

## Reaktortypen

Kernreaktoren erzeugen primär Wärme und unterscheiden sich dadurch nicht von Kraftwerktypen, die fossile Brennstoffe verfeuern. Es soll daher hier nicht auf die Umwandlung von Wärme in Elektrizität oder chemische Energie eingegangen werden. Kernreaktoren haben aber Eigenschaften, die sie von anderen Wärmequellen deutlich unterscheiden. In Kernreaktoren wird eine Kettenreaktion unterhalten, die unter sorgfältiger Kontrolle gehalten werden muss. Dies gilt letztlich auch für Reaktoren, die fossile Energieträger verbrennen, nur sind die Schwierigkeiten bei Kernreaktoren unvergleichlich viel grösser. Die schiere Menge an Energie, die sich in einem nuklearen Reaktorkern befindet, lässt sich mit dem Brennstoffvorrat in einem Gas- oder Kohlekraftwerk nicht vergleichen. Die entstehenden Spaltprodukte müssen mit grossem Aufwand von der Umwelt ferngehalten werden. Dies erfordert Sicherheitsmassnahmen, die jene in anderen thermischen Kraftwerken bei weitem übersteigen. Hier sollen vorerst einige Begriffe erklärt werden, die bei Kernreaktoren grundsätzlich eine Rolle spielen.

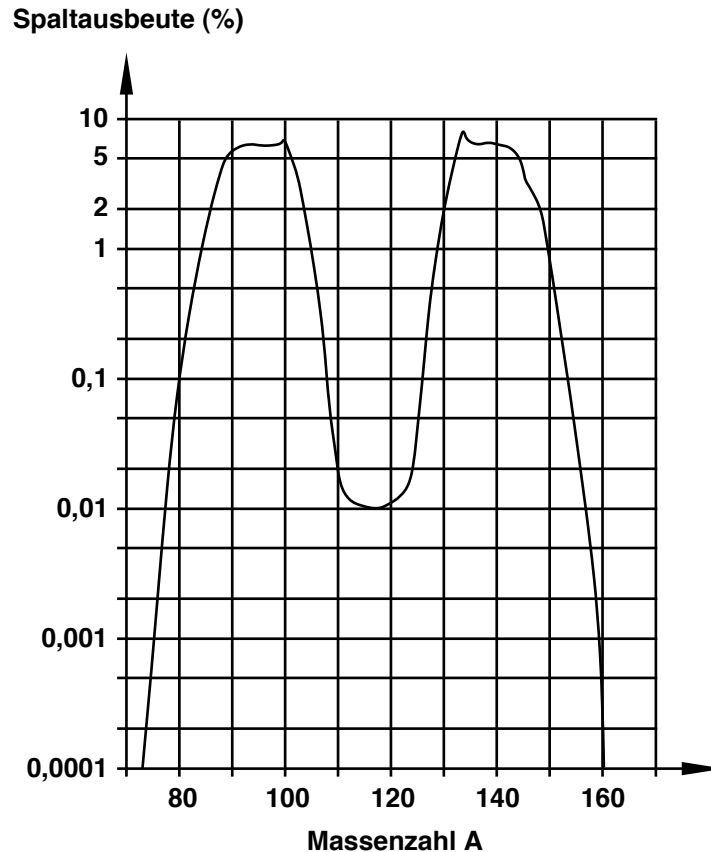
### Kernbrennstoffe

Als Kernbrennstoffe kommen die Nuklide  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Pu}$  zum Einsatz. Das weitaus wichtigste Nuklid ist  $^{235}\text{U}$ , das im Gegensatz zu den anderen in der Natur vorkommt.  $^{239}\text{Pu}$  entsteht erst im Reaktor durch Bestrahlen von  $^{238}\text{U}$  mit Neutronen, während  $^{233}\text{U}$  durch Bestrahlen von  $^{232}\text{Th}$  erzeugt werden muss.  $^{235}\text{U}$  ist in natürlichem Uran zu ca. 0.7% vorhanden, der Rest ist fast ausschliesslich  $^{238}\text{U}$ . Der eigentliche Energie erzeugende Schritt ist der Einfang eines langsamen (thermischen) Neutrons durch einen spaltbaren Kern, der dadurch in zwei Bruchstücke spaltet. Dabei werden im Fall von  $^{235}\text{U}$  im Durchschnitt etwa 3 Neutronen frei, die in einer Kettenreaktion weitere Kerne spalten können.

### Spaltprodukte

Die Massenverteilung der Kerne, die durch Kernspaltung entstehen, ist abhängig vom spaltenden Nuklid und von der Energie der Neutronen, die die Spaltung auslösen. Bei der Spaltung von  $^{235}\text{U}$  durch thermische Neutronen zeigt die Massenverteilung zwei charakteristische Peaks in der Gegend bei 80–105 und bei 125–150. Dazwischen, bei der halben Masse des  $^{235}\text{U}$ -Kerns, entstehen praktisch keine Spaltprodukte. Die Kerne zerfallen also in zwei ungleich schwere Bruchstücke:

## H2



Da spaltbare Kerne schwer und daher neutronenreich sind, enthalten die meisten Spaltprodukte zu viele Neutronen, um stabil zu sein. Sie sind typischerweise  $\beta^-$ -Strahler, wobei auch die Töchter oftmals unter Aussendung von  $\beta^-$ -Teilchen weiter zerfallen, bis die Stabilitätslinie erreicht wird. Die folgenden Spaltprodukte sind besonders wichtig. Es handelt sich durchwegs um  $\beta^-$ -Strahler.

$^{90}\text{Sr}$   $t_{1/2} = 28.64$  a, folgt dem chemisch verwandten Ca und reichert sich nach Inkorporation in den Knochen an, wo es das rote Knochenmark schädigen kann

$^{131}\text{I}$   $t_{1/2} = 8.02$  d, flüchtig, mobil, wasserlöslich als Iodid, kann sich nach Inkorporation in der Schilddrüse anreichern und zu Schilddrüsenkrebs führen

$^{137}\text{Cs}$   $t_{1/2} = 30.17$  a, mobil, wasserlöslich, entsteht in grossen Mengen

### Anreicherung

Es gibt Reaktoren, die mit Natururan betrieben werden können. Die meisten Reaktortypen erfordern jedoch eine grössere Konzentration an  $^{235}\text{U}$  als die 0.7%, die in natürlichem Uran vorhanden sind. Dadurch ist eine aufwendige isotopische Anreicherung erforderlich.

## Moderator

Die Absorption von Neutronen durch  $^{235}\text{U}$  mit nachfolgender Spaltung ist umso effizienter, je langsamer die Neutronen sind, genauer, wenn sie eine Energie von 1 eV haben. Die meisten Kernreaktoren enthalten daher eine Substanz, die die Neutronen möglichst effizient abbremst, sie aber kaum absorbiert. Diese Materialien werden als Moderatoren bezeichnet. Sie bestehen aus Atomen mit kleiner Masse. Geeignet sind  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ . Gewöhnliches Wasser kann als Moderator eingesetzt werden. Es wird auch schweres Wasser,  $\text{D}_2\text{O}$ , eingesetzt, das zwar sehr teuer ist, aber weniger Neutronen absorbiert als leichtes Wasser. Ein brauchbarer Moderator ist auch Graphit.

## Steuerstäbe

Die Kettenreaktion in einem Reaktor muss sorgfältig kontrolliert werden. Frische Brennelemente erzeugen einen höheren Neutronenfluss als weitgehend abgebrannte. Die zusätzlichen Neutronen müssen daher kontrolliert entfernt werden. Dies geschieht durch bewegliche Stäbe aus einem Material wie Cd, Ho, B oder Gd, das Neutronen besonders effizient absorbiert. Die Steuerstäbe absorbieren in einer optimalen Position gerade so viele Neutronen, dass insgesamt ein Neutron pro Kernspaltung übrigbleibt, um die Kettenreaktion aufrechtzuerhalten. Ist der Neutronenfluss zu gross, werden die Stäbe weiter in den Reaktorkern eingeführt. Die Steuerstäbe können auch für eine Sofortabschaltung des Reaktors verwendet werden, etwa indem man sie durch die Schwerkraft in den Reaktorkern hineinfallen lässt.

