Nukleare Wärmequelle

Autor(en): **Brogli, Rudolf / Burgsmüller, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 27-28

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-77139

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Fortschrittliche Kernreaktoren

Nukleare Wärmequelle

Der Einsatz von Kernenergie zur Wärmeerzeugung bringt wesentliche Vorteile, vor allem bezüglich Versorgungssicherheit und Umweltschutz, mit sich. Es bieten sich drei Einsatzmöglichkeiten an: Wärmeauskopplung aus grossen Kernkraftwerken, Wärmekraftkopplung in eigentlichen Heizkraftwerken und ausschliessliche Heizreaktoren. Heizreaktorkonzepte bestehen für Leistungsgrössen zwischen 2 und 500 MW und beruhen sowohl auf wasser- wie auch gasgekühlten Baulinien. Die schweizerischen Heizreaktorkonzepte befinden sich noch im Beurteilungsstadium. Die Konkurrenzfähigkeit der nuklearen Wärmequelle ist mit derjenigen der Fernwärme gekoppelt und scheitert heutzutage an den niedrigen Preisen der fossilen Brennstoffe, für welche allerdings die Entsorgungskosten nicht im Preis inbegriffen sind.

Einleitende Gedanken

Eines der ersten Nuklearprojekte in der Schweiz war in den 50er Jahren ein Reaktor für die Wärmeversorgung der

VON RUDOLF BROGLI, WÜRENLINGEN, UND PETER BURGSMÜLLER, WINTERTHUR

ETH Zürich. Was sind aber heute die Beweggründe, die die nukleare Wärme wieder zu einem Thema machen? Es sind vor allem die Sorgen um die Versorgungssicherheit und die Umwelt.

Der Versorgungssicherheit wird energiepolitisch eine grosse Bedeutung beigemessen. Die Schweiz importiert rund 80% der benötigten Primärenergieträger. Davon entfallen 57% auf Erdöl und seine Derivate, 8% auf Naturgas und 28% auf Uran. Aufgrund der gültigen Gesetze muss im Bereich der flüssigen Treibstoffe ein Pflichtlager gehalten werden, welches unsere Landesversorgung während 6 Monaten sicherstellt. Dies entspricht dem Fassungsvermögen von etwa 27 Supertankern. Die im schweizerischen Gasnetz gespeicherte Gasmenge genügt je nach Jahreszeit und Verbrauch für 1 bis 14 Tage. Die in den bestehenden Kernkraftwerken eingesetzte und gelagerte Brennstoffmenge genügt für die Fortsetzung der Stromproduktion für 3 bis 4 Jahre. Daneben bestehen Uranlieferverträge für eine Zeitspanne von 10 bis 20 Jahren.

In der letzten Zeit verdichten sich die Alarmzeichen in unserer Umwelt. Sie wecken im Bewusstsein der Öffentlichkeit die Einsicht, dass eine Energieverwendung ohne Rücksicht auf die Folgen nicht mehr tragbar ist. Dabei wird vielen auch bewusst, dass Kernenergie nicht nur ein ideales Mittel zur Stromerzeugung darstellt, sondern auch für die Wärmeversorgung sehr geeignet ist und zudem den Postulaten des Umweltschutzes entgegenkommt.

Es ist wichtig zu beachten, dass zur Entsorgung der Abfälle aus nuklearen Anlagen technische Lösungen bereitstehen, für die Abgase aus Feuerungsanlagen hingegen nur sehr begrenzt. Eine Gemeinde mit 5000 Einwohnern, die sich während 20 Jahren mit einem Heizreaktor vesorgt, erzeugt etwa 8 m^3 zur Endlagerung verpackter Abfälle, was einem Würfel von 2 m Kantenlänge entspricht. Würde in der gleichen Zeit die gleiche Wärmemenge aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern gewonnen, so würden neben Asche, Stick- und Schwefeloxyden auch 100 Mio m^3 CO_2 entstehen.

Die Kilowattstunde Heizenergie aus einem Reaktor ist eine saubere Kilowattstunde, mit welcher alle Umweltkosten, einschliesslich der Endlagerung der radioaktiven Abfälle, abgedeckt sind. Würde man beim Preis der fossilen Brennstoffe auch die Umweltbelastung mitberücksichtigen, so schätzen Fachleute, dass diese Preise um einen Faktor 2 erhöht würden.

Die Wärme aus Kernreaktoren bietet sich hier als umweltfreundliche und sichere Versorgungsquelle an. Es gibt drei Möglichkeiten, die Wärmeversorgung mit Kernreaktoren sicherzustellen: durch Wärmeauskopplung aus Kernkraftwerken, die primär der Elektrizitätserzeugung dienen, durch Erstellen besonderer Heizreaktoren sowie durch den Bau von Anlagen, die von Anfang an konzipiert sind, sowohl Prozess- und Raum-Wärme als auch Elektrizität zu produzieren.

Wärmeauskopplung aus den bestehenden Kernkraftwerken

Bei der Wärmekraftkopplung (WKK) wird ein Teil des Dampfes entnommen nachdem dieser bereits einen Teil seines Arbeitsvermögens an die Dampfturbine abgegeben hat und zu einem Wärmetauscher geleitet, wo der restliche Energieinhalt dieser Dampfmenge an das Wärmenetz übertragen wird. Somit wird die Abwärmemenge, die bei thermischen Kraftwerken 60 bis 70% der gesamten thermischen Leistung beträgt, entsprechend verringert, und der Primärenergieträger kann besser genutzt werden.

