operation notwendig. Man schätzt einen Bedarf von jährlich etwa 20000 solcher Lebensretter voraus, und das allein ist wohl all der Mühe wert, die zur Entwicklung der kernkraftgespeisten Batterien aufgewendet wurde.

Auf dem Weg zur Kernfusion

Die Sonne bringt es an den Tag

Kehren wir noch einmal zum Anfang unserer Betrachtungen zurück (S. 22), als wir die Erscheinung des Massendefektes entdeckten. Aus zwei Protonen und zwei Neutronen haben wir in Gedanken den Kern eines Heliumatoms zusammengebaut. Bei dieser Gelegenheit hatten wir auch schon ausgerechnet, daß bei der Synthese von 1 kg Helium die Energie 185 Mill. kWh frei werden muß. Das ist immerhin das Siebenfache dessen, was bei der vollständigen Spaltung von 1 kg Uran 235 herauspringt, ganz zu schweigen davon, daß hier das Rohstoffproblem überhaupt keine Rolle mehr spielt, da Wasserstoff als Bestandteil des gewöhnlichen Wassers und Deuterium im schweren Wasser in beliebiger Menge zur Verfügung stehen. Was wir hiermit angeschnitten haben, ist also genau das Gegenteil der Kernspaltung. Es handelt sich um die *Kernverschmelzung* oder *Kernfusion*.

Wir haben auch schon davon gesprochen, daß sich derartige Prozesse auf der Sonne und den übrigen Fixsternen abspielen. Bis in unser Jahrhundert hinein hat die Menschheit ausschließlich von dieser Sonne gelebt. Die ganze Tier- und Pflanzenwelt mitsamt ihren im Laufe der Erdgeschichte angesammelten Überresten in Form der fossilen Brennstoffe hat ihr Dasein der Sonne zu verdanken. Die von ihr produzierte wohltätige Strahlung ist letzten Endes nichts anderes als Kernenergie, die sie auch heute noch in verschwenderischer Fülle ins Weltall verstrahlt.

Der Gedanke der Kernfusion ist ebenso alt wie die Entdeckung der Kernspaltung. Er bewegt die Gemüter der Physiker schon seit Jahrzehnten. Wie eine trügerische Fata Morgana

scheint die friedliche Nutzung auch dieser Energiequelle zum Greifen nahe – und ist doch bis heute unerreichbar geblieben. Worum es dabei geht, ist mit wenigen Worten gesagt. Die zu verschmelzenden Teilchen, z. B. 2 Protonen und 2 Neutronen, müssen so nahe zusammengebracht werden, daß sie sich berühren. Alles andere geht dann ganz von selbst. Sie bleiben aneinander haften wie vier klebrige Bonbons, allerdings mit einer unvergleichlich größeren Kraft. Dies ist zugleich der Moment, in dem jener kleine Bruchteil von Masse verschwindet, den wir auf S. 21 bereits berechnet haben, und die entsprechende Energie frei wird.

Leider steht dieser Absicht ein schweres Hindernis im Wege. Die beiden Protonen sind gleichnamig elektrisch geladen und stoßen sich demzufolge mit einer Kraft ab, die um so größer wird, je näher sie einander kommen. Um diese zu überwinden, kennt man bis heute nur einen einzigen Ausweg. Bekanntlich bewegen sich die Teilchen eines Gases um so schneller, je höher seine Temperatur ist. Man kann sich dann leicht vorstellen, daß ein Punkt kommen muß, bei dem die Teilchen die gegenseitige Abstoßung überwinden können und zur Verschmelzung kommen. Die Temperatur, bei der dies eintritt, ist bekannt. Sie liegt bei etwa 100 bis 400 Mill. K. (Es ist bei diesen Angaben üblich, die Temperatur in Kelvingraden auszudrücken, obwohl bei den hier vorliegenden hohen Beträgen der Unterschied gegenüber der Celsiusskale verschwindend gering ist.) Man spricht wegen der sehr hohen Temperaturen auch von *thermonuklearen Reaktionen*. In diesem extremen Zustand hören die Atome auf zu existieren. Infolge der ungeheuren Geschwindigkeit, mit der sie zusammenprallen, sind sie ihrer Elektronenhüllen vollständig beraubt. Wir haben ein *Plasma* vor uns, das nur noch aus nackten Atomkernen und freien Elektronen besteht. Damit wird die ganze Fusionsangelegenheit zu einem Problem der Plasmaphysik.