## Prompte und verzögerte Neutronen

Die meisten Neutronen, die zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion gebraucht werden, stammen unmittelbar von den eigentlichen Zerfallsprozessen. Man nennt sie prompte Neutronen. Es gibt aber einen kleinen Anteil von etwa 0.6 % aller Neutronen, die erst nachträglich durch die entstandenen Spaltprodukte gebildet werden. Man nennt sie verzögert. Ohne verzögerte Neutronen wäre es sehr schwierig, die Kettenreaktion zu regeln. Man bezeichnet den Anteil der verzögerten Neutronen mit  $\beta$ . Der Anteil der prompten Neutronen ist also  $1-\beta$ .

## Effektiver Multiplikationsfaktor, Reaktivität, Reaktorzustand, Reaktorperiode

Der effektive Multiplikationsfaktor  $k_{\text{eff}}$  ist ein Mass für den Zustand der Kettenreaktion. Ist  $k_{\text{eff}} = 1$ , werden gleich viele Neutronen gebildet, wie durch Absorption oder Verlust verschwinden. Im Allgemeinen wird dieser Reaktorzustand angestrebt. Einen solchen Reaktor nennt man kritisch. Ist  $k_{\text{eff}} < 1$ , kann die Kettenreaktion nicht aufrecht erhalten werden. Bei jeder Spaltungsgeneration werden weniger Neutronen gebildet, als zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion nötig wären. Bleibt der Reaktor in diesem Zustand, kommt die Energieproduktion zum Erliegen. Der Reaktor ist unterkritisch. Man bezeichnet entsprechend den Reaktorzustand als überkritisch, wenn  $k_{\text{eff}} > 1$  ist. Dieser Zustand ist potentiell gefährlich, da die Leistung des Reaktors stetig

zunimmt. Beim Hochfahren eines Reaktors ist dieser Zustand anfänglich notwendig, kann aber nicht beliebig lange aufrecht erhalten werden. Die Zeitspanne, während der die Leistung des Reaktors um den Faktor  $e$  (Basis der natürlichen Logarithmen) zunimmt, bezeichnet man als Reaktorperiode.

Man kann den Reaktorzustand auch mit der Reaktivität  $\rho$  beschreiben. Dabei ist

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

Ein unterkritischer Reaktor hat also eine negative Reaktivität, ein überkritischer eine positive. Angestrebt wird meist eine verschwindende Reaktivität. Eine besonders wichtige Schranke für die Reaktivität überkritischer Reaktoren stellt der Anteil der verzögerten Neutronen  $\beta$  dar. Solange  $\rho \leq \beta$  bleibt (und damit  $k_{\text{eff}} \leq 1 + \beta$ ), reichen die prompten Neutronen allein nicht aus, die Kettenreaktion zu unterhalten. Die Produktion der verzögerten Neutronen hängt vom Reaktorzustand ab, wie er einige Sekunden in der Vergangenheit bestand. Ein solcher, als verzögert überkritisch bezeichneter Reaktor, lässt sich relativ leicht kontrollieren. Übersteigt die Reaktivität hingegen diese Schwelle, genügen die prompten Neutronen für sich allein zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion. Diese Situation ist überaus gefährlich, wenn nicht wirksame rückkoppelnde Mechanismen anderweitig die Reaktivität begrenzen. Derartige Rückkopplungen gibt es in der Praxis fast nie. Ein solcher, als prompt überkritisch bezeichneter Reaktor, hat eine Reaktorperiode im Bereich von Millisekunden. In diesem Zustand ist die Zerstörung des Reaktors durch eine so genannte Leistungsexkursion praktisch nicht zu verhindern.

### **Xenonvergiftung**

Einige Spaltprodukte haben grosse Querschnitte für thermische Neutronen, weshalb man sie als Neutronengifte bezeichnet. Sie können bei der Aufrechterhaltung der Kettenreaktion einen störenden Einfluss haben. Das wichtigste Neutronengift ist  $^{135}\text{Xe}$ , ein  $\beta^-$ -Strahler mit einer Halbwertszeit von 9.10 Stunden. Es entsteht allerdings nur mit einer kleinen Ausbeute durch Kernspaltung. Wesentlich wichtiger ist seine Bildung über den  $\beta^-$ -Zerfall von  $^{135}\text{I}$ , das mit einer viel grösseren Ausbeute als Spaltprodukt entsteht. Da  $^{135}\text{I}$  eine Halbwertszeit von 6.61 Stunden hat, entsteht das Neutronengift  $^{135}\text{Xe}$  deutlich verzögert. Im stationären Zustand eines Reaktors wird das  $^{135}\text{Xe}$  mit der gleichen Geschwindigkeit gebildet, wie es durch  $\beta^-$ -Zerfall und hauptsächlich durch Neutroneneinfang verschwindet. Vermindert man aber die Leistung des Reaktors, sinkt die Neutronendichte und daher die Vernichtungsrate von  $^{135}\text{Xe}$ . Dadurch steigt seine Konzentration an, da es vorerst mit praktisch unveränderter Bildungsrate aus  $^{135}\text{I}$  entsteht. Kurzfristig bleibt die Konzentration erhöht. Erst wenn sich die kleinere Bildungsrate der Mutter  $^{135}\text{I}$  bemerkbar macht, sinkt die Konzentration wieder ab und stabilisiert sich auf tieferem Niveau, was nach etwa 50 Stunden erreicht ist. Umgekehrt ist das Verhalten, wenn die Reaktorleistung erhöht wird. Die Xenonvergiftung kann zu Schwierigkeiten beim Stabilisieren der Reaktorleistung

führen, wenn vorgängig die Leistung wesentlich verändert wurde. Dies ist besonders beim Anfahren der Fall.

### **Dampfblasenkoeffizient (void coefficient)**

Der Dampfblasenkoeffizient gibt an, wie sich die Wärmeleistung des Reaktors ändert, wenn im Moderator oder im Kühlmedium Dampfblasen entstehen oder verschwinden. Wenn Dampfblasen den Moderator verdrängen, nimmt die Leistung des Reaktors ab (negativer Koeffizient). Dies kann der Sicherheit des Reaktors dienlich sein, weil beim Verlust des Kühlmittels die Leistung abnimmt. Ein negativer Koeffizient kann aber auch problematisch sein, wenn sich durch unvermitteltes Schliessen eines Ventils ein Druck im Kühlmittel aufbaut, der die im Normalbetrieb vorhandenen Blasen verschwinden lässt. Durch die zunehmende Menge an Moderator kann die Leistung des Reaktors ansteigen. Wesentlich kritischer ist ein positiver Koeffizient, da bei einem Kühlmittelverlust die Leistung ansteigt. Grundsätzlich wird ein verschwindender oder leicht negativer Koeffizient angestrebt.

