

Ueber die thermische Ausnützung der Energie des Atomkerns: Vortrag

Autor(en): **Lalive d'Epinay, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **70 (1952)**

Heft 7

PDF erstellt am: **16.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-59558>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ueber die thermische Ausnützung der Energie des Atomkerns

Vortrag, gehalten am 21. November 1951 im Zürcher Ingenieur- und Architektenverein, von Ing. J. LALIVE D'EPINAY, Baden

A. Einleitung

Obwohl die Sicherheitsmassnahmen des Auslandes nur spärliche Informationen durchlassen und die Forschungsmittel der Schweiz im Vergleich zu denjenigen der Grossstaaten sehr bescheiden sind, hat eine aus Physikern und Ingenieuren bestehende Studiengruppe die Aufgabe übernommen, die Möglichkeiten einer industriellen Verwertung der Kernenergie in der Schweiz zu prüfen. Dieser Bericht über das Ergebnis der bisherigen Untersuchungen wird mit einem kurzen Ueberblick über einige wesentliche Begriffe der Kernphysik in der Absicht eingeleitet, ein möglichst anschauliches Bild des Atoms und des Spaltvorganges zu entwerfen¹⁾.

Das Atom verdient diesen Namen nicht mehr, denn es ist nicht unteilbar. Es besteht aus einem positiv geladenen Kern, der eine Anzahl Teilchen und praktisch die ganze Masse des Atomes enthält, und aus einer Anzahl negativ geladener Elektronen, die sehr leicht sind und sich wie eine Hülle um den Kern legen oder um ihn kreisen wie die Planeten um die Sonne. Dieser Vergleich mit dem Sonnensystem ist sehr sinnfällig, doch darf er nicht allzu buchstäblich aufgefasst werden. Schwieriger ist es, sich die Grösse des Atoms vorzustellen. Die Elektronenhülle ist im Durchmesser 10 000mal grösser als der Kern. Hätte also der Kern die Grösse eines Einrappentstückes (16 mm), so wäre der Durchmesser der Hülle 160 m. Um eine Kette von Atomen zu bilden, braucht es für jeden Zentimeter 100 Millionen dicht aneinanderstossender Atome.

Der Kern besteht aus den positiv geladenen Protonen und den ungeladenen Neutronen. Er ist unvorstellbar dicht, wie folgendes Bild zeigt: Wäre es möglich, einen Würfel von 1 mm Kantenlänge aus lauter Kernen zu bilden, so würde sein Gewicht 10 000 t betragen. Das Bild erleichtert die Vorstellung der enormen Energiemengen, die im Atomkern konzentriert sind. Die Elektronen sind hingegen sehr leicht, und auch ihre Bindungsenergie ist sehr gering. Chemische Reaktionen spielen sich nur in der Elektronenhülle ab, können folglich nur relativ kleine Energiebeträge liefern. So beträgt die bei der Verbrennung von 1 g Kohle entstehende Wärme, in elektrischen Einheiten ausgedrückt, nur rd. 10 Wattstunden. Wenn aber die vollständige Umwandlung dieser Masse in nutzbare Energie gelänge, so könnten nach der von Einstein aufgestellten Beziehung zwischen Masse und Energie 25 Mio kWh oder gleich viel Wärme erzeugt werden wie bei der Verbrennung von 2500 t Kohle. Durch Kernspaltung kann jedoch nur eine wesentlich kleinere Energiemenge entstehen.

Wir möchten diese Einleitung mit einem Hinweis auf die Isotopen abschliessen. Im periodischen System der in der Natur vorkommenden Elemente steht an erster Stelle das Wasserstoffatom mit einem Proton und einem Elektron, an letzter Stelle das Uran mit 92 Protonen, 92 Elektronen und 146 Neutronen. Die dazwischenliegenden Elemente sind bis auf einige wenige bekannt. Die Zahl der Protonen und Elektronen hat für jedes Element einen die chemischen Eigenschaften bestimmenden Wert. Die Zahl der Neutronen hingegen kann verschieden sein, so dass ein Element verschiedene Massen haben und sich folglich kernphysikalisch wesentlich anders verhalten kann. Man nennt diese etwas anders gearteten Atome eines Elementes Isotopen. Uns interessieren in erster Linie die Wasserstoff- und Uran-Isotopen. So unterscheidet sich das Deuterium oder der schwere Wasserstoff vom gewöhnlichen Wasserstoff dadurch, dass in seinem Kern ausser einem Proton noch ein Neutron vorhanden ist. Das so oft genannte schwere Wasser ist eine chemische Verbindung von Deuterium und Sauerstoff; es ist im Verhältnis 1:5000 im gewöhnlichen Wasser vorhanden. Das in der Natur vorkommende Uran besteht aus einer Mischung von drei Isotopen: U 234 in Spuren (0,006 %), U 235 mit 0,7 % und U 238.

Vor 32 Jahren gelang die erste Kernspaltung. Der Traum

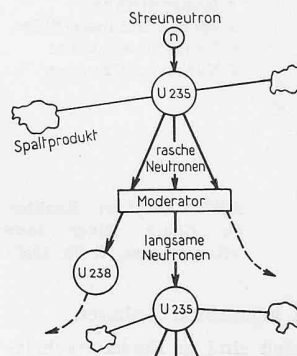


Bild 1. Schema der Kettenreaktion mit Moderator - Streuneutron - Spaltprodukt - Rasche Neutronen - Langsame Neutronen

der Alchimisten war Wirklichkeit geworden; aber der Aufwand blieb viel grösser als der Erfolg. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Geschoss den Kern trifft, ist ausserordentlich klein. Man vergleicht sie mit der Treffsicherheit des Mannes, der in einem verdunkelten Raum, mit Taschenlampe und Pistole bewaffnet, auf eine Fliege zielt. Bei der ersten Spaltung des Urans im Jahre 1939 entstand wohl Wärme, aber auch da blieb die Ausbeute in keinem Verhältnis zum Aufwand, genau so, wie wenn man durch Abbrennen einzelner Streichhölzer einen Kessel voll Wasser zum Sieden bringen

wollte. Im Dezember 1942 kam unter Leitung von Prof. Fermi in Chicago die erste Kettenreaktion mit Uran, das erste sich selbst erhaltende Feuer mit Atombrennstoff zustande; drei Jahre später explodierte die erste Atombombe.

Die Vorgänge, die sich bei der Kernspaltung abspielen, wollen wir an Hand des Schemas (Bild 1) verfolgen. Ein Streuneutron, das aus irgend einer Quelle kommt, treffe den Kern eines U 235-Atoms. Dieser Kern explodiert, zerfällt in zwei Teile und sendet dabei zwei bis drei «rasche» Neutronen aus, die, um nicht restlos von U 238 eingefangen zu werden, von einem Moderator gebremst werden müssen, bevor sie den nächsten U 235-Kern treffen. Eine Kettenreaktion findet statt; sie wird divergent, wenn das Verhältnis der entstehenden zu den eingefangenen Neutronen grösser als 1 ist. Die Spaltprodukte bleiben im Uran stecken. Ihre kinetische Energie wird dort in Wärme umgesetzt, die abgeführt werden muss.

Die Masse der Spaltprodukte ist um 1/1000 kleiner als diejenige des Urans, und es ist nur diese Massendifferenz, die in Energie umgewandelt wird. Reaktionen mit grösserer Ausbeute (2 bis 3 %) sind bekannt, aber es bleibt zum Glück beim Tausendstel. Jedenfalls ist die oft geäusserte Befürchtung unbegründet, die Kettenreaktion könnte weitergehen und den Zauberlehrling mit der ganzen Erde vernichten.

Damit nun nicht zu viele Neutronen verloren gehen, muss genügend spaltbares Material sowie genügend und zweckmässig verteilter Moderatorstoff vorhanden sein. Das heisst, dass die Anlage eine bestimmte Grösse nicht unterschreiten darf. Diese kritische Grösse ist von verschiedenen Faktoren abhängig: zunächst vom Verhältnis des U 235 zum U 238, denn U 235 ist das einzige heute bekannte natürliche Element, das zu einer Kettenreaktion führen kann. Beide Isotopen lassen sich trennen. Im natürlichen Uran kann U 235 «angereichert» und es kann sogar reines Uran 235 hergestellt werden. Dieser Weg führt zur Atombombe, zum kleinsten Reaktor.