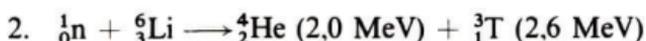
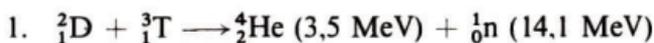
Grundsätzlich ist es auch schon gelöst worden. Aber wiederum geschah es wie zum Hohn auf die sonst so glanzvollen Ergebnisse der physikalischen Forschung. Es wurde gelöst in Gestalt der berüchtigten *Wasserstoffbombe*, der wohl perfektesten Konstruktion zur Massenvernichtung von Menschen. Sie wird von der Kettenreaktion einer »normalen« Kernspaltungsbombe gezündet, die mutmaßlich von einem Mantel aus Lithiumdeuterid, einer Verbindung aus ${}^6_3\text{Li}$ und ${}^2_1\text{D}$ (dem

schweren Wasserstoff, S. 12), umgeben ist. In etwas vereinfachter Weise beschrieben, liefert die ungesteuert und ungehemmt explodierende Uranfüllung die zunächst erforderliche hohe Anfangstemperatur. Sie reicht aus, um je zwei Deuteriumkerne ${}^2_1\text{D}$ zu einem Heliumkern zu verschmelzen. Die Sprengkraft einer am 21. 5. 1956 geworfenen amerikanischen Versuchsbombe wurde auf das 1000fache einer gewöhnlichen Kernspaltungsbombe geschätzt. Nur durch die gemeinsamen Anstrengungen aller friedliebenden Kräfte der Welt kann es gelingen, einen erneuten verbrecherischen Mißbrauch wissenschaftlicher Kenntnis zu verhindern.

Harte Bedingungen

Soll die Energie der Kernfusion für friedliche Zwecke verwertbar sein, so sind an den Ablauf der Reaktion die gleichen Bedingungen zu stellen wie im Fall der Kernspaltung. Er muß langsam vor sich gehen, jederzeit zu zünden und zu löschen sein. Die produzierte Wärme soll sich mit den bewährten Mitteln der Technik nutzen lassen.

Zuerst aber gilt es Ausschau zu halten, welche Kernreaktionen überhaupt in Betracht kommen. Von der Theorie her haben sich bis jetzt die Reaktionen



als die günstigsten herausgestellt. Die erste Gleichung besagt, daß je ein Deuterium- und Tritiumkern unter Freigabe eines Neutrons zu einem Heliumkern verschmelzen. Die beiden gebildeten Teilchen fliegen mit etwa 1/10 Lichtgeschwindigkeit diametral auseinander. Die entsprechenden Energien sind in Klammern dahintergeschrieben. Für die Gesamtheit aller in der reagierenden Masse anwesenden Teilchen bedeutet das einen gewaltigen Zuwachs an Wärmeenergie. Der Wirkungsquerschnitt hat bei etwa 1,2 Mrd. K mit 5 barn seinen größten Wert. Wir erinnern uns noch (S. 29), daß er ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der besagten Reaktion ist.

Die zweite Gleichung ist auf den ersten Augenblick nicht sofort als Fusionsprozeß erkennbar, da ja die beiden gebil-

deten Teilchen leichter als der Lithiumkern sind. Dennoch tritt auch hier ein deutlicher Massendefekt auf, der sich als kinetische Energie auf die frei werdenden Kerne verteilt. Diese Reaktion ist aber aus einem anderen Grund sehr wichtig. Sie liefert nämlich genau die Menge an Tritium, die in der ersten Reaktion verbraucht wird. Denn im Gegensatz zum Deuterium, das als Bestandteil des »schweren Wassers« mit einem Anteil von 0,015 % in jedem Tropfen gewöhnlichen Wassers enthalten ist, kommt Tritium in der freien Natur so gut wie überhaupt nicht vor und könnte nur auf kostspieligste Weise aus anderen Kernreaktionen gewonnen werden.

Beide Reaktionen werden also in einem Plasma vor sich gehen, das durch extreme Erhitzung von Lithiumdeuterid entsteht.

Es läßt sich denken, daß derartige und ähnliche Experimente mit hochoverhitzten Plasmen schon längst ausprobiert wurden. Viele große Institute, die sich hauptsächlich mit dem Studium solcher Plasmen beschäftigen, sind in allen großen Staaten während der letzten Jahre entstanden. Die Plasmaphysik gehört zu den Gebieten, auf denen z. Z. am meisten geforscht wird. Die Experimente sind aber unerhört schwierig.