### **Wigner-Energie**

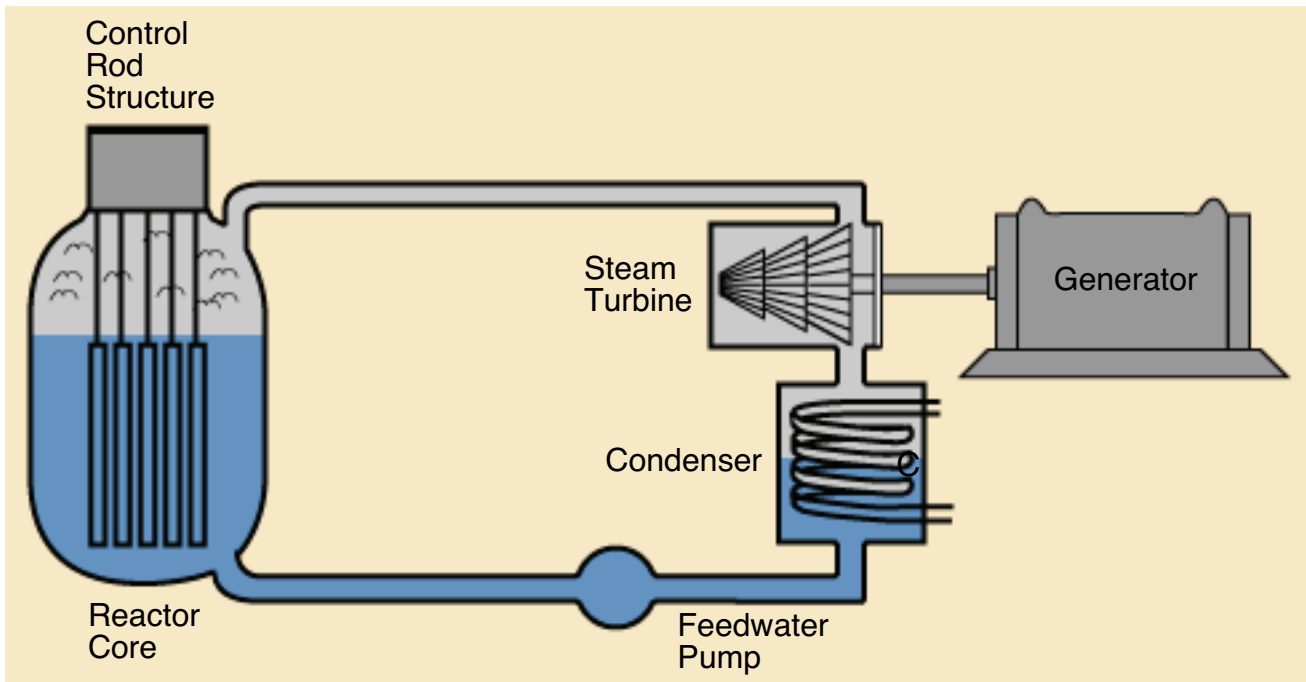
Im Zusammenhang mit dem Gebrauch von Graphit als Moderator wurde beobachtet, dass durch Beschuss mit Neutronen C-Atome aus dem Kristallverband des Graphits versetzt werden und so Energie speichern. Diese so genannte Wigner-Energie kann nach einer gewissen Zeit spontan frei werden, was zu einer Erhitzung des Moderators führt. Dadurch wird das Freisetzen der Wigner-Energie noch zusätzlich begünstigt, wodurch es zu einem plötzlichen und unvorhergesehenen Ansteigen der Temperatur kommt. In einem graphit-moderierten Reaktor kann das Phänomen zu einem Problem werden.

### **Leichtwasserreaktor (light water reactor)**

Ein Leichtwasserreaktor verwendet gewöhnliches Wasser als Neutronenmoderator. Man unterscheidet im Wesentlichen die beiden Typen Druckwasserreaktor (pressurized water reactor) und Siedewasserreaktor (boiling water reactor). Sie unterscheiden sich in der Art, wie die Wärme der Kernreaktionen in Dampf umgewandelt wird. Mit Leichtwasser moderierte Reaktoren werden beim Einsatz Natururan nicht kritisch. Sie erfordern etwa 3%–4% spaltbares Material im Brennstoff. Uran muss also an  $^{235}\text{U}$  angereichert werden, oder anderes Spaltmaterial wie  $^{239}\text{Pu}$  muss hinzugefügt werden. Der Brennstoff wird meist in der Form von keramischem  $\text{UO}_2$  und allenfalls zusätzlich  $\text{PuO}_2$  eingesetzt. Um die Brennelemente zu ersetzen, muss ein Leichtwasserreaktor während einiger Zeit vollständig abgeschaltet werden. Typischerweise wird dann etwa ein Viertel des Brennstoffs ersetzt. Abgebrannter Brennstoff enthält noch mehr als 1% spaltbares Material, typischerweise 0.9% bis 1.2%  $^{235}\text{U}$  und knapp 1% erbrütetes  $^{239}\text{Pu}$ , also mehr Spaltmaterial als Natururan.

## Siedewasserreaktor (boiling water reactor)

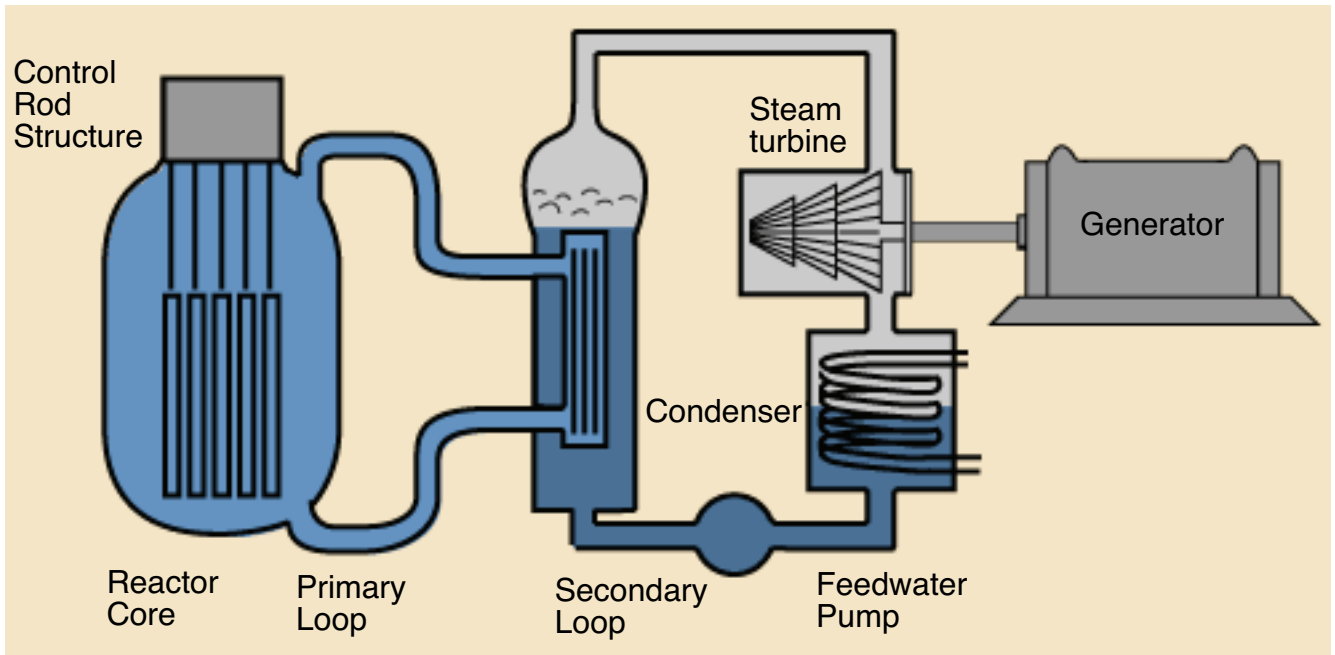
Ein Siedewasserreaktor ist relativ einfach aufgebaut. Durch die Wärme des Reaktorkerns wird Dampf erzeugt, der direkt zu einer Turbine geleitet wird. Nach dem Kondensieren des Dampfes durch ein Kühlmittel wird das Kondensat wieder zum Reaktorkern zurückgeführt.