Man weiss ferner, dass schweres Wasser (D₂O) oder Graphit, die bis heute als Moderator gebrauchten Stoffe, verschiedene kritische Grössen ergeben. Ein Graphit-Reaktor braucht etwa zehnmal mehr natürliches Uran als ein D₂O-Reaktor, um überkritisch zu werden. Wichtig ist ferner die Reinheit der verwendeten Baustoffe oder deren Absorptionsvermögen für die Neutronen. Wir werden später darauf zurückkommen, möchten jedoch hier schon die Rolle der «neutronen-fressenden» Elemente erwähnen. Es ist klar, dass, sobald die Reaktion divergent ist, d. h. sobald der Reaktor die kritische Grösse überschreitet und der Vermehrungsfaktor grösser als Eins wird, die Leistung kontrolliert werden muss, weil sonst die Anlage durchbrennen würde. Am einfachsten geschieht die Regelung durch Einführung von Cadmium- oder Borstäben in den aktiven Teil. Die kleinste Menge dieser Elemente genügt, um die Reaktion zu bremsen oder zum Stillstand zu bringen.

¹⁾ Vgl. hierzu auch: W. R. DUBS, Die physikalischen Grundlagen der Atomenergie-Anlage, SBZ, Bd. 128, S. 107*, 123* (31. Aug. u. 7. Sept. 1946). G. ROSSÉ, L'énergie atomique, Applications actuelles et perspectives d'utilisation industrielle, «Bull. techn. Suisse Rom.» Bd. 77 (1951), 18.

DK 621.499.4

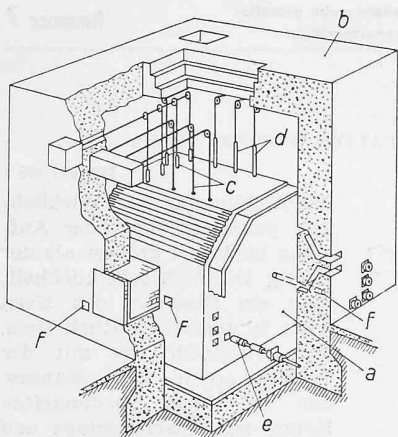
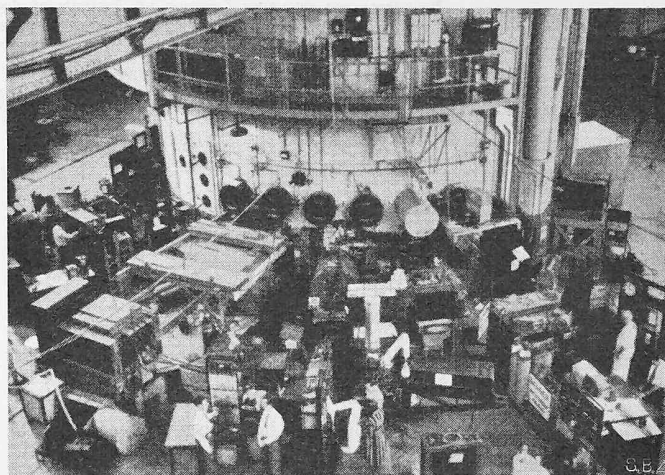


Bild 2 (links), Schematische Darstellung eines heterogenen Reaktors (Gleep) in Harwell (aus «Nucleonics», 8, 4, 1951)

a Uranstäbe und Graphit
b Beton
c Kontrollstäbe
d «Schnellschluss»-Stäbe
e Ionisationskammer
f Versuchsöffnungen

Bild 3 (rechts), Reaktor in Chalk River (aus «Nucleonics», 7, 98, 1950)



B. Uebersicht über die wichtigsten bekannten Anlagen

Die meisten bestehenden Anlagen sind in Fachzeitschriften zum mindesten teilweise beschrieben worden, so dass hier nur das Wesentliche erwähnt werden soll. Bild 2 stellt den englischen Uran-Graphit-Reaktor «Gleep» in Harwell schematisch dar. Die Uran- oder Uranoxyd-Stäbe sind in einem Gitter aus Graphitblöcken eingebettet. Man erkennt die Regulier- und Schnellschluss-Stäbe c und d mit ihren Antriebs-Mechanismen, sowie die verschiedenen Oeffnungen f zur Einführung von Probematerialien. Eine Ionisationskammer e dient zur Messung des Neutronenflusses.

Dieser Reaktor enthält etwa 32 t Uran, 500 t Graphit und ist damit nur sehr wenig überkritisch. Er ist luftgekühlt, wobei der Druck im Innern unter dem Atmosphärendruck liegt, um das Entweichen radioaktiver Luft in den Prüfraum zu verhindern. Die Luft wird abgesogen und durch ein hohes Kamin ins Freie geführt. Der zweite, wesentlich stärkere Reaktor in Harwell wurde hier kürzlich schon beschrieben²⁾.

Die französischen Forscher verfügen über zwei Schwerwasser-Reaktoren, die in der Nähe von Paris aufgestellt sind. Der eine steht seit Ende 1948 in Betrieb und kann innerhalb 24 Stunden bis auf etwa 100 kW belastet werden. Der zweite Reaktor soll künstlich gekühlt werden und eine wesentlich höhere Leistung abgeben. In Norwegen befindet sich ebenfalls ein D₂O-Reaktor, der heute fertiggestellt ist.

Bild 3 zeigt einen der beiden kanadischen Schwerwasser-Reaktoren von Chalk River in vollem Betrieb. Etwa 400 Physiker und Techniker sind in dieser Anlage beschäftigt; noch letztes Jahr war sie die stärkste ihrer Art. Sie dient in erster Linie zur Prüfung von Materialien unter starker und langdauernder Neutronen-Bestrahlung. Bild 4 stellt einen der amerikanischen Graphit-Reaktoren in Brookhaven dar. Der Leiter dieses Laboratoriums hat im April 1948 mitgeteilt, er hoffe in zwei Jahren zeigen zu können, dass die Erzeugung elektrischer Energie aus einem solchen Reaktor möglich sei. Wir wissen nicht, ob der Versuch gelungen ist oder ob die Anlage heute einem anderen Zwecke dient.

In den USA liegen die meisten kernphysikalischen Forschungsanstalten im östlichen Teil des Landes, so u. a. in Argonne, Brookhaven, Oak Ridge. Alle Anlagen sind nationalisiert und stehen unter der Kontrolle der Atomic Energy Commission, die ihren Sitz beim Pentagon in Washington hat. Im Westen des Landes stehen die grossen Hanford-Werke zur Plutonium-Herstellung, die Laboratorien von Los Alamos, die eigentliche Waffenfabrik, und die Universität von Californien. Auf dem Gebiete der Kernphysik arbeiten Industrie und Hochschulen im Dienste des Staates zusammen. Im Nordosten und auch im Nordwesten sind grosse Reaktoren-Versuchsanlagen im Bau oder im Betrieb. Die General Electric Co. betreibt die Knolls Laboratorien und die Plutonium-Werke von Hanford. Um einen Begriff vom enormen Aufwand zu geben, sei erwähnt, dass in diesen Werken 30 000 Techniker und Physiker, d. h. etwa 15 % des Personals der General Electric Co. beschäftigt sein sollen. Die Grundlagenforschung ist selbstverständlich auch Aufgabe der Universitäten, aber alle Anstrengungen scheinen auf die Herstellung von Atomwaffen gerichtet zu sein. Einige zur Produktion

elektrischer Energie geplante Anlagen wurden möglicherweise ihrem ursprünglichen Zwecke entfremdet.

Wie aus dem auf Bild 5 dargestellten Vergleich hervorgeht, dürfte eine mit Atombrennstoff betriebene Zentrale (Atomkraftwerk) von einem modernen Dampfkraftwerk nicht sehr verschieden sein, solange die direkte Erzeugung elektrischer Energie nicht möglich ist; Turbinen und Hilfsbetriebe sind in beiden Anlagen gleich, das eigentliche Kesselhaus ist ähnlich. Der Reaktor hätte wohl Platz im Kesselhaus; auch ein hohes Kamin wäre nötig.