Wärmeauskopplung aus Kraftwerken, die ursprünglich ausschliesslich zur Stromerzeugung konzipiert waren, ist eine interessante Variante der Wärmekraftkopplung: Eine geringe Einbusse in Elektrizität bringt gesamthaft eine erhebliche Verbesserung der Brennstoffnutzung, dazu Erdölsubstitution und Umweltentlastung. Die Verminderung der produzierten Elektrizität durch die Wärmeerzeugung ist gering, beträgt sie doch nur ⅙ bis ⅛ der abgegebenen Wärme. Bild 1 veranschaulicht dies am Beispiel der Fernwärmeversorugung für Refuna und Transwaal aus dem KKW Beznau.

Die Wärmeauskopplung ist nicht nur energietechnisch günstig, sondern auch wirtschaftlich, da die Wärmekosten an der Quelle auch nur etwa ⅙ bis ⅛ der Elektrizitätsgestehungskosten betragen. Der eigentliche Nachteil der Wärmeauskopplung besteht darin, dass die Bedarfsspitzen für Strom und Wärme zusammenfallen.

Wie für alle Fernwärmenetze gültig, kommen aus wirtschaftlichen Gründen nur grosse, zusammenhängende Bevölkerungs-Agglomerationen als potentielle Abnehmer in Frage. Die wirtschaftlichen Grenzen eines vertretbaren Heiznetzes liegen bei einer Erschliessungstiefe von 20 bis 30 km. Aus den wenigen bestehenden Kernkraftwerken, die zudem noch ziemlich nahe zueinander gebaut sind, ist deshalb das Wärmeversorgungspotential beschränkt.

Eigentliches nukleares Heizkraftwerk

Am besten kann die WKK in einem dazu konstruierten Heizkraftwerk verwirklicht werden. Wie bei der oben erwähnten Wärmeauskopplung aus gros-

sen stromerzeugenden Anlagen benötigt die gemeinsame Strom- und Wärmeerzeugung in einem Heizkraftwerk einen geringeren Brennstoffeinsatz als eine getrennte.

Denkt man an nukleare Heizkraftwerke, so sind vor allem kleine bis mittelgrosse Reaktoren angesprochen, die aufgrund der geringeren Leistung und besonderer Charakteristika als inhärent sicher gelten und damit weniger beschränkt in der Standortwahl sind. Dazu benötigen sie auch keine langen Transportleitungen. Typische Beispiele sind der HTR-100 und der HTR-Modul. Je nach Typ beträgt die thermische Leistung 200 bis 250 MW und die elektrische 80 bis 100 MW. Wie alle Reaktoren der HTR-Linie haben auch sie eine grosse Wärmekapazität, eine geringe Leistungsdichte, einen keramischen Kern und Nachwärmeabfuhrsysteme, die schlimmstenfalls Wärme durch Dissipation in die Umgebung abführen. Dies alles führt dazu, dass eine Aktivitätsfreisetzung ausgeschlossen werden kann.

Die spezifischen Energieerzeugungskosten dieser Anlagen sind aber hoch, einerseits wegen der niedrigen Leistungsgrösse und anderseits wegen der teuren Kraftanlagen. Die Produktion wird dann besonders teuer, wenn nicht im Grundlastbetrieb gefahren werden kann. Die Stromerzeugung aus solchen Anlagen wird mit derjenigen von grossen Leichtwasserreaktoren nicht konkurrenzfähig sein. Aber auch die Wärmeabgabe wird durch die kostenintensive Kraftanlage verteuert. Da die nuklearen Brennstoffkosten gering sind, wirkt die bessere Brennstoffnutzung nur schwach verbessernd. Solche Anlagen wären eigentlich dann geeignet, wenn die Wärme auch als Prozesswärme genutzt werden könnte. Die dazu benötigten höheren Temperaturen bedingen die Verwendung von Hochtemperaturreaktoren (HTR).

Heizreaktoren

Reine *Heizreaktoren* können bei niedrigen Temperaturen und Drücken betrieben werden. Die angestrebte inhärente Nachwärmeabfuhr lässt Wirtschaftlichkeit durch Einfachheit erwarten. Der vereinfachte und oft im Reaktordruckgefäss integrierte Primärkreislauf erlaubt es, dass kleine Einheiten von 20 bis 100 MW in der Zukunft wirtschaftlich sein könnten. Dies würde ermöglichen, auch ausserhalb des Einzugsbereiches grosser Kernkraftwerke eine saubere Wärmeversorgung zu bewerkstelligen.

Weltweit sind fast ein Dutzend Heizreaktorkonzepte bekannt. In der Folge werden sie gegliedert aufgrund der technischen Verwandtschaft, (Schwimmbadreaktoren, Siedewasserreaktoren, Druckwasserreaktoren, Reaktoren mit automatischer Borregelung und Hochtemperaturreaktoren).

Slowpoke: Safe Low Critical Experiment (Kanada)

Ausgehend von den Erfahrungen mit ihren bewährten, kleinen 20 kW_{th}-Slowpoke-Schwimmbadreaktoren, die in einem halben Dutzend kanadischer Forschungsstätten in Betrieb stehen, entwickelt die Atomic Energy of Canada, Ltd. einen kleinen *Schwimmbadreaktor* für Heizzwecke (Bild 2). Der SES-10 ist für eine thermische Leistung von 10 MW_{th} ausgelegt. Sein Kern befindet sich in einem Metallrohr in Bodennähe eines Wasserbeckens und enthält Brennelemente mit einer Urananreicherung von 5% und einer Zircaloy-Umhüllung. Als Kühlmittel und Moderator dient leichtes Wasser, das im Naturumlauf zirkuliert, und die Wärme vom Reaktorkern zu den obenliegenden Plattenwärmetauschern transportiert. An der Wasseroberfläche herrscht Atmosphärendruck. Bei einer Auslastung von 50% reicht eine Brennstoffladung für zwei Jahre. Die Reaktorleistung wird durch einen einzigen zentralen Absorberstab geregelt. Die Langzeit-Reaktivitätsregelung erfolgt durch einen beweglichen Beryllium-Reflektor. Der Reaktor soll unbemannt betrieben werden. Als besonderes Sicherheitsmerkmal gilt der Verzicht auf eine druckführende Umschliessung, was aber den Nachteil hat, dass die Vorlauftemperatur im Netz auf 70 °C beschränkt ist.

