

# Die Konstruktion des PIUS-Reaktors

Autor(en): **Hannerz, Kare**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

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

Heft 38

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77169>

## **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.

Bau einer grosstechnischen Versuchsanlage mit einem Hochtemperaturreaktor in Modulbauweise mit einer Wärmeleistung von 200 MW in Dimitrowgrad. Ferner ist die gemeinsame Realisierung von Folgeanlagen zur Erzeugung von Strom, Prozessdampf und Prozesswärme in der UdSSR und gegebenenfalls in Drittländern geplant.

Mit der Volksrepublik China wurden mehrere Zusammenarbeitsvereinbarungen abgeschlossen, die zum Ziel haben, den HTR für die Anwendungsmöglichkeiten in China zu entwickeln und zu bauen.

In der Volksrepublik Bulgarien und in der Türkei besteht ebenfalls Interesse an der deutschen HTR-Technologie.

### Zusammenfassung

In mehr als 30jähriger Entwicklungszeit wurde der Kugelbett-Hochtemperaturreaktor an die Schwelle der Marktreife geführt. Auf der Grundlage der Erfahrungen mit dem 15-MW-AVR-Reaktor und dem THTR-300 wurden bedarfsgerechte Leistungsgrößen (HTR-500, HTR-Modul, GHR-10) für

den Strom- und Wärmemarkt entwickelt, die nun für die zukünftige Energieversorgung zur Verfügung stehen. Der Hochtemperaturreaktor ist eine sinnvolle Ergänzung der bewährten Leichtwasserreaktoren und hat eine hohe industriepolitische und volkswirtschaftliche Bedeutung.

Adresse der Verfasser: Dipl.-Ing. E. Röhler und Dr. R. Rotterdam, Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, D-6800 Mannheim.

## Fortschrittliche Kernreaktoren

# Die Konstruktion des PIUS-Reaktors

**Die vernünftige Nutzung des umweltfreundlichen Kernbrennstoffs könnte in weiten Teilen der westlichen Welt aufgegeben werden, weil die Öffentlichkeit radioaktive Strahlung fürchtet und eine Abneigung gegen eine Technik hat, von der angenommen wird, dass sie unvermeidlich zur Freisetzung von Radioaktivität führt. Um die öffentliche Billigung zu erreichen, ist eine Technik erforderlich, die überzeugendere Beweise als die gegenwärtigen Leichtwasserreaktoren dafür liefert, dass solche Freisetzungen vermieden werden können. Sie sollte die Einsicht vermitteln, dass nennenswerte Freisetzungen von Radioaktivität ausgeschlossen sind - ungeachtet beliebiger Kombinationen von Irrtümern des Betreibers und von Fehlern an Komponenten und Strukturteilen.**

### Die Wahl der Konstruktion

ABB Atom (ASEA-ATOM vor dem Zusammenschluss von ASEA und Brown Boveri) hat schon früh erkannt, dass

VON KÅRE HANNERZ,  
VÄSTERÅS

angesichts der besonders aktiven Tätigkeit der Kernenergiegegner in Schweden eine solche Technik erforderlich ist. Aus Gründen des Zeitplans und der Kosten musste davon ausgegangen werden, dass diese auf den umfangreichen Erfahrungen mit dem Betrieb der Leichtwasserreaktoren aufbaut und die bestehende Infrastruktur des Brennstoffkreislaufs nutzen kann.

Anfängliche Arbeiten zielten auf eine Abwandlung der Siedewasserreaktoren, dann aber konzentrierten sich die Anstrengungen auf das PIUS-Konzept. Mit diesem Konzept wird die Integrität

eines in Betrieb befindlichen Reaktorkerns völlig unabhängig vom Verhalten aktiver Komponenten wie Pumpen, Ventile oder Instrumentierung und von Fehlern der Betriebsmannschaft aufrecht erhalten. In dieser Hinsicht ist PIUS offensichtlich einmalig, zumindest unter Wasserreaktoren.