C. Die Arbeiten in der Schweiz

Wir können keine Photographien von schweizerischen Reaktoren zeigen, da in unserem Land weder Uran noch Graphit noch schweres Wasser vorhanden ist. Die Schweiz ist jedoch sowohl auf dem Gebiete der Kernphysik wie in der Prüfung technischer Möglichkeiten nicht untätig geblieben. Die Sorge um unsere Stellung auf dem Gebiete der energiumsetzenden Maschinen hatte schon vor sechs Jahren Brown Boveri dazu bewogen, eine Gruppe von jungen Physikern zu bilden, die in engem Kontakt mit den Hochschulen in Zürich und Basel ihre Arbeit aufnahmen. Ihre Tätigkeit hat das Interesse anderer Kreise geweckt; sie wurde durch die Mitarbeit eines theoretischen Physikers der Schweizerischen Studienkommission für Atomforschung und eines Chemikers wesentlich erweitert.

Wir hatten im Jahre 1948 alle Fragen schematisch zusammengefasst, die sich beim Studium der industriellen An-

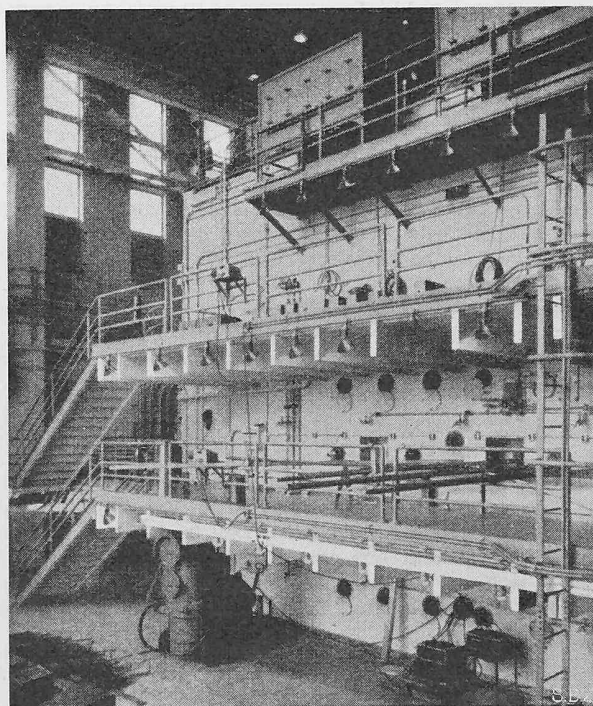


Bild 4. Reaktor in Brookhaven (aus «Physics to-day», 4, 9, 1951)

²⁾ Dr. F. Salzmann: Die britische Atomenergie-Versuchspile, SBZ 1951, Nr. 44, S. 623*.

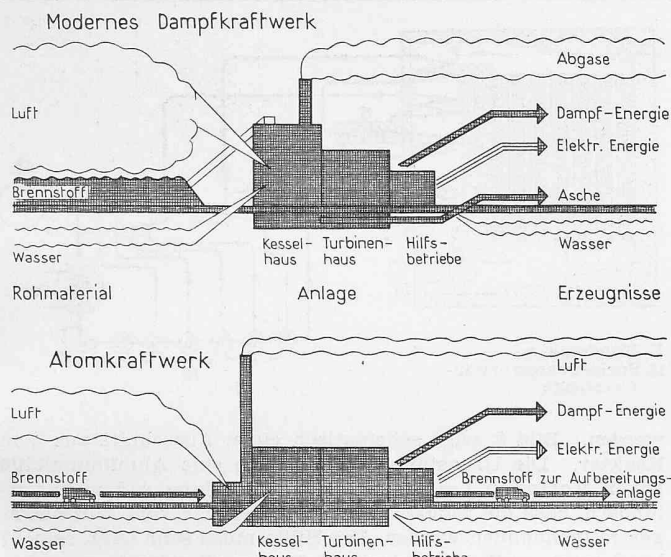


Bild 5. Energie-Erzeugungsanlage mit Kohle und Atom Brennstoff (aus «Goodman» 11)

wendung der Kernenergie stellen. Bild 6 zeigt eine solche Zusammenstellung. Sie soll mit aller Deutlichkeit zeigen, dass wir uns damals nur mit den drei umrandeten Feldern: Grundlagenforschung, Messtechnik und Geräte, Kraftwerk abgeben konnten. Wir wollten auch gewisse allzu optimistische Vorstellungen zerstreuen. Als sehr krasses Beispiel sei das Auto genannt. Wer damals glaubte, seinen Wagen mit konzentriertem Atom Brennstoff betreiben zu können, übersah die Materialfragen und die Notwendigkeit, etwa 20 t totes Gewicht als Abschirmung gegen gesundheitsschädliche Strahlen mitzuschleppen! Man kam langsam zur Einsicht, dass die Erzeugung elektrischer Energie nicht unmittelbar bevorsteht.

Die wichtigsten Probleme sind auf Bild 6 in Feldern eingeordnet; sie betreffen:

Spaltbares Material: U 235 ist das einzige in der Natur vorhandene Element, das eine Kettenreaktion auslösen kann.

Moderator: Schweres Wasser, Beryllium oder Graphit bremsen durch elastischen Stoss die raschen Neutronen auf das brauchbare «thermische» Energieniveau.

Wärmeträger: Einige Gase, Wasser oder schweres Wasser, flüssige Metalle.

Abschirmstoffe: Blei, Cadmium, Beton usw. absorbieren die schädlichen Strahlen.

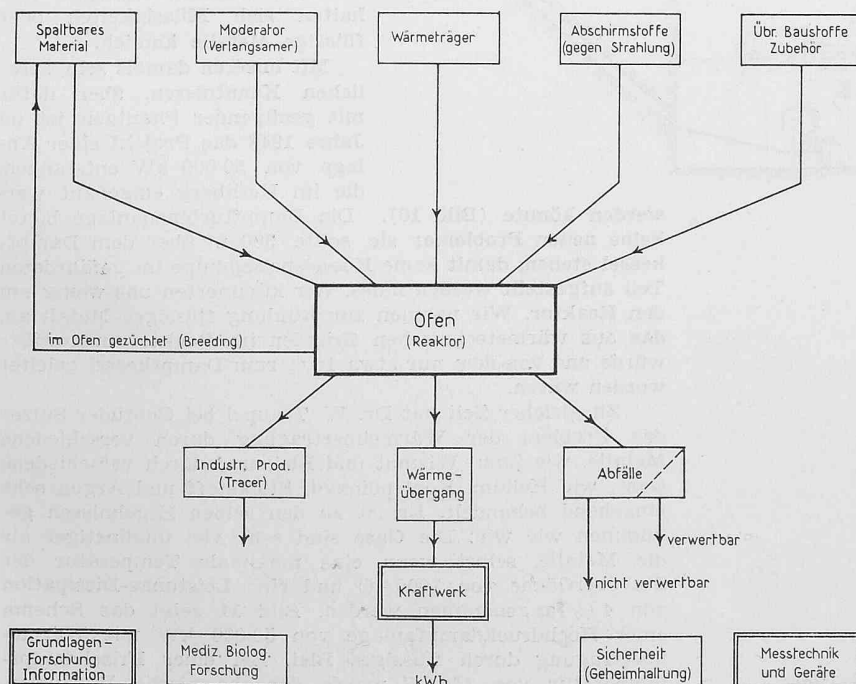


Bild 6. Schema zur industriellen Anwendung der Kernenergie

Uebrigere Baustoffe: Wesentlich bei der Auswahl dieser Stoffe sind ihre kern-physikalischen Eigenschaften, die Stabilität ihres Gefüges unter der intensiven Bestrahlung und ihre mechanische Festigkeit. Es ist eine Ironie der Natur, dass die heute gebräuchlichen Baustoffe mit genügender Festigkeit kern-physikalisch unbrauchbar sind und dass vorderhand noch keine Materialien verfügbar sind, die die Neutronen wenig absorbieren (wie z. B. Aluminium) und zugleich eine genügende Festigkeit haben.

Der im Reaktor erhitzte Wärmeträger wird so stark radioaktiv, dass er nicht direkt zur Turbine geführt werden kann. Er muss im eigentlichen Kessel seine Wärme an einen Hilfskreislauf, Gas oder Wasser, abgeben. Das Problem der radioaktiven Zerfallprodukte ist nicht gelöst. Nur ein kleiner Teil davon lässt sich verwerten, der andere muss unschädlich gemacht werden.