Eine 2-MW_{th}-Demonstrationsanlage dieses Typs (SDR) ist seit Juli 1987 bei der AECL in Whiteshell/Manitoba in störungsfreiem Heizbetrieb. Über die Lieferung von SES-10 Anlagen verhandelt die AECL mit Ungarn.

KWU Naturumlauf-Siedewasserreaktor (BRD)

Das KWU-Heizreaktor-Konzept baut auf der langjährigen Erfahrung dieser Firma im Bau von Druck- und Siedewasserreaktoren für Kernkraftwerke auf. Die Leistungsgrösse liegt bei 200 MW. Bei einem primären Systemdruck von 15 bar tritt das Wasser in den Reaktorkern mit einer Temperatur von 160 °C ein. Der Kern weist eine ähnliche Konfiguration auf wie ein *Siedewasserrektaor* (Bild 3). Am Kernaustritt beträgt die Temperatur des Wasser--Dampfgemisches 200 °C. Der eher niedrige Kühlmitteldruck legt es nahe, die Primärwärmetauscher, die hydraulischen Steuerstabantriebe und das Lager für abgebrannte Elemente innerhalb des Druckgefässes unterzubringen. Die Wärme wird im Naturumlauf auf zwölf Wärmetauscher übertragen. Der Reaktordruckbehälter ist von einer Sicherheitshülle umgeben, die ihrerseits an eine äussere Betonabschirmung angelehnt ist. Als besonderes Sicherheitsmerkmal gilt, dass bei einem Leck in der primären Druckbarriere der Reaktorkern wegen der eng anliegenden Sicherheitshülle nicht trockengelegt werden kann. Die Reaktorabschaltung erfolgt durch Abstellen der Antriebspumpen der hydraulischen Absorberstäbe. Die Nachwärmeabfuhr erfolgt durch Ventilumschaltung auf Kreisläufe mit Naturzugkühltürmen. KWU beabsichtigt, die Ergebnisse der abgeschlossenen F+E-Arbeiten für die vorgesehene 400-MW-Fernheizung der Stadt Harbin im Norden Chinas zu nutzen.

AST: Atomic Station Thermal (UdSSR)

(auch bekannt als DHAPP: District Heating Atomic Power Plant)

Die UdSSR hat offenbar eines der grössten Heizreaktorprogramme. Zwei Prototypanlagen (AST 500) stehen bei Gorki und bei Woronesch vor der Inbetriebnahe. Es handelt sich um *Siedewasserreaktoren* der Leistungsgrösse 500 MW_{th}, die auf der langjährigen Erfahrung mit einem 50-MW-Reaktor beruhen. Der Reaktorkern besteht aus hexagonalen Brennelementen. Die stabförmigen Brennstabbündel sind die gleichen wie in den sowjetischen Leistungsreaktoren der WWER-Linie. Als Kühlmittel und Moderator dient Leichtwasser, das unter partieller Verdampfung die Wärme im Naturumlauf transportiert. Der Primärkreislauf ist von zwei unabhängigen Druckgefässen (Stahl und vorgespannter Beton) eingeschlossen. Es wird vermutet, dass die Betriebsverzögerung eine Vorsichtsmassnahme nach Tschernobyl darstellt.

SHR: Schweizerischer Heizreaktor (Schweiz)

Das Grundprinzip des Schweizerischen Heizreaktors entstand Anfang der 80er Jahre am ehemaligen EIR und wurde seit Mitte 1984 unter Mitwirkung der interessierten Industrie entwickelt. Der Wärmetransport erfolgt durch Naturzirkulation bei partiellem Sieden. Das Druckgefäss steht in einem grossen Wasserbecken, das einerseits zur Strahlenabschirmung und anderseits als potentielle Notwärmesenke dient. Das Druckgefäss ist gegen das Beckenwasser durch einen Luftspalt isoliert. Bei Unterbrechung des normalen Wärmeflusses im Heiznetz werden die Antriebspumpen der Steuerstabhydraulik