Da nicht verhindert werden kann, dass in diesem Kreislauf Radioaktivität auftritt, muss die Turbine entsprechend abgeschirmt werden. Das wichtigste entstehende Nuklid ist allerdings  $^{16}\text{N}$  mit einer Halbwertszeit von nur 7 s. Der Druck im Kreislauf beträgt etwa 75 bar bei einer Temperatur von  $285^\circ\text{C}$ . Siedewasserreaktoren haben einen negativen Dampfblasenkoeffizienten. Bei einem Verlust des Kühlwassers, das auch als Moderator dient, nimmt die Leistung des Reaktors ab. Bei einer unvorhergesehenen Druckerhöhung im Reaktorkreislauf wird die Moderation durch weniger Dampfblasen verstärkt, was zu einer Erhöhung der Leistung führt. Ein sekundäres Sicherheitssystem besteht darin, bei einer Notabschaltung die Zufuhr von Kühlwasser zu drosseln und dadurch den Dampfanteil im Kreislauf zu erhöhen.

## Druckwasserreaktor (pressurized water reactor)

Im Druckwasserreaktor wird im primären Reaktorkreislauf ein Verdampfen des Wassers verhindert. Der Druck beträgt bei einer Temperatur von  $325^\circ\text{C}$  etwa 150 bar. Die Kühlflüssigkeit wird in einen Dampferzeuger geleitet, der in einem getrennten sekundären Kreislauf Dampf zum Betreiben der Turbinen erzeugt.

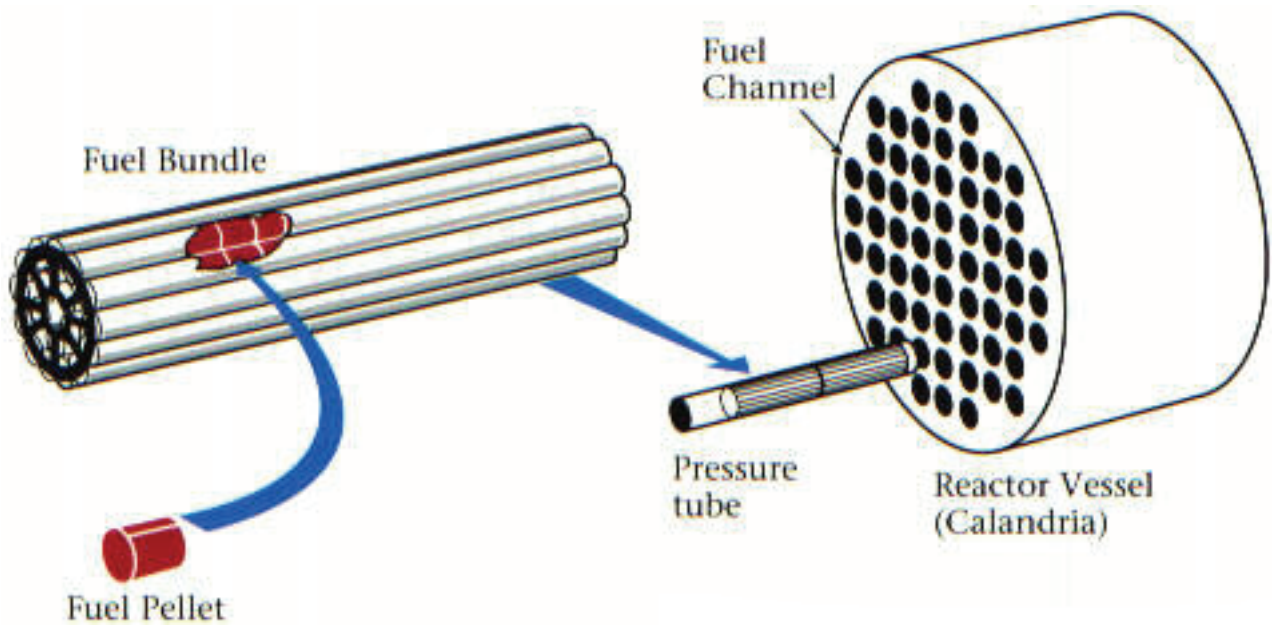


Das im Vergleich mit dem Siedewasserreaktor etwas aufwendigere Design führt zu einem einfacheren Betrieb. Das Wasser im sekundären Kreislauf ist nicht radioaktiv und der Unterhalt der Turbinen gestaltet sich dadurch weniger aufwendig. Das Wasser im sekundären Kreislauf hat auch keine moderierenden Eigenschaften, wodurch sich der negative Dampfblasenkoeffizient nicht ungünstig auf die Sicherheit auswirken kann. Im Fall eines Kühlwasserverlustes im primären Kreislauf sinkt die Leistung des Reaktors durch den fehlenden Moderator. Als sekundäre Massnahme bei einer Notabschaltung wird dem Kühlwasser z. B. Borat zugefügt, das als effizienter Neutronenabsorber die Kettenreaktion unterbricht. Der Druckwasserreaktor ist der weltweit am meisten verbreitete Reaktortyp. Gemäss dem "Nuclear Engineering International Handbook 2005" gingen von insgesamt 381 GWe installierter Leistung 249 GWe auf das Konto dieses Reaktortyps.

### **CANDU Schwerwasser-Druckröhren-Reaktor**

Die CANDU-Technologie (CANada Deuterium Uranium) wurde in Kanada nach Ende des Zweiten Weltkriegs entwickelt. Kanada verfügte damals nicht über die Infrastruktur einer Schwerindustrie und besass auch keine Anlagen zur Anreicherung von  $^{235}\text{U}$ . Kanada verfügt aber über grosse Reserven an Uranerz und hatte damals bereits eine etablierte Infrastruktur zur Produktion von schwerem Wasser. Um möglichst viele Komponenten eines Kraftwerks innerhalb der eigenen Grenzen produzieren zu können, verfolgte Kanada die Technologie eines mit Schwerwasser moderierten Druckröhrenreaktors, der mit Natururan betrieben werden kann. Der Aufbau des CANDU-Reaktors ist denkbar einfach. Der Reaktorblock (Calandria, siehe Figur) besteht aus einem horizontal angeordneten Aluminiumzylinder, der mehrere hundert stabförmige Druckröhren aufnehmen kann.

H8



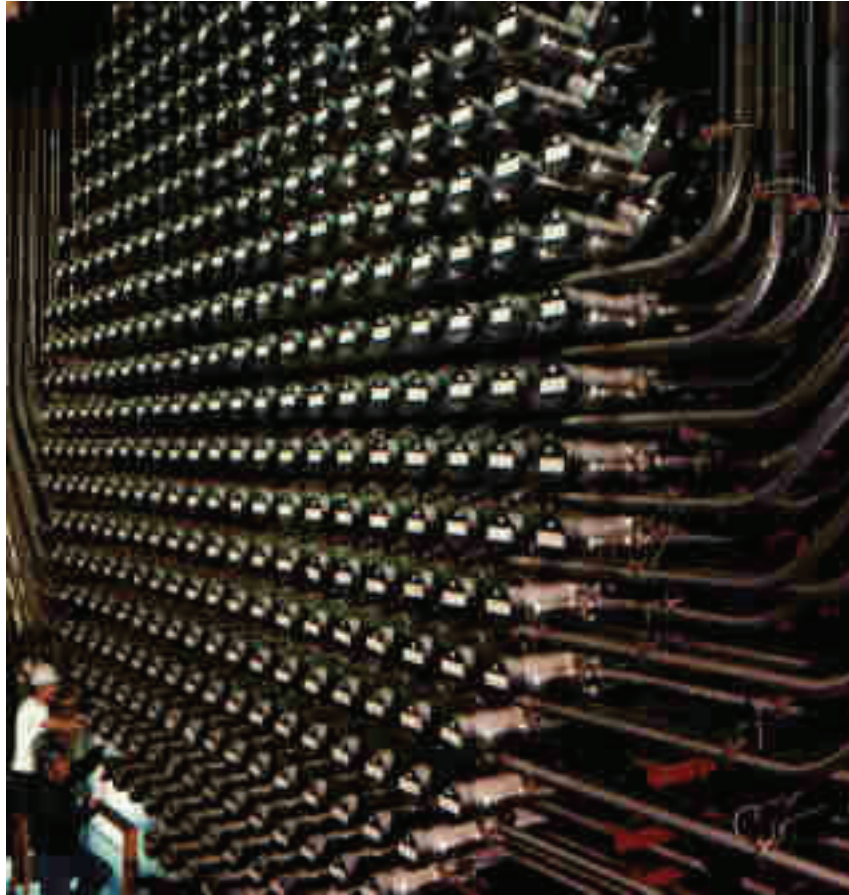
Die folgende Figur zeigt einen Reaktorkern vor dem Einbau.