Links unter dem Feld «Reaktor» liegt das Feld der industriellen Produktion. Man bezeichnet mit «Tracer» die radioaktiven Isotopen von Elementen, wie etwa Jod, Phosphor, Schwefel, Eisen, die ihre Anwesenheit durch ihre Radioaktivität offenbaren. Da sie die gleichen chemischen Eigenschaften haben wie das Grundelement, machen sie alle seine Prozesse, auch die biologischen und metallurgischen, mit. Ihre Verwendung in Naturwissenschaft und Technik nimmt immer noch zu und öffnet früher ungeahnte Möglichkeiten. Es sei hier nur ein Beispiel aus der Metallurgie genannt: die Kontrolle des Schmelzprozesses. Durch Beigabe von radioaktivem Schwefel kann der Schwefelgehalt der Schmelze jederzeit ohne chemische Analyse geprüft werden. Ein Zählrohr zeigt sofort an, ob und wieviel Schwefel die Probe noch enthält. Radio-Isotopen als Ersatz oder Ergänzung der Röntgen-Untersuchung leisten in der Materialprüfung hervorragende Dienste. Dieses Gebiet fällt jedoch aus dem Rahmen dieses Aufsatzes hinaus.

Wir sind früh zur Einsicht gekommen, dass eine Kraftwerkstudie den Reaktor mit erfassen muss und dass dazu der Ingenieur den Physiker und der Physiker den Ingenieur braucht. Denn einerseits muss die Wärme aus dem Reaktor herausgeführt werden; andererseits aber darf der Wärmeträger den Spaltprozess nicht stören. Diese Wechselwirkungen zeigen, dass die Probleme nur in enger Zusammenarbeit aller Beteiligten gelöst werden können. Auch der Physiko-Chemiker ist ein wesentliches Mitglied der Mannschaft.

Vom Feld «Reaktor» führt links eine Linie zurück zum Feld der spaltbaren Materialien, weil unter gewissen Bedingungen solche Materialien im Reaktor selber entstehen oder «ausgebrütet» werden. Darum steht hier «breeding», was in freier Uebersetzung heisst «im Ofen gezüchtet». Der Ausdruck «breeding» hat sich eingebürgert wie viele andere englische Bezeichnungen. Im Französischen spricht man von «génération»; «auto-génération» wäre vielleicht noch besser.

Unter spaltbarem Material muss das Plutonium erwähnt werden, ein künstliches Element, das beim Beschiessen von U 235 mit Neutronen entsteht. Plutonium spielt in der Waffenherstellung eine noch wichtigere Rolle als U 235. Darum sind in den USA einige «Breeder-Piles» im Bau. Nach der Spaltung von Uran 235 werden rasche Neutronen vom Uran 238 eingefangen (Bild 7). Es bilden sich durch Zerfall

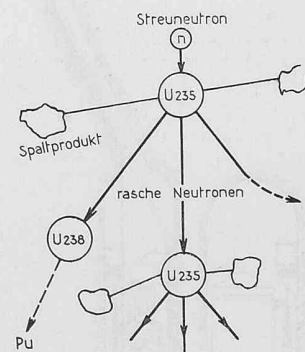


Bild 7. Schema der Kettenreaktion mit «breeding» Streuneutron - Spaltprodukt - Rasche Neutronen

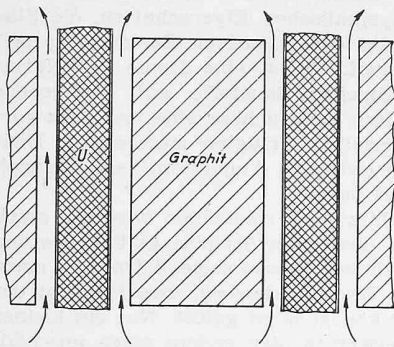
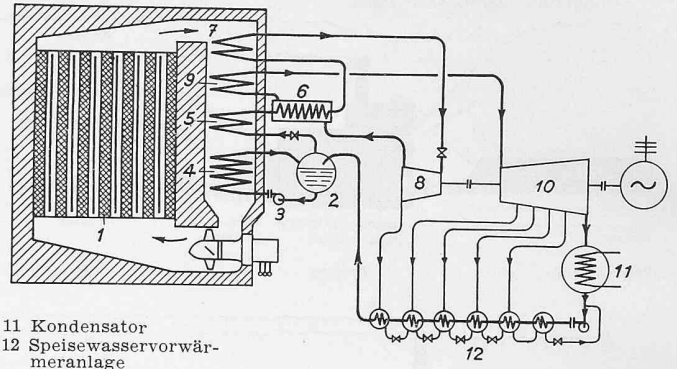


Bild 8 (links). Uranstab im Graphit-Reaktor

Bild 11 (rechts). Schema einer Hochdruckdampf-Atomkraftanlage (Sulzer)

- 1 Reaktormasse
- 2 Verdampfertrommel
- 3 Umwälzpumpe
- 4 Verdampferbündel
- 5 Primär-Überhitzerbündel
- 6 Dampfbeheizter Zwischenüberhitzer
- 7 Sekundär-Überhitzerbündel
- 8 HD-Turbine
- 9 Zwischenüberhitzer
- 10 ND-Turbine

11 Kondensator
12 Speisewasservorwärmanlage

über das Uran-Isotop U 239 sogenannte Transurane d. h. noch schwerere Elemente: das Neptunium und schliesslich das fast stabile Pu 239. Auch Thorium kann durch einen ähnlichen Prozess Spaltmaterial liefern, nämlich das Uran-Isotop U 233.

Wenn «breeding» gelingt, d. h. wenn mehr Plutonium erzeugt werden kann, als U 235 verbraucht wird, so könnte nach und nach das gesamte natürliche Uran des Reaktors verbrannt werden. Diese künstliche Herstellung von spaltbarem Material ist wahrscheinlich der einzig wirtschaftliche Weg zur Energie-Erzeugung.

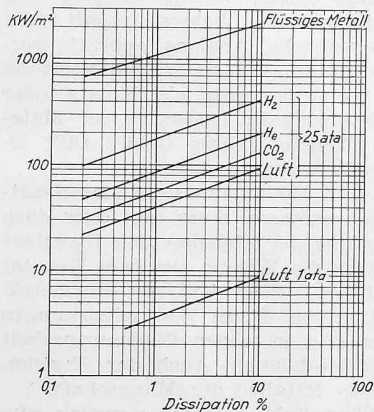


Bild 9. Wärmeübertragung im Graphit-Reaktor

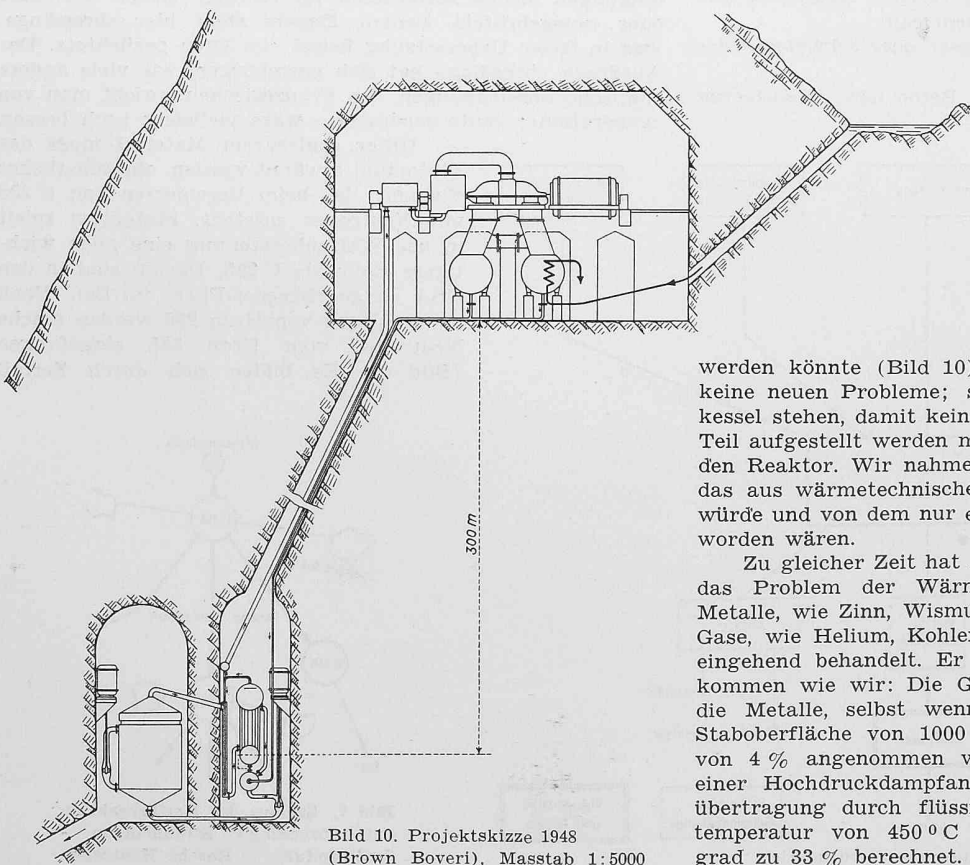
Bei unserer möglichst ausführlichen Zusammenfassung aller Probleme mussten wir feststellen, dass die wichtigsten Fragen nicht beantwortet werden konnten. Wir mussten also beim Studium eines ersten Projektes für einen Uran-Graphit-Reaktor viele Annahmen treffen. Auf eine dieser Fragen soll hier kurz hingewiesen