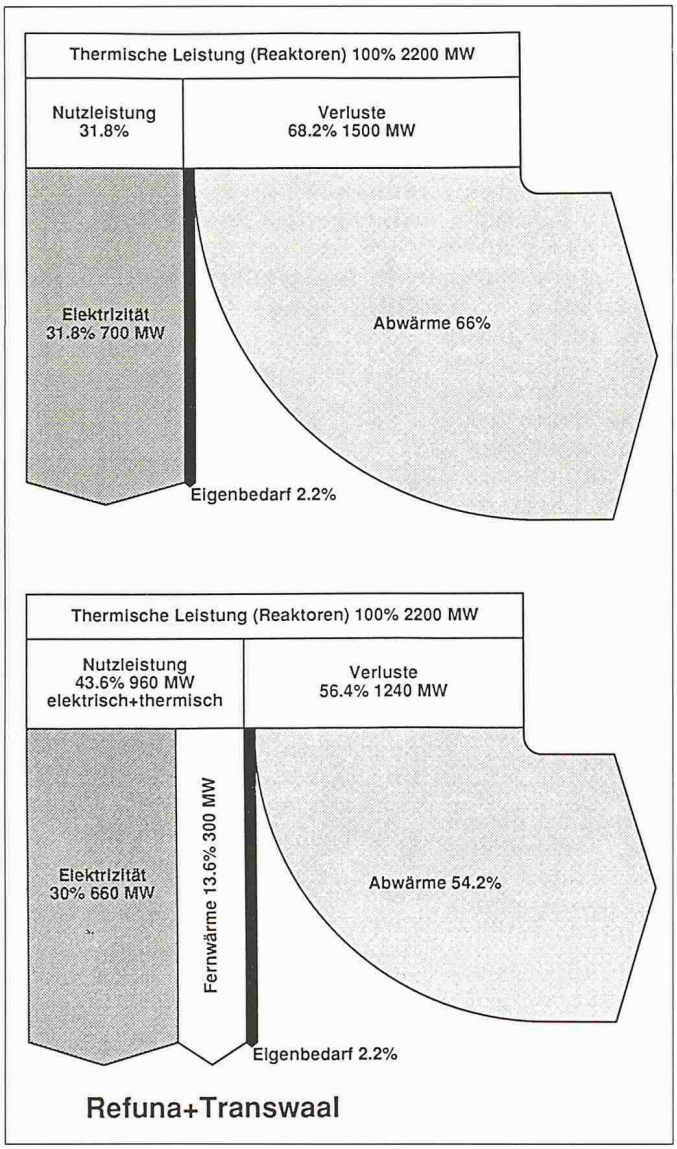


Bild 1. *Leistungsfluss im KKW Beznau*

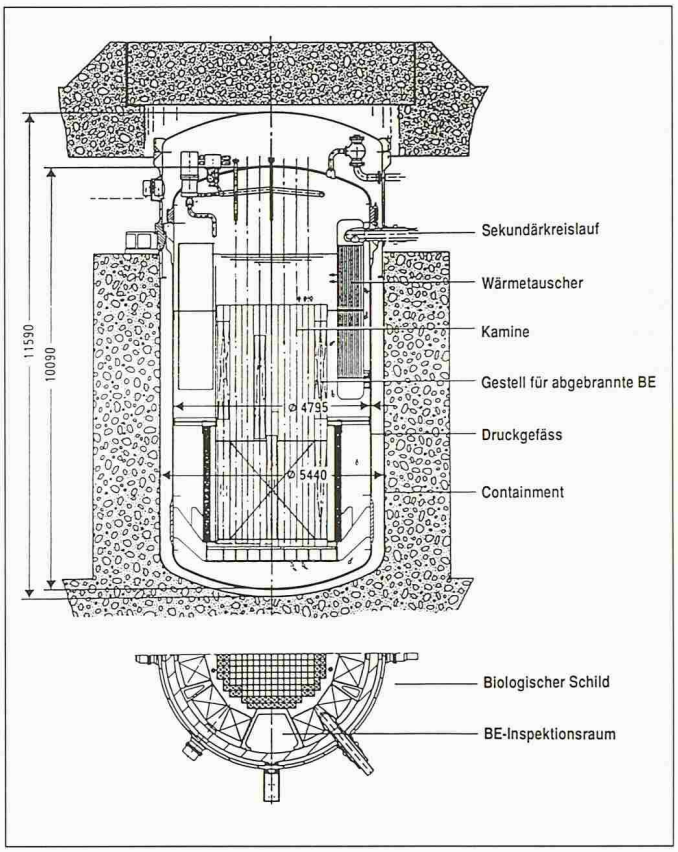


Bild 3. *Anordnung des Primärkreislaufes des KWU-Naturumlauf-Heizreaktors*

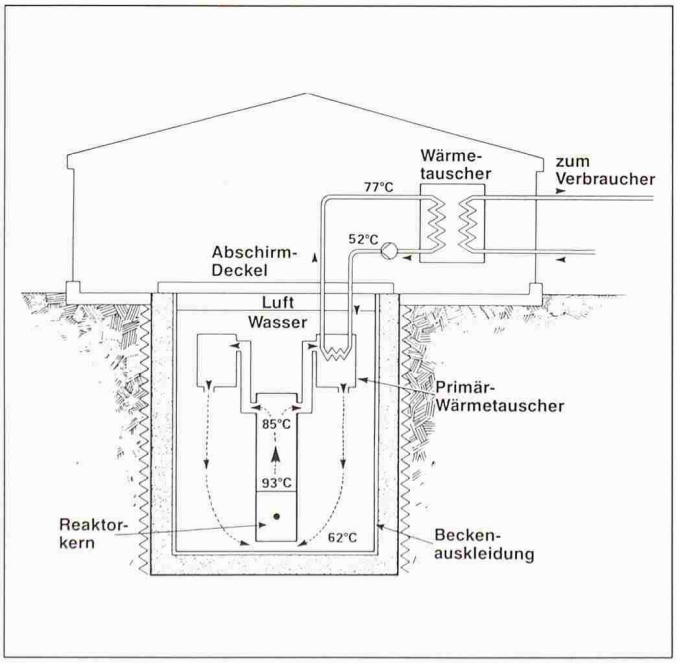


Bild 2. *Prinzipschaltbild des Slowpoke-Heizreaktors (Can)*

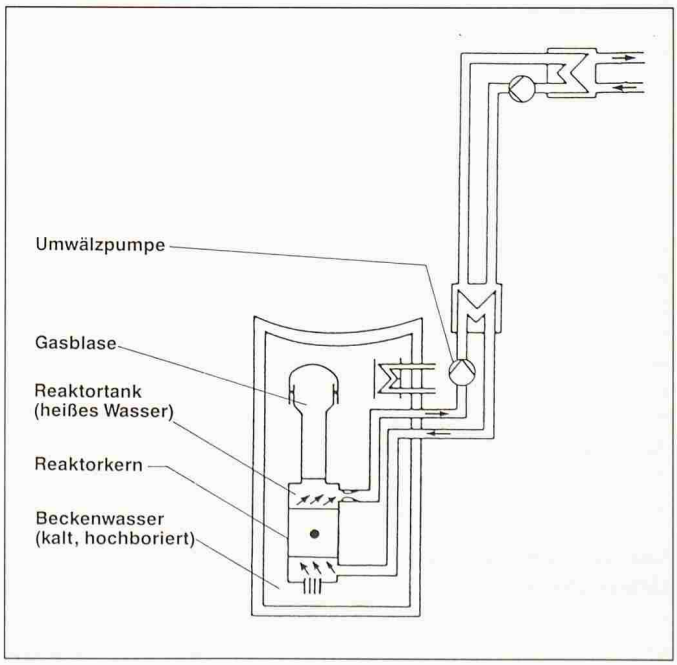


Bild 4. *Prinzipschaltbild des Secure-Heizreaktors (S)*

abgestellt, und der Reaktor wird durch die einfallenden Absorberstäbe abgeschaltet. Die Restwärmeabfuhr erfolgt über Kühler und/oder die Flutung des isolierenden Luftspaltes direkt in das grosse Wasserbecken. Auch bei Ausfall des Beckenluftkühlers wird die Wärme durch die Beckenwand ins Erdreich abgeführt.

LTR: Low Temperature Reactor (China)

Als ein Prototyp zu der erwähnten 2×200-MW-Anlage in Harbin wird zurzeit im Institut für Nuklear-Energie-Technologie (INET, Beijing, China) eine 5-MW-Anlage gebaut. Komponenten und Brennstoff sind in China hergestellt. Dieser Prototyp ist dem KWU-Konzept ähnlich. Der Kern besteht aus PWR-ähnlichen, Zircaloy- umhüllten Brennstabbündeln. Die Steuerstäbe werden hydraulisch angetrieben. Wegen befürchteten Instabilitäten ist es vorgesehen, den Reaktor sowohl als Siede- wie auch Druckwasserreaktor betreiben zu können. Die maximale Anreicherung ist beschränkt auf 3%, was zusammen mit der aus den kleinen Kernabmessungen herrührenden schlechten Neutronenökonomie zu kurzen Standzeiten (weniger als 1 Volllastjahr) führt. Die Inbetriebnahme ist für 1989 vorgesehen. Bei erfolgreichem Betrieb des Prototyps sollen die zwei 200-MW_{th}-Heizreaktoren bei Harbin gebaut und 1995 in Betrieb genommen werden.

Thermos (Frankreich)

Das französische Commisariat à l'Energie Atomique (CEA) hat den Thermos-Reaktor seit etwa Anfang der 70er Jahre entwickelt. Er ist ein Druckwasserreaktor und ist für eine Wärmeleistung von 100 MW_{th} ausgelegt. Der Reaktorkern befindet sich in einem Behälter aus nichtrostendem Stahl, der mit Wasser gefüllt ist. Der Reaktorbehälter ist in einem Stahlbetongefäss in boriertem Wasser aufgestellt. Im Reaktorbehälter sind drei Kühlmittelpumpen untergebracht. Die Brennelemente sind plattenförmig und in Zircaloy-Hüllen eingeschlossen. Diese Kombination wurde für Leistungsreaktoren in U-Booten entwickelt. In den früheren 80er Jahren war der Einsatz von Thermos im Rahmen eines Fernheiz-Projektes für die Stadt Grenoble geplant. Seit dessen Aufgabe etwa 1984 sind keine weiteren Aktivitäten in Frankreich bekannt geworden.

