

Energiequellen für die chemische Industrie

In den letzten Jahren werden immer mehr Stimmen laut, die auf die kritische Versorgungslage im Energiesektor hinweisen, und nachdem die chemische Industrie im Wirtschaftsleben der Schweiz eine dominierende Stellung einnimmt, war es von Interesse, die dieser Industrie zur Verfügung stehenden Energiequellen in einer Artikelserie von Sachverständigen beleuchten zu lassen. In Erwartung der industriellen Auswertung der Atomenergie, die im ersten Artikel von Herrn Dr. DUBS behandelt wird, sind wir vorerst noch auf Wasser, Kohle, Gas, Erdöl und Elektrizität angewiesen, wie die Ausführungen von Herrn Ing. ZEHNDER zeigen. Die Artikelreihe wird fortgesetzt.

Redaktion

Die Atomkernreaktion als Energiequelle

Von Dr. sc. techn. WERNER R. DUBS, dipl. Masch.-Ing. ETH, Zürich

Seitdem es gelungen ist, die gewaltigen Energiemengen des Atomzerfalls in sogenannten Kernreaktoren in technisch gut beherrschbarer Form zu erschließen, eröffnet sich ein neuer Weg, der geeignet sein kann, den Bedarf an Energie für alle Zeiten zu befriedigen. Die Möglichkeit der Energiegewinnung durch Umwandlung von Materie, ein Prozeß, der in der Kettenreaktion des Urans selbständig abläuft, wurde bereits im Jahre 1905 durch den Physiker A. EINSTEIN erkannt. Als eine Folgerung der Relativitätstheorie formulierte er den fundamentalen Satz von der Gleichwertigkeit von Materie und Energie. Die Masse stellt nur eine besonders konzentrierte Form von Energie dar, es muß daher grundsätzlich möglich sein, Materie in mechanische Arbeit, Wärme oder Strahlung zu verwandeln und auch umgekehrt Energie in Materie überzuführen.

Während bekanntlich nach der klassischen Mechanik die kinetische Energie eines materiellen Punktes gegeben ist durch:

$$E = \frac{m}{2} v^2 \quad (1)$$

lautet nach der Relativitätstheorie der entsprechende Ausdruck:

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = m \cdot c^2 \quad (2)$$

worin:

m_0 = Ruhemasse
 v = Geschwindigkeit
 $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
 } des materiellen Punktes

Die Masse m eines mit der Geschwindigkeit v bewegten Teilchens berechnet sich zu:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (3)$$

Diese Beziehung, nach der die Masse eines bewegten Teilchens mit der Geschwindigkeit zunimmt, ist durch das Experiment sehr gut bestätigt worden. Entwickelt man den Ausdruck (2) nach einer binomischen Reihe, so folgt:

$$E = m_0 \cdot c^2 + \frac{m_0}{2} v^2 + \frac{3}{8} m_0 \cdot \frac{v^4}{c^2} + \dots \quad (4)$$

Das erste Glied dieser Reihe enthält die Geschwindigkeit v nicht, es kommt also nicht in Betracht, wenn es sich um die Frage handelt, wie die Energie eines Massenpunktes von seiner Geschwindigkeit abhängt. In der klassischen Mechanik wird allein das zweite Glied berücksichtigt, die weiteren Glieder sind gegenüber diesem Glied stets sehr klein, solange $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ gegenüber 1 klein ist. Damit ist dem ruhenden materiellen Teilchen ($v=0$, $m=m_0$) die Energie zugeordnet:

$$E = m_0 \cdot c^2 \quad (5)$$

d. h. die träge Masse eines Körpersystems ist ein Maß für seine Energie. Eine Energieänderung ΔE eines Systems zieht eine Massenänderung Δm nach sich, derart, daß

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \quad (6)$$

Die Materie wird damit zum Sonderfall räumlich verdichteter Energie. Schon eine sehr kleine Masse verkörpert einen enorm großen Energiebetrag. Setzt man im Äquivalenztheorem die Masse in g, die Lichtgeschwindigkeit in cm/s ein, so erhält man die Energie in erg. Diese Energieeinheit des physikalischen Maßsystems läßt sich in den technischen Einheiten ausdrücken durch Einführen folgender Umrechnungsfaktoren¹:

¹ W. DUBS, Die physikalischen Grundlagen der Atomenergie-Anlage. Schweiz. Bauzeitung 128, Nr. 9 und 10 (1946).

$$1 \text{ erg} = 2,778 \cdot 10^{-14} \text{ kWh}$$

$$1 \text{ erg} = 2,389 \cdot 10^{-11} \text{ kcal}$$

Bei der restlosen Umwandlung von 1 g Materie in Energie würden somit

$$E = 1 \cdot 9 \cdot 10^{20} \cdot 2,778 \cdot 10^{-14} = 25\,000\,000 \text{ kWh}$$

$$= 21\,600\,000\,000 \text{ kcal}$$

entstehen, ein Betrag, der nach den bisherigen Verfahren durch die Verbrennung von rund 3 000 000 kg Kohle gedeckt werden kann.

Da die EINSTEINSche Erkenntnis der Zeit weit vorausseilte, ergaben sich zunächst keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Technik. Erst als es gelang, künstliche Atomumwandlungen durchzuführen, trat die Umsetzung von Materie in Energie in Form eines Massendefektes sichtbar in Erscheinung. Bekanntlich besteht das Atom aus einem winzigen, aber schweren Kern, der von einer ausgedehnten leichten Elektronenhülle umgeben ist. Bei den chemischen Prozessen verändert sich nur die Elektronenhülle. Da in diesem Fall der Kern als Hauptträger der Masse nicht beteiligt ist, wird nach den vorangehenden Ausführungen über die Äquivalenz von Masse und Energie ohne weiteres klar, daß bei den exotherm verlaufenden chemischen Reaktionen (Verbrennung von Kohle, Explosion von Sprengstoffen usw.) die Wärmetönungen verhältnismäßig klein sind.

Die Verbrennung der Kohle zu Kohlensäure verläuft mit einer Wärmeentwicklung von 97 000 cal pro Mol Kohlenstoff. Dieser Verbrennungswärme entspricht ein Massendefekt von:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{97\,000}{2,389 \cdot 10^{-8} \cdot 9 \cdot 10^{20}} = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ g/Mol}$$

Die Masse des Kohlensäuremoleküls ist um diesen Betrag kleiner, als die Summe der Massen der Kohlenstoff- und Sauerstoffatome war, ehe sie zu CO_2 verbrannt. Bezeichnen wir als Massenausbeute das Verhältnis von der in Energie umgesetzten Masse zur gesamten Masse, so ergibt die Verbrennung der Kohle den Wert

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{4,5 \cdot 10^{-9}}{44} = 1,02 \cdot 10^{-10}$$

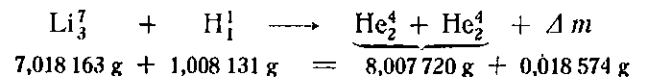
Von derselben Größenordnung sind die Zahlen bei der Knallgasreaktion, in der auf 2 g Wasserstoff eine Wärmemenge von 68 000 cal frei wird, was zu einer Massenausbeute

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{3,18 \cdot 10^{-9}}{18} = 1,76 \cdot 10^{-10}$$

führt. In bezug auf die Energieumsetzung arbeiten somit die chemischen Reaktionen sehr ungünstig. Die Verhältnisse ändern sich aber sofort, sobald wir Prozesse durchführen, bei denen die Atomkerne miteinander reagieren, wie dies bei der künstlichen Atomumwandlung der Fall ist.

