

Ueberblick über die Bauarten von Leistungsreaktoren

Autor(en): **Dubs, Werner**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **74 (1956)**

Heft 49

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-62754>

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.

Ueberblick über die Bauarten von Leistungsreaktoren

DK 621.039.42

Von Dr. Werner Dubs, Obergeringieur bei Escher Wyss AG., Zürich

In seiner heutigen Form ist der Leistungsreaktor eine Vorrichtung zur Ausnützung der Wärme, die bei der Spaltung des Atomkernes von Uran-235, von Plutonium-239 oder von Uran-233 entsteht. Diese Wärme ist im Kernreaktor bei konstanter Temperatur verfügbar, die so hoch gewählt werden kann, wie es die Konstruktionsmaterialien und das Wärmeübertragungsmedium zulassen. Ein zentrales Problem des Leistungsreaktors ist die Wärmeabfuhr. Damit die Temperatur eines Reaktors nicht ständig steigt, muss die Wärme im selben Ausmass abgeführt werden, wie sie durch die Kernspaltung erzeugt wird. Bei den zur Zeit in Ausführung begriffenen Kernenergiekraftwerken wird Dampf erzeugt, dessen Temperatur und Druck in den meisten Fällen wesentlich niedriger liegen, als es in modernen Dampfkraftwerken üblich ist. Die Herstellung von Kernreaktoren für hohe Temperaturen ist eine Aufgabe, an der intensiv gearbeitet wird, zu deren Bewältigung aber noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden muss.

Ausserordentlich zahlreich sind die Möglichkeiten, nach denen ein auf dem Prinzip der Kernspaltung beruhender Leistungsreaktor gebaut werden kann. Welches Verfahren das wirtschaftlichste sein wird, konnte bis heute noch nicht festgestellt werden, weshalb wir uns in der Folge mit den verschiedenen Annäherungen an dieses Ziel befassen wollen. Um einen Ueberblick über die verschiedenen Bauarten von Kernreaktoren für Energieerzeugung zu gewinnen, kann man sie etwa nach folgenden Gesichtspunkten einteilen:

1. Verwendungszweck;
2. Art der Zusammensetzung der Spaltstoffelemente;
3. Energie der Neutronen, welche die Spaltung verursachen;
4. konstruktiver Aufbau;
5. Art des Wärmeübertragungsmediums.

Je nach dem Verwendungszweck ist zu unterscheiden zwischen mobilen und ortfesten Reaktoren. *Mobile Reaktoren*, die als Energiequelle für den Antrieb von Schiffen, Fahrzeugen und Flugzeugen in Frage kommen, sollen klein und verhältnismässig leicht sein. Dazu müssen die Spaltstoffelemente an spaltbarem Material angereichert sein. Die Kosten für den Spaltstoff spielen eine untergeordnete Rolle gegenüber dem Vorteil, den eine Energiequelle bietet, die lange Zeit keinen Nachschub benötigt. Die amerikanische Armee hat z. B. einen Reaktor (Army Package Power Reactor, APPR) für die Energieerzeugung in abgelegenen Stützpunkten entwickeln lassen, der so konstruiert ist, dass alle Teile in Flugzeugen transportiert werden können. Die Wärmeleistung dieses Reaktors beträgt 10 000 kW und die elektrische Leistung an den Klemmen des Generators rund 2000 kW. Eine Erneuerung der Spaltstoffelemente soll nur alle zwölf Monate nötig sein. Es kann ausgerechnet werden, dass der Verbrauch an spaltbarem Material im Dauerbetrieb etwa 4 kg pro Jahr beträgt. Weitere Beispiele ausgeführter mobiler Reaktoranlagen sind die Antriebsaggregate der Unterseeboote Nautilus und Sea Wolf.

Bei den *ortfesten Kraftwerkreaktoren* sind im Gegensatz zu den mobilen Reaktoren, welche eine Art Energieakkumulatoren darstellen, die wirtschaftlichen Gesichtspunkte von ausschlaggebender Bedeutung. Vom Kraftwerkreaktor wird u. a. eine besonders grosse Betriebssicherheit verlangt. In dieser Hinsicht verhalten sich z. B. die mit Kohlesäuregas gekühlten Graphitreaktoren des englischen Kernenergiekraftwerkes Calder Hall günstig. Ein Lufteinbruch in das Kühlsystem wirkt sich wegen der Neutronenabsorption durch den Stickstoff in gleicher Richtung wie das Einschleichen von Sicherheitsstäben aus.

Die Werkstofffragen spielen im Reaktorbau eine übertragende Rolle. Welche Reaktorbauart, welcher Moderator und welches Wärmeübertragungssystem sich im Kernenergiekraft-

werk am besten bewähren wird, kann heute noch nicht vorausgesagt werden. Es ist der Zweck der in verschiedenen Ländern in Ausführung begriffenen Leistungsreaktoren, eine möglichst klare Antwort auf diese Frage zu geben. Voraussichtlich werden die meisten Kraftwerkreaktoren der nahen Zukunft leicht angereicherte Uranelemente (etwa 1 bis 2 % Uran-235) besitzen. Auf diese Weise erhält man Leistungsreaktoren von angemessener Grösse.

Nach der Art der Zusammensetzung der Spaltstoffelemente ist zu unterscheiden zwischen Reaktoren, die mit *natürlichem Uran* und solchen, die mit *angereichertem Uran* betrieben werden. Natürliches Uran enthält 0,715 % Uran-235 und 99,285 % Uran-238. Wird der Gehalt an Uran-235 künstlich erhöht, so spricht man von angereichertem Uran. Als Spaltstoffe kommen nur die drei Elemente Uran-233, Uran-235 und Plutonium-239 in Frage. Das Plutonium-239 sowie das Uranisotop U-233 müssen in Konverterreaktoren aus den nicht spaltbaren Grundstoffen (fertile material) Uran-238 und Thorium-232 erzeugt werden.

Bei der Kettenreaktion des Urans-235 wird theoretisch lediglich ein einziges von den durch die Spaltung entstehenden Neutronen zur Auslösung einer neuen Spaltung und damit zum Unterhalt der Kettenreaktion benötigt. Zusätzliche Neutronen können zur Erzeugung von neuem Spaltmaterial verwendet werden, sei es durch Umwandlung von Uran-238 in Plutonium oder durch Umwandlung von Thorium in das Uranisotop U-233 (Bild 1). Uebersteigt in einem Kernreaktor die Zahl der neu erzeugten Spaltstoffatome die Zahl der durch die Kernspaltung zerstörten Atome, so liegt ein Breederreaktor vor. Damit der Breedingprozess wirklich stattfindet, muss die Zahl der pro Spaltung freiwerdenden Neutronen den Wert 2 wesentlich überschreiten, da immer einzelne Neutronen verlorengehen. Für eine wirtschaftliche Ausnützung der Kernenergieserven Uran und Thorium ist der Breedingprozess von grosser Bedeutung.

In bezug auf die Energie der Neutronen, welche die Kernspaltung auslösen, ist zu unterscheiden zwischen *thermischen Reaktoren* mit Moderator und *schnellen Reaktoren* ohne Moderator. Bei thermischen Reaktoren liegen die Neutronengeschwindigkeiten in der Grössenordnung der molekularen Wärmebewegung, daher die Bezeichnung thermisch. Der Neutronenhaushalt schneller Reaktoren ist wesentlich besser als derjenige thermischer Reaktoren; solche Reaktoren sind für

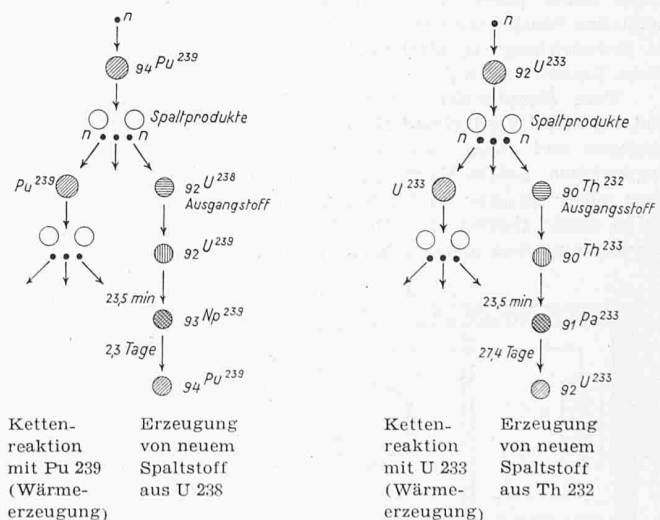


Bild 1. Breeding, Kettenreaktion von Plutonium-239 (links) oder Uran-233 (rechts) mit gleichzeitiger Erzeugung von neuem Spaltstoff aus Uran-238 oder Thorium-232

1) Frühere Veröffentlichungen dieser Reihe: SBZ 1956, Nr. 21, 25, 36.

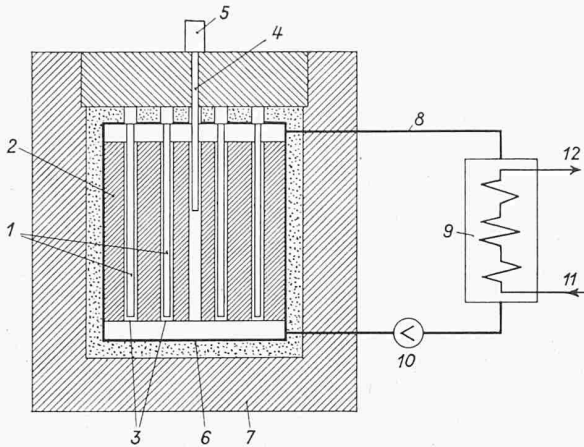


Bild 2. Prinzipschema eines heterogenen Reaktors mit festen Spaltstoffelementen und festem Moderator (Graphit)

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 Spaltstoffstäbe | 7 Biologische Abschirmung |
| 2 Moderator | 8 Kühlmittelkreislauf |
| 3 Kühlmittelkanäle | 9 Wärmeaustauscher |
| 4 Regulierstäbe | 10 Umwälzpumpe zu 8 |
| 5 Antrieb zu 4 | 11 Speiswasser-Eintritt |
| 6 Thermische Abschirmung | 12 Dampf-Austritt |

die Erzeugung von neuem Spaltstoff, d. h. für das Breeding, besonders geeignet.