Secure: Safe Environment Clean Urban Reactor (Schweden)

In Schweden haben Projektstudien Mitte der 50er Jahre dazu geführt, dass 1958 der Bau einer 70-MW_{th}-Zweizweck-Anlage für die Stadt Agesta geplant wurde. Diese Anlage ging 1963 in Betrieb, wurde 1974 stillgelegt und wird heute abgebaut. Secure-Anlagen dagegen sind reine Heizwerke mit einer Leistung von 200 bis 400 MW_{th}. Der Reaktorkern befindet sich am Boden eines Spannbetonbehälters, der ungefähr 1500 m^3 kaltes Wasser von hohem Borgehalt enthält (Bild 4). Im Behälter herrscht ein Überdruck von 20 bar. Der eigentliche Reaktortank trennt das stark borierte Beckenwasser vom schwach borierten Primärkühlmittel. Die Primärkühlkreise mit Pumpen und Wärmetauschern liegen ausserhalb des Spannbetonbehälters. Das Kühlwasser wird beim Durchströmen des Reaktorkerns von 150 °C auf 190 °C aufgewärmt. Die Reaktivitätsregelung geschieht durch Justierung des Borsäuregehaltes im Primärkühlmittel. Das besondere Sicherheitsmerkmal des Secure-Reaktors ist der gegen das borierte Beckenwasser hin offene Primärkreis; im Normalbetrieb wird zwischen Primärkreis und Beckenwasser ein Druckausgleich hergesellt. Wird das Gleichgewicht durch Ausfall der Primärpumpen oder durch überhöhte Temperatur des Primärkühlmittels gestört, so strömt das borierte Beckenwasser in den Reaktokern und schaltet diesen ab.

In Schweden können kraft Parlamentsbeschluss keine neuen Nuklearanlagen gebaut werden. Nach Verzicht von Finnland auf einen Secure-Reactor für Helsinki ist über weitere Exportaktivitäten nichts bekannt geworden. Der auf dem gleichen Prinzip beruhende Leistungsreaktor PIUS ist in den USA auf Interesse gestossen.

GEYSER (Schweiz)

Dieses am ehemaligen Schweizerischen Institut für Nuklearforschung (SIN) verfolgte Konzept nutzt den statischen Druck einer hohen Wassersäule und verzichtet auf ein eigentliches Druckgefäss.