Beschießt man z. B. den Kern des Lithium-Atoms mit Protonen, so beobachtet man die Entstehung

einer sehr energiereichen α -Strahlung, d. h. einer Emission von Heliumkernen. Die Reaktion wird durch folgende Gleichung beschrieben:



Der Massendefekt beträgt:

$$\Delta m = 18,574 \cdot 10^{-3} \text{ g/Grammatom}$$

und die Massenausbeute berechnet sich zu:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0,018\,574}{8,007\,720} = 2,32 \cdot 10^{-3} = 2,32 \text{ ‰}$$

In diesem Fall ist die Massenausbeute und damit die entsprechende Energieumsetzung rund zehn Millionen mal so groß wie diejenige der beiden angeführten chemischen Reaktionen. Auf 1 g Lithium bezogen, ergibt sich ein Massendefekt von $2,65 \cdot 10^{-3}$ g. Könnte man nach obiger Kernreaktion 1 kg natürliches Lithium (Isotopengemisch von 92,1 % Li_3^7 und 7,9 % Li_3^6) vollständig umsetzen, so würde sich ein Massendefekt von 2,44 g ergeben, was nach EINSTEIN einer Reaktionsenergie von 61 000 000 kWh entspricht.

Genaue Massenbestimmungen zeigen, daß die Masse eines stabilen Atomkernes etwas kleiner ist als die Gesamtmasse der getrennten Protonen und Neutronen. Dieser der Bindungsenergie der Nucleonen entsprechende Massendefekt berechnet sich aus:

$$\Delta m = M - (A - Z) \cdot m_n - Z \cdot m_p$$

wobei:

M = wirkliche Masse des Kernes

A = Massenzahl

Z = Kernladungszahl

m_n = Neutronenmasse

= 1,008 930 Masseneinheiten (ME)

m_p = Protonenmasse

= 1,007 582 Masseneinheiten (ME)

Betrachten wir z. B. den Aufbau eines Heliumkernes, so gelten folgende Zahlen:

$M = 4,002\,764 \text{ ME}$

$A = 4$

$Z = 2$

Somit

$$\Delta m = 4,002\,764 - (4 - 2) \cdot 1,008\,930 - 2 \cdot 1,007\,582$$

$$= 0,030\,26 \text{ ME}$$

Nach der EINSTEINSchen Energiebeziehung berechnet sich die bei der Vereinigung von zwei Protonen und zwei Neutronen zu einem Heliumkern freiwerdende Energie zu:

$$E = 0,030\,26 \cdot 9 \cdot 10^{20} = 0,2723 \cdot 10^{20} \text{ erg/Grammatom}$$

oder, in technischen Einheiten ausgedrückt:

$$E = 0,2723 \cdot 10^{20} \cdot 2,778 \cdot 10^{-14}$$

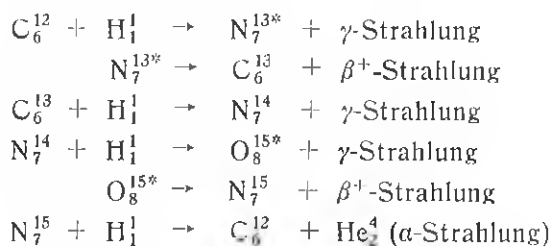
$$= 756\,450 \text{ kWh/Grammatom}$$

Bei der Bildung von 1 kg Helium würde der Massendefekt 7,565 g betragen, und die äquivalente Energie rund 190 000 000 kWh.

Die erwähnte Kernreaktion des Lithiums mit schnellen Protonen benötigt zu ihrem selbsttätigen Ablauf eine Zündung bei etwa 10 000 000 °C. Erst bei dieser hohen Temperatur besitzen die Protonen genügend thermische Energie, um eine Kernreaktion auszulösen, wodurch große Energien freiwerden, die ihrerseits die Temperatur und damit den Prozeß aufrechterhalten. Da es auf der Erde keine Materialien gibt, welche solchen Temperaturen standhalten, wäre es unmöglich, die reagierenden Gase in einer Kammer einzuschließen. Lange bevor die Temperatur den erforderlichen Wert erreicht hätte, würden die Wände wegschmelzen, die heißen Gase sich ausdehnen und die Temperatur fallen. Die Technik kennt zurzeit keine Mittel, um solche thermische Kernreaktionen unter Laboratoriumsbedingungen in Gang zu bringen.

Anders liegen dagegen die Voraussetzungen auf der Sonne mit ihren durch die Gravitationskräfte zusammengehaltenen Gaswänden. Nach HELMHOLTZ begann die Sonne ihr Leben als eine riesige, verhältnismäßig kühle Gasmasse, die allmählich unter dem Einfluß der Gravitationskräfte durch Kontraktion immer heißer geworden ist. Sobald nun die Mittelpunkttemperatur dieser sich zusammenziehenden Sonne einen Grad erreicht hatte, der zur Aufrechterhaltung von thermischen Kernreaktionen ausreichte, hat die freiwerdende Energie jede weitere Schrumpfung verhindert und den gegenwärtigen stabilen Zustand der Sonne herbeigeführt².

Unter der katalytischen Wirkung von Kohlenstoff- und Stickstoffkernen verwandeln sich bei der extrem hohen Temperatur (etwa 20 000 000 °C) vier Wasserstoffkerne in einen Heliumkern. H. BETHE (Cornell University, USA) und C. VON WEIZSÄCKER (MAX-PLANCK-Institut für Physik in Göttingen) haben zur Erklärung der solaren Energieerzeugung folgende geschlossene Reaktionskette von thermischen Kernprozessen vorgeschlagen:

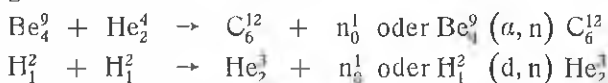


Ein * bedeutet instabiler Kern, in vorliegendem Fall Positronenstrahler. Nachdem hintereinander vier Wasserstoffkerne (Protonen) in das Reaktionsschema eingetreten sind, entsteht in der letzten Reaktion der als Ausgangspunkt gewählte Kohlenstoff und ein Heliumkern oder α -Teilchen. Die Überführung von Masse in Energie bewirkt einen Massenverlust

der Sonne von etwa 4 000 000 Tonnen/s, die abgestrahlte Leistung beträgt rund $4 \cdot 10^{23}$ kW.³

Allgemein werden heute Kernreaktionen im Laboratorium durch Beschließung eines Kernes mit Protonen, Neutronen, Deuteronen oder Helionen (α -Teilchen) durchgeführt. Wegen der außerordentlichen Kleinheit des Zielobjektes und der gegenseitigen elektrischen Abstoßung (bei Bombardierung mit Neutronen nicht der Fall) von Kern und Geschöß, ist die Trefferwahrscheinlichkeit sehr gering. Die meisten Geschosse laufen sich in der Elektronenhülle tot, ohne je in Kernnähe gelangt zu sein. Obwohl bei einem einzelnen Treffer eine beträchtliche Energie frei wird, kann sie gegenüber dem Energieaufwand in den Beschleunigungsanlagen (Cyclotron usw.) vernachlässigt werden.

Das Bild änderte sich jedoch in dem Augenblick, als es durch die Entdeckung der Uranspaltung gelang, bei technisch noch gut beherrschbaren Temperaturen eine Kettenreaktion durchzuführen. Bereits zwei Jahre nach der Entdeckung des Neutrons durch J. CHADWICK (1932) bombardierten in Rom E. FERMI und seine Mitarbeiter Uran mit Neutronen aus einer Radium-Beryllium-Quelle. Die Neutronen sind für die Umwandlung schwerer Kerne, an die man wegen der hohen positiven Kernladung mit geladenen Teilchen nicht herankommt, besonders geeignet. Allerdings müssen die Neutronen erst über eine Kernreaktion mit geladenen Teilchen erzeugt werden. Als Beispiele gebräuchlicher Neutronenquellen seien angeführt die Reaktionen:



Im ersten Beispiel handelt es sich um ein Pulver aus Beryllium, welches, mit etwas Radiogas gemischt, in einer Ampulle eingeschlossen ist. Die zweite Reaktion erzielt man durch Beschließung von schwerem Wasserstoff mit Deuteronen in einer Kanalstrahlröhre.