Vor allem kommt es darauf an, daß die *Teilchendichte* n , das ist die Anzahl der in der Volumeneinheit anwesenden Teilchen, und auch die *Einschließungszeit* τ , das ist die Zeit, während der das Plasma noch zusammenhält, möglichst groß sind. Die Theorie fordert für das Produkt beider Größen bei einer Temperatur von etwa 100 Millionen Grad einen Mindestwert von $n \cdot \tau = 5 \cdot 10^{14} \text{ s/m}^3$. Man nennt dies das *Lawson-Kriterium*.

Damit wir uns wenigstens etwas darunter vorstellen können, denken wir uns ein Plasma von der Dichte $2,5 \cdot 10^{16}$ Teilchen je cm^3 , die zur Erzielung einer vertretbaren Leistung vorhanden sein muß. Damit die ersten Fusionsprozesse in Gang kommen, müßte dann das Plasma mindestens $2 \cdot 10^{-2}$ s lang zusammengehalten werden. Eine einfache Rechnung lehrt dann weiter, daß dieses Plasma auf die einschließenden Wände einen Druck von 350 at ausüben würde. Auf der ganzen Welt gibt es aber kein Material, das solchen Temperaturen und zugleich Drücken auch nur im entferntesten standzuhalten vermag. Die Bedingungen, unter denen die Reaktion allein zustande kommen kann, übertreffen somit an Härte alles, was Physik und Technik bisher zu bewältigen hatten.

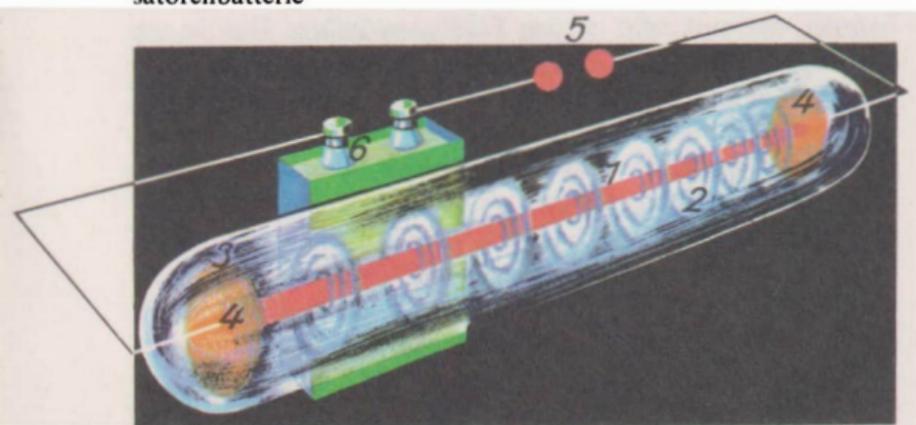
Unsichtbare Wände

Angesichts dieser Schwierigkeiten ist es fast ein Wunder zu nennen, daß es einen Ausweg gibt. Er beruht darauf, daß jedes Plasma ein vorzüglicher Leiter für den elektrischen Strom ist. Die an unserer Zimmerdecke strahlende Leuchtstoffröhre enthält ein solches Plasma. Allerdings ist hier der Strom nur sehr schwach, und die Lampe wird kaum handwarm. Aber noch etwas ist da. Wie jeder stromdurchflossene Leiter ist auch die Plasmasäule von einem Magnetfeld umgeben. Doch es ist nur äußerst schwach, wie ein zarter Hauch und ohne jede praktische Bedeutung.

Wenn man aber diesen Plasmaschlauch so behandelt, wie es die Physiker in ihren Versuchen schon viele tausendmal in allen Variationen probierten, wird alles ganz anders. Aus einer mächtigen Batterie von Kondensatoren wird ein Strom von mehreren Tausend Ampere durch das Plasma gejagt. Das jäh ansteigende Magnetfeld drückt von allen Seiten konzentrisch auf das Plasma und schnürt es zu einem im freien Raum schwebenden dünnen Faden zusammen (Bild 55). Man nennt diese Erscheinung den *Pincheffekt*. Die plötzliche Kompression steigert die Temperatur auf Millionen Grad. Blitzschnell geht das vor sich. Gleißendes Licht blendet die Augen – und schon ist alles wieder dunkel. Der Faden ist zerrissen. Gerade in dem