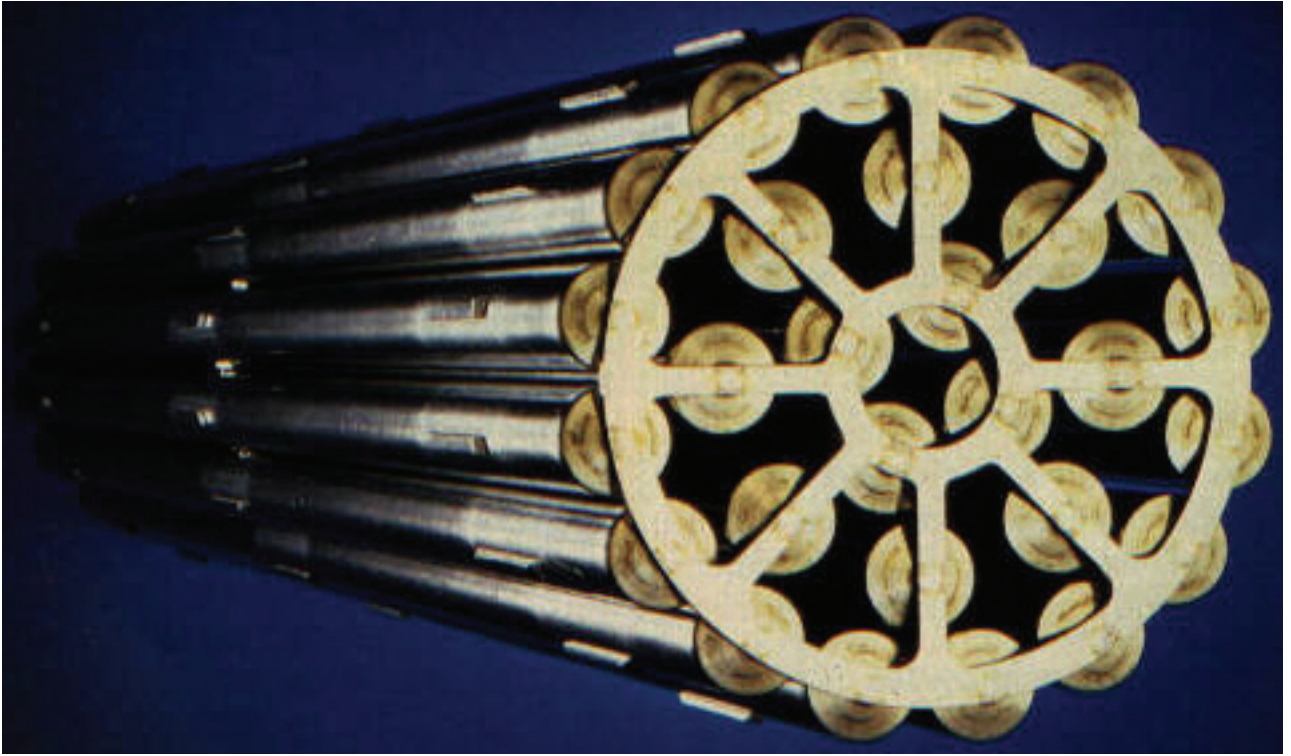
## H9

Die folgende Figur zeigt, dass jede Druckröhre ein eigenständiger kleiner Reaktor ist, der auch individuell mit neuen Brennstoffelementen beschickt werden kann, selbst wenn der Gesamtreaktor unter Vollast läuft.



Natürlich kann der einzelne Reaktor nur im Zusammenwirken mit den anderen kritisch werden. Jede Druckröhre enthält mehrere Brennstoffbündel, deren Aufbau in den folgenden Figuren dargestellt ist. Eine solche Einheit ist etwa 50 cm lang und wiegt ca. 20 kg.

H10



Ein Brennstoffbündel besteht aus 37 Stäben, zwischen denen das Kühlmittel zirkuliert. Im klassischen CANDU-Reaktor wird Schwerwasser zur Kühlung verwendet. Als Brennstoff kommt dann meist natürliches Uran in Form von  $\text{UO}_2$  zum Einsatz. Zwischen den Druckröhren befindet sich der Moderator, ebenfalls Schwerwasser, mit einer Temperatur von  $70^\circ \text{C}$ . Das CANDU-Design zeichnet sich durch einen besonders ökonomischen Umgang mit den Neutronen aus. Nur so kann Natururan als Brennstoff verwendet werden.

Ein CANDU-Reaktor ist sehr flexibel in der Art des verwendeten Brennstoffs. Weil die Brennstoffbündel ausgewechselt werden können, während der Reaktor voll produziert, kann der Brennstoff sogar im "fliegenden Wechsel" gegen eine andere Art ausgetauscht werden. Im Normalbetrieb werden durch zwei Roboter an den Enden des Reaktorkerns jeden Tag einige Bündel an eine andere Position im Reaktor gebracht. Dadurch kann der Neutronenfluss präzise gesteuert werden. Die abgebrannten Brennelemente, die zuletzt an der Peripherie des Reaktors positioniert sind, enthalten noch etwa  $0.2\%$   $^{235}\text{U}$  im Uran, soviel wie auch das angereicherte Uran aus einer Anreicherungsanlage enthält. Das erbrütete Plutonium ist für Kernwaffen nicht geeignet. Auch lohnt es sich kaum, das noch verbleibende Plutonium zurückzugewinnen. Daher verzichtet man auf eine Aufarbeitung der Brennstäbe.

Die hohe Flexibilität und das hervorragende Neutronen-Management des CANDU-Reaktors führt auch dazu, dass Brennstoff aus abgebrannten Brennelementen eines Leichtwasserreaktors als neuer Brennstoff verwendet werden kann. Dieser abgebrannte Brennstoff enthält noch immer  $0.9\%$  bis  $1.2\%$   $^{235}\text{U}$  im Uran sowie knapp  $1\%$  erbrütetes Plutonium. Dies ist also mehr spaltbares Material, als im Natururan vorhanden ist, daher kann der Abfall aus Leichtwasserreaktoren ohne weitere Aufarbeitung als neuer Brennstoff verwendet werden.

Seit dem Jahr 2001 wird im neuesten CANDU-Design Leichtwasser als Kühlmittel eingesetzt. Da aber Leichtwasser mehr Neutronen absorbiert als Schwerwasser, muss nun als Brennstoff leicht angereichertes Uran mit einem Gehalt von  $1.65\%$   $^{235}\text{U}$  verwendet werden. Dadurch lässt sich das Inventar an Schwerwasser auf einen Viertel reduzieren, was zu erheblichen Kosteneinsparungen führt.