Der Reaktor befindet sich in einem gegen das Erdreich dichten Betonschacht von etwa 50 m Tiefe und 5 m Durchmesser. Auf diese Weise erreicht man am Kernaustritt den Sättigungszustand des Primärkühlwassers bei 150 °C. Bei weiterem Aufsteigen in einem sog. Diffusor geht das Kühlmittel teilweise in die Dampfphase über und transportiert die Wärme zum ebenfalls im Schacht angeordneten Primärwärmetauscher. Dieser funktioniert auf seiner Primärseite als Kondensator und Kühler, auf der Sekundärseite als Verdampfer. Der so entstandene Sekundär-Dampf gibt seine Wärme durch Kondensation an das Heiznetz ab. Primär- und Sekundärkreislauf arbeiten im Naturumlauf.

Als besonderes Sicherheitsmerkmal gilt die grosse Menge borierten Wassers im Schacht, die in Abhängigkeit vom Gleichgewicht zwischen freigesetzter und abgeführter Wärme in den Primärkreis eindringen kann und so zu einer leistungsabhängigen Selbstregulierung und nötigenfalls zur Abschaltung führt.

GHR: Gasgekühlter Heizreaktor (BRD/Schweiz)

Der GHR gehört der Familie der heliumgekühlten Kugelhaufen von *Hochtemperatur-Reaktoren* an. Ausgehend von HTR-Prinzip hat HRB/BBC einen kleinen, einfachen Heizreaktor mit stationärem Kugelhaufen entwickelt (Bild 5). Absorberstäbe sind nur im Reflektor vorhanden. Als Besonderheit ist der intensiv gekühlte Liner, der nebst der Dichthaut-Funktion auch die Rolle des primären Wärmetauschers übernimmt und damit entsprechende Apparate überflüssig macht. Die nach diesem Prinzip begrenzte Wäremabfuhrkapazität hat eine Leistungsbegrenzung auf etwa 15 MW_{th} zum Nachteil. Die grosse Wärmespeicherkapazität des Graphits im Kern und im Reflektor und die Integrität der Brennelemente bei Temperaturen weit über die zu erwartenden Maximalwerte sind ein wichtiges Sicherheitsmerkmal dieses Reaktortyps. Eine Weiterentwicklung des GHR wird von der Weiterführung der HTR-Linie in der BRD abhängig gemacht.

Heizreaktor-Überblick

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der technischen Daten der neun erwähnten Heizreaktor-Konzepte. Man stellt fest, dass für alle Konzepte kleinere Leistungen, 2 bis 500 MW gegenüber 300 MW bei heutigen Leistungsreaktoren, niedrigere Kühlmitteltemperaturen (bei wassergekühlten Heizreaktoren weniger als 200 °C gegenüber 350 °C bei LWR), und niedrigere Leistungsdichten (2 bis 55 kW/l gegenüber etwa 100 kW/l beim LWR), aufweisen. Diese Merkmale führen allgemein zu niedrigen Betriebsdrücken und -temperaturen, die zusammen mit den grösstenteils einfacheren Systemen und den wesentlich erhöhten Wärmekapazitäten bedeutend grössere Margen bis zu den Versagensgrenzen der Materialien bedeuten. Dies ist auch für den Nicht-Fachmann als Erhöhung der Sicherheit leicht zu deuten und zu verstehen.

Stand der Schweizerischen Heizreaktor-Entwicklung

Aus Sorge um die Umwelt, mit der guten Erfahrung aus der Implementierung des REFUNA-Fernwärmenetzes und mit der Einsicht, dass kleine Reaktoren sicher sein können, wurde am PSI

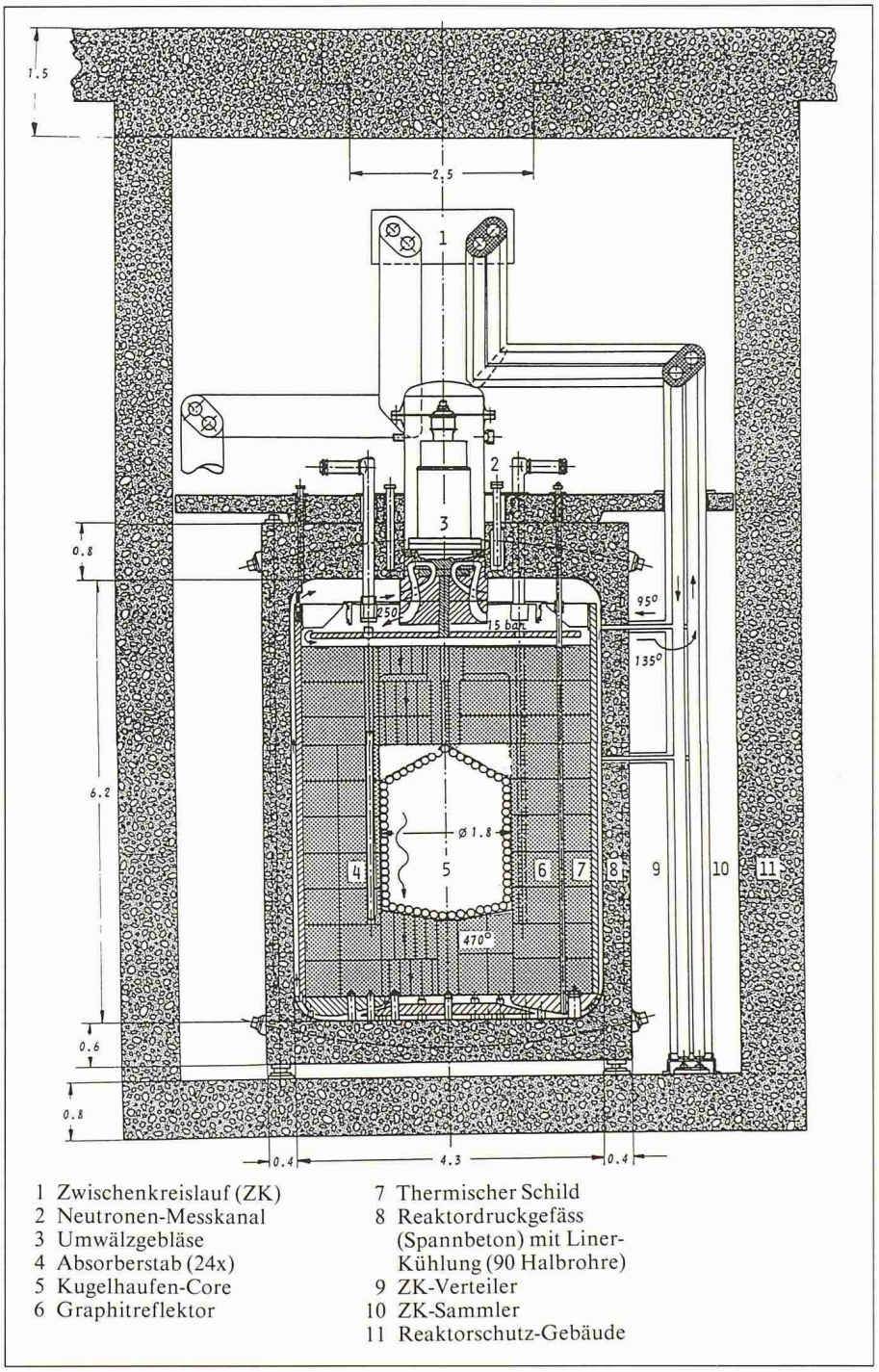
die Heizreaktorentwicklung gestartet. In Zusammenarbeit mit der Industrie wurden die Arbeiten optimistisch angegangen, so dass bald drei konkurenzierende, interessante Konzepte vorlagen. Beruhend auf gemeinsam ausgehandelten Kriterien, sind die drei Konzepte von den Sicherheitsbehörden und von Expertengremien hinsichtlich der Genehmigungsfähigkeit geprüft bzw. auf technische, wissenschaftliche und betriebliche Aspekte hin beurteilt worden.