Ein Kernreaktor, der mit schnellen Neutronen arbeitet, also keinen Moderator besitzt, wird sehr klein und kompakt im Aufbau, wodurch es schwierig wird, seine Wärme abzuführen und ihn unter Kontrolle zu halten. Auch werden durch die hohe Dichte des Neutronenstromes die Eigenschaften der Baumaterialien verändert. Das Kühlmedium muss ausgezeichnete Wärmeübertragungseigenschaften besitzen, darf aber die Neutronen nicht merklich verlangsamen. Andererseits erlaubt die hohe Konzentration von spaltbarem Material im Reaktorkern sowie das kleine Absorptionsvermögen der meisten Elemente für schnelle Neutronen eine grössere Auswahl von Baumaterialien. Rostfreier Stahl und andere Werkstoffe mit guten mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit können verwendet werden, ohne dass die Neutronenbilanz stark beeinträchtigt wird.

Die hauptsächlichsten konstruktiven Schwierigkeiten des schnellen Breederreaktors liegen in dem heiklen Kompromiss, der zwischen der nicht ausnützbaren Kompaktheit und einer aus kernphysikalischen Gründen nicht mehr arbeitsfähigen Auflockerung des Reaktorkerns gefunden werden muss. Der schnelle Versuchsreaktor von Los Alamos, die Clementine, weist z. B. einen zylindrischen Plutoniumkern von nur etwa 15 cm Durchmesser und 15 cm Höhe auf. Ein anderer Versuchsreaktor, der «Experimental Breeder Reactor» (EBR), hatte einen Kern in der Grösse eines Fussballes. Die mit schnellen Neutronen arbeitenden Breederreaktoren stehen erst in Entwicklung; es sind noch sehr wenig Einzelheiten über diese Bauart bekannt.

Vom Standpunkt der technischen Ausführung und des Betriebs sind vorderhand Kernreaktoren, die einen Moderator besitzen und daher mit verlangsamt Neutronen arbeiten, vorzuziehen. Solche Kernreaktoren baut man grösser, und sie sind daher leichter zu kühlen und zu beherrschen. Dagegen ist in einem thermischen Reaktor ein Breedererfolg nur bei Verwendung von angereichertem Uran zu erwarten.

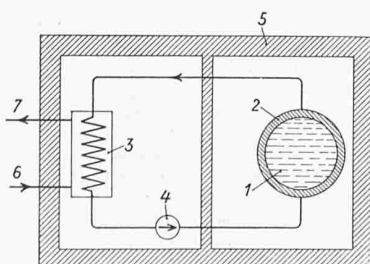


Bild 3. Prinzipschema eines homogenen Reaktors mit gleichmässiger Mischung von Spaltstoff und Moderator

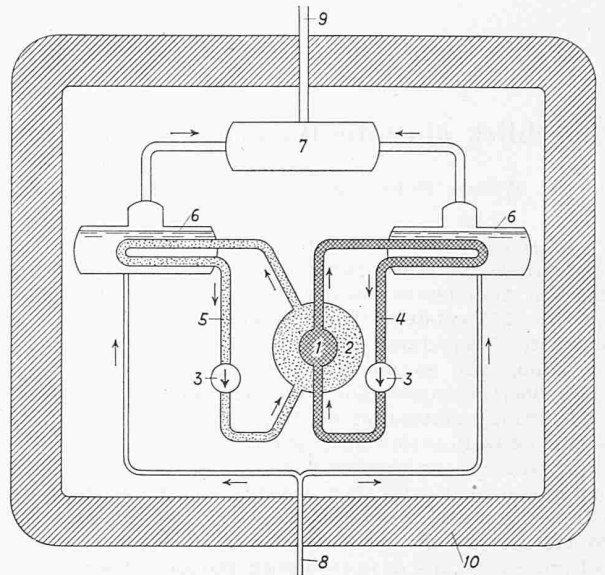


Bild 4. Projekt eines homogenen Reaktors mit Breederhülle, in welcher neuer Spaltstoff erzeugt wird. Der Kreislauf durch den Reaktorkern und derjenige durch die Breederhülle besitzen getrennte Wärmeaustauscher, in welchen Sattdampf von 42 ata erzeugt wird. Ungefähr 80 % der gesamten abgeführten Wärme stammen aus dem Reaktorkern und 20 % aus der Hülle [aus P/496] *

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Reaktorkern | 7 Dampfsammler und Wasserabscheider |
| 2 Breederhülle | 8 Speiswasserleitung |
| 3 Umwälzpumpen | 9 Dampfleitung zur Turbine |
| 4 Spaltstoff-Moderator-Mischung | 10 Abschirmung |
| 5 Mischung der Breederhülle | |
| 6 Wärmeaustauscher | |

Nach der baulichen Struktur ist zu unterscheiden zwischen *heterogenen* Reaktoren mit einzelnen Spaltstoffelementen und *homogenen* Reaktoren, in denen der Spaltstoff in einer Lösung oder Aufschlämmung gleichmässig verteilt ist.

Steht als Ausgangsmaterial für einen thermischen Reaktor lediglich natürliches Uran zur Verfügung, so muss man besonders günstige Verhältnisse schaffen, um zu erreichen, dass die bei der Spaltung freiwerdenden Neutronen mit genügend hoher Wahrscheinlichkeit von einem der seltenen Kerne des Uranisotops U-235 eingefangen werden. Die Einfang-Wahrscheinlichkeit für thermische Neutronen wird am grössten, wenn das Uran in einzelnen Elementen räumlich konzentriert angeordnet und von der Moderator Masse gleichmässig umgeben wird. So entsteht der *heterogene Reaktor* oder die *pile*. Die klassische Anordnung besteht aus einem Uranstabgitter, das einen Graphitblock durchsetzt, wobei zwischen den Stäben und dem Graphitmoderator Ringkanäle für die Zirkulation des Kühlmediums angeordnet sind (Bild 2).

Eine ausserordentlich einfache Konstruktion wird erhalten, wenn die beiden Funktionen Verlangsamung der Neutronen und Wärmeabfuhr von einem einzigen Medium übernommen werden. Man gelangt damit zum Schwerwasserreaktor. Da das schwere Wasser als Moderator günstigere Eigenschaften aufweist als der Graphit, wird ein solcher Reaktor kleiner als ein entsprechender Uran-Graphitreaktor. Auch verfügt man in der technischen Gestaltung und in der Wahl der Konstruktionsmaterialien, welche im Reaktor verwendet werden können, über etwas mehr Freiheit. Allein auch in diesem günstigeren Fall bestehen grosse Einschränkungen; es können z. B. im Kern nur Baustoffe mit kleinstem Neutronenabsorptionsvermögen angewendet werden.

Einige Schwierigkeiten bereitet im heterogenen Reaktor das Problem der Wärmeabfuhr. Da die Wärme zu rd. 90 % im Uranstab entsteht, muss sie zunächst durch reine Wärmeleitung an die Staboberfläche gelangen. Uran ist ein schlechter Wärmeleiter. Ausserdem müssen die Spaltstoffelemente in eine gasdichte und korrosionsbeständige Hüllen einge-

*) Die Angaben in eckiger Klammer beziehen sich auf die nummerierten Berichte über die Internationale Konferenz für friedliche Verwendung von Atomenergie vom 8. bis 20. August 1955 in Genf, herausgegeben von den Vereinigten Nationen, New York 1955.

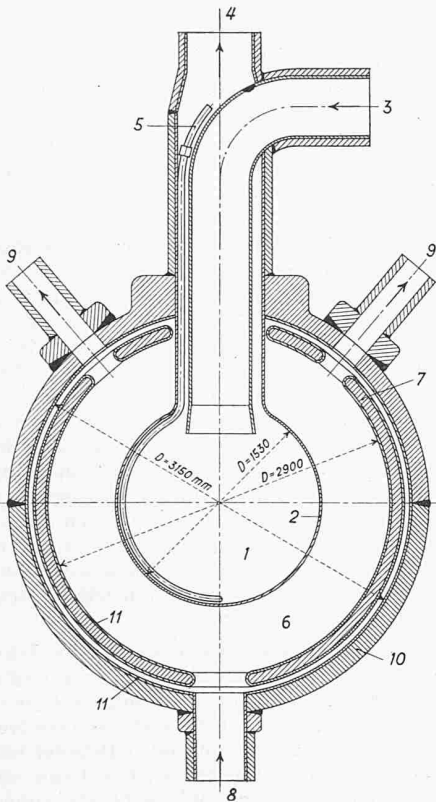


Bild 5 (links). Schematischer Schnitt durch einen homogenen Reaktor mit Breederhülle [aus P/496]

- 1 Reaktorkern
- 2 Innerer Behälter aus korrosionsbeständigem Material
- 3 Eintritt der Spaltstoff-Moderatormischung
- 4 Austritt der Mischung
- 5 Entleerungsleitung
- 6 Breederhülle
- 7 thermische Abschirmung
- 8 Eintritt für die Mischung der Breederhülle
- 9 Austritt der Breederhülle
- 10 Wandung des Druckgefäßes
- 11 Plattierung mit rostfreiem Stahl als Korrosionsschutz

geschlossen werden, welche die Wärmeübertragung weiter erschweren. Wird angereichertes Uran verwendet, so können die Spaltstoffelemente in aufgelockerter Form mit geringen Querschnitten und grossen Wärmeaustauschflächen ausgeführt werden. Unter dem Einfluss des intensiven Neutronenstromes verlieren die Spaltstoffelemente mit der Zeit einen Teil ihrer mechanischen Festigkeit. Auch häufen sich im längeren Betrieb neutronenfressende Spaltprodukte im Reaktionsmaterial derart an, dass die Spaltstoffelemente mit ferngesteuerten Vorrichtungen periodisch ausgewechselt werden müssen.