CANDU-Reaktoren haben einen leicht positiven Dampfblasenkoeffizienten, wenn sie klassisch mit Schwerwasser sowohl als Moderator als auch als Kühlmittel betrieben werden. Das Kühlmittel umströmt unmittelbar die Brennstäbe, verlangsamt die Neutronen also nur auf mittlere Geschwindigkeiten. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie von  $^{238}\text{U}$  absorbiert zu werden, ist gross. Ein Verlust des Kühlmittels kann die Leistung des Reaktors vergrössern, indem getroffene  $^{238}\text{U}$ -Kerne durch die schnellen Neutronen vermehrt gespalten werden oder aber die Neutronen gar nicht absorbieren. In einem Druckröhrenreaktor ist das Kühlmittel heiss. Thermisch gewordene Neutronen sind dort weniger effizient im Spalten von  $^{235}\text{U}$  als die Neutronen, die im eigentlichen Moderator bei einer Temperatur von  $70^\circ \text{C}$  thermisch werden. Durch das Fehlen des Kühlmittels können die besonders langsamen Neutronen aus dem Moderatorbereich

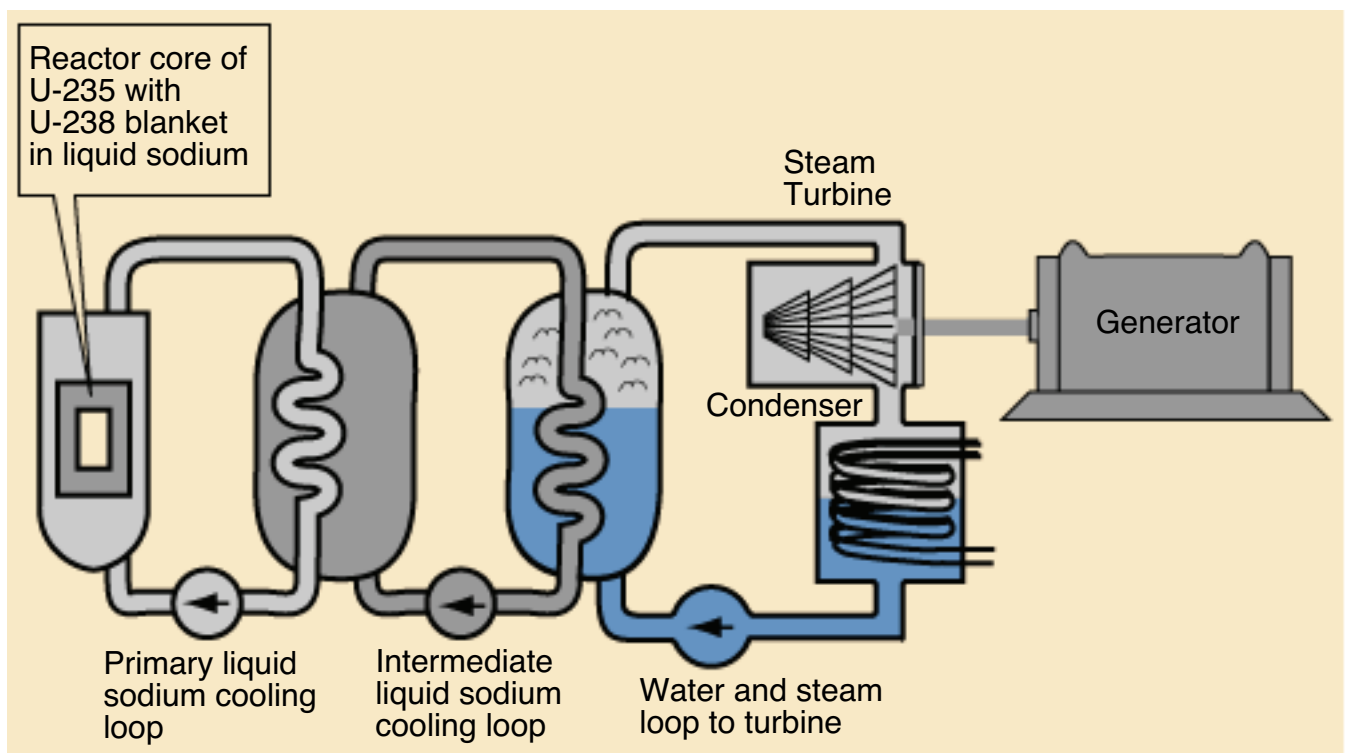
ungehindert in die Brennelemente zurückdiffundieren, wo sie jetzt besonders effizient sind, da sie durch das Kühlmittel nicht wieder aufgeheizt werden.

### RBMK-Reaktor

Der mittlerweile als veraltet zu bezeichnende Reaktortyp RBMK hat zur Katastrophe von Tschernobyl geführt. RBMK steht für einen russischen Begriff, der etwa mit "Hochleistungsreaktor mit Kanälen" übersetzt werden kann. Der Reaktor ist mit Graphit moderiert und mit Leichtwasser gekühlt. Es handelt sich um einen Siedewasser-Druckröhren-Reaktor. Als Brennstoff kann Natururan verwendet werden. Der Reaktortyp wurde in der Sowjetunion entwickelt, um schnell grosse Mengen waffenfähiges Plutonium erbrüten und viel Leistung zur Verfügung stellen zu können. Die Brennelemente können während der Volllast ausgewechselt werden, was für die Produktion von Waffenplutonium unverzichtbar ist. Weil Graphit als Moderator eingesetzt wird und nicht das Kühlmittel Leichtwasser, kann ein Verlust der Kühlfähigkeit die Leistung des Reaktors nicht verringern. Leichtes Wasser wirkt bei diesem Reaktor eher als Neutronenabsorber, denn als Moderator. Der Dampfblasenkoeffizient ist daher bei diesem Reaktortyp besonders stark positiv, was zur Katastrophe von Tschernobyl mit beigetragen hat.

### Schneller Brüter

Es ist nichts Schnelles am Brüter. Die Neutronen sind bei diesem Reaktortyp nicht moderiert, also schnell. Ein Brutreaktor verwendet seine Neutronen zu einem wesentlichen Teil, um  $^{238}\text{U}$  oder  $^{232}\text{Th}$  in spaltbares Material umzuwandeln.



Er kann auch langlebige Aktiniden in kürzerlebige Produkte umwandeln. Man bezeichnet einen Reaktor als Brüter, wenn er mehr spaltbares Material erzeugt, als er zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion verbraucht. Als Kühlmittel wird meist flüssiges Natrium verwendet, das sehr geringe moderierende, aber gute thermische Eigenschaften aufweist. Durch die hohe Temperatur des Kühlmittels kann im Vergleich zu wassergekühlten Reaktoren ein erheblich höherer thermischer Wirkungsgrad erreicht werden. Natrium erstarrt allerdings wenig unterhalb von  $100^{\circ}\text{C}$ , was ein Problem darstellen kann. Legierungen von Na und K bleiben auch bei Raumtemperatur flüssig. Alkalimetalle reagieren sehr heftig mit Sauerstoff und Wasser, was ein Sicherheitsproblem darstellt. Da Brutreaktoren unmoderiert sind, ist die Spaltung des eigentlichen Brennstoffs nicht effizient. Es ist also eine vergleichsweise grosse Konzentration an spaltbaren Kernen nötig. Bei Verwendung von Uran sind Anreicherungsgrade für  $^{235}\text{U}$  von mindestens 15%, bis zu 30%, nötig. Das erbrütete  $^{239}\text{Pu}$  oder  $^{233}\text{U}$  kann nach chemischer Aufarbeitung direkt in Brennelementen verwendet werden. Um den Brennstoff für einen gleich grossen Reaktor wie den Brüter zu erzeugen, vergehen 15 bis 20 Jahre. Problematisch ist, dass das erbrütete Material, besonders  $^{233}\text{U}$ , das nur chemisch abgetrennt werden muss, kernwaffentauglich sein kann. Eigentlich bestehen gegenwärtig Bestrebungen, das nicht mehr gebrauchte, waffenfähige Spaltmaterial zum Verschwinden zu bringen. Schnelle Brüter sind gegenwärtig nicht kommerziell konkurrenzfähig.