Ogleich die Ergebnisse der FERMISCHEN Arbeiten erst einige Jahre später richtig gedeutet werden konnten, gaben sie dem Studium der Neutron-Uran-Reaktion einen gewaltigen Auftrieb. So haben im Jahre 1939 O. HAHN (Nobelpreis 1944 in Chemie) und F. STRASSMANN gefunden, daß der schwere Atomkern des Uranisotops U^{235} bei der Bombardierung mit langsamen Neutronen unter vorübergehender Bildung des Zwischenkernes U^{230} in zwei mittelschwere Kerne zerfällt und dabei gleichzeitig zwei bis drei neue Neutronen aussendet⁴. Wird den neuentstandenen, zunächst schnellen Neutronen Gelegenheit geboten, ihre Geschwindigkeit zu vermindern (z. B. durch Bremsung in schwerem Wasser, Kohle usw.),

² G. GAMOW, Geburt und Tod der Sonne. Birkhäuser, Basel 1947.

³ R. DURRER, Betrachtungen über die Weltenergieerzeugung. Polygraphischer Verlag, Zürich 1946.

⁴ O. HAHN und F. STRASSMANN, Naturwiss. 27, 163 (1939).

so können sie sich selbst wiederum an die Kerne des U^{235} anlagern und die Spaltung weiter fördern (Abb. 1). So besteht die Möglichkeit einer Kettenreaktion, die, einmal eingeleitet, weiter fortschreitet, bis die ganze Uranmenge umgesetzt ist. Beide Kernbruchstücke stoßen sich wegen ihrer großen positiven Ladung ab und fliegen mit starker Wucht auseinander, wobei sie ihre kinetische Energie durch Zusammenstöße in Wärme umsetzen. Die Gesamtmasse der Bruchstücke ist kleiner als die Ausgangsmasse des Urankerns; dem Massendefekt entspricht eine Energietönung von

$$E = (m_0 - \sum m_i) \cdot c^2$$

m_0 = Ruhemasse des Ausgangskernes
 m_i = Ruhemasse eines Kernbruchstückes

Direkte Messungen der durch die Spaltung des Urans freiwerdenden Energie wurden gemacht durch Beobachtung der Geschwindigkeit der Spaltprodukte und Berücksichtigung der in ihrer Radioaktivität enthaltenen Energie. Ein sehr eleganter Weg zur Bestimmung der kinetischen Energie der Spaltprodukte wurde von M. C. HENDERSON⁵ gezeigt, der die Technik der Mikrokalorimetrie zur Messung der Wärme benützte, die eine kleine, mit langsamen Neutronen bombardierte Uranprobe entwickelt. Rechnen wir die erhaltenen Werte in das technische Maßsystem um, so gibt die Spaltung (*fission*) von 1 kg U^{235} eine Energie von rund 25 000 000 kWh frei, d. h. die Massenausbeute beträgt 1 %. Diese Umwandlung von 1 g Materie in Energie spielt sich in der Atombombe in ca. 10^{-7} s ab⁶.

Die Reaktionsgleichung der Uranspaltung lautet:

$$U_{92}^{235} + n_0^1 \rightarrow U_{92}^{236} \rightarrow X_r^s + Y_t^u + \eta(1-\delta) \cdot n_0^1 + \gamma + \varphi \quad (8)$$

Es bedeuten:

r, s = Massenzahl des leichten und schweren Spaltproduktes (X, Y)

t, u = Ordnungszahl des leichten und schweren Spaltproduktes

η = Anzahl Neutronen, die pro Spaltung freiwerden

$\delta \sim 0,006$ = Anteil an verzögerten Neutronen

γ = Gammastrahlung

φ = Energietönung

Von der totalen Energie der Uranspaltung werden etwa 80 % als kinetische Energie der Spaltprodukte und etwa 20 % als Strahlungsenergie frei. Nach den Messungen von ZINN und SZILARD liegt der mittlere Wert für die pro Kernspaltung freiwerdenden Neutronen bei $\eta = 2,3$. Aus dem Ertragsspektrum der

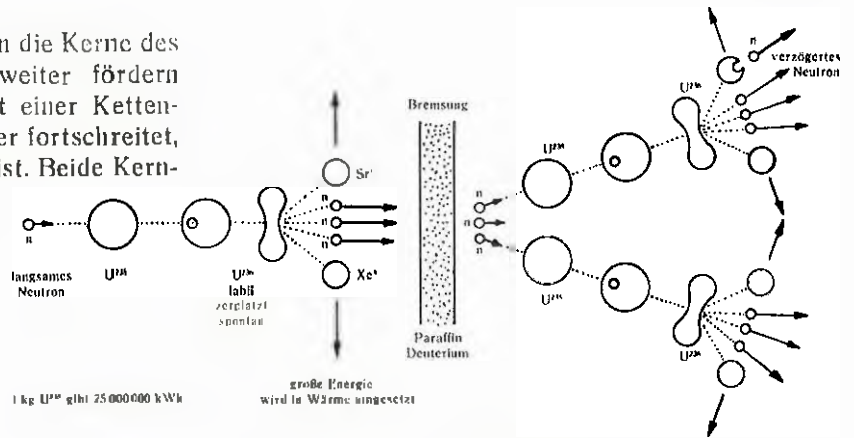


Abb. 1. Die Kettenreaktion von U^{235}

Spaltprodukte (Abb. 2) entnehmen wir, daß die beiden Maxima der Kurve bei den Massenzahlen 95 und 139 liegen, bei einer Ausbeute von etwa 6 %. Die Beziehung zwischen Ladung und Massenzahl ergibt für t und u die wahrscheinlichsten Werte 38 (Strontium) und 54 (Xenon). Damit geht die Gleichung der Uranspaltung über in:

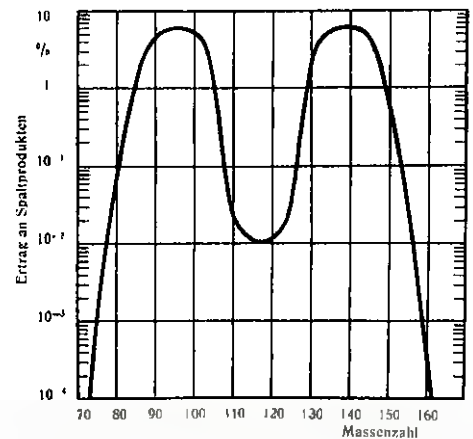
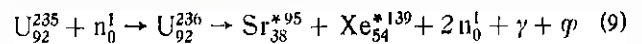
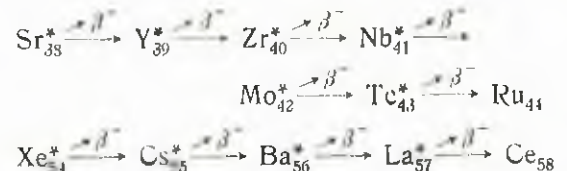


Abb. 2. Spaltproduktertragsspektrum für die Spaltung von U^{235} mit langsamen Neutronen

Bei den Spaltprodukten handelt es sich um instabile Isotope, die sich im β -Zerfall nach Art der radioaktiven Reihen in stabile Elemente umwandeln.



Zur Zeit der Entwicklung des «Manhattan-Projektes» wurden ausgedehnte Untersuchungen über die Natur der in der Kernspaltung erzeugten Zerfallskerne unternommen⁷. Ungefähr fünfzig verschiedene Ketten von Spaltprodukten wurden gefunden, und als

⁵ M. C. HENDERSON, Phys. Rev. 58, 774 (1940).
⁶ W. L. LAURENCE, Dawn over Zero, S. 170. A. Knopf, New York 1946.

⁷ Rev. Mod. Physics 18, 513 (1946).

allgemeine Regel wurde festgestellt, daß die Zerfallsgeschwindigkeit der Kerne am Kopf der Kette größer ist als diejenige der Produkte am Ende der Reihe.