Das Gegenstück zum heterogenen Reaktor bildet der *homogene Reaktor* (Bild 3). Dieser zeichnet sich durch grosse Einfachheit aus, besteht er doch zur Hauptsache aus einem druckfesten Kessel, der eine gleichmässige Mischung von Spaltstoff und Moderator enthält. Eine Umwälzpumpe fördert die Mischung im geschlossenen Kreislauf durch einen Wärmeaustauscher. Kernphysikalisch verhält sich die gleichmässige Mischung von Spaltstoff und Moderator ungünstiger als die räumlich konzentrierte Anordnung, weshalb der homogene Reaktor nur mit angereichertem Uran betrieben werden kann. Demgegenüber bietet der homogene Reaktor technische Vorteile; so kann z. B. eine hohe Leistungskonzentration erreicht werden. Ferner besteht die Möglichkeit, in einem Nebenstrom dauernd eine kleine Menge der umlaufenden Mischung durch einen Ionenaustauscher zu regenerieren. Der Reaktorbetrieb muss nicht unterbrochen werden.

Die Umtriebe für die Wiederaufbereitung des Spaltmaterials sind von grossem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Reaktorbetriebes. Hier bietet der homogene Reaktor einen interessanten Ausblick. Das Zirkulationssystem muss so gestaltet werden, dass die kritische Spaltstoffmenge nur im Reaktorkessel erreicht wird und sonst nirgends. Der Reaktor ist vollständig selbstregulierend; mechanisch gesteuerte Kontrollstäbe werden nicht benötigt. In den bisherigen homogenen Versuchsreaktoren wurde meistens Uranyl-sulfat und leichtes oder schweres Wasser verwendet. In neuerer Zeit wird auch Uranyl-nitrat als geeigneter Spaltstoff vorgeschlagen. Allerdings muss wegen dem grossen Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen der Stickstoff N-14 durch das Isotop N-15, welches im Luftstickstoff nur zu 0,4 % enthalten ist, ersetzt werden. Die technischen Probleme des homogenen Reaktors liegen in der Handhabung der hochgradig radioaktiven Mischung, welche umgewälzt werden muss. Das Zirkulationssystem, das unter hohem Druck

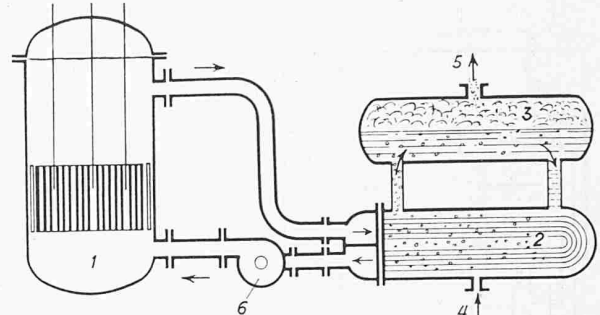


Bild 6. Prinzipschema eines Druckwasser-Reaktors mit Wärmeaustauscher zur Dampferzeugung

- 1 Reaktor
- 2 Wärmeaustauscher
- 3 Ausdampftrommel
- 4 Speisewasser-Eintritt
- 5 Dampfaustritt zur Turbine
- 6 Umwälzpumpe für das Druckwasser

steht, muss absolut dicht sein. Ausserdem wirken die Spaltstofflösungen sehr korrosiv.

Von der bekannten Kesselbaufirma Foster Wheeler Corp. wurde das Projekt eines homogenen Reaktors für den Antrieb einer Turbogruppe von 100 000 kW Klemmenleistung ausgearbeitet. Das stark vereinfachte Diagramm (Bild 4) zeigt den Reaktor mit den Wärmeaustauschern zur Dampferzeugung. Am Eintritt der Turbine steht Sattdampf von 42 at zur Verfügung. Der eigentliche Reaktorkern ist aussen von einem zweiten Gefäss umgeben, das mit einer Lösung von Thorium in schwerem Wasser gefüllt ist. Hier findet das «Breeding» statt, durch das aus dem Thorium das spaltbare Isotop Uran-233 gewonnen wird. Die Mischung des Mantelgefässes wird in einem getrennten Kreislauf mit Wärmeaustauscher ebenfalls umgewälzt. Etwa 20 % der totalen Wärmeleistung des Reaktors stammen aus dem Thoriummantel. Zur Anlage gehören auch die notwendigen chemischen Einrichtungen für die Aufbereitung der Spaltstoffmischung und der Thoriumhülle (in Bild 4 nicht dargestellt). Bild 5 zeigt einen schematischen Querschnitt durch den Reaktorkern und die Breederhülle.

Ganz allgemein müssen die Wärmeübertragungsmedien einen möglichst kleinen Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang besitzen, grosse Wärmeübertragungszahlen ergeben und eine hohe Wärmekapazität aufweisen. Als Flüssigkeiten kommen in Frage: leichtes und schweres Wasser, flüssiges Natrium, Wismut, Diphenyl usw. Unter den Gasen seien Helium und Kohlensäure besonders erwähnt.

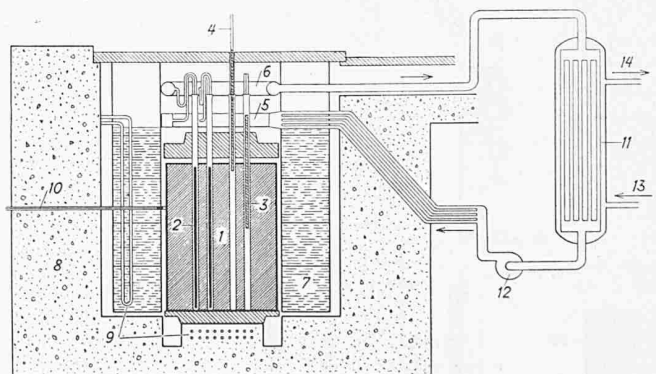


Bild 7. Schema des russischen Reaktors für das erste Kernenergie-Kraftwerk der Welt (Betriebsöffnung 27. Juni 1954) mit 5000 kW elektrischer Nutzleistung [aus P/615]

- 1 Graphitmoderator
- 2 Spaltstoffstäbe aus angereichertem Uran
- 3 Regulierstäbe
- 4 Sicherheitsstäbe für Schnellschluss
- 5 Verteiler für das eintretende Druckwasser
- 6 Sammler für das austretende Druckwasser
- 7 seitliche Abschirmung (Wasser)
- 8 Abschirmung aus Beton
- 9 Kühlschlangen für die Kühlung der Abschirmungen
- 10 Sonde zur Kontrolle der Ionisation
- 11 Wärmeaustauscher
- 12 Umwälzpumpe für das Druckwasser
- 13 Speisewasser-Eintritt
- 14 Dampfaustritt

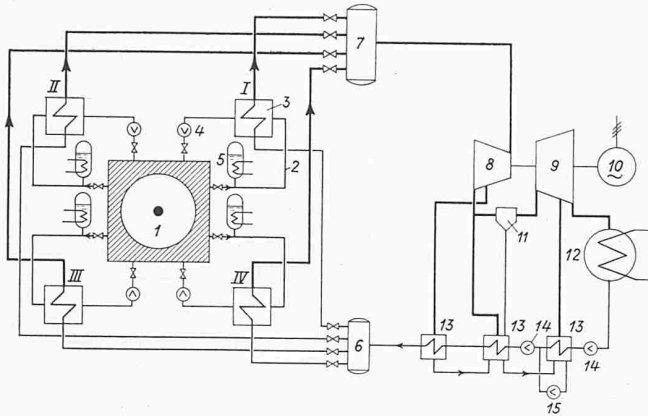


Bild 8. Prinzipschema eines Kernenergie-Kraftwerkes mit Druckwasser-Reaktor (Shippingport) [aus P/815]

- | | |
|---|---------------------------|
| 1 Druckwasser-Reaktor | 7 Dampfsammler |
| 2 Primärkreisläufe (vier Kreisläufe, davon einer Reserve) | 8 Hochdruckturbine |
| 3 Wärmeaustauscher (Dampferzeuger) | 9 Niederdruckturbine |
| 4 Umwälzpumpen zu 2 | 10 Generator |
| 5 Pressurizer mit elektrischer Heizung | 11 Wasserabscheider |
| 6 Speisewasserverteiler | 12 Kondensator |
| | 13 Speisewasser-Vorwärmer |
| | 14 Speisewasser-Pumpen |
| | 15 Kondensatpumpe zu 13 |

Die mit Wasser gekühlten Leistungsreaktoren bilden eine grosse Familie und sind zurzeit in vielen Ländern in Entwicklung. In den ersten Kernreaktoren, die für die Energieerzeugung gebaut und erfolgreich in Betrieb gesetzt wurden, zirkuliert das Kühlwasser unter hohem Druck und entsprechender Temperatur durch den Reaktorkern und den Wärmeaustauscher. Im Wärmeaustauscher wird Sattdampf erzeugt

(Bild 6). Mit angereicherten Spaltstoffelementen kann gewöhnliches Wasser als Moderator und Wärmeübertragungsmittel verwendet werden. Diese Bauart von Kernreaktoren wird allgemein als *Druckwasserreaktor* (Pressurized Water Reactor = PWR) bezeichnet. Der Druck wird so hoch gewählt, dass im Reaktorkern kein Sieden des Wassers mit entsprechender Dichteänderung auftritt. Der Dampferzeuger besteht aus einem eigentlichen Wärmeaustauscherteil und einem Dampfabscheider.

Nach Ausführung der russischen Delegierten an der Konferenz für die friedliche Anwendung der Atomenergie der Vereinten Nationen in Genf im Herbst 1955 wurde das erste Kernenergiekraftwerk der Welt am 27. Juni 1954 in der Nähe Moskaus in Betrieb gesetzt. Die Anlage soll eine elektrische Leistung von 5000 kW an die Stromversorgung abgeben. Der Reaktor ist von heterogener Bauweise mit Graphitmoderator und wird durch umgewälztes Wasser gekühlt, das unter einem Druck von 105 at steht (Bild 7). Im Wärmeaustauscher wird das Druckwasser von 270° C auf 190° C abgekühlt und Sattdampf von 12 ata zum Antrieb einer Turbine erzeugt. Wegen der bei höherer Temperatur auftretenden starken Korrosion des Aluminiums durch das Wasser sind die Uranstäbe mit rostfreiem Stahl umhüllt. Dadurch wird jedoch die Neutronenabsorption vergrössert, so dass angereichertes Uran (10 % U-235) verwendet werden musste.