Der GEYSER wurde als wissenschaftlich interessant und vielversprechend angesehen, konnte aber wegen seines frühen Entwicklungsstandes nicht endgültig beurteilt werden. Von den beiden weiterentwickelten Anlagen GHR und SHR wurde dem GHR dank seiner einem unbemannten Betrieb zugänglichen, langsamer verlaufenden Transienten der Vorrang gegeben.

Die Heizreaktor-Entwicklung, die vielleicht in der Zukunft zu einem wichtigen Wärmeversorgungsglied werden könnte, ist in die politische Kernenergie-Debatte hineingerutscht. Es besteht aber die Absicht, die Planung und die begleitende Forschung zum GHR und GEYSER weiterzutreiben, um im Fall eines positiven Ausgangs der bevorstehenden politischen Entscheidungen mit dem Bau eines Prototyps beginnen zu können.

Wirtschaftlichkeit

Ein Vergleich verschiedener Wärmequellen bzw. Energieträger bezüglich der Heizkosten beim Endverbraucher wird durch die bestehenden Unsicherheiten schwierig. Um Einsichten zu gewinnen, soll trotzdem ein Versuch gemacht werden, der wenigsten die Grössenordnungen aufzeigen kann. Die Kosten der nuklearen Fernwärme werden mit den Kosten der individuellen Öl-



1 Zwischenkreislauf (ZK)
2 Neutronen-Messkanal
3 Umwälzgebläse
4 Absorberstab (24x)
5 Kugelhaufen-Core
6 Graphitreflektor
7 Thermischer Schild
8 Reaktordruckgefäss (Spannbeton) mit Liner-Kühlung (90 Halbrohre)
9 ZK-Verteiler
10 ZK-Sammler
11 Reaktorschutz-Gebäude

Bild 5. Anordnungsschema des gasgekühlten Heizreaktors (GHR)

Land	*UdSSR*	*BRD*	*Schweden*	*Frankreich*	*Schweiz*			*Kanada*	*Volks-Republik China*
Reaktortyp	AST-500	KWU-200	Secure-200	Thermos-100	SHR	GHR	Geyser	Slowpoke	LTR
Basiskonzept	BWR	BWR	PWR	PWR	BWR	GCR	PWR	PWR	BWR/PWR
Thermische Leistung (MW)	500	200	200	100	10	10	10	2-10	5
Kühlmittel/Moderator	H_2O	H_2O	H_2O	H_2O	H_2O	He/C	H_2O	H_2O	H_2O
Primärkreislauf-Art	integr.	integr.	2 loops	integr.	integr.	integr.	integr.	tank	integr.
Umlauf	Natur	Natur	Pumpe	Pumpe	Natur	Pumpe	Natur	Natur	Natur
Kerntemperatur Aus-/Eintritt (°C)	200/150	198/163	115/90	144/131	198/185	450/250	150/130	93/68	198/187
Leistungsdichte (kW/l)	27,4	20	41	54	14	2	35	55	27,57
Brennstoffanreicherung (%)	1,6/2,0	5	2,58	3,7	4,5	20	8	5	3
Brennstoffstandzeit (a)	2	20	2	2	12	16	15	3	