Bild 55. Pincheffekt

1 - komprimierter Plasmaschlauch, 2 - konzentrisches Magnetfeld, 3 - Vakuumgefäß, 4 - Elektrode, 5 - Schaltfunkenstrecke, 6 - Kondensatorenbatterie



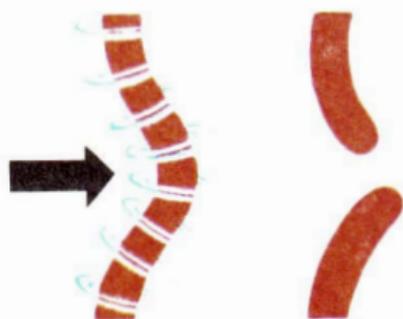


Bild 56. Instabilität des Plasmas

An der Innenseite der Krümmung, wo sich die magnetischen Feldlinien zusammendrängen, ist der Druck des Feldes größer als an der Außenseite.

Augenblick, in dem das Plasma beginnt, für den Physiker interessant zu werden, wird es instabil. Der Faden schnürt sich in unkontrollierbarer Weise an vielen Stellen vollständig ab und zersprengt sich dadurch von selbst. Das ist auch ganz erklärlich. Irgendwo, wie es der Zufall will, ist der Faden ein wenig gekrümmt. Dann ist auch das Magnetfeld zwangsläufig an der konkaven Seite stärker als an der abgewandten, die nach außen zeigt. Das Feld drückt immer so, daß es die Krümmung verstärkt und den Faden zerreißen muß (Bild 56). Machtlos und verzweifelt steht man dem Phänomen dieser Instabilität auch heute noch gegenüber.

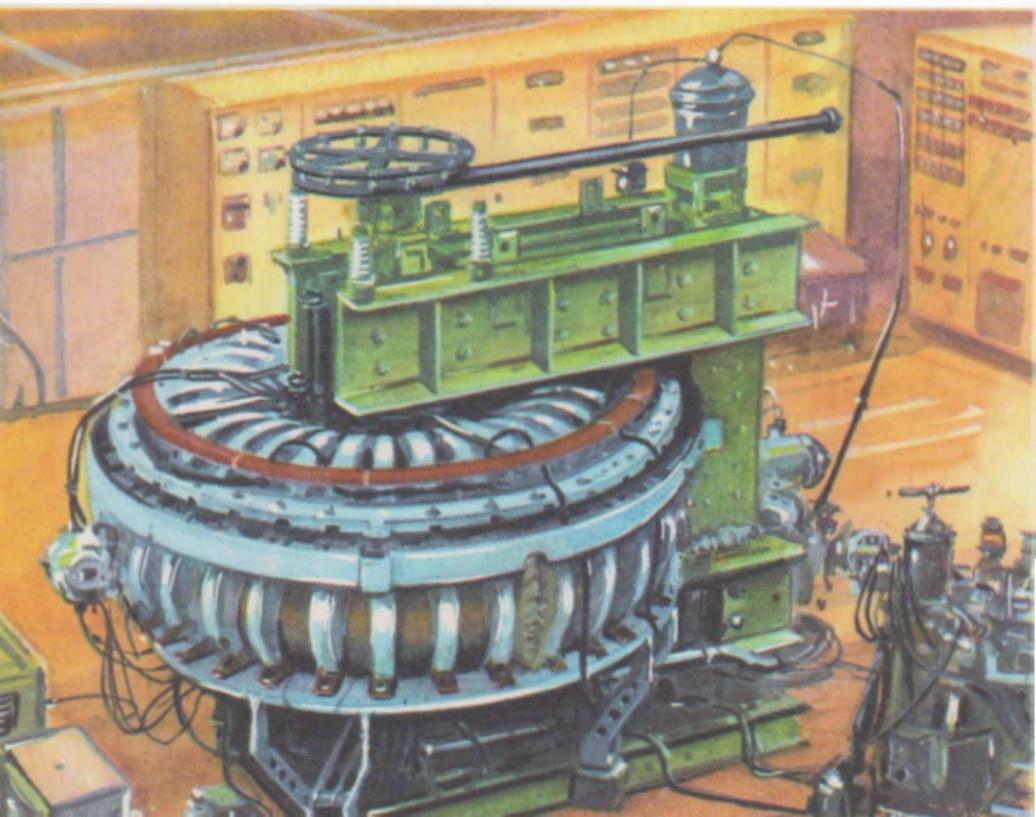
Eine andere Grundeigenschaft des Plasmas erweist sich dagegen von größtem Vorteil. Die darin umherfliegenden elektrisch geladenen Teilchen bewegen sich niemals quer zu den magnetischen Feldlinien, sondern immer nur auf Kreisbahnen, die senkrecht zu den Feldlinien stehen. Das ist ein Grundgesetz der Elektrodynamik. Bei schräger Anflugrichtung entstehen dann schraubenförmige Bahnen. Wenn ein Teilchen auf diese Weise in ein Magnetfeld hineinfliegt, das zunehmend stärker wird, geschieht etwas Merkwürdiges. Bei einem bestimmten Punkt kehrt es um und fliegt wieder zurück, als werde es von einer unsichtbaren Wand reflektiert. Wird daher ein geradliniger Plasmaschlauch beiderseits mit zusätzlichen Magnetwicklungen versehen, können die geladenen Teilchen an diesen Enden nicht mehr entweichen. Sie sind in einer *magnetischen Flasche* gefangen. Damit besteht eine Chance mehr, die Einschließungszeit zu vergrößern. Noch vorteilhafter als der