Im ersten Kernenergiekraftwerk Kanadas, das im Jahre 1958 in der Nähe von Ontario mit einer elektrischen Energieerzeugung von etwa 20 000 kW in Betrieb kommen soll, wird ebenfalls ein heterogener Reaktor mit Druckwasserkühlung aufgestellt. Im Unterschied zum vorangehenden Beispiel verwendet man im kanadischen Reaktor natürliches Uran und schweres Wasser als Moderator und Wärmeübertragungsmittel.

In den USA ist die Reaktortechnik zweifellos am weitesten vorangeschritten. Von der Westinghouse Electric Corp. wird gegenwärtig in Shippingport ein heterogener Reaktor mit Druckwasserumwälzung für den Antrieb einer Turbogruppe von 60 000 kW Klemmenleistung gebaut. Im Reaktor steht das Wasser unter einem Druck von 141 ata. In den Wärmeaustauschern wird Sattdampf von 42,4 ata (253° C) erzeugt. Die Spaltstoffelemente aus ziemlich hoch angereichertem Uran bestehen aus einem System von einzelnen, mit einem korrosionsfesten Ueberzug versehenen Platten von etwa 2 mm Dicke. Diese Anlage, deren Reaktorbauart sich im Unterseeboot «Nautilus» praktisch bewährt hat, soll nächstes Jahr die Stromlieferung an die Stadt Pittsburgh aufnehmen.

Das Schema der gesamten Anlage (Bild 8) zeigt den Reaktor mit vier Wärmeübertragungskreisläufen. Ein Kreislauf dient als Reserve. Jeder Kreislauf besteht aus einer Umwälzpumpe, einem Wärmeaustauscher mit Dampferzeuger, sowie den notwendigen Absperrorganen. Würde der Druckwasserkreislauf ein geschlossenes star-

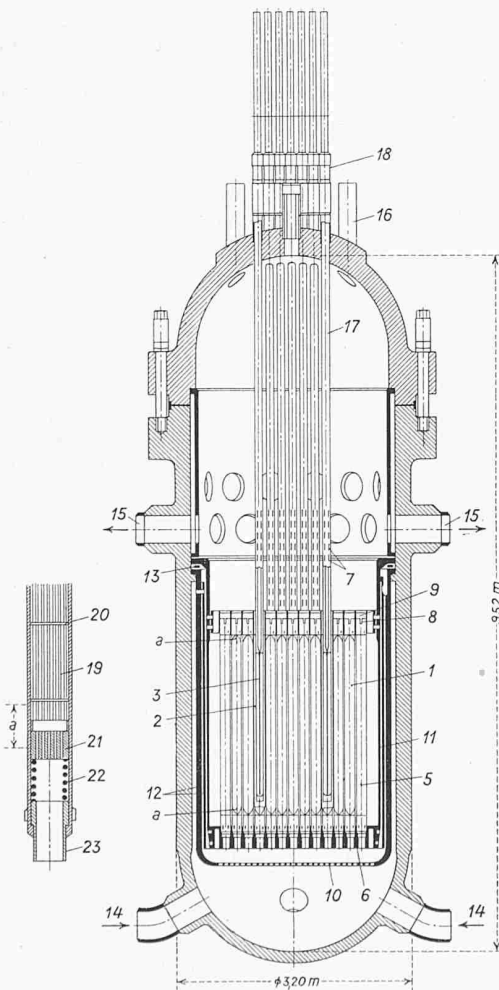


Bild 9. Vertikalschnitt durch den Druckwasser-Reaktor (Shippingport, Pa.) [aus P/815] Masstab 1:100

- 1 Spaltstoffelemente aus Uran-oxid UO₂
- 2 Spaltstoffelemente mit stark angereichertem Uran
- 3 Regulierstangen mit kreuzförmigem Querschnitt
- 4 Distanzstücke
- 5 Raum für besondere Spaltstoffelemente
- 6 Bodenplatte
- 7 Wasseraustrittsöffnungen
- 8 Verschlussstück zu 1
- 9 obere Halteplatte für die Spaltstoffelemente
- 10 Perforierter Boden zum Ausgleichen der Strömung
- 11 Kernkäfig
- 12 Thermische Abschirmungen
- 13 Belleville-Federring
- 14 Kühlwasser-Eintrittsstutzen
- 15 Kühlwasser-Austrittsstutzen
- 16 Stützen für äussere Spaltstoffelemente
- 17 Führungsrohre zu 3
- 19 mit UO₂ gefüllte Röhren aus einer Zirkonlegierung
- 20 Zwischenböden
- 21 Düsenplatte
- 22 Feder
- 23 Haltestützen
- a Uebergang vom runden zum quadratischen Querschnitt

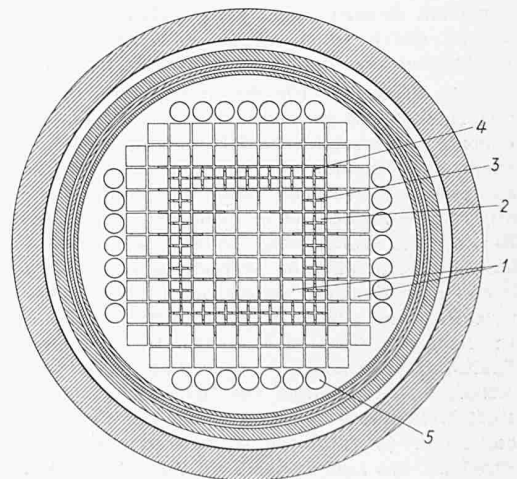


Bild 10. Querschnitt durch den Druckwasser-Reaktor nach Bild 9, Masstab 1:50

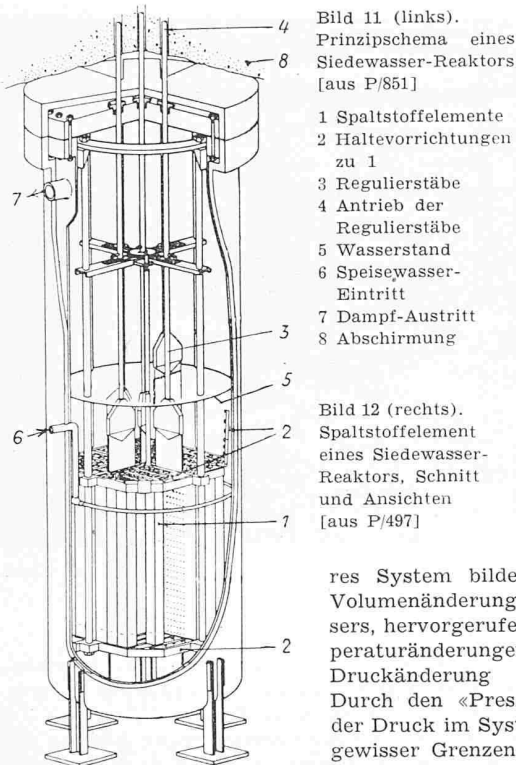
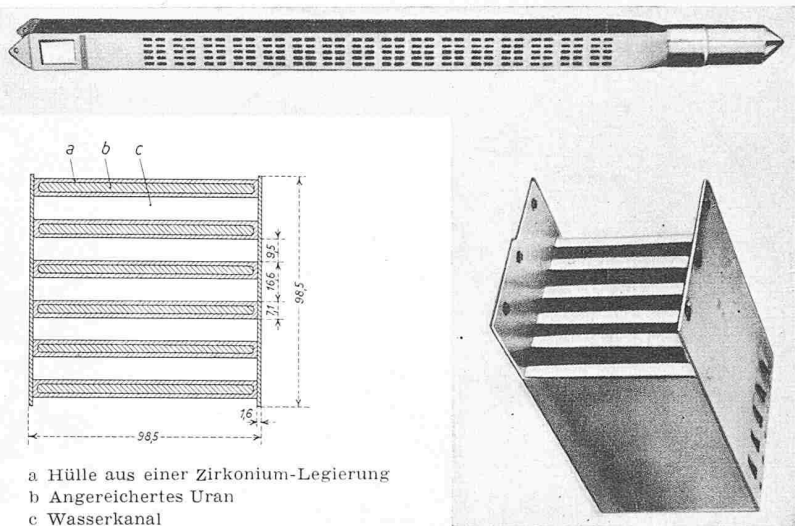


Bild 11 (links).
Prinzipschema eines
Siedewasser-Reaktors
[aus P/851]

- 1 Spaltstoffelemente
- 2 Haltevorrichtungen zu 1
- 3 Regulierstäbe
- 4 Antrieb der Regulierstäbe
- 5 Wasserstand
- 6 Speisewasser-Eintritt
- 7 Dampf-Austritt
- 8 Abschirmung

Bild 12 (rechts).
Spaltstoffelement
eines Siedewasser-
Reaktors, Schnitt
und Ansichten
[aus P/497]



a Hülle aus einer Zirkonium-Legierung
b Angereichertes Uran
c Wasserkanal

res System bilden, so hätten Volumenänderungen des Wassers, hervorgerufen durch Temperaturänderungen, eine starke Druckänderung zur Folge. Durch den «Pressurizer» wird der Druck im System innerhalb gewisser Grenzen konstant gehalten.

Gegenüber den anderen Reaktoren, deren Bau in den USA in Angriff genommen wurde, birgt der Druckwasserreaktor die kleinsten konstruktiven Risiken. Es wurde mehr Wert auf ein zuverlässiges Funktionieren der Anlage als auf Wirtschaftlichkeit gelegt. Der Reaktor (Bilder 9 und 10) besitzt einen zylindrischen Druckkessel von etwa 3 m Durchmesser, etwa 11 m Höhe und 200 mm Wandstärke. Auf der Innenseite ist der Kessel mit einer 6 mm dicken Plattierung aus rostfreiem Stahl ausgekleidet. Das Wasser tritt am Boden durch vier Öffnungen in den Reaktorkessel ein und verlässt ihn durch vier weitere Öffnungen im oberen Teil.