werden. Bild 8 zeigt schematisch einen Ausschnitt aus dem Reaktor. Die Uranstäbe U sind durch eine Aluminiumhülle gegen Korrosion geschützt. Diese Umhüllung soll auch verhindern, dass die radioaktiven Spaltprodukte vom Wärmeträger mitgenommen werden. Die Hülle muss sehr dünn sein (1 bis 3 mm), weil Aluminium Neutronen absorbiert; wenn sie zu dünn ist, besteht aber die Gefahr, dass sie dem Druck der im Innern entstehenden Gase nicht standhält. Will man einen energieabgebenden Reaktor bauen, so braucht man dafür hohe Temperaturen. Nun schmilzt aber Aluminium bei 650 °C und schon bei 200 °C hat es eine stark verminderte Festigkeit. Es blieb uns also nichts anderes übrig, als die Lösung des Problems der Hülle hinauszuschieben.

Wenn Gitteranordnung und Abmessungen des Reaktors bestimmt sind, können die zu übertragende Wärmemenge und die für die Zirkulation des Wärmeträgers erforderliche Leistung berechnet werden. Die Wärme entsteht zu 97 % im Uranstab selbst, so dass praktisch nur die Staboberfläche für den Wärmeübergang an den Wärmeträger massgebend ist. Bild 9 zeigt die pro m² Staboberfläche übertragbare Wärmemenge in Abhängigkeit der Dissipation, d. h. des Verhältnisses zwischen dem Leistungsbedarf zur Umwälzung des Wärmeträgers und der Wärmeleistung. Die grössten Werte ergeben die flüssigen Metalle; sie liegen fast 300-mal höher als diejenigen von Gasen bei Atmosphärendruck. Die mittleren Linien für Luft, CO₂, He und H₂ bei 25 ata geben noch rd. zehnmal kleinere Werte als Flüssigkeiten. Zur wirksamen Kühlung des Reaktors muss also das Gas verdichtet und der Reaktor druckfest gebaut werden. Bei der Verwendung von Flüssigkeiten als Wärmeträger dürften die auftretenden Auftriebskräfte wesentliche Schwierigkeiten bieten. Hinsichtlich des Wärmeüberganges verhalten sich Flüssigkeiten oder flüssige Metalle ähnlich.

Mit unseren damals sehr spärlichen Kenntnissen, aber dafür mit genügender Phantasie ist im Jahre 1948 das Projekt einer Anlage von 50 000 kW entstanden, die im Uetliberg eingebaut werden könnte (Bild 10). Die Dampfturbinenanlage bietet keine neuen Probleme; sie sollte 300 m über dem Dampfkessel stehen, damit keine Kesselspeisepumpe im gefährdeten Teil aufgestellt werden muss. Wir kümmerten uns wenig um den Reaktor. Wir nahmen zur Kühlung flüssiges Metall an, das aus wärmetechnischen Gründen im Reaktor umgewälzt würde und von dem nur etwa 10 % zum Dampfkessel geleitet worden wären.

Zu gleicher Zeit hat Dr. W. Traupel bei Gebrüder Sulzer das Problem der Wärmeübertragung durch verschiedene Metalle, wie Zinn, Wismut und Blei, und durch verschiedene Gase, wie Helium, Kohlendioxyd, Stickstoff und Argon sehr eingehend behandelt. Er ist zu den selben Ergebnissen gekommen wie wir: Die Gase sind sehr viel ungünstiger als die Metalle, selbst wenn eine maximale Temperatur der Staboberfläche von 1000 °C und eine Leistungs-Dissipation von 4 % angenommen werden. Bild 11 zeigt das Schema einer Hochdruckdampfanlage von 50 000 kW mit Wärmeübertragung durch flüssiges Blei. Bei einer Frischdampf-Temperatur von 450 °C wurde der thermische Wirkungsgrad zu 33 % berechnet.

Bild 10. Projektskizze 1948
(Brown Boveri), Masstab 1:5000

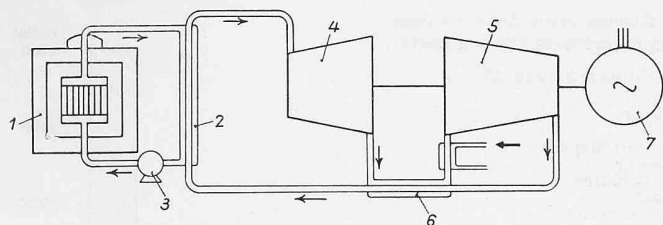


Bild 12a. Schema einer Gasturbinen-Atomkraftanlage mit geschlossenem Kreislauf, mit Wärmeaustauscher und sekundärem Arbeitskreislauf (Escher Wyss)

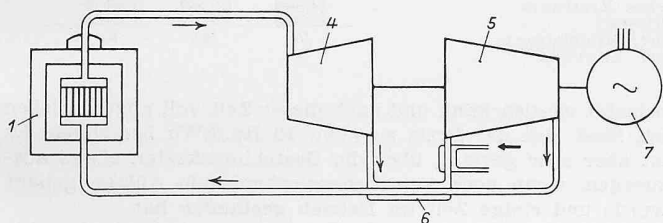


Bild 12b. Schema einer Gasturbinen-Atomkraftanlage mit geschlossenem Kreislauf (Escher Wyss)

Legende zu den Bildern 12a und 12b

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 Reaktor | 4 Turbine |
| 2 Wärmeaustauscher Hilfs-Kreislauf — Arbeitskreislauf | 5 Kompressor |
| 3 Umwälzgebläse Hilfskreislauf | 6 Wärmeaustauscher Arbeitskreislauf |
| | 7 Generator |

Im Jahre 1949 wurde bei Escher Wyss die Verwendung der Gasturbine mit geschlossenem Kreislauf und mit Helium als Betriebsstoff in einer Anlage zur Ausnützung der Kernenergie geprüft. Nach dem Schema Bild 12b strömt das Helium vom Reaktor zur Turbine und durch Wärmeaustauscher und Kühler zum Kompressor und zurück zum Reaktor. Dies ist die denkbar einfachste und thermodynamisch vorteilhafteste Anlage. Sie hätte aber den grossen Nachteil, dass radioaktive Stoffe die Maschine durchströmen. Im Schema Bild 12a ist ein Wärmeaustauscher zwischen Reaktor und Turbogruppe eingeschaltet. Für den sekundären Arbeitskreislauf durch die Turbine kann hierbei wiederum Helium oder ein anderes Gas benutzt werden.

Dr. F. Salzmann (Escher Wyss) ist auf Grund seiner Berechnungen zum Schluss gekommen, dass zur wirtschaftlichen Energieübertragung ein Druck von 30 ata im Reaktor notwendig sei, und es entstand das Projekt einer 12 500 kW-Gasturbinenanlage mit zwei geschlossenen Helium-Kreisläufen (Bild 13).