### **Hochtemperaturreaktor**

Das Konzept eines graphitmoderierten, gasgekühlten Reaktors ist vielversprechend. Durch die hohe Betriebstemperatur kann der thermische Wirkungsgrad 50% erreichen, was in wassergekühlten Reaktoren unmöglich ist. Das zur Kühlung verwendete Helium wird nicht radioaktiv und kann auch Prozesswärme bis  $1000^{\circ}\text{C}$  liefern. Der Brennstoff ist in keramischer Form in Graphit eingebettet. Es wurden Brennelemente mit prismatischer Form oder tennisball-grosse Kugeln verwendet, letztere im Kugelhafenreaktor THTR-300 in Hamm-Uentrop, Deutschland, der von 1985 bis 1988 am Netz war.



Die Elemente können während des Vollbetriebs ausgetauscht werden. Hochtemperaturreaktoren sind voluminös. Ihre Leistungsdichte ist mehr als eine Größenordnung geringer als jene von wassergekühlten Reaktoren. Sie sind zudem inhärent sicher. Fällt die Kühlung aus, nimmt die Temperatur des Reaktorkerns zu. Dadurch erhöht sich die Fähigkeit von  $^{238}\text{U}$ , Neutronen zu absorbieren. Die Leistung des Reaktors nimmt ab. Bei einer bestimmten maximalen Temperatur,  $1750^\circ\text{C}$  im Fall des THTR-300, wird die erzeugte Wärme durch passiven Verlust abgeführt. Liegt die Maximaltemperatur unterhalb des Brennstoff-Schmelzpunktes,  $2800^\circ\text{C}$  im Fall von  $\text{UO}_2$ , kann weder eine Kernschmelze eintreten, noch der Reaktor beschädigt werden. Die Leistung des Reaktors lässt sich über die Temperatur steuern. Wird eine hohe Leistung gewünscht, wird viel Wärme abgeführt. Durch die niedrigere Temperatur erhöht sich die Leistung. Um den Reaktor ganz abzustellen, sind allerdings Kontrollstäbe einzufahren, die die Kettenreaktion unterbrechen. Die hohe Temperatur verhindert den Aufbau von Wigner-

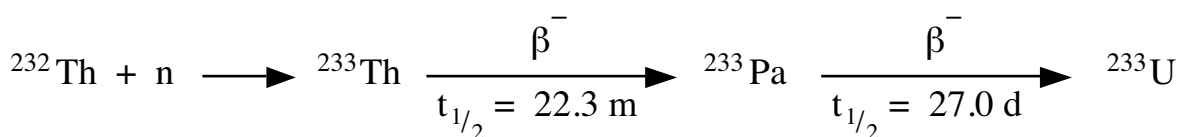
Energie im Graphit. Der Hochtemperaturreaktor erlaubt einige Flexibilität, da die kleinen Brennelemente während des Betriebs ausgetauscht werden können. So können Elemente eingesetzt werden, die Uran oder Plutonium verbrennen. Es können aber auch Elemente zugemischt werden, die neues Spaltmaterial erbrüten. Der Grad des Abbrandes ist bei Hochtemperaturreaktoren besonders gross. Gegenwärtig sind nur wenige Reaktoren in Betrieb. Die Entwicklung geht in Richtung kleinerer dezentraler Einheiten. Auch transportable Reaktoren, etwa zum Betrieb von Schiffen, sind in der Entwicklung. In China sollen bis im Jahr 2020 dreissig Hochtemperaturreaktoren gebaut werden.

### Thorium-Brennstoffzyklus

Der Krieg ist der Vater aller Dinge. Die Forschung auf dem Gebiet der nuklearen Energiegewinnung konzentrierte sich von Anfang an auf die Konstruktion einer Waffe. Dies blieb noch Jahre nach dem Zweiten Weltkrieg unverändert. Nur was dem Bau einer Atombombe förderlich war, wurde weiterverfolgt. Die zivile Nutzung der Nuklearenergie wurde anschliessend durch entsprechende Anpassungen des Bombenkonzepts verwirklicht.

Heute ist die Situation umgekehrt. Die grösste Gefahr besteht in der Proliferation. Hochangereichertes  $^{235}\text{U}$  und waffenfähiges Plutonium dürfen nicht in falsche Hände geraten. Könnte man Forschung und Entwicklung unter den veränderten Voraussetzungen nochmals von vorn beginnen, würde man einen fundamental anderen Weg beschreiten. Insbesondere würde man nicht Natururan als Basis spaltbaren Materials verwenden, sondern Thorium.

Das einzige, in der Natur vorkommende Isotop des Thoriums ist  $^{232}\text{Th}$ . Es ist ein  $\alpha$ -Strahler mit einer Halbwertszeit von 14 Mia Jahren.  $^{232}\text{Th}$  ist selbst nicht spaltbar, sondern muss zuerst durch Neutronenbeschuss in spaltbares  $^{233}\text{U}$  umgewandelt werden:



$^{233}\text{U}$  ist ein  $\alpha$ -Strahler mit einer Halbwertszeit von 160'000 Jahren. Es zerfällt in einer Reihe, in der nur das Nuklid  $^{209}\text{Bi}$  in der Natur vorkommt. Die Zerfallsreihe endet beim  $^{205}\text{Tl}$ .  $^{233}\text{U}$  ist spaltbar durch thermische Neutronen wie  $^{235}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$ .

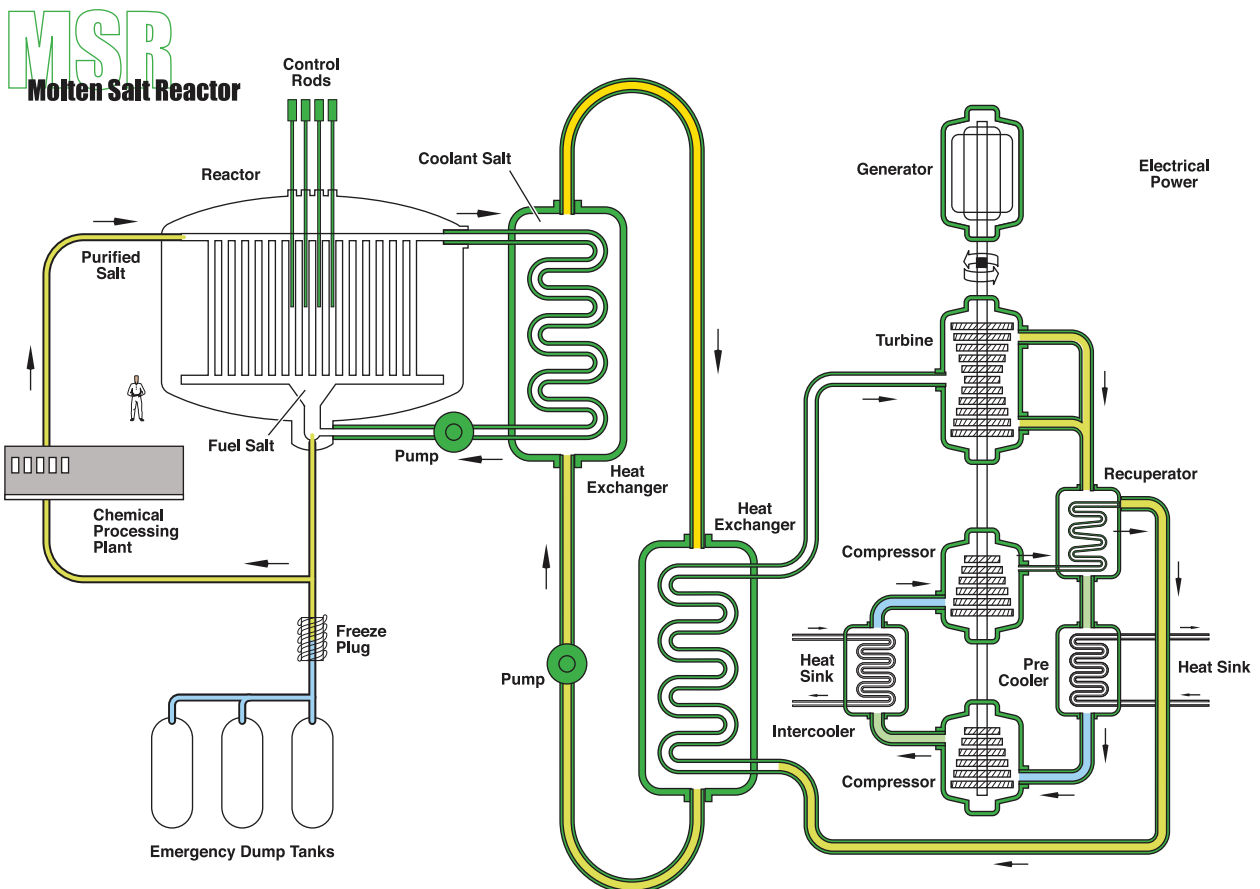
Die wesentlichen Vorteile von Thorium als Brennstoff sind folgende:

- Thorium ist in der Natur mehr als dreimal so häufig wie Uran.
- Der Thorium-Brennstoffzyklus produziert wesentlich weniger und unproblematischeren radioaktiven Abfall, insbesondere kaum langlebige höhere Aktiniden.