Ein wirksamer Weg zur Verbesserung des Nutzeffektes einer Reaktoranlage ist die Erzeugung des Turbinendampfes im Reaktor selbst statt in einem Wärmeaustauscher. Der Zirkulationskreislauf wird dadurch ausgeschaltet, und der Druck muss im System nur noch so gross sein wie vor der Turbine (Bild 11 zeigt ein entsprechendes Schema). Diese sehr interessante Reaktorbauart wird als *Siedewasserreaktor* (Boiling Water Reactor) bezeichnet. Als Spaltstoff dient leicht angereichertes Uran und als Moderator gewöhnliches Wasser. Der erzeugte Dampf wird etwas radioaktiv sein, so dass der Dampfkreislauf, d. h. die Leitungen, die Turbine mit dem Kondensator und die entsprechenden Pumpen abgeschirmt werden müssen. Bei einer Revision spielt vor allem die Radioaktivität möglicher Ablagerungen in der Turbine eine Rolle. Es ist die Frage zu klären, welche Art von radioaktiven Elementen sich ansammeln werden. Zwecks Vergrößerung der Oberfläche bestehen die Spaltstoffträger aus einzelnen Platten, die einschliesslich der aus einer Zirkonlegierung bestehenden Hülle 7,1 mm dick sind. Je sechs Platten sind derart seitlich mit zwei angeschweissten Platten verbunden, dass 9,5 mm weite Kanäle entstehen. Die Schlitz in den seitlichen Platten geben der Konstruktion eine gewisse Elastizität (Bild 12).

Die hauptsächlichste Ungewissheit über das Funktionieren des Siedewasserreaktors steht in Verbindung mit der durch das Sieden verursachten Zustandsänderung des Moderators. Wenn der Moderator siedet, ändert seine Dichte und damit der Wirkungsquerschnitt für die Verlangsamung der Neutronen. Wichtige Unterlagen über die Arbeitsweise eines siedenden Reaktors wurden durch die unter Leitung von W. H. Zinn stehenden Untersuchungen der National Reactor Testing Station in Idaho gewonnen. In einem Film über den sog. «Borax test» wurde an der Genfer Konferenz gezeigt, dass ein Siedewasserreaktor auch unter extremen Bedingungen stabil ist. Die Bildung von Dampfblasen im moderierenden Wasser führt zu einer Zunahme der Neutronenverluste

und vermindert die Reaktivität. Wurde der Versuchsreaktor durch schlagartiges Herausziehen der Regulierstäbe und gleichzeitige Zufügung von zusätzlichen Uranstäben in einen stark überkritischen Zustand gebracht, so trat eine äusserst rapide Leistungssteigerung auf, die zu einer explosionsartigen Dampfentwicklung mit anschliessender Zerstörung des Reaktors führte. Ein solches Auseinanderfliegen des Reaktors, hervorgerufen durch die rasche Drucksteigerung, hatte jedoch höchstens die Wirkung der Explosion von einigen Kilo Trinitrotoluol. Die radioaktiven Bruchstücke wurden in einem nur sehr kleinen Umkreis gestreut.

Eine besondere Art eines Siedewasserreaktors wurde von der General Electric Co. entwickelt (Bild 13). Die Konstrukteure des «Dual Cycle Boiling Reactors» (DCBR), d. h. des Siedewasserreaktors mit Doppelkreislauf, nehmen an, dass dem Reaktor mit direkter Dampferzeugung in bezug auf die Leistungsausbeute pro Volumeneinheit und der Anpassung auf die Lastanforderungen einer thermischen Zentrale gewisse Grenzen gesetzt sind. In diesem Reaktor wird die Wärme etwa zur Hälfte in Dampfform und zur anderen Hälfte in Form von heissem Druckwasser abgeführt. Der im Reaktor erzeugte Sattdampf von z. B. 42 ata durchläuft einen Wasserabscheider und gelangt anschliessend in die erste Stufe der Turbine. Ein Teil des heissen Druckwassers wird in einem Entspannungsgefäss in Düsen entspannt und als Sattdampf von z. B. 24,5 ata den hinteren Stufen der Turbine zugeführt. Durch die Verdampfung eines Teils des Wassers wird die Temperatur des übrigbleibenden Wassers etwas erniedrigt. Dieses etwa 225 °C warme Wasser wird zusammen mit dem vorgewärmten Kondensat in den Reaktor zurückgepumpt und dort wieder auf die Sattdampf Temperatur von 252 °C aufgeheizt.

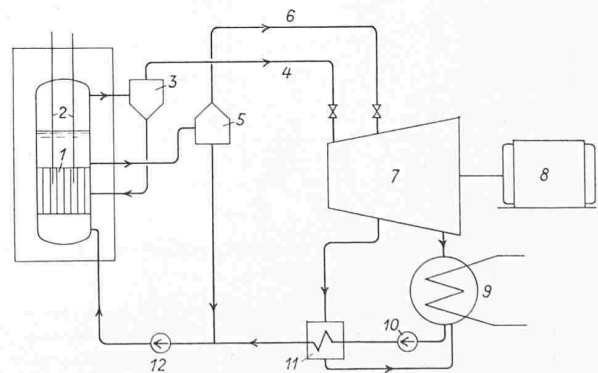


Bild 13. Prinzipschema eines Kernenergie-Kraftwerkes mit Siedewasser-Reaktor und Doppelkreislauf nach dem Vorschlag der General Electric Co. Aus «General Electric Review», Nov. 1955.

- | | | |
|--------------------|----------------------|-------------------|
| 1 Reaktorkern | 5 Entspannungsgefäss | 9 Kondensator |
| 2 Regulierstäbe | 6 Niederdruck-Dampf | 10 Kondensatpumpe |
| 3 Wasserabscheider | 7 Dampfturbine | 11 Vorwärmer |
| 4 Hochdruck-Dampf | 8 Generator | 12 Speisepumpe |

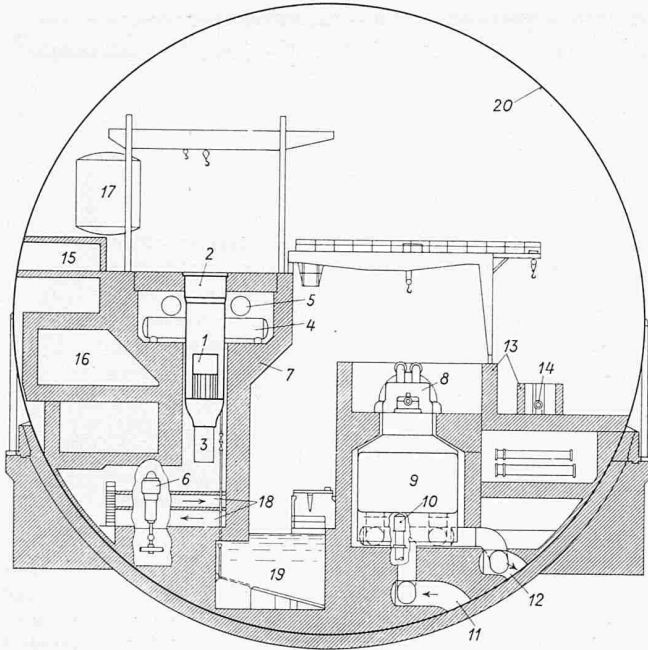


Bild 14. Vorläufiger Dispositionsplan des Kernenergie-Kraftwerkes von 180 000 kW Nutzleistung der Commonwealth Edison Co. Die Anlage wird mit einem Doppelkreislauf-Siedewasser-Reaktor, Bauart General Electric Co., ausgerüstet. Aus «General Electric Review», Nov. 1955

- | | |
|---|---|
| 1 Reaktor | 13 Betonabschirmung zu 8 bzw. 14 |
| 2 Deckel mit Abschirmung | 14 Luft-Ejektor |
| 3 Antriebe für die Regulierstäbe | 15 Schaltwarte |
| 4 Entspannungsgefäss | 16 Speiswasser-Aufbereitungs-anlage |
| 5 Wasserabscheider | 17 Kühlwasserbehälter |
| 6 Speiswasserpumpen | 18 Kühlluftkanäle mit Austritt nach dem Hochkamin |
| 7 Beton-Abschirmung | 19 Wasserbehälter zur Lagerung von gebrauchten Spaltstoffstäben |
| 8 Dampfturbinen-Gruppe, Leistung 180 000 kW | 20 Kugelförmiger Druckbehälter von 61 m Durchmesser |
| 9 Kondensator | |
| 10 Kondensatpumpen | |
| 11 Kühlwasser-Eintritt | |
| 12 Kühlwasser-Austritt | |

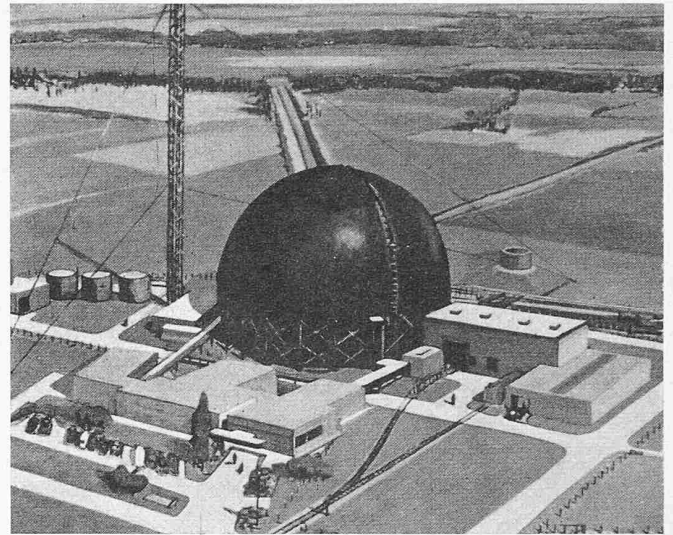


Bild 15. Modell des Commonwealth Edison Co.-Kernenergie-Kraftwerkes

Als Vorteil des Doppelkreislaufs wird u. a. angeführt, dass aus dem gleichen Reaktorkern mehr Leistung entnommen werden kann, als beim einfachen Siedewasserreaktor. Die General Electric Co. hat mit der Commonwealth Edison Company einen Vertrag für die Lieferung eines Kernenergiekraftwerkes mit Doppelkreislauf-Siedewasserreaktor abgeschlossen. Die Anlage, welche eine elektrische Leistung von 180 000 kW an die Stromversorgung abgeben wird, soll im Jahre 1960 in Betrieb kommen. Der thermische Wirkungsgrad der Anlage soll 26 % betragen. Als Spaltstoff wird angereichertes Uran-dioxyd verwendet, das in Zirkon eingehüllt ist. Bild 14 zeigt einen vorläufigen Dispositionsplan des Kraftwerkes und Bild 15 ein Modell davon. Vor allem fällt die Kugel aus Stahlblech von 61 m Durchmesser auf, in die das ganze Werk hineingebaut ist. Durch sie soll die Umgebung vor Schäden geschützt werden, die sich bei einer allfälligen Explosion von unter Druck stehenden Teilen ergeben könnten. Die Kugel ist so dimensioniert, dass sie dem Innendruck standzuhalten vermag, der sich einstellen wird, wenn alles im Reaktor enthaltene Wasser plötzlich verdampfen und aus dem Kreis austreten sollte. Für den Aufstellungsort der Zentrale sind in grossen Linien die gleichen Gesichtspunkte massgebend wie bei einer Wärmekraftzentrale bisheriger Bauart. Eine wirtschaftliche Brennstoffzufuhr ist weniger wichtig, dafür werden an die Kühlwasserversorgung grössere Ansprüche gestellt (siehe die Kanäle zum benachbarten Fluss im Hintergrund in Bild 15).