Im Bestreben, uns über die Zahl der ungelösten Probleme Rechenschaft zu geben, und um uns über die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung elektrischer Energie durch Kernreaktionen eigene Unterlagen zu verschaffen, hatten wir in unserer Studiengruppe das Projekt einer Uran-Schwerwasseranlage mit Kostenvoranschlag ausgearbeitet. Der theoretische Physiker hat die Pile-Theorie aufgestellt und bei seinen Berechnungen die Messungen und Untersuchungen der Experimental-Physiker benützt. Wir konnten vor einem Jahr unsere Studien vorläufig abschliessen. Kurz darauf wurde ausländisches Material über den Bau verschiedener Versuchs-Reaktoren kleiner Leistung freigegeben. Hätten wir gewartet, so wären uns viel Zeit und Mühe erspart geblieben; aber wir durften nicht warten. Wir haben zunächst mit gemischten Gefühlen, dann aber doch mit Befriedigung festgestellt, dass das Ergebnis unserer Studie mit den freigegebenen Unterlagen recht gut übereinstimmt. Von den ungelösten Fragen seien hier erwähnt: die Bestimmung der kernphysikalischen Grössen, die für eine Reaktor-Berechnung unentbehrlich sind; der Einfluss der Temperatur auf die Reaktion; die Temperaturverteilung im Reaktor im Normalbetrieb und bei plötzlichem Ausfall der Kühlung; die chemisch-technologischen Fragen: Umhüllung, Uranreinigung, Korrosion usw. und viele konstruktive Fragen.

Bild 14 zeigt das Schema und Bild 15 ein Schnittbild des geplanten Kraftwerks, auf das sich unsere Berechnungen der Gesteungskosten bezogen. Da heute noch keine Anhaltspunkte vorliegen, die darauf schliessen lassen, dass Kernenergie in anderer Weise als über ein thermisches Kraftwerk nutzbar gemacht werden kann, war zuerst abzuklären, wie die im Kernreaktor 1 (Bild 14) entstehende Wärme abge-

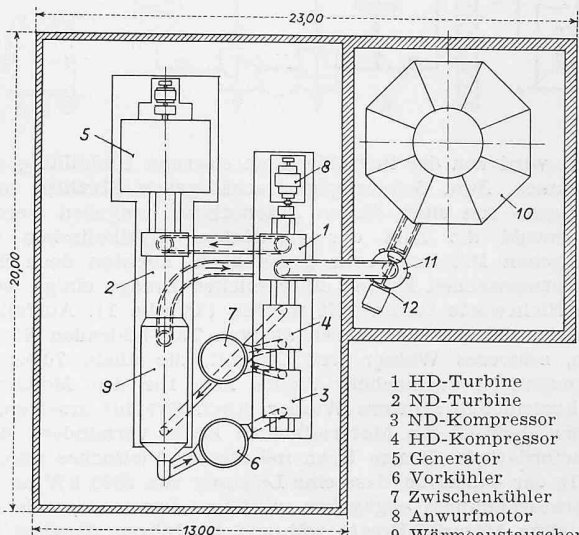
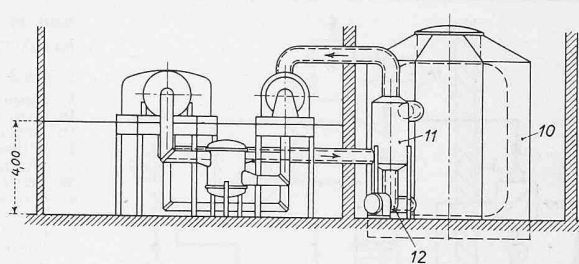


Bild 13. Projekt einer 12 500-kW-Gasturbine mit geschlossenem Heliumkreislauf zur Ausnützung der Kernenergie (Escher Wyss) 1:300

- | |
|--|
| 1 HD-Turbine |
| 2 ND-Turbine |
| 3 ND-Kompressor |
| 4 HD-Kompressor |
| 5 Generator |
| 6 Vorkühler |
| 7 Zwischenkühler |
| 8 Anwurfmotor |
| 9 Wärmeaustauscher |
| 10 Reaktor |
| 11 Wärmeaustauscher für Hilfskreislauf |
| 12 Umwälzgebläse für Hilfskreislauf |

führt und der thermischen Zentrale zugeführt werden kann. Wir gingen davon aus, dass eine sich selbst erhaltende Kernreaktion im natürlichen Uran nur in Anwesenheit eines Moderators möglich ist und dass Graphit oder schweres Wasser diese Aufgabe erfüllen. Es schien zweckdienlich, durch Verwendung von schwerem Wasser Moderator und Wärmeträger in ein- und demselben Medium zu vereinigen, das die Wärme vom Reaktor zum Austauscher 3 überträgt. Das Speisewasser des vom Reaktor örtlich getrennten Dampfkraftwerkes strömt durch den Wärmeaustauscher 3, der die Rolle des Dampferzeugers übernimmt, zum Ueberhitzer 4 und zur Turbine 5. Es wäre denkbar, den im Wärmeaustauscher erzeugten Satttdampf unmittelbar zu entspannen; es ist jedoch wesentlich vorteilhafter, ihn vorher in einem vom Reaktor getrennten und mit üblichen Brennstoffen geheizten Ueberhitzer auf die wirtschaftliche Temperatur zu bringen. Es lässt sich leicht nachweisen, dass die dadurch zusätzlich zugeführte Energie den Wirkungsgrad wesentlich erhöht. Ferner bietet der getrennte Ueberhitzer den Vorteil, dass er an einem von den schädigenden Ausstrahlungen des Reaktors vollkommen geschützten Ort aufgestellt werden kann.

Der aktive Teil des Reaktors besteht aus dem im Graphit eingebetteten Schwerwasserbehälter, der die erforderliche Anzahl Uranstäbe enthält. Der Graphit wirkt hier als Reflektor. Der bei einer Temperatur von 250 °C vorhandene

Tabelle 1. Anlagekosten eines Uran-Schwerwasser-Kraftwerkes für 2500 kW in Mio Fr.

Reaktor: Uran	0,8
Schweres Wasser	7,5
Graphit	0,7
Uebrigste Baustoffe	0,5
Total	9,5
Wärmeaustauscher	0,5
Regulierung und Instrumente	0,5
Kraftwerk	1,0
Gebäude	0,5
Montage und Unvorhergesehenes	1,0
Gesamtkosten	13,0

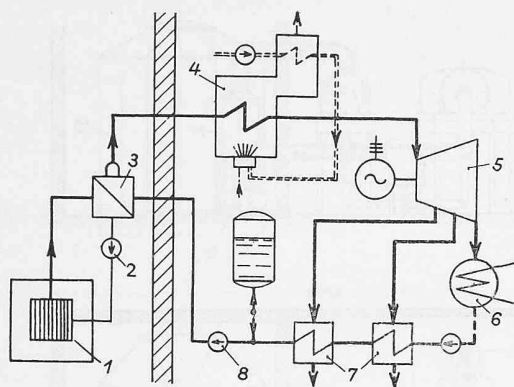


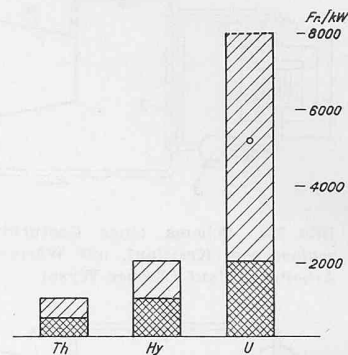
Bild 14 (links). Schema eines Schwerwasser-Reaktors mit Dampfkraftwerk (Brown Boveri)

Legende zu den Bildern 14 und 15

- 1 Reaktor
- 1a Graphit-Reflektor
- 1b Beton
- 2 Schwerwasser-Umwälzpumpe
- 3 Wärmeaustauscher
- 3a Schwerwasser-Behälter
- 4 Dampferhitzer
- 5 Turbine und Generator
- 6 Kondensator
- 7 Speisewasservorwärmung
- 8 Kesselspeisepumpe

Bild 16 (rechts). Vergleich der Anlagekosten

Th = Thermisches Kraftwerk
Hy = Hydraulisches Kraftwerk
U = Uran-Kraftwerk
Doppelt schraffiert: Minimalwerte
Einfach schraffiert: Streuung



Druck wird von der kugelförmigen eisernen Umhüllung aufgenommen. Zum Schutz gegen schädigende Strahlen muss das Ganze von einer dicken Betonschicht umgeben werden.

Obwohl die Zahl der ungelösten physikalischen und technischen Probleme sehr gross blieb, konnten doch über die mutmasslichen Kosten einer solchen Anlage einige wertvolle Richtwerte festgestellt werden (Tabelle 1). Auffallend gross ist der Anteil der den aktiven Teil bildenden Stoffe: Uran, schweres Wasser und Graphit, die allein 70 % der Gesamtkosten ausmachen. Wollte man für den Moderator das kostspielige schwere Wasser durch Graphit ersetzen, so würden dadurch die Materialkosten kaum vermindert, denn die erforderliche Menge Uran müsste ein Vielfaches sein.