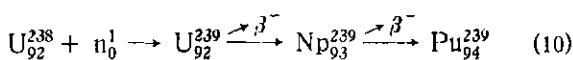
Die schweren Kerne enthalten zur Sicherung ihrer Stabilität einen gewissen Neutronenüberschuß. Das Verhältnis der Neutronenzahl zur Protonenzahl wächst vom Wert 1 bei den leichten Elementen auf 1,6 bei den schweren Elementen an. Zerfällt der Zwischenkern U^{230} spontan, so ist bei den leichteren Zerfallskernen das Verhältnis der Neutronenzahl zur Protonenzahl kleiner als beim schweren Urankern, und es werden einige Neutronen in Freiheit gesetzt. Zur Aufrechterhaltung einer Kettenreaktion ist aber die Tatsache einer Neutronenvermehrung allein nicht hinreichend, sondern es müssen die abgespaltenen Neutronen auch eine geeignete Geschwindigkeit besitzen, um selbst wieder den Primärprozeß auszulösen.

Damit nicht zu viele Neutronen die Uranmasse ohne Wirkung verlassen und sich im Raum verlieren, ist es notwendig, daß das Reaktionsmaterial U^{235} in einer gewissen Mindestmenge vorhanden ist. So aussichtsreich die Reaktion mit U^{235} zunächst erscheint, so muß andererseits in Rechnung gestellt werden, daß dieses Uranisotop im natürlichen Uran nur zu 0,7 % enthalten ist. Zurzeit sind nur 3 Isotope bekannt, bei denen mit langsamen Neutronen eine Kernspaltung ausgelöst werden kann. Es sind dies U^{233} , U^{235} und Pu^{239} , aber nur U^{235} kommt in der Natur vor.

Eines der wichtigsten Ausgangsmaterialien für die Urangewinnung ist die Uranpechblende, die wegen ihres Radiumgehaltes um die Jahrhundertwende bekanntgeworden ist. In 100 kg Uranpechblende sind im Mittel rund 75 kg Uranoxyd U_3O_8 enthalten, darin etwa 63 kg natürliches Uran und in letzterem etwa 0,450 kg U^{235} .

Die Trennung des Uranisotops U^{235} vom U^{238} ist aber wegen des chemisch gleichen Verhaltens der Isotope außerordentlich schwierig und verlangt einen riesigen Aufwand. Brauchbar sind nur Verfahren, welche die sehr geringe Verschiedenheit der Massen ausnützen. In Abb. 3 sind die nötigen Grundoperationen zur Reindarstellung von U^{235} schematisch zusammengestellt.

Das U^{238} reagiert in ganz anderer Weise auf eine Neutronenbombardierung als U^{235} . Während das Uranisotop U^{235} nur mit langsamen Neutronen wirkungsvoll gespalten werden kann, bevorzugt das U^{238} mittelschnelle Neutronen. Es fängt sie ein, um sich dann unter Bildung des radioaktiven Zwischenkernes U^{239} in das Element Neptunium und weiter in das Element Plutonium zu verwandeln.



Die Elemente U^{239} und Neptunium sind β^- -Strahler, d. h. in ihrem Kern verwandelt sich ein Neutron in

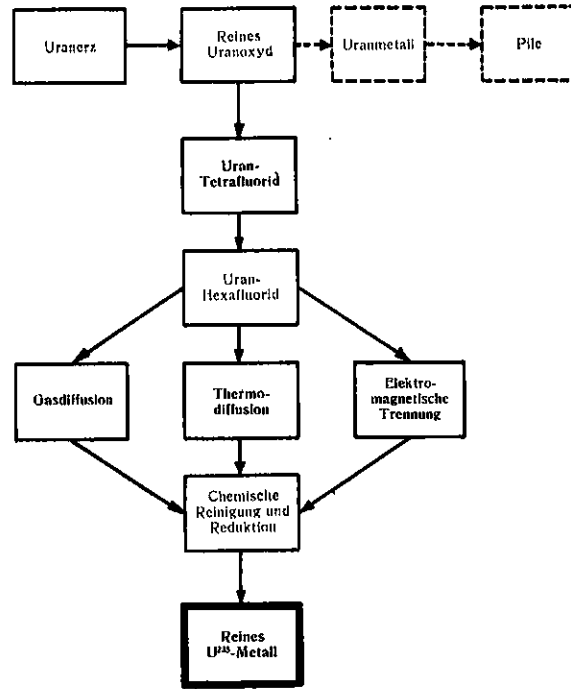


Abb. 3. Die Reindarstellung von U^{235}

ein Proton und sendet dabei ein Elektron aus. Dadurch rückt die Ordnungszahl um eine Einheit hinauf (Abb. 4). Das Plutonium ist ein α -Strahler mit einer sehr langen Halbwertszeit. Seine überragende Bedeutung verdankt es dem Umstand, daß der Kern mit langsamen Neutronen gespalten werden kann und das Problem der Großherstellung gelöst worden ist. Unter dem Namen «Plutonium Project of the Manhattan District» ist in den USA die Produktion dieses Elementes als Explosivstoff für die Atombombe organisiert worden⁸.

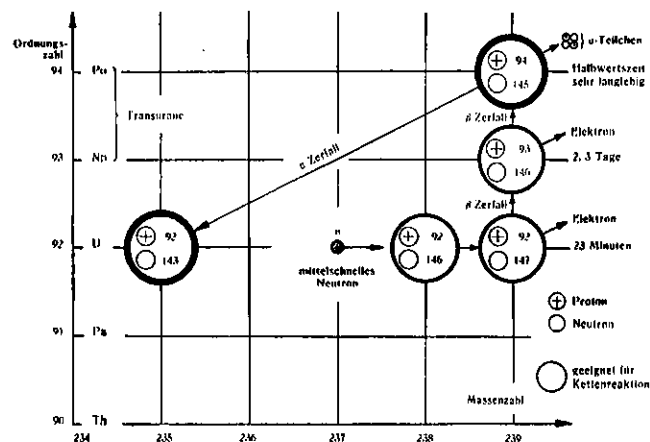
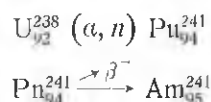


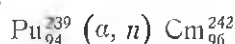
Abb. 4. Die Umwandlung des U^{238}

⁸ H. D. SMYTH, Atomic Energy. A General Account of the Development of Methods of Using Atomic Energy for Military Purposes under the Auspices of United States Government 1940—1945. U. S. A. Government Printing Office, 1945.

Da den Elementen Neptunium und Plutonium, die in der freien Natur nicht vorkommen, die Ordnungszahlen 93 und 94 zugeordnet werden müssen, stehen sie im periodischen System der Elemente jenseits des Urans und werden daher auch als Transurane bezeichnet. In diesem Zusammenhang mag die Tatsache von Interesse sein, daß heute auch die radioaktiven Elemente Americium (Am) und Curium (Cm) mit den Ordnungszahlen 95 und 96 künstlich hergestellt werden können. Beschießt man U^{238} mit α -Teilchen hoher Energie (Beschleunigung durch ein Cyclotron), so beobachtet man folgende Kernreaktion:



Der Kern des Am^{241} zerfällt unter Aussendung eines α -Teilchens mit einer Halbwertszeit von etwa fünfhundert Jahren. Als im Jahre 1944 genügende Mengen von Plutonium zur Verfügung standen, konnte mit hochbeschleunigten α -Teilchen das Element Curium durch folgende Kernreaktion synthetisch hergestellt werden:



Da heute durch künstlich hergestellte Elemente, wie z. B.

Technetium ⁹ (Tc)	≡	Element 43
Promethium (Pm)	≡	Element 61
Astatin (At)	≡	Element 85
Francium (Fr)	≡	Element 87

die Lücken im periodischen System der Elemente geschlossen werden konnten, müssen zukünftige Elemente, die noch entdeckt werden mögen, Ordnungszahlen über 96 haben, d. h. sie müssen in das Gebiet der «Transurane» zu liegen kommen¹⁰. Es scheint sehr wohl möglich, daß es gelingen wird, in diesem Gebiet neue Elemente zu schaffen, jedoch liegt die Schwierigkeit in der Beschaffung des Ausgangsmaterials. Das gegenwärtig schwerste Element Curium leuchtet so stark, daß es in seinem eigenen Licht photographiert werden kann.