Bei allen bisher besprochenen Reaktorbauarten wird die Wärme der Arbeitsmaschine bei Drücken und Temperaturen

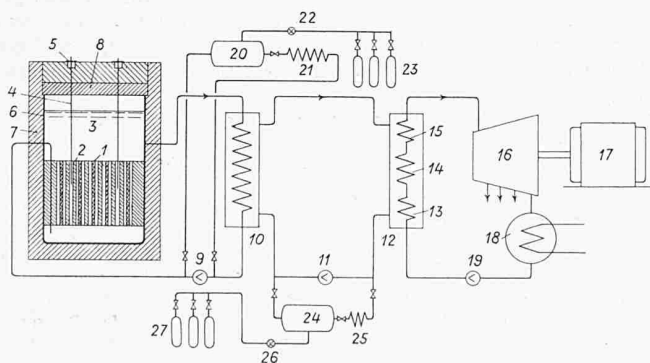


Bild 16. Prinzipschema eines Kernenergie-Kraftwerkes mit einem Natrium-Graphit-Reaktor [aus P/493]

- | | | |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1 Spaltstoffstäbe | 10 Primär-Wärme-austauscher | 18 Kondensator |
| 2 Graphitmoderator | 11 Umwälzpumpe für den Sekundärkreislauf | 19 Speisepumpe |
| 3 flüssiges Natrium | 12 Sekundär-Wärme-austauscher | 20 Behälter für flüssiges Natrium |
| 4 Regulierstäbe | 13 Vorwärmer | 21 Kühler |
| 5 Antrieb zu 4 | 14 Verdampfer | 22 Regulierventil |
| 6 Behälter aus rost-freiem Stahl | 15 Ueberhitzer | 23 Helium |
| 7 Abschirmung | 16 Dampfturbine | 24 Behälter für Zwischenmedium |
| 8 Deckel | 17 Generator | 25 Kühler |
| 9 Umwälzpumpe für den Primärkreislauf | | 26 Regulierventil |
| | | 27 Helium |

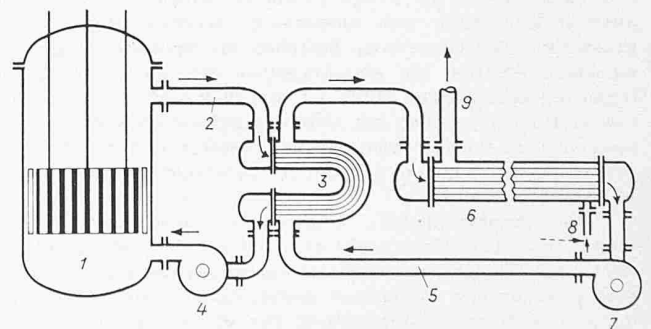
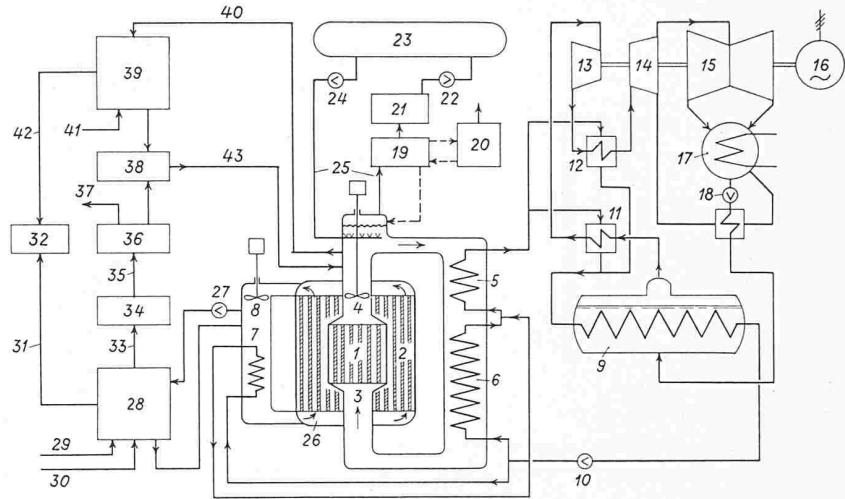


Bild 17. Prinzipschema eines Natrium-Graphit-Reaktors mit Wärmeübertragung an den Dampferzeuger durch ein Zwischenmedium

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1 Reaktor | 6 Sekundärer Wärmeaustauscher (Dampferzeuger) |
| 2 Primärkreislauf (flüssiges Natrium) | 7 Umwälzpumpe zu 5 |
| 3 Primär-Wärmeaustauscher | 8 Speiswasser-Eintritt |
| 4 Umwälzpumpe zu 2 | 9 Austritt des überhitzten Dampfes zur Turbine |
| 5 Sekundärer Kreislauf | |

- 1 Reaktorkern mit Graphit-Moderator und Uran-Wismut-Schmelze
- 2 Breedermantel mit Graphit-Moderator und Thorium-Wismut-Schmelze
- 3 Eintritt der Uran-Wismut-Schmelze
- 4 Umwälzpumpe
- 5 und 6 Wärmeaustauscher im Kernkreislauf
- 7 Wärmeaustauscher Breeder-mantel-Kreislauf
- 8 Umwälzpumpe für die Breeder-Schmelze
- 9 Sekundärer Wärmeaustauscher (Dampferzeuger)
- 10 Umwälzpumpe für Zwischenmedium
- 11 Frischdampf-Ueberhitzer
- 12 Zwischenüberhitzer
- 13 Hochdruck-Turbine
- 14 Mitteldruck-Turbine
- 15 Niederdruck-Turbine
- 16 Generator
- 17 Kondensator
- 18 Speisepumpe
- 19 Vorrichtung zum Ausscheiden von Wismut und Polonium
- 20 Vorrichtung zum Ausdestillieren von Polonium
- 21 Vorrichtung zum Ausscheiden von Xenon
- 22 Vakuumpumpe
- 23 Lagerbehälter für radioaktive Gase
- 24 Pumpe
- 25 Sperrgasleitungen
- 26 Eintritt der Breeder-Mischung
- 27 Extraktionspumpe für die mit Spaltprodukten angereicherte Breeder-Mischung
- 28 Aufbereitungsanlage für die Breeder-Mischung
- 29 Zugabe von Salzen
- 30 Zugabe von Thorium
- 31 Leitung für Salze und Spaltprodukte
- 32 Lagerung der Abfallprodukte
- 33 Leitung für Pa-233 und U-233
- 34 Rückhaltegefäss für Pa-233
- 35 Leitung für U-233
- 36 Leitung für U-233
- 37 Ueberschussabgabe von U-233
- 38 Apparat zur Regelung der Konzentration von U-233
- 39 Kernspaltstoff-Aufbereitung



- 28 Aufbereitungsanlage für die Breeder-Mischung
- 29 Zugabe von Salzen
- 30 Zugabe von Thorium
- 31 Leitung für Salze und Spaltprodukte
- 32 Lagerung der Abfallprodukte
- 33 Leitung für Pa-233 und U-233
- 34 Rückhaltegefäss für Pa-233
- 35 Leitung für U-233
- 36 Leitung für U-233
- 37 Ueberschussabgabe von U-233
- 38 Apparat zur Regelung der Konzentration von U-233
- 39 Kernspaltstoff-Aufbereitung
- 40 Extraktionsleitung für die mit Spaltprodukten angereicherte Uran-Wismut-Schmelze
- 41 Salzzugabe
- 42 Leitung für Salz und Spaltprodukte
- 43 Zuleitung für die regenerierte Uran-Wismut-Spaltstoffmischung

Bild 18. Prinzipschema einer Kraftzentrale mit homogenem Breederreaktor und den zugehörigen Einrichtungen zur kontinuierlichen Regenerierung des Spaltstoffes sowie zur Gewinnung von U-233 aus Thorium. Vorschlag des Brookhaven National Laboratory [aus P/494]

zur Verfügung gestellt, die viel tiefer liegen, als es im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit in modernen thermischen Zentralen gebräuchlich ist. Einen ersten Vorstoss in das Gebiet höherer Temperaturen stellt der mit flüssigem Natrium gekühlte heterogene Uran-Graphitreaktor der North American

Aviation Inc. dar. Die Kühlung durch flüssige Metalle gibt die Möglichkeit, den Reaktor mit hohen Temperaturen zu betreiben, ohne dass gleichzeitig grosse Drücke auftreten. Um jede Möglichkeit eines Kontaktes zwischen dem stark radioaktiven Natrium und dem Wasser im Dampferzeuger auszuschliessen, erfolgt in der ersten derartigen Anlage die Wärmeübertragung über ein Zwischenmedium; es wird also ein doppelter Wärmeaustausch notwendig (Bild 16 zeigt das Prinzipschema dieser Anlage).