In der Annahme, dass eine Leistung von 2500 kW an den Generatorklemmen abgegeben wird und ferner dass die Anlage ohne Material-Ersatz während 30 Jahren dauernd voll

belastet werden kann und nach dieser Zeit voll abgeschrieben ist, lässt sich der Preis zu etwa 10 Rp./kWh berechnen. Es ist aber sehr gewagt, über die Gestehungskosten etwas auszusagen, wenn noch keine energieabgebende Anlage gebaut wurde und einige Zeit im Betrieb gestanden hat.

In Bild 16 haben wir die Anlagekosten in Fr./kW installierter Leistung für thermische, hydraulische und Uran-Kraftwerke aufgezeichnet. Der untere, kreuzweise schraffierte Teil bedeutet Ausführungen mit minimalen Kosten, bzw. günstigste Schätzungen; der obere, einfach schraffierte Teil umfasst den Bereich bis zu den höchsten Kosten.

Beim Uran-Kraftwerk wurde keine Grenze nach oben eingezeichnet, denn da streuen die Ansichten im Verhältnis von etwa 1:10. Im Jahre 1946 wurden in den USA³⁾ Zahlen veröffentlicht, die von einem bewundernswerten Optimismus zeugten. Der Vergleich zwischen Kohle- und Plutonium-

Kraftwerk für 100 000 kW fiel zugunsten des Plutonium-Reaktors aus. Bei gleichen Brennstoffkosten war die kWh im Plutonium-Reaktor 10 % billiger. Man glaubte damals, mit kleineren Anlage- und Betriebskosten rechnen zu dürfen. Heute ist man vorsichtiger geworden. Mit 5200 Fr./kW liegt der von uns ermittelte Wert wahrscheinlich zu tief. Es ist also begreiflich, dass man über die Gestehungskosten der kWh in einem solchen Kraftwerk heute noch nichts aussagen darf. Jedenfalls besteht heute noch kein Zweifel, dass man weitere thermische oder hydraulische Kraftwerke wird bauen müssen, um den zunehmenden Energiebedarf zu decken.

Der Wunsch nach engerer Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Industrie hat im März 1951 zur Bildung einer Arbeitsgemeinschaft zwischen Gebrüder Sulzer, Escher Wyss und Brown Boveri geführt. Thermodynamiker der drei Firmen treffen sich regelmässig mit den Physikern oder, wenn nötig, auch unter sich. Die ersten Kraftwerk-Projekte, die zum Teil schon im Jahre 1947 auf Anregung von Prof. P. Scherrer ausgearbeitet worden sind, wurden gemeinsam geprüft und kritisiert. Es war wohl zu erwarten,

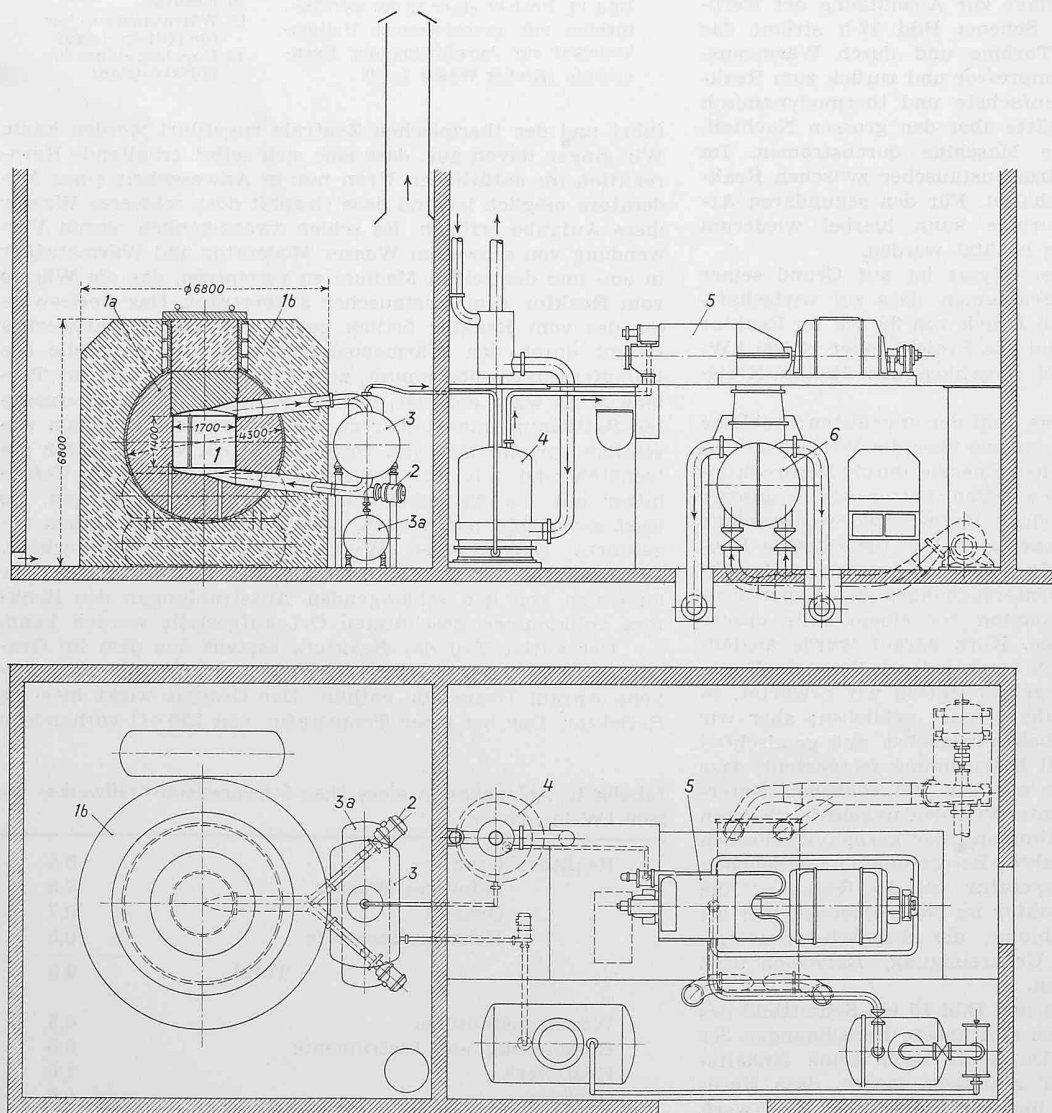


Bild 15. Längsschnitt und Grundriss durch den Schwerwasserreaktor mit Dampfkraftwerk (Projektstudie Brown Boveri)

Masstab 1:200

³⁾ «Electrical World», November 1946.

dass das Problem der Wärmeübertragung, das zu gleicher Zeit von drei Seiten angepackt wurde, zu ähnlichen Lösungen führen würde. Jeder der Beteiligten war an den Aussprachen sehr erfreut darüber und sicher auch über die zukünftige Zusammenarbeit.

Diese Gruppe hat nun die Aufgabe erhalten, die Vorstudien zu einer Energie-Erzeugungsanlage mit Atom-Brennstoff weiterzuführen. Sie soll eine Art Pflichtenheft ausarbeiten und wenn möglich alle Fragen zusammenfassen, die vor dem Bau einer solchen Anlage geprüft oder beantwortet werden müssen.

D. Ausblick

Man kann sich aus Neugier die Frage stellen, ob es möglich wäre, den Energiebedarf unseres Landes durch Spaltung von Uranatomkernen zu decken. Zu ihrer Beantwortung muss die pro Jahr erforderliche Uranmenge festgestellt werden. Beschränken wir uns dabei zunächst auf den Bedarf an elektrischer Energie, den wir zu rd. 10 Mrd kWh annehmen. Wir haben einleitend ausgeführt, dass bei vollständiger Umwandlung von 1 g Materie eine Energiemenge von 25 Mio kWh frei werde. Demnach genügen für 10 Mio kWh 400 g Materie. Da aber der Massendefekt bei der Spaltung von U 235 nur 1 % beträgt, müssten jährlich 400 kg U 235 aufgewendet werden. Nun enthält das natürliche Uran nur 0,7 % U 235. Nehmen wir an, dass durch «breeding» und Verwendung des entstehenden Plutoniums insgesamt 1 % des natürlichen Urans umgesetzt werden könne, so ergibt sich ein theoretischer Bedarf von 40 t pro Jahr. Bei einem thermischen Wirkungsgrad des angeschlossenen Dampfkraftwerkes von 25 % steigt die jährlich benötigte Uranmenge auf 160 t. Das verbrauchte Uran, das durch chemische Prozesse von den Spaltprodukten befreit und teilweise wieder verwendet werden kann, ist jedoch nur ein Bruchteil der Gesamtmenge, die in den Reaktoren eingebaut werden muss, um die kritische Grösse zu überschreiten. Gelingt das «breeding», so wäre die Hoffnung berechtigt, dass eine Gesamtmenge von 5000 t für einen 30jährigen Dauerbetrieb ausreichen würde. Dann wäre aber das U 235 wahrscheinlich aufgebraucht.