Trifft bei einer Beschießung des natürlichen Urans ein langsames Neutron zufällig (im Mittel nach etwa 200 Stößen) auf einen der seltenen Kerne des U^{235} , so löst es in bekannter Weise eine Spaltung dieses Atomkernes aus. Die dabei freiwerdenden schnellen Neutronen verlieren durch Stöße mit den übrigen Urankernen einen Teil ihrer kinetischen Energie und durchlaufen bei dieser Gelegenheit den Geschwindigkeitsbereich, in welchem sie von den in erdrückender

Mehrzahl vorhandenen Kernen des U^{238} besonders leicht eingefangen werden (Resonanzeinfang). Damit bleiben aber praktisch keine langsamen Neutronen für eine weitere Spaltung des U^{235} mehr übrig und die Kettenreaktion erlischt. Das U^{238} absorbiert bei seiner Umwandlung die für die Kette notwendigen Neutronen, ohne selbst neue Neutronen freizugeben. Diese Schwierigkeit konnte durch Verzögerung der Neutronen in einem sogenannten Moderator überwunden werden.

Die meisten der zurzeit im Betrieb stehenden Atomenergieanlagen arbeiten mit ganz reinem Graphit (z. B. darf 1 kg Graphit höchstens 0,001 g Bor enthalten) oder schwerem Wasser als Moderator. Schweres Wasser ist für die Bremsung der Neutronen günstiger als Graphit, der Moderator erhält kleinere Abmessungen und der Faktor der Neutronenvermehrung ist größer. Im Graphitmoderator sind in genau berechneter geometrischer Anordnung Uranstäbe aus dem natürlichen Isotopengemisch eingelagert. Erst nachdem die von der Spaltung des U^{235} herrührenden schnellen Neutronen im Graphit den gefährlichen Geschwindigkeitsbereich (ca. 70 km/s), in welchem sie von den Atomen des U^{238} weggeschnappt werden, durchlaufen haben und bereits sehr langsam geworden sind, fliegen sie wieder in den nächsten Uranstab hinein, um dort die wenigen Kerne des U^{235} zu spalten (Abb. 5). Die neu entstehenden schnellen Neutronen erfahren wiederum dasselbe Schicksal: sie werden ebenfalls im Graphitmoderator verlangsamt und gelangen mit der geeigneten Geschwindigkeit in einen weiteren Uranstab.

Bei diesem Prozeß nimmt die Neutronenzahl rasch zu. Mit ihr wächst auch die Energieproduktion, die durch die Spaltung des U^{235} entsteht. Da die Atomenergie hauptsächlich in Form einer enormen Wärmemenge anfällt, steigt die Temperatur der Uranstäbe sehr stark an. Könnte man die Neutronenvermehrung nicht regulieren, so würde das Uran und der Graphit im Innern des Kernreaktors (*pile*) bald verdampfen und ein derartiger Druck entstehen, daß die Anlage explodieren würde.

Damit der Ablauf der Kettenreaktion gesteuert werden kann, sind im Moderator Hohlräume angeordnet, in welche Stäbe aus einer stark borhaltigen oder cadmiumhaltigen Legierung eintauchen. Diese Elemente absorbieren langsame und mittelschnelle Neutronen sehr stark. Durch ein entsprechendes Eintauchen der Steuerstäbe kann der Neutronenstrom auf einem konstanten Wert gehalten werden. Sobald die Uran-Graphit-Struktur eine bestimmte kritische Größe erreicht hat, beginnt die Kettenreaktion selbsttätig abzulaufen. Die Einleitung der Reaktion erfolgt durch Zufallsneutronen, die mit der kosmischen Strahlung aus dem Weltraum einfallen.

Mannigfaltig sind die Umstände, die dem Anwachsen des Neutronenstromes entgegenstehen. Eine An-

⁹ Das Element 43 wird nach einem Vorschlag von C. PERRIER und E. SEGRE (Nature 159, 24, 1947) als Technetium (Tc) bezeichnet, in Erinnerung des Umstandes, daß dieses Element als erstes mit künstlichen Mitteln hergestellt wurde. Die frühere Feststellung eines stabilen Elementes 43, genannt Masurium, hat sich als ein Irrtum erwiesen.

¹⁰ G. T. SEABORG, The American Scientist (July 1948).

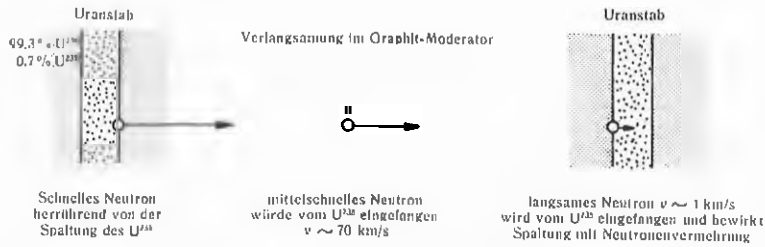


Abb. 5. Das Prinzip des Moderators

zahl von Neutronen kann ohne Wirkung aus der Vorrichtung entweichen und sich in der Umgebung verlieren. Eine andere Gruppe macht mit Unreinigkeiten im Graphit oder im Uran unerwünschte Kernprozesse durch, die keine neuen Neutronen liefern. Ein weiterer Teil von Neutronen wird im Moderator nicht genügend verzögert und in der Folge von den Kernen des U^{238} eingefangen, wobei die bekannte Umwandlung in Plutonium erfolgt. Überwiegen nun die Prozesse, die zu Neutronenverlusten führen, so bricht die Kette bald ab, da nach einer geringen Zahl von Reaktionen jedes der Endneutronen einem Verlustprozeß zum Opfer gefallen ist (konvergente Kette). Gelingt es dagegen, die Neutronenverluste in der Anlage klein genug zu halten, so nehmen die Verzweigungen der Kette immer mehr zu (divergente Kette).

Zur Plutoniumgewinnung müssen die Uranstäbe von Zeit zu Zeit aus dem Kernreaktor herausgenommen und das Plutonium vom Uran getrennt werden.

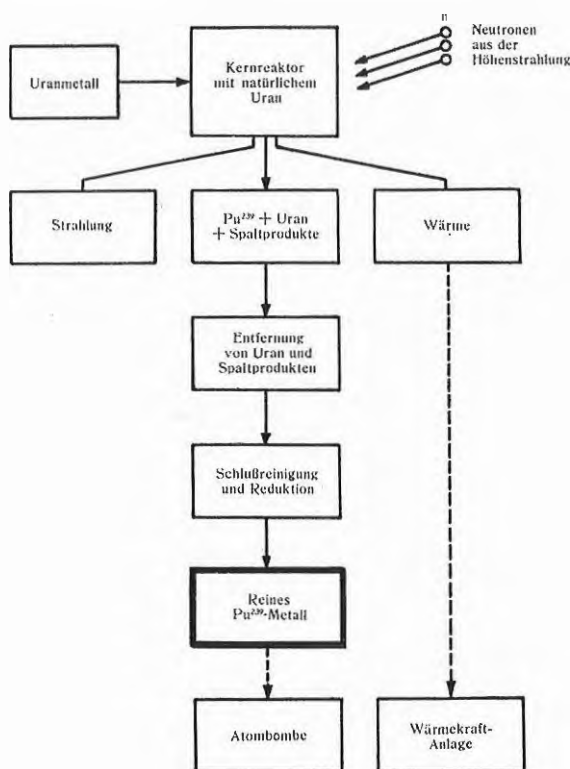


Abb. 6. Die Reindarstellung von Pu^{239}

Diese Trennung ist unvergleichlich viel leichter als diejenige der Uranisotopen, weil das Plutonium ein vom Uran verschiedenes chemisches Element ist. In Abb. 6 sind die einzelnen Schritte der Plutoniumgewinnung schematisch dargestellt, gleichzeitig sieht man aber auch, wie eng die Anwendung der Atomenergie für friedliche Zwecke mit der Erzeugung des Grundstoffes der Atombombe verknüpft ist. Das Plutonium nimmt im Kernreaktor ebenfalls an der Kettenreaktion teil, so daß auf diese Weise das U^{238} indirekt zur Energieerzeugung herangezogen wird.