Der vorgesehene Reaktor ist ausgerüstet mit leicht angereichertem Uranstäben, die in den Kanälen eines Graphitblockes angeordnet sind. Der ganze aktive Kern taucht in ein Bad von flüssigem Natrium, das auf etwa 510 °C erhitzt wird (Bild 17). Die gegenwärtige Temperaturgrenze ist bedingt durch die noch nicht ausreichenden Erfahrungen über das Verhalten von Zirkon und Stahl in flüssigem Natrium, sowie der Spaltstoffelemente bei hoher Temperatur. Die Verwendung metallischer Uranstäbe stösst auf die Schwierigkeit, dass das Uran bei 660 °C einen Gefügemwandlungspunkt aufweist, der mit einer Volumenänderung verbunden ist. Aus diesem Grund wurde im Versuchsreaktor die höchste Temperatur im Zentrum der Uranstäbe auf 649 °C (1200 °F) festgelegt. Beim Thorium liegt der Schmelzpunkt bei 1750 °C und der erste Gefügemwandlungspunkt bei 1400 °C. Es dürfte also möglich sein, bei Verwendung von Thoriumelementen, welche ursprünglich etwas mit spaltbarem Uran angereichert werden, höhere Metalltemperaturen, z. B. 1093 °C (2000 °F) zuzulassen, wodurch erst die Vorteile der Wärme-

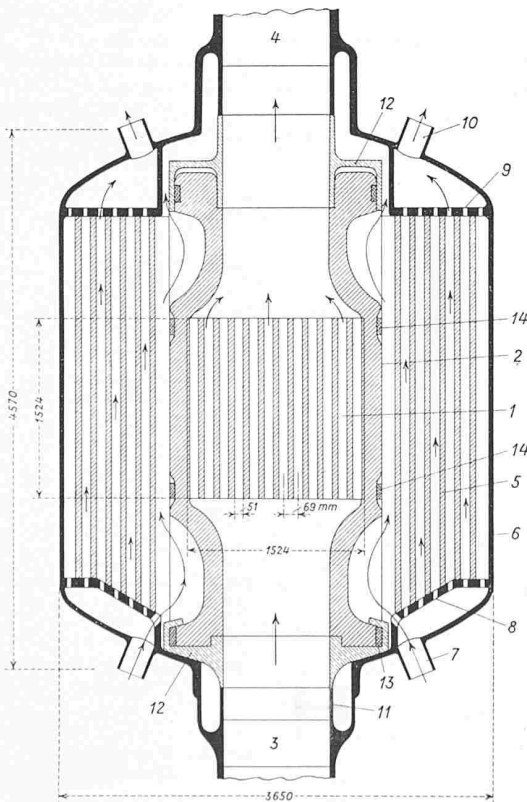


Bild 19. Vertikalschnitt durch den homogenen Reaktor für Energiegewinnung und Spaltstoffherstellung nach dem Vorschlag des Brookhaven National Laboratory [P/494]

- 1 Kern, bestehend aus reinem Graphit
- 2 Innerer Behälter
- 3 Eintrittsstutzen aus legiertem Stahl für die Bi-U-233 Spaltstoffmischung
- 4 Austrittsstutzen für den Kernspaltstoff
- 5 Breedermantel, bestehend aus Graphitstäben von 80 mm Durchmesser
- 6 äusserer Behälter aus legiertem Stahl (2 1/4 % Cr, 1 % Mo) 3660 mm Durchmesser
- 7 Eintrittsstutzen für die Thorium-Wismut-Schmelze
- 8 Tragboden für 5
- 9 Halteplatte für 5
- 10 Austrittsstutzen für die Thorium-Wismut-Schmelze
- 11 inneres Übergangsstück aus legiertem Stahl
- 12 Fassungsringe aus Spezialmaterial
- 13 Dichtungsring, der eine radiale Verschiebung erlaubt
- 14 Dichtungsringe, die vertikale Verschiebung erlauben

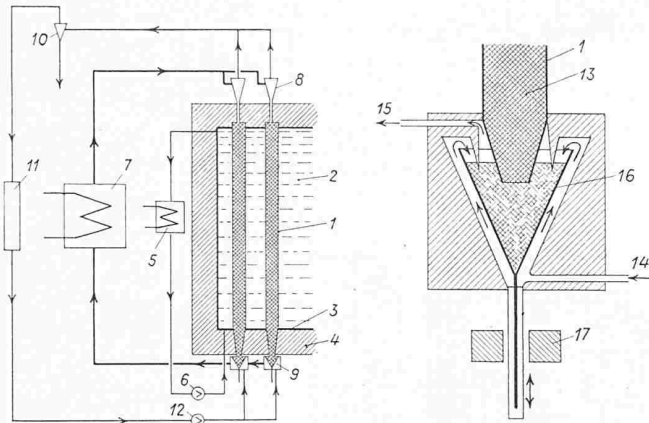


Bild 20. Projekt eines heterogenen Hochtemperatur-Reaktors mit pneumatischer Förderung des pulverförmigen Spaltstoffes [aus P/938]

- 1 Rohre aus Graphit
- 2 Schweres Wasser (Moderator)
- 3 Behälter für schweres Wasser
- 4 Graphit-Reflektor
- 5 Wärmeaustauscher im Schwerwasser-Kreislauf
- 6 Umwälzpumpe für schweres Wasser
- 7 Wärmeaustauscher im Spaltstoff-Kreislauf
- 8 Zyclone
- 9 Elektromagnetischer Vibrator
- 10 Sekundärer Zyclon
- 11 Gasreinigungs-Kolonne
- 12 Gebläse für Gasumlauf
- 13 Uranoxyd-Pulver
- 14 Eintritt des Trägergases
- 15 Austritt von Trägergas und Spaltstoff
- 16 Vibrator
- 17 Elektromagnetischer Anreger

- 1 Reaktor
- 2 Hochdruck-Turbine
- 3 Niederdruck-Turbine
- 4 Generator
- 5 Wärmeaustauscher
- 6 Vorkühler
- 7 Niederdruck-Kompressor
- 8 Zwischenkühler
- 9 Hochdruck-Kompressor
- 10 Hochdruck-Sammler
- 11 Niederdruck-Sammler
- 12 Ventile zur Druckpegel-Regelung

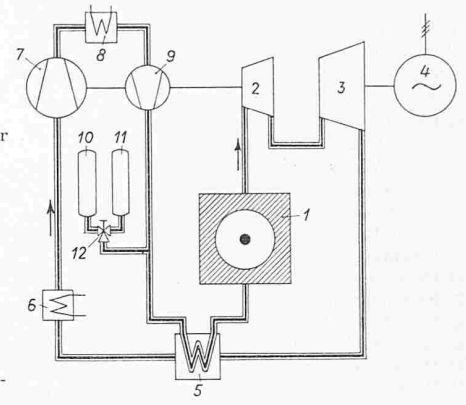


Bild 21 (rechts). Schema einer Gasturbinen-Anlage mit geschlossenem Helium-Kreislauf zur Ausnützung der Kernenergie

übertragung durch flüssige Metalle voll ausgenützt werden können. Kernphysikalisch bietet das Natrium Nachteile, die eine schlechtere Ausnützung des Urans zur Folge haben.

Bei gleichen Verhältnissen ist diejenige Reaktoranlage am interessantesten, die mit dem höchsten thermischen Wirkungsgrad arbeitet. Für die Wirtschaftlichkeit spielen aber ausser dem thermischen Wirkungsgrad auch die Anlage-

USA-Programm der ortsfesten Leistungsreaktoren

Bauherr	Ort	Reaktorbauart	Reaktionsmaterial	Moderator	Kühlmittel	Druck ata	Dampf ata	Temperatur C	Leistung in kW Wärme	Leistung in kW Elektr.	Konstruktionsfirma	Fertigstellg.
a) Fünfjahrprogramm der Atomenergiekommission												
AEC und North American Aviation Inc	Santa Susana Calif	Natrium-Graphit	2,8 % angereichertes Uran	Graphit	flüssiges Natrium				20 000		North American Aviation Inc	1956
Atomenergie-Kommission	Lemont, Ill	Siedewasser	leicht angereichertes Uran	Wasser	Wasser	42,2	42,2	satt	20 000	5 000	Argonne National Laboratory	1956
Atomenergie-Kommission	Oak Ridge Tenn	Homogen	Uranyl-sulfat in schwerem Wasser	schweres Wasser	schweres Wasser	140,6	36,6	satt	5-10 000		Oak Ridge National Laboratory	1956
Atomenergie-Kommission	Arco, Idaho	schneller Breeder	Hochangereichertes Uran	keiner	flüssiges Natrium				62 500	15 000	Argonne National Laboratory	1958
AEC und Duquesne Light Co	Shippingport Pa	Druckwasser	Hochangereichertes Uran und Uranoxyd	Wasser	Wasser	140,6	42,2	satt	230 000	60 000	Westinghouse Electric Corp	1957
b) Industrieprogramm (AEC)												
Yankee Atomic Electric Co	Rowe, Mass	Druckwasser		Wasser	Wasser					100 000	Monsanto Chemical Co	1958
Atomic Power Development (Detroit Edison)	Michigan	schneller Breeder	Angereichertes Uran mit Mantel aus erschöpftem Uran	keiner	flüssiges Natrium sek. NaK		42,2	388	300 000	100 000		1959
Consumers Public Power District	Nebraska	Natrium Graphit	leicht angereichertes Uran	Graphit	flüssiges Natrium					75 000	North American Aviation Inc	1958
c) Private Lizenz-Abkommen												
Consolidated Edison Co of N. Y.	Buchanan N. Y.	Druckwasser	Hochangereichertes Uran, Thorium	Wasser	Wasser	105,4	26,6	538		150 000	Babcock & Wilcox Co	1960
Nuclear Power Group (Commonwealth Edison)	near Chicago	Doppelkreislauf Siedewasser	angereichertes Uran	Wasser	Wasser	42,2	42,2	satt		180 000	General Electric Co	1960
Rural Cooperative Power	Elk River Minn	Geschl. Kreislauf Siedewasser	Natürliches Uran und angereichertes Uran	Wasser	Wasser	84,4	42,2	satt		22 000	American Machine & Foundry	1959
Pennsylvania Power & Light Co		Homogen								150 000	Westinghouse Electric Corp	1962
d) Spezialausführungen												
Army package power reactor	Fort Belvoir Va	Druckwasser	leicht angereichertes Uran	Wasser	Wasser	84,4	14,06	208		1 800	Alco Products, Inc	1957

kosten, sowie die Kosten für das Regenerieren des Spaltstoffes eine massgebliche Rolle. Daher ist ein wichtiges Kriterium die Energiemenge, die aus einer gegebenen Spaltstoffmenge gewonnen werden kann. Ob der durch das vorliegende System erzielbare Gewinn an thermischem Wirkungsgrad den Vorteil der grösseren Einfachheit des besten Systems mit Wasserkühlung überwiegen wird, ist eine der Hauptfragen, welche durch den Bau des heterogenen Reaktors mit Wärmeübertragung durch flüssiges Natrium beantwortet werden soll.