lineare Pinch erscheint der *toroidale Pinch*. Die das Plasma enthaltende Röhre ist zu einem Kreis zusammengebogen wie ein Rettungsring und noch zusätzlich von einer starken Magnetwicklung umgeben.

Eine Beschreibung aller bisher gebauten Apparaturen ist hier nicht möglich. Als eine der erfolgreichsten gilt z. Z. das mit einem toroidalen Pinch arbeitende sowjetische Gerät *Tokamak* (Bild 57). 9 Mill. K und eine Hundertstel Sekunde Einschlußzeit wurden bereits gemeldet. Ein wirklich durchschlagender Erfolg wurde aber noch nirgends erzielt. Auch mit ganz andersartigen Methoden, wie z. B. der Plasmaerzeugung mit Hilfe des Lasers oder mit Laserstrahlen, die auf Deuteriumeis geschossen wurden, ist man dem Ziel noch nicht näher gekommen.

Selbst wenn es eines Tages gelingen sollte, die Grenze des Lawson-Kriteriums zu erreichen, stünde man erst am Anfang. Als nächste Stufe müßte die Plasmaentladung erst einmal imstande sein, sich energetisch selbst zu unterhalten, über längere Zeit stabil zu bleiben und schließlich Nutzenergie nach außen

Bild 57. Versuchsanlage „Tokamak 6“ für Fusionsexperimente im Kurtschatow-Institut für Atomenergie



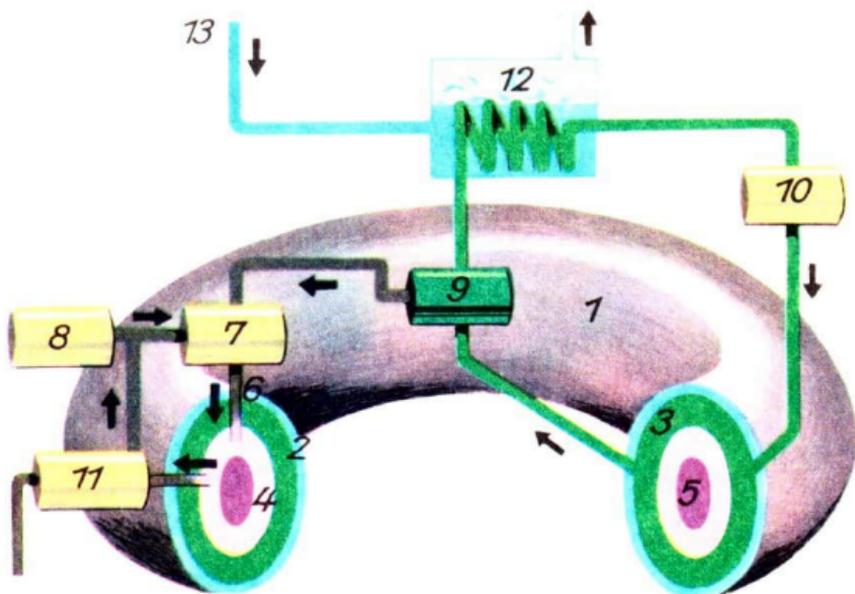
abzugeben. Fachleute meinen, daß dieses Ziel wohl kaum vor dem Jahre 2000 erreicht sein wird. Andere wieder, wie der sowjetische Nobelpreisträger und Miterfinder des Lasers, N. G. Basow, sind der Ansicht, daß der Durchbruch zum ersten Fusionsreaktor noch in diesem Jahrzehnt zu erwarten sei.