Die inhärente Sicherheit von PIUS beruht auf drei grundsätzlichen Massnahmen:

- Der Reaktorkern ist dauernd und ungehindert mit einem grossen Becken mit borhaltigem Wasser verbunden, das für die Nachzerfalls-Wärmeabfuhr durch Verdampfen während mindestens einer Woche ausreichend ist. Das Becken ist in einem grossen Spannbeton-Druckbehälter mit mehreren Barrieren gegen Lecks untergebracht, so dass es keine glaubwürdige Art gibt, wie das Wasserinventar verloren gehen könnte.

- Die thermohydraulische Anordnung des Primärkreislaufs ist so gestaltet, dass Störfälle, die sonst zu ungenügender Kühlung des Kerns mit der Gefahr seiner Zerstörung führen könnten, durch den Eintritt von borhaltigem Wasser aus dem Becken beendet werden. Mit anderen Worten, es gibt einen eingebauten thermohydraulischen Selbstschutz, der völlig unabhängig ist von Überwachung und Eingriffen von aussen.
- Der Reaktorkern, vom Typ ein vereinfachter Druckwasserreaktor mit Standardbrennstäben, ist für einen grossen thermischen Spielraum bemessen. Transienten, die innerhalb der durch den thermohydraulischen Selbstschutz gegebenen Grenzen auftreten können, stellen keine Gefährdung für die Integrität des Kerns dar.

Die mittels umfangreicher Rechnersimulationen erwiesene inhärente Sicherheit ist in Grossversuchen bestätigt worden, bei denen ein mit 2,5 MW Leistung elektrisch beheiztes, simuliertes Brennelement in einem vollständigen PIUS-Kreislauf verwendet wurde. Zusätzliche Versuche haben die Funktionsfähigkeit des thermischen Barriersystems zur Fernhaltung des borhaltigen Beckenwassers sowie die Machbarkeit der Spannbetonbehälter-Konstruktion erwiesen. Betriebbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Störungen sind sowohl durch Rechnersimulationen wie durch die erwähnten Versuche bestätigt worden.

Die Wirtschaftlichkeit im Bereich der Einheitsleistungsgrösse von 600 bis 700 MWe vergleicht sich günstig mit den gegenwärtigen Leichtwasserreaktoren, wie zum Beispiel den ausserordentlich wettbewerbsfähigen Standard-Siedewasserreaktoren der ABB. Der Grund dafür ist die drastische Vereinfachung