Durch die große kinetische Energie der Spaltprodukte werden die Uranstäbe aufgeheizt, man

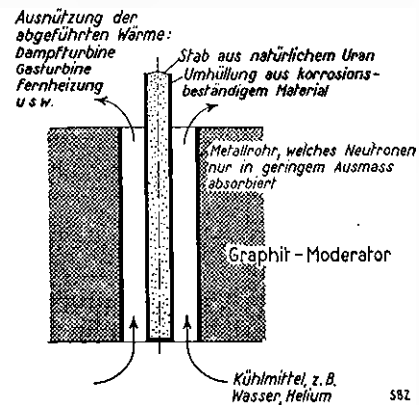


Abb. 7. Die Gewinnung der Nutzenergie durch Kühlung der Uranstäbe

muß sie also kühlen. Zur Abführung der Wärme sind die Uranstäbe von Hohlräumen umgeben, durch die ein Wärmeträger zirkuliert (Abb. 7). Die Atomenergie-Anlage stellt in ihrer heutigen Form nichts anderes als eine besondere Art Kessel mit einer neuartigen Feuerung dar.

Außer dem Uran eignet sich auch das häufiger verbreitete Thorium als Primärmaterial für einen Kernreaktor¹¹. Das natürliche Thorium Th_{90}^{232} setzt sich im Kernreaktor in das Uranisotop U^{233} um, welches ebenfalls mit langsamen Neutronen gespalten werden kann. Die Reaktionen, welche zur Bildung von U^{233} führen, sind folgende:



Das U^{233} zerfällt unter Aussendung von α -Teilchen mit einer Halbwertszeit von etwa $1,6 \cdot 10^5$ Jahren, was lang genug ist, um die Vorratshaltung großer Beträge dieses Isotopes (Atombombe) zu ermöglichen. Die Reindarstellung des U^{233} verläuft analog wie die Plutoniumerzeugung.

¹¹ Das Element Thorium kommt als Thoriumoxyd in recht hoher Konzentration im Monazit sand vor. Solche Sande werden in einem gewissen Ausmaß in den USA, hauptsächlich aber in Brasilien und in Britisch-Indien, gefunden.

Es ist von Interesse, die Größenordnung der thermischen Leistung eines Kernreaktors zur Herstellung von 1 g Plutonium im Tag abzuschätzen. Mit einem Atomgewicht von 239 enthält 1 g Plutonium etwa $2,5 \cdot 10^{21}$ Atome, und seine Erzeugung erfordert $2,5 \cdot 10^{21}$ Neutronen für den Resonanzeinfang des U^{238} . Rechnen wir, daß zur Erreichung der genannten Neutronenzahl $2,5 \cdot 10^{21}$ Kernspaltungen mit einer Energietönung von 0,000 32 erg pro Kernspaltung nötig sind, so beträgt die freiwerdende Energie:

$$E = 2,5 \cdot 10^{21} \cdot 0,000\ 32 \text{ erg}$$

$$= 2,5 \cdot 10^{21} \cdot 0,000\ 32 \cdot 2,778 \cdot 10^{-14} = 22\ 200 \text{ kWh}$$

Damit berechnet sich die Leistung des Kernreaktors zu:

$$N = \frac{22\ 200}{24} = 925 \sim 1000 \text{ kW}$$

Haben wir uns gar zum Ziele gesetzt, im Tag 1 kg Plutonium herzustellen, so müssen wir die Kühlung so auslegen, daß der Betrag von rund 1 000 000 kW als Wärme abgeführt werden kann.

In nachfolgender Übersicht sind einige der freigegebenen Informationen über Kernreaktoren, die in Nordamerika, England und Frankreich gebaut und in Betrieb genommen wurden, zusammengestellt.

Tab. 1

Aufstellungs-ort	Inbetrieb-setzung	Reaktions-material	Moderator	Küh-lung	Leistung kW
<i>a) USA</i>					
Universität Chicago	2.12.42	Uran + Uranoxyd	Graphit	keine	0,2
Oak Ridge (Clinton)	4.11.43	Uranstäbe	Graphit	Luft	>2000
Hanford (drei Reaktoren)	1944/45	Uranstäbe	Graphit	H ₂ O	>>>1000
Argonne	15.5.44	Uranstäbe	D ₂ O	D ₂ O	>300
Los Alamos	1944	angereichertes Uran	H ₂ O	H ₂ O	10
Chalk River	1945	Uranstäbe	D ₂ O	D ₂ O	—
<i>b) England</i>					
Harwell Gleep*	August 1947	Uranstäbe	Graphit	Luft	100
Harwell Bepo**	Juli 1947	Uranstäbe	Graphit	Luft	6000
<i>c) Frank-reich</i>					
Châtillon (Z. O. E.)	15.12.48	Uranoxyd	D ₂ O	keine	max. 5

* Gleep = Graphite low energy experimental pile

** Bepo = British experimental pile

D₂O = schweres Wasser

Der «Wasserkessel» von Los Alamos unterscheidet sich von den anderen Kernreaktoren grundsätzlich dadurch, daß etwa 1 kg U^{235} in Form eines Salzes von angereichertem Uran in Wasser gelöst ist.

Das gewöhnliche Wasser erfüllt in diesem Fall die Aufgabe des Moderators. Solche Reaktoren, in welchen das spaltbare Material einheitlich im Moderator verteilt ist, werden als homogen bezeichnet, im Gegensatz zu den heterogenen Reaktoren mit ihrem Gitterwerk aus Graphit und Uranstäben.

Keine der angeführten Anlagen ist zur Energieerzeugung gebaut worden. So wird in den Hanfordwerken in Pasco (Washington), deren thermische Gesamtleistung auf rund 2 500 000 kW geschätzt wird, die erzeugte Wärme in den Columbia-River abgeführt. Im Vordergrund stand die Herstellung von Plutonium aus natürlichem Uran. Je nach der Konstruktion des Kernreaktors fällt die Wärme auf einem Temperaturniveau von ca. 100 bis max. 300 °C an. Bei solchen Temperaturen ist die Wärme nur von begrenztem Nutzen, und die Entwicklung von Kernreaktoren für hohe Temperaturen ist eines der Hauptprobleme, welches gelöst werden muß, bevor in einer thermo-elektrischen Anlage Energie für industrielle Zwecke abgegeben werden kann. Mit den bestehenden Kernreaktoren ist dies nicht ohne weiteres möglich, da bei höherer Temperatur die Baustoffe des Reaktors durch das Kühlmedium zu stark angegriffen werden.

Wie die stellare Temperatur der Atombombenexplosion zeigt, besteht praktisch keine Grenze für die in Kernspaltungsprozessen erreichbaren Temperaturen. Eine einfache thermodynamische Rechnung zeigt, daß die Spaltprodukte mit Geschwindigkeiten auseinanderfliegen, die einigen Billionen Grad entsprechen.

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{E}{k} \text{ Grad} \quad (12)$$

wobei:

T = absolute Temperatur

E = kinetische Energie in erg

k = $1,372 \cdot 10^{-16}$ erg/Grad = BOLTZMANNsche Konstante

Der Energie von 0,000 32 erg, welche bei der Spaltung eines Urankernes frei wird, führt somit zu einer Temperatur von

$$T = \frac{2 \cdot 0,000\ 32}{3 \cdot 1,372 \cdot 10^{-16}} = 1,55 \cdot 10^{12} \text{ Grad}$$

Die explosiven Reaktoren (Bombe) entwickeln ihre Energie auf einem viel zu hohen Temperaturniveau, um für industrielle Dienste eingesetzt werden zu können.