Der Reaktor der Zukunft

Noch gehört die Frage der Kernfusion nicht zu den brennenden Problemen der Gegenwart. Aber es gibt wohl kaum einen Physiker, der nicht fest davon überzeugt wäre, daß Fusionsreaktoren ebenso selbstverständlich sein werden wie die heutigen Kernkraftwerke. Wir wissen noch nicht, wie sie aussehen werden. Dem freien Flug der Gedanken sind jedoch keine Grenzen gesetzt. Nichts hindert uns daran, uns einen Fusions-

Bild 58. Schema eines Fusionsreaktors

- 1 - Ringrohr, 2 - Magnetwicklung, 3 - Brutmantel aus Lithium,
- 4 - Vakuum, 5 - Plasmaschlauch, 6 - Brennstoffzufuhr, 7 - Deuterium-Tritium-Gemisch,
- 8 - Deuteriumvorrat, 9 - Tritiumabscheider, 10 - Lithiumvorrat,
- 11 - Heliumabscheider, 12 - Dampferzeuger, 13 - Speisewasserzufluß



reaktor vorzustellen, wie er nach unseren heutigen, zugegebenermaßen noch recht mageren Kenntnissen einmal aussehen könnte (Bild 58).

Als Hauptteil fällt uns ein riesiges ringförmiges Rohr auf. Sein Querschnitt besteht aus mehreren konzentrischen Zonen. In der Mitte brennt, frei im Raum schwebend, bei einer Temperatur von etwa 200 Mill. K das D-T-Plasma. Hier vollzieht sich die in Gleichung 1 (S. 121) genannte Hauptreaktion. Das Plasma wird komprimiert und stabilisiert durch eine den ganzen Torus umschließende Magnetwicklung. Der größte Teil der Energie steckt in den frei werdenden Neutronen. Als elektrisch neutrale Teilchen können sie aus dem Plasma ungehindert entweichen und gelangen in die umgebende, aus Lithium bestehende Brutzone. Dort spielt sich die Reaktion nach Gleichung 2 ab. Der restliche Teil der Energie ist in dem gebildeten Helium enthalten, das die Aufheizung des Plasmas besorgt. Rohrleitungen verbinden das Plasma mit dem äußeren Brennstoffkreislauf, der das überschüssige Helium herauszieht und frisches D-T-Gemisch zuführt.

Die Hauptmenge der gebildeten Wärme sammelt sich somit in der Brutzone an. Das zugleich als Kühlmittel dienende flüssige Lithium strömt in einem besonderen Kreislauf durch den Dampferzeuger, der seinerseits den Turbogenerator speist. Das vom Lithium mitgeführte Tritiumgas wird verlustlos abgeschieden und dem Brennstoffzyklus zur Ergänzung zugeführt. Im übrigen werden keine weiteren Betriebsmittel verbraucht als Deuterium und Lithium.

So schön das alles auf dem Papier aussehen mag, so gehört das letztgenannte Projekt vorderhand noch ins Reich der Utopie, der wissenschaftlichen Träumerei. Dennoch ist sie nicht ganz sinnlos. Ohne diesen freien Flug der Gedanken und ohne ein gehöriges Maß an schöpferischer Phantasie und Kombinationsfähigkeit des forschenden und arbeitenden Menschen gäbe es keinen technischen Fortschritt. Zu den gegenwärtig progressivsten Zweigen der modernen Technik aber gehört die unaufhaltsame Entwicklung kernenergetischer Anlagen als der künftig zuverlässigen Basis aller Technik und menschlichen Kultur.

»akzent« – die neue Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.

Weitere Bände:

Achtung, Roboter!

Aus dem Tagebuch der Erde

Der Sternhimmel

Mathe mit Pfiff

Sind wir allein im Weltall?

Die Erfindung des Haustieres

Vom Wasser- zum Landleben

EVP 4,50 Mark