- Ein Thorium-Reaktor kann alle Arten von Plutonium und höhere Aktiniden verbrennen und so zum Verschwinden bringen.
- Die Anzahl Neutronen, die für ein absorbiertes Neutron erzeugt werden, ist bei  $^{233}\text{U}$  über weite Bereiche der Neutronenenergie grösser als 2, im Gegensatz zu  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$ . Unter diesen Bedingungen kann ein Brutreaktor mehr Brennstoff erzeugen, als er verbraucht.
- Th-basierter Brennstoff ist proliferations-resistent, da beim Beschuss von  $^{233}\text{U}$  mit Neutronen durch Aussenden von zwei Neutronen das Nuklid  $^{232}\text{U}$  entstehen kann. Dieses hat eine Halbwertszeit von 73.6 Jahre, klingt also nicht innert nützlicher Frist ab. Die Zerfallsprodukte  $^{212}\text{Bi}$  und insbesondere  $^{208}\text{Tl}$  emittieren sehr harte  $\gamma$ -Strahlung, die umfangreiche Massnahmen im Strahlenschutz erfordern und den Standort einer Bombe verraten.

### Flüssigsalz-Reaktor (Molten Salt Reactor)

Von den vielen vorgeschlagenen Reaktortypen sei hier der Flüssigsalz-Reaktor als einziger vorgestellt. Der Reaktortyp ist nicht auf den Thorium-Kreislauf beschränkt, eignet sich aber besonders gut dafür.





Das Kühlmedium des Reaktors ist ein Gemisch von Salzen, meist Fluoriden, das im geschmolzenen Zustand gehalten wird. Das Gemisch kann Thorium oder andere Brutstoffe enthalten. Es gibt auch die Möglichkeit, das Brutmaterial getrennt von der Salzschnmelze zu halten. Als Moderator dient meist Graphit, es gibt aber auch die Möglichkeit, einen unmoderierten Schnellen Brüter zu realisieren. Die Schmelze wird ausserhalb des Reaktorkerns einer chemischen Aufarbeitung unterzogen. Dabei werden typischerweise Spaltprodukte entfernt. Es kann aber auch erbrütetes Material wie  $^{233}\text{Pa}$  oder  $^{233}\text{U}$  entfernt werden.

Die Temperatur im Reaktorkern ist gegenüber wassergekühlten Reaktoren wesentlich höher. Das führt zu einem verbesserten thermodynamischen Wirkungsgrad. Gegenüber etwa 30% bei wassergekühlten Reaktoren können 50 % erreicht werden. Der Reaktor kann auch Prozesswärme auf einem hohen Temperaturniveau liefern, mit dem z.B. Wasserstoff hergestellt oder Kohle zu Synthesegas umgesetzt werden kann.

Das Material im Reaktorkern hat einen grossen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Beim Erwärmen dehnt sich die Schmelze aus, wodurch die Kritikalität vermindert wird. Dies entspricht einem negativen Dampfblasenkoeffizienten. Beim Überhitzen des Reaktorkerns nimmt also die Leistung ab. Der Reaktor kann inhärent sicher gebaut werden, wenn das Prinzip der Schmelzsicherung angewendet wird. Ein Pfropfen erstarrtes Salz wird beim Überhitzen aufgeschmolzen, wodurch das Material im Reaktorkern in Auffangbecken ausfliesst und seine Kritikalität verliert und auskühlen kann. Es braucht also kein Kühlmittel in den Reaktorkern eingeleitet zu werden.

Flüssigsalz-Reaktoren können in einem weiten Bereich von thermischen Leistungen gebaut werden. Die Anwendung reicht von kleinen Einheiten zum Betrieb von Fahrzeugen im MW-Bereich bis zu Grossanlagen mit mehreren GW.

In den Jahren 1965 bis 1969 wurde im Oak Ridge National Laboratory ein Prototyp betrieben, mit dem die prinzipielle Funktionstüchtigkeit nachgewiesen wurde. Anfänglich wurde er mit  $^{235}\text{U}$  betrieben, später mit  $^{233}\text{U}$ . Der Brennstoff enthielt kein Thorium; der Reaktor war also kein Brüter. Er war eher gestaltet wie der Kern eines zukünftigen Brutreaktors, der aber nicht gebaut wurde.

Gegenwärtig setzen vor allem Schwellenländer wie Indien und China auf den Flüssigsalzreaktor. Um einen Reaktor im Thorium-Kreislauf betreiben zu können, muss der Reaktor zuerst mit einer Ladung aus  $^{235}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$  beschickt werden. Vorräte an  $^{233}\text{U}$  gibt es praktisch nirgends. Dies stellt ein erhebliches Proliferationsproblem dar, da der Brennstoff im Fall eines Brüters waffentauglich ist. Die Nutzung des Thorium-Brennstoffkreislaufs bedingt eine lange Anlaufzeit von vielen Jahrzehnten. Dieser Anfang wurde verschlafen, weil die Prioritäten für die Entwicklung immer beim Bau einer Waffe lagen.

## **Kernreaktoren in der Schweiz**

Der erste kommerzielle Kernreaktor in der Schweiz ging 1969 in Beznau ans Netz. Es handelt sich um einen Druckwasserreaktor der Firma Westinghouse mit einer elektrischen Leistung von gegenwärtig 365 MW. Im Jahr 1971 wurde am gleichen Standort ein zweiter, gleicher Reaktor errichtet. Sämtliche Reaktoren in der Schweiz wurden im Lauf der Zeit auf eine höhere Leistung aufgerüstet. Ebenfalls im Jahr 1971 folgte ein Siedewasserreaktor der Firma General Electric in Mühleberg mit einer Leistung von jetzt 355 MW. Diese Reaktoren werden mit Wasser des Flusses Aare gekühlt. Im gleichen Jahr wurde diese Kühlungsart verboten. Der nächste Reaktor folgte im Jahr 1979. Der Druckwasserreaktor des Kraftwerks Gösgen mit einer Leistung von 970 MW wurde von Siemens geliefert. Die Kraftwerke Beznau und Gösgen produzieren nebst Elektrizität auch Fernwärme. Das letzte Kernkraftwerk der Schweiz wurde 1984 in Leibstadt in Betrieb genommen. Es handelt sich um einen Siedewasserreaktor von General Electric mit einer jetzigen Leistung von 1165 MW. Ein weiterer Reaktor mit einer ursprünglichen Leistung von 950 MW wurde am Standort Kaiseraugst geplant, aber aus politischen Gründen nie verwirklicht. Weitere Pläne von Kernkraftwerken in Graben und Verbois wurden ebenfalls nicht verwirklicht. Die gesamte installierte Leistung von 3220 MW entspricht einem Anteil von 40 % an der gesamten Produktion an elektrischer Energie in der Schweiz.