Tabelle 1. Hauptdaten der Heizreaktoren

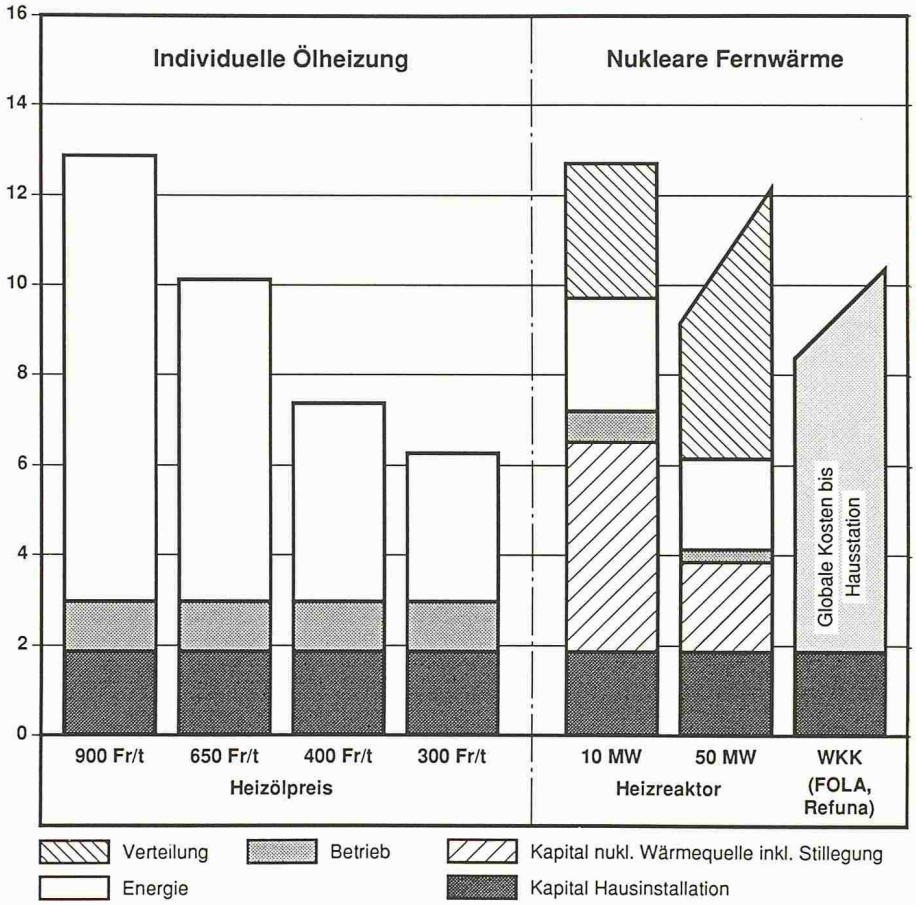


Bild 6. Vergleich Heizkosten beim Endbezüger (Rp./kWh)

heizung verglichen (Bild 6). Um der ungewissen Ölpreisentwicklung Rechnung zu tragen, wurden die Kosten für verschiedene Ölpreise ermittelt. Die Kosten für nukleare Fernwärme setzen sich zusammen aus:

- den Kosten für die Hausinstallation (Übergabestation Fernwärmenetz/ Hausnetz und Wäremspeicher),
- den Kosten für die Verteilung (aus den Erfahrungen von REFUNA übernommen) und
- den Wäremegestehungskosten an der Quelle.

Während für eine kleine Wärmequelle (10 MW) nur die Feinverteilung berücksichtigt werden muss, kommt für die grössere Wärmequelle (grösserer Heizreaktor oder WKK aus Kernkraftwerken) noch die Grobverteilung dazu, deren Kosten allerdings für städtische und ländliche Versorgungsgebiete variieren können. Die spezifischen Kapitalkosten für den Heizreaktor (die auch die Stillegungskosten berücksichtigen) sind natürlich für grössere Anlagen bedeutend kleiner. In den Betriebs- und Energiekosten sind auch jeweils die Kosten für den Unterhalt und für den Betrieb der fossilen Spitzen- und Reserve-Heizanlagen inbegriffen.

Bei den heutigen Ölpreisen ist jede Art von Fernwärmeversorgung, belastet durch Verteilkosten, gegenüber Individualheizungen konkurrenzunfähig. Dies gilt auch für die ausgekoppelte Wärme aus den bestehenden Kernkraftwerken; sie wäre aber konkurrenzfähig gegenüber Ölpreisen, die noch vor wenigen Jahren bezahlt werden mussten. Die Kosten der Wärme aus Heizreaktoren sind noch höher, doch eine gute Leistungsanpassung und eine günstige Verteilung könnten die Kosten auf ein vernünftiges Niveau bringen.

Bei der Bewertung solcher Zahlen durch Vergleich mit herkömmlichen Wärmegestehungkosten ist zu berücksichtigen, dass nukleare Brennstoffkosten die Beseitigung der Rückstände enthalten (Verbannung aus der Biosphäre). Dies ist für fossile Brennstoffe meistens nicht der Fall, sicherlich nicht was das CO_2 betrifft.

Schlussfolgerungen

Für die Umwelt und die Versorgungssicherheit bietet die nukleare Fernwärme eine gute Option. Wäremeauskopplung aus bestehenden Kernkraftwerken ist bereits heute dank der guten Energienutzung und der vertretbaren Kosten einsatzfähig.

Die kleinen bis mittelgrossen nuklearen Heizkraftwerke bieten neben der wärmetechnisch günstigen Wärmekraftkopplung den Vorteil von zusätzlichen inhärenten Sicherheitseigenschaften, allerdings scheinen diese Anlagen ziemlich teuer zu werden.

Solange nukleare Akzeptanz nicht gegeben ist, werden selbst wettbewerbsfähige Heizreaktoren nicht gebaut. Sollte aber in Zukunft eine Entspannung eintreten und der Abbau ideologischer Barrieren eine sachliche Relativierung begünstigen, so wird sich längerfristig die schon heute erkennbare Umweltbesorgnis auch gegen höhere Wärmepreise durchsetzen.

Adressen der Verfasser: *R. Brogli*, Labor für Reaktorphysik und Systemtechnik, Paul Scherrer Institut, 5303 Würenlingen, und *P. Burgsmüller*, Abt. Kessel- und Kernenergieanlagen, Gebrüder Sulzer AG, 8401 Winterthur.