Es sei hier nur darauf hingewiesen, dass die heute bekannte abbauwürdige Uranmenge nur etwa 50 bis 100 000 t Uran beträgt. Umsomehr werden wir dann um den dauerhaften, wenn auch schwankenden Ertrag unserer Wasserkraft froh sein. Wir dürfen jedoch nicht vergessen, dass unser gesamter Energiebedarf viermal grösser ist als die Produktionsmenge unserer hydroelektrischen Kraftwerke, und dass wir daher auch noch vom Import von Kohle und Öl sowie von der Lieferung von einheimischem Holz abhängig sind.

Das Problem der Energiegewinnung in industriellem Massstab durch Atomkernspaltung bietet heute noch grosse Schwierigkeiten. Es wäre aber durchaus verfehlt, es als technisch unlösbar zu bezeichnen. Ueberblicken wir die gewaltige Entwicklung: 1919 gelang erstmals die Spaltung des bisher als unteilbar gehaltenen Atoms, 1939 die erste Uranspaltung mit Wärmeentwicklung, 1942 das Herbeiführen der ersten Kettenreaktion, und 1945 explodierte die erste Atombombe. Heute kennt man ausser Protonen und Neutronen auch noch andere Elementarteilchen, wie Neutrinos und Mesonen. Wenn das alles in so kurzer Zeit geschehen konnte, so ist die Hoffnung berechtigt, dass der intensiv und in grossem Massstab betriebenen Forschung auch die Energiegewinnung durch Atomkernspaltung in absehbarer Zeit gelingen werde. Es entspräche durchaus der Tradition unseres Landes, wenn auch die schweizerischen Wissenschaftler und Ingenieure auf dem Gebiete der Kernforschung oder einer ihrer technischen Anwendungen einen besonderen Beitrag leisten könnten.

Strassenbauten im Kanton Bern

DK 625.711.1 (494.24)

Abgesehen von der Erstellung der Sustenstrasse war der Bau von Hauptstrassen im Kanton Bern während des letzten Krieges ganz eingestellt. Nach dem Kriege ist dann ein Rahmenprogramm entsprechend einem Kostenaufwand von 72 Mio Franken für die Epoche 1948/57 zur Förderung des Ausbaues der kantonseigenen Staatsstrassen ausgearbeitet worden, in welchem die mit Bundessubvention zu bauenden Hauptstrassen nur mit kleinen Beträgen für dringende Teilkorrekturen berücksichtigt waren. Auch deren grosszügiger

Ausbau drängte sich aber immer mehr auf, so dass auch dafür ein Programm, und zwar zunächst für die Jahre 1950 bis 1959 mit 52 Mio Fr. (Volksabstimmung vom 11. Dez. 1949), aufgestellt wurde. Es handelt sich um den Neubau einer Grauholzstrasse mit Hochbrücke über das Worblental und um den Ausbau von Teilstrecken folgender Strassenzüge: Tavannes-Delémont-Porrentruy, Delémont-Grellingen, Attiswil-Dürnmühle (Jurafusslinie), Bern-Biel und Bern-Thun-Spiez. Zudem wird der Ausbau der Verbindungsstrassen und die Erstellung von staubfreien Belägen weitergeführt. Die eigentlichen Alpenstrassen und der Umbau der rechtsufrigen Thunerseestrasse auf Trolleybusbetrieb sind in vorstehender Aufzählung nicht enthalten, auch nicht einige andere Strassenzüge, für deren Ausbau besondere Kredite vorliegen. Der Kanton Bern wird in den nächsten 10 Jahren für seine Staatsstrassen und für Beiträge an Gemeindestrassen durchschnittlich jährlich 11,4 Mio Franken aufwenden.

Als Beispiele der neuesten Arbeiten auf diesem Gebiet entnehmen wir einer Aufsatzreihe in «Strasse und Verkehr» vom 20. Juni 1951 zusammenfassend, dass zum Beispiel eine 5,2 km lange Strecke der Strassenverbindung Bern-Biel mit einem Kostenaufwand von 1,3 Mio Fr. umgebaut wird. Wegen ungünstigen Verkehrsverhältnissen werden dabei die Dörfer Worben, Studen, Aegerten und Brügg umfahren und wird eine neue Brücke über den Nidau-Büren-Kanal erstellt. Im Strassenzug Bern-Thun sind in den zwei vergangenen Jahren schon die Teilstrecken Muri-Rubigen, Münsingen-Wichtrach, Haslikehr-Steffisburg und Zugbrücke-Thun mit 9 m Fahrbahnbreite ausgebaut und mit einer Prismo-Leitlinie in Fahrbahnmitte versehen worden. Die Baukosten, ohne Landerwerb und Entschädigungen, beliefen sich auf nur 27 Fr./m², weil keine Kunstbauten und besondere Entwässerungsanlagen notwendig waren und geeignetes Baumaterial in nächster Nähe der Baustellen gefunden werden konnte.

Als Fortsetzung der nun leistungsfähigen Staatsstrasse Bern-Thun und der kurz erwähnten rechtsufrigen Thunerseestrasse vermag die rechtsufrige Brienzerseestrasse schon seit einiger Zeit dem saisonmässigen Stossverkehr kaum mehr zu genügen. Zur Behebung der engen und kurvenreichen Ortsdurchfahrten und der häufigen Verkehrsunterbrechungen wegen Murgängen im Sommer und Lawinen im Winter liegen Umbauprojekte mit einem Kostenbetrag von 7 Mio Fr. vor. Weil selbst mit diesem Aufwand die Verhältnisse nicht befriedigend verbessert werden könnten, liess die Baudirektion des Kantons Bern die Erstellung einer neuen linksufrigen Brienzerseestrasse erneut projektieren. Im Gegensatz zu einem vor etwa 50 Jahren ausgearbeiteten Vorschlag folgt dieser 19,4 km lang und 6 m breit vorgesehene Strassenzug nicht ausschliesslich und unmittelbar dem Seeufer, was im Hinblick auf den Schutz von Natur und Heimat sehr zu begrüssen ist. Er erschliesst weitgehend die bewohnten, sowie die land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebiete des Uferstreifens und fügt sich unauffällig in die Landschaft ein. Der Kostenvoranschlag erreicht die Summe von 17 Mio Fr., also 146 Fr./m² Strassenfläche. Wenn für die Korrektur einzelner Strecken der rechtsufrigen Brienzerseestrasse etwa 1 Mio Fr. ausgegeben würden, könnte sie als Entlastung der linksufrigen weiterhin wertvolle Dienste leisten. Es darf nicht ausser acht gelassen werden, dass der Ausbau der rechtsufrigen und der Neubau einer linksufrigen Seestrasse ausser den zivilen Verkehrswünschen berechtigten militärischen Interessen Rechnung tragen würde.

Dänische Architektur der Gegenwart

Von Arch. KLAUS NAEFF, Zürich

DK 72 (489)

Kommt man in der Schweiz auf nordische Architektur zu sprechen, so wird man im allgemeinen zuerst an Schweden und Finnland denken und erst dann an Dänemark oder gar Norwegen. Das rührt davon her, dass die beiden erstgenannten Länder zwei Architekten hervorgebracht haben, die typische Exponenten ihrer Zeit und ihres Landes sind: Alvar Aalto und Gunnar Asplund. Aber auch Dänemark besitzt eine Reihe namhafter Architekten wie Prof. Kay Fisker, Arne Jacobsen, Finn Juhl, Prof. Kaare Klint, Vilhelm Lauritzen, C. F. Møller und der verstorbene Fritz Schlegel, die im Ausland nur wenig bekannt sind. Die finnische Architektur wurde zum grossen Teil durch das Schaffen Aaltos bekannt; die von Asplund geschaffene Stockholmer Ausstellung im Jahre