Eine besonders fortschrittliche Bauart stellt der vom Brookhaven National Laboratory entwickelte Liquid Metal Fuel Reactor (LMFR) dar (Bild 18). Es handelt sich dabei um einen homogenen thermischen Breederreaktor mit Kühlung durch ein flüssiges Metall und kontinuierlicher Aufbereitung des Spaltstoffes. Als Spaltstoff wird das im Breedingprozess des Thoriums gewonnene Isotop Uran-233 verwendet, das sich bei 500°C zu 0,5 % im Wismut als Trägermetall löst. Wismut ist wegen seines kleinen Wirkungsquerschnittes für Neutroneneinfang kernphysikalisch günstig. Den eigentlichen Kern des Reaktors bildet ein zylinderförmiger Graphitmoderator (Bild 19) mit Kanälen, die so dimensioniert sind, dass die umgewälzte Uran-Wismutlegierung die kritische Masse an Spaltmaterial erreicht. Der innere Kern wird umschlossen von der Breederzone, die ebenfalls einen Graphitmoderator besitzt. Dieser wird von einer Thorium-Wismutlegierung durchströmt. Ein Wärmeaustauscher mit Natriumkreislauf übermittelt die Reaktionswärme an eine moderne Dampfturbinengruppe mit Zwischenüberhitzung. Die übrigen, in Bild 18 schematisch angedeuteten Apparate gehören zur chemischen Aufbereitungsanlage für die Spaltstoffmischung im Kern und für die Stoffe in der Breederhülle. In einem besonderen System werden die gasförmigen Spaltprodukte entfernt. Die Anlage scheint auf den ersten Blick ziemlich kompliziert, doch ist bei der Gegenüberstellung mit den bereits erwähnten, vorwiegend heterogenen Reaktoren zu beachten, dass in jenen Projekten die Anlagen für die Aufbereitung des Spaltstoffes nicht eingezeichnet waren.

Beim Verfahren nach Bild 18 werden die Temperaturen der Spaltstoffmischung zu 550°C bei Reaktorausritt und zu 400°C bei Reaktoreintritt angegeben, diejenigen des Zwischenwärmeträgers zu 516 bzw. 330°C , während der Frischdampf bei Turbineneintritt 87,5 ata und 482°C aufweist. Solche Dampfdaten entsprechen zwar nicht denjenigen modernster Zentralen, sind aber auch heute noch in sehr vielen mit Kohle gefeuerten Kraftwerken gebräuchlich. Der Spaltstoffkreislauf und der Breedermantel weisen getrennte Wärmeaustauschsysteme auf.

Ein Vorschlag, wie ein heterogener thermischer Reaktor mit hoher Temperatur betrieben werden könnte, wurde in einer holländischen Studie ausgearbeitet (Bild 20). Ein mit schwerem Wasser gefüllter Behälter, das als Moderator wirkt, wird von einem Gitter von Graphitrohren durchsetzt. Die Rohren sind mit pulverförmigem Uranoxyd (Korngrösse 0,25 mm) als Spaltstoff gefüllt. Am untern Ende der Rohren werden die herunterrutschenden, etwa 650°C heissen Uranoxydkörner von einem Heliumstrom erfasst und in einem geschlossenen Kreislauf durch einen Wärmeaustauscher mit anschliessenden Zyklonen wieder an den Eintritt des Rohrsystems zurückgeführt. Ein Gebläse fördert das gereinigte Helium in die Einblasdüsen am Austritt der Graphitrohren. Im Wärmeaustauscher, in dem die Konzentration des Uranoxydpulvers etwa 35 Vol-% beträgt, wird überhitzter Dampf von 100 at und 550°C erzeugt. In den Graphitrohren, in denen kein Gas durch das Uranoxydpulver strömt, ist die Wärmeleitung schlecht, so dass die Wärmeverluste an das schwere Wasser, das auf einer niedrigen Temperatur (50°C) gehalten wird, klein sind. Die heterogene Bauweise in Verbindung mit dem schweren Wasser als Moderator ermöglicht die Verwendung von natürlichem Uran als Spaltmaterial. Je nach der räumlichen Lage der Graphitrohre und entsprechend der Grösse des Neutronenflusses muss die Fördermenge des Uranoxydpulvers verschieden sein. Am grössten wird sie für die Rohren im Zentrum des Reaktors. Zur Fernsteuerung des Durchsatzes an Uranoxydpulver ist am untern Ende jedes Graphitrohres ein elektromagnetischer Vibrator angeordnet, dessen Amplituden verändert werden können. Die pneumatische Förderung ermöglicht in Verbindung mit einer ent-

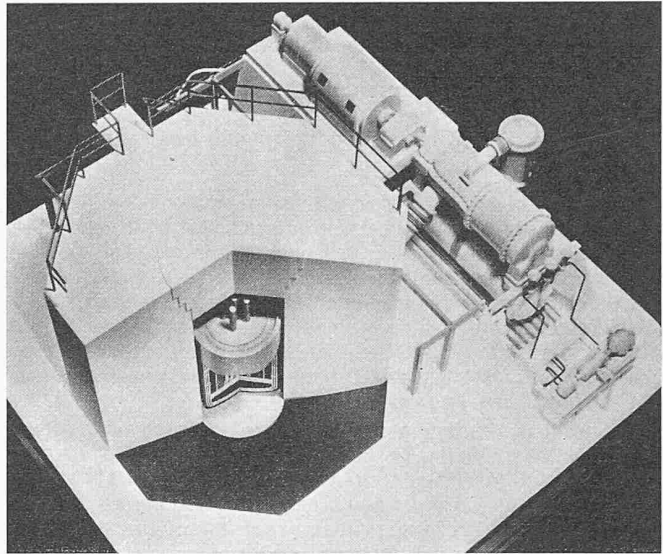


Bild 22. Modell einer Gasturbinen-Anlage mit geschlossenem Kreislauf mit gasgekühltem Hochtemperatur-Kernreaktor

sprechenden Reinigungsanlage eine kontinuierliche Abführung der schädlichen gasförmigen Spaltprodukte (z. B. Xenon-135). Sollte aus irgend einem Grund eines der Graphitrohre verstopfen, so steigt im betreffenden Rohr die Temperatur, und es werden die Sicherheitsvorrichtungen ausgelöst. Setzt der Gaskompressor aus, so kommt die Reaktion automatisch zum Stillstand, da in diesem Fall die Graphitrohre nicht mehr nachgefüllt werden.

Unsere Uebersicht wäre unvollständig, wenn wir nicht auch auf ein Beispiel der Anwendung der Gasturbine in einer Kernenergieanlage hinweisen würden. Da in letzter Zeit Vorschläge von gasgekühlten Kernreaktoren, die mit sehr hohen Temperaturen des Wärmeübertragungsmittels arbeiten, bekannt geworden sind, rückt der Einsatz der Gasturbine als Wärmekraftmaschine in den Bereich der praktischen Möglichkeiten. Eine besonders vorteilhafte Schaltung erhält man, wenn das Kühlgas des Reaktors gleichzeitig Arbeitsmittel der Gasturbine ist. Dies führt zur Gasturbine mit geschlossenem Kreislauf, der z. B. mit Helium betrieben werden kann (Bilder 21 und 22). Der Kreislauf mit Helium ergibt sehr kleine Wärmeaustauscher, das Gas durchströmt mit einem Druck von z. B. 50 at direkt den Reaktor. Durch den Wegfall des Wärmeaustauschers ergibt sich eine analoge Vereinfachung wie beim Siedewasserreaktor. Allerdings stellt sich auch hier das Problem einer eventuellen radioaktiven Verunreinigung der Turbomaschinen. Im offenen Gasturbinenprozess muss zwischen dem Kühlmittel des Reaktors und dem Arbeitsmittel der Turbine ein Wärmeaustauscher eingeschaltet werden. Wird schon ein Wärmeaustauscher benötigt, so kann als Gaserhitzer auch einer der erwähnten Hochtemperaturreaktoren mit Kühlung durch ein flüssiges Metall verwendet werden. Allerdings dürfte eine solche Anlage wesentlich komplizierter ausfallen, als die Anordnung mit geschlossenem Kreislauf.

Werfen wir am Schluss unserer Ausführungen nochmals einen Blick zurück, so sehen wir, dass die wirtschaftliche Ausnutzung der Kernenergie eine ausserordentlich vielgestaltige Aufgabe ist. In einer grossen Zahl industriell hochentwickelter Länder wird die neue Technik der Kernreaktoren mit grosser Energie vorwärtsgetrieben. Da im gegenwärtigen Zeitpunkt niemand die endgültige Entwicklung der Kernreaktoren voraussagen kann, muss auf breiter Front marschiert werden. Die Tabelle gibt als Ausblick das amerikanische Programm anfangs 1956 für den Bau ortsfester Leistungsreaktoren, sowie die vorgesehenen Inbetriebsetzungsdaten. Verfolgt man die einschlägigen Veröffentlichungen, so sieht man, dass es nicht an weiteren Projekten mangelt, und neue Programme in Vorbereitung sind. Die industrielle Ausnutzung der Kernenergie stellt den Ingenieur und Physiker vor eine grosse Zahl neuer, faszinierender Pionieraufgaben.