In den amerikanischen Studien¹² für die beste Anlage zur Großherstellung von Plutonium wurden die grundsätzlichen Faktoren, die auf den Bau eines Kernreaktors von Einfluß sind, wie Kühlung, Leistung, Sicherheit, Schnelligkeit der Errichtung, eingehend untersucht und folgende Anlagentypen in nachstehender Reihenfolge ihrer Wertung vorgeschlagen:

¹² SMYTH-Report, Abschnitt 6.43.

1. a) Gitterkonstruktion von natürlichem Uran in einem Graphitmoderator mit Heliumkühlung,
 b) Gitterkonstruktion von natürlichem Uran in einem Graphitmoderator mit Wasserkühlung,
 c) Gitterkonstruktion von natürlichem Uran in einem Graphitmoderator mit Kühlung durch geschmolzenes Wismut.
2. Gitterkonstruktion von natürlichem Uran mit schwerem Wasser als Moderator.
3. Uran mit angereichertem Isotop U^{235} mit Graphit, schwerem Wasser oder gewöhnlichem Wasser als Moderator.

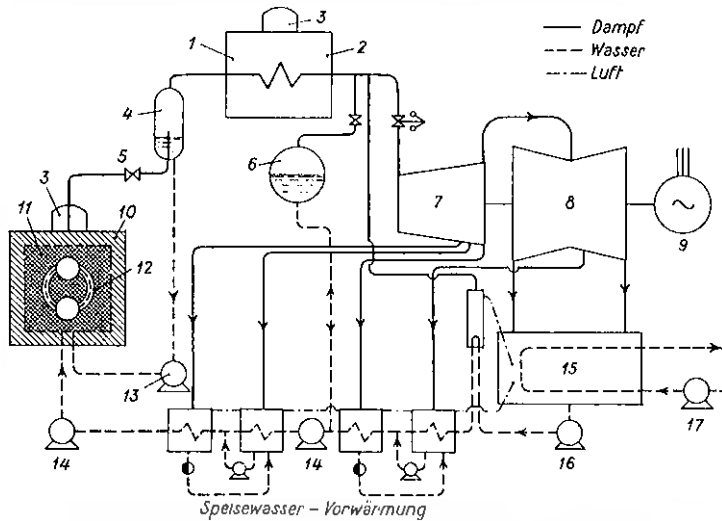


Abb. 8. Schema eines Atomenergiedampfkraftwerkes
 1 Main Nuclear Pile, 2 Superheating Pile, 3 Thermostat zur Steuerung des Neutronenstromes, 4 Verdampfungsgefäß, 5 Druckreduzierventil, 6 Speisewasserbehälter, 7 HD-Turbine, 8 ND-Turbine, 9 Generator, 10 Schutzmantel, 11 Graphit-Moderator, 12 Rohrbündel mit Uranstäben, 13 Umwälzpumpe, 14 Speisepumpen, 15 Kondensator, 16 Kondensatpumpe, 17 Kühlwasserpumpe

Die erste Großanlage, das Hanfordwerk, arbeitet der Einfachheit halber mit einem offenen Kühlwasserkreislauf (somit maximale Kühlwassertemperatur unter 100°C). Vor seiner Rückgabe in den Columbia-River wird das abfließende Wasser solange in einem Behälter aufgehalten, bis seine Radioaktivität auf einen ungefährlichen Betrag abgeklungen ist. Als hauptsächlichste Nachteile der Heliumkühlung werden angegeben: die Gefahr einer Undichtheit bei einer Kühlung mit einem Gas unter hohem Druck, das radioaktive Verunreinigungen mit sich führt, ferner die relativ großen Mengen des erforderlichen reinen Heliums sowie die Schwierigkeit, die Uranstäbe im Kernreaktor auszuwechseln, und die verhältnismäßig niedrige Leistungsausbeute pro kg Uran. Die Kühlung mit geschmolzenem Wismut (Schmelzpunkt 271°C) ist im Hinblick auf die Nutzbarmachung der Wärme vielversprechend. Ganz allgemein ist darauf hinzuweisen, daß die Kühlung eines der schwierigsten Probleme darstellt, welches durch den Erbauer von Kernreaktoren bewältigt werden muß. Auf die-

sem Gebiete sind denn auch noch viele Einzelheiten geheimgehalten.

Wird das Kühlwasser unter hohem Druck durch den Kernreaktor gefördert, so kann das heiße Wasser in einem Expansionsventil entspannt werden, wodurch teilweise Dampf entsteht, der industriell ausgenützt werden kann¹³. Soll der Dampf für den Betrieb einer Dampfturbine mit Generator dienen, so muß er in einem zweiten Kernreaktor überhitzt werden (Abb. 8).

Diese Unterteilung in zwei getrennte Reaktoren ist schon deshalb notwendig, weil wegen der unterschiedlichen Dichte die Neutronenabsorption in flüssigem Wasser und in Wasserdampf verschieden ist. Zur Steuerung des Neutronenstromes sind cadmiumplattierte Stahlstäbe angeordnet, deren Eintauchtiefe durch einen Thermostaten reguliert wird.

Erfolgt die Kühlung der Uranstäbe mit einem geeigneten Gas, so kann die abgeführte Wärme in einer Gasturbine ausgenützt werden. In Abb. 9 ist die Anordnung des Kernreaktors im offenen und im geschlossenen Gasturbinenprozeß dargestellt. Will man im offenen Kreislauf die Luft nicht direkt durch den Kernreaktor leiten, da die Neutronen mit dem Luftstickstoff unerwünschte Kernprozesse durchführen, so muß ein Wärmeaustauscher angeordnet werden. Auch bietet die Abführung großer, mit radioaktiven Verunreinigungen durchsetzter Luftmengen bedeutende Schwierigkeiten. Besonders günstig liegen dagegen die Verhält-

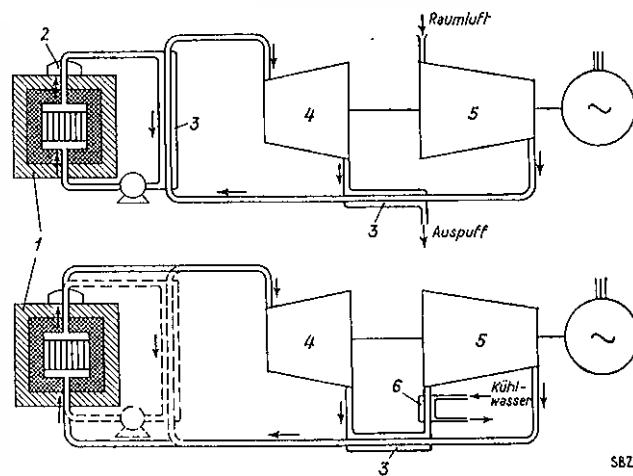


Abb. 9. Anordnung des Kernreaktors im offenen (oben) und geschlossenen (unten) Gasturbinenprozeß
 1 Kernreaktor, 2 Thermostat zur Steuerung des Neutronenstromes, 3 Wärmeaustauscher, 4 Turbine, 5 Kompressor, 6 Vorkühler

¹³ W. DUBS, Schweiz. Bauzeitung 128, 125 (1946).