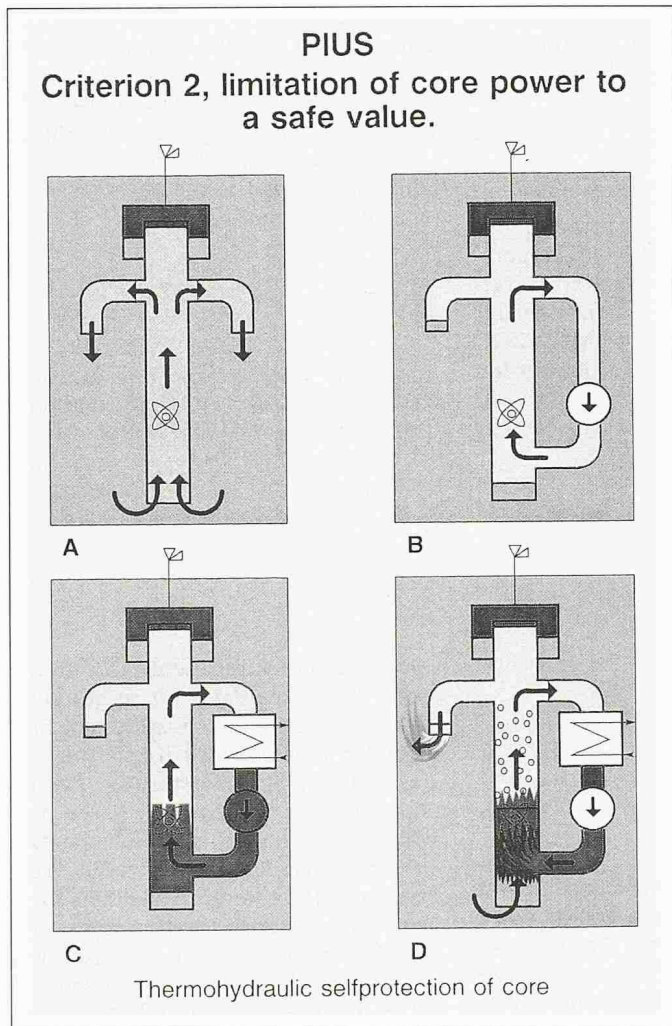


Bild 1. Beschränkung der Reaktorleistung auf einen sicheren Wert: thermohydraulischer Selbstschutz des Reaktorkerns

- A Wärmequelle unten. Die Wärmeentwicklung bewirkt einen natürlichen Zirkulationsfluss durch das Steigrohr
- B Der Durchfluss wird mit einer Pumpe zum Einlauf des Steigrohres zurückgeführt
- C Ein Wärmeaustauscher befindet sich im Kreislaufsystem und hält dessen Temperatur konstant
- D Mangelnde Kühlung bewirkt Bildung von Dampfblasen. Die natürliche Zirkulation übersteigt die Leistung der Pumpen. Das Defizit wird dem borhaltigen Beckenwasser entnommen; der Reaktor schaltet automatisch ab

Tabelle 1. PIUS-Reaktor von 2000 MWth: Hauptdaten

Thermische Kernleistung	2000 MW
Elektrische Nettoleistung	640 MW
Kühlwassertemperatur	18 °C
Anzahl Brennelemente	213
Kernhöhe (aktiv)	2,5 m
Kern-Äquivalenzdurchmesser	3,76 m
Durchschnittliche Brennstoffbelastung	11,9 kW/m
Durchschnittliche Leistungsdichte	72 kW/l
Kern-Einlasstemperatur	260 °C
Kern-Austrittstemperatur	289,8 °C
Betriebsdruck	9 MPa
Kerndurchfluss	13 000 kg/s
Durchschnittlicher Abbrand	45 000 MWd/t
Urananreicherung	3,5 U-235
Betonbehälter-Innendurchmesser	13,4 m
Betonbehälter-Volumen	3500 m <sup>3</sup>
Betonbehälter-Gesamthöhe	45 m
Betonbehälter-Wandstärke	7-10 m
Anzahl Dampferzeuger und Kühlmittelpumpen	4

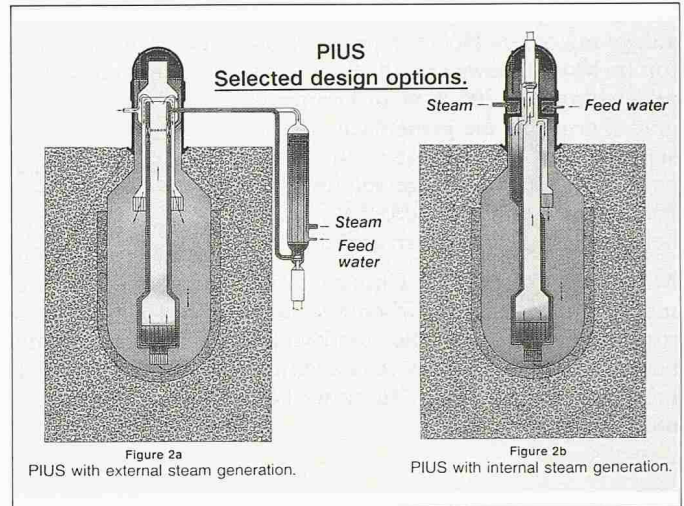


Bild 2. Die wichtigsten Ausführungen des PIUS-Reaktors

- a Externe Dampferzeugung
- b Interne Dampferzeugung