T a b. 2. Verteilung der wichtigsten Uranvorkommen

Nom	Composition	% d'Uranium	Lieux de production
Pechblende (Uraninite)	Oxydes d'Uranium et mélange complexe	30 à 80 %	Tchécoslovaquie, Angleterre, États-Unis, Congo Belge, Canada
Broggérîte	Oxydes d'Uranium et de Thorium		Norvège et États-Unis
Thorianites	Oxydes de Thorium et d'Uranium	10 %	Ceylon
Becquerelite	$UO_3 \cdot 2H_2O$	72 %	Congo Belge
Curite	$2PbO, 5UO_3, 4H_2O$	55 %	Congo Belge
Kasolite	$3PbO, 3UO_3, SiO_2, 4H_2O$	40 %	Congo Belge
Soddite	$12UO_2, 5SiO_2, 14H_2O$	72 %	Congo Belge
Orangite	Silicate hyd. de Thorium et Uranium	1 %	Norvège
Thorite	Silicate hyd. de Thorium et Uranium	9 %	Norvège
Autunite	$Ca, 2UO_4, 2PO_4, 8H_2O$	50 %	Portugal, Tonkin
Calcolite	$Cu, 2UO_2, 2PO_4, 8H_2O$	50 %	Angleterre, Portugal
Carnotite	Vanadate d' UO_2 et de K hydr.	50 %	États-Unis
Ferghanite	Composés de UO_3 et V_2O_5	50 %	Turkestan
Samarskite	Niobate et tantalate de terres rares	3 à 15 %	U.R.S.S., États-Unis, Inde, Madagascar
Euxénite	Niobate et titanate de terres rares	3 à 15 %	Norvège, États-Unis, Madagascar
Bétafite	Titanoniobate et tantalate d'Uran	25 %	Madagascar

nisse beim geschlossenen Kreislauf, der mit Helium betrieben werden kann (z. B. Escher Wyß, AK-Anlage)¹⁴. Ein Teil der in diesem Fall zu überwindenden Schwierigkeiten wurde bereits im Abschnitt über die Kühlung mit Helium angedeutet. Will man verhindern, daß im geschlossenen Kreislauf die Turbine und der Kompressor von Gasen, die radioaktive Verunreinigungen enthalten, durchströmt werden, so ist ebenfalls ein Wärmeaustauscher anzuordnen. Ohne einen solchen Wärmeaustauscher müßte man bei einer Revision von Turbine und Kompressor warten, bis die Radioaktivität auf einen ungefährlichen Betrag zurückgegangen ist.

Nach außen sind die Kernreaktoren von einem dicken Graphitmantel umgeben, der entweichende Neutronen zurückwerfen soll. Ferner ist zur Unterbindung einer schädlichen Strahlung um das Ganze noch ein Schutzmantel aus Beton gelegt. Nach Berechnungen von K. T. COMPTON¹⁵ würde eine Atomenergie-Anlage für eine Leistung von 100 PS ein Gewicht von mindestens 45 Tonnen aufweisen.

Aus den vorangehenden Ausführungen geht klar hervor, daß die Atomenergie in Form von Wärme anfällt und die elektrische Energieform über den bekannten Umweg der thermo-elektrischen Anlage gewonnen werden muß. (Trotzdem ist es üblich, die Produktionskapazität der Kernreaktoren in kW anzugeben.) Als Ausblick für eine zukünftige Energiewirtschaft eröffnet sich die Möglichkeit der Erstellung von thermischen Großkraftwerken, die von der Kohle als Brennstoff unabhängig sind. Dadurch würde die Kohle in vermehrtem Maß als Rohstoff für die chemische Industrie reserviert bleiben. Die Atomenergiekraftwerke sollten in erster Linie die Grund-

last übernehmen, weil ihre Wärmekapazität sehr groß ist und sie daher nicht rasch angefahren und abgestellt werden können. Die hydraulischen Kraftwerke würden alsdann zweckmäßig für die Spitzendeckung herangezogen. Es sind aber auch große Fernheizwerke denkbar, die ganze Städte in rationeller Weise mit Wärme versorgen.

Seit der Entdeckung der Uranspaltung hat überall ein lebhaftes Interesse für die Uranvorkommen eingesetzt. Die Zusammenstellung in Tab. 2, die einer Arbeit von Frau P. CURIE¹⁶ entnommen wurde, gibt eine Übersicht über die Verteilung der wichtigsten Uranvorkommen auf der Erde. Sehr bedeutende Uranlager befinden sich in den Haute-Katanga-Minen in Belgisch-Kongo. Der Carnotit (Utah, USA), ein Calcium-Vanadium-Uranerz, enthält bis zu 5 % V_2O_5 , weshalb er vor dem Kriege zur Vanadiumgewinnung abgebaut wurde. Trotz der relativen Seltenheit des Uranminerals ist ein ausreichender Vorrat vorhanden, der den Betrieb großer Uran-Atomenergie-Anlagen ermöglichen würde.

Theoretisch könnten viele Kernreaktionen zur Energieumwandlung herangezogen werden. Aber zurzeit besteht nur die Möglichkeit, solche Kernreaktionen einzuleiten und zu überwachen, die zu Kernspaltungen führen. Vielleicht gelingt es auch einmal, eine ähnliche Synthese, wie sie als Quelle der Sonnenenergie angeführt wurde, im Laboratorium durchzuführen.

Über den Zeitpunkt der Inbetriebsetzung des ersten Atomenergiekraftwerkes fällt es schwer, eine Voraussage zu machen¹⁷. Kurze Zeit nach Beendigung des zweiten Weltkrieges war man sehr optimistisch

¹⁴ J. ACKERET, Schweiz. Bauzeitung 127, 51 (1946).

¹⁵ W. L. LAURENCE, Dawn over Zero, S. 256.

¹⁶ MARIE CURIE, Radioactivité, Hermann & Cie, Editeurs, Paris 1935.

¹⁷ W. DUBS, Schweiz. Bauzeitung 127, 145 (1948).

und glaubte, daß die Gewinnung elektrischer Energie aus der Wärme der Uranspaltung unmittelbar bevorstehe. Heute haben ruhigere Überlegungen Platz gefunden, nachdem man weiß, welche ungeheuren technischen Schwierigkeiten noch zu überwinden sind. Nach den Ansführungen von DAVID E. LILIENTHAL, dem Vorsitzenden der amerikanischen Atomenergiekommission (A. E. C.) schwankt die häufigste Schätzung über die erforderliche Zeit bis zur Inbetriebnahme einer praktisch brauchbaren Demonstrationsanlage zwischen acht und zehn Jahren.

Welches auch immer der Erfolg sein wird, der in der Erschließung der Atomenergie als Quelle industrieller Kraft erreicht werden mag; in einer Hinsicht sind bereits gewinnbringende Ergebnisse erzielt worden. Als starke Neutronenquelle ermöglichen die Kernreaktoren die Großherstellung von stabilen und radioaktiven Isotopen, deren Einsatz in den Forschungen der Biologie, Medizin, Chemie (Tracer-Chemistry) und Metallurgie zusehends an Bedeutung gewinnt. Da diese Isotope gegenwärtig den wesentlichsten Gewinn der friedensmäßigen Anwendung der Atomenergie darstellen, hat die «Federation of American Scientists» (F. A. S.) am 25. Mai 1948 in einer Eingabe an die UNO eine Verteilung der neuen

Isotope (stabile und radioaktive) auf internationaler Basis vorgeschlagen¹⁸.

Es besteht kein grundsätzlicher Unterschied zwischen den Experimenten, in denen stabile Isotope verwendet werden, und solchen mit Radioisotopen. Im allgemeinen werden Radioisotope als «Leuchtspurmuniten» vorgezogen, da die Mittel zu ihrer Anzeige einfach sind. Außerdem können Radioisotope viel stärker verdünnt werden als stabile Isotope. Stabile Isotope kommen zur Markierung bestimmter Moleküle in Frage, wenn Radioisotope z. B. auf Grund ihrer schädlichen Wirkung auf die lebende Zelle nicht verwendet werden können. Auch in biologischen und agrkulturchemischen Untersuchungen kann sich wegen der zu kurzen Zerfallszeiten der Radioisotope die Verwendung von stabilen Isotopen als notwendig erweisen. — An der Erschließung der Atomenergie sind in den Vereinigten Staaten von Amerika eine große Zahl von Laboratorien beteiligt. Zu den bekanntesten Forschungsstätten dieser Art zählen die Laboratorien von Chicago, Oak Ridge, Los Alamos und Berkeley, ferner die neuen Regionallaboratorien in Brookhaven, Long Island und das «Power Development Laboratory» in Schenectady.

¹⁸ Bull. Atomic Scientists 4, 248 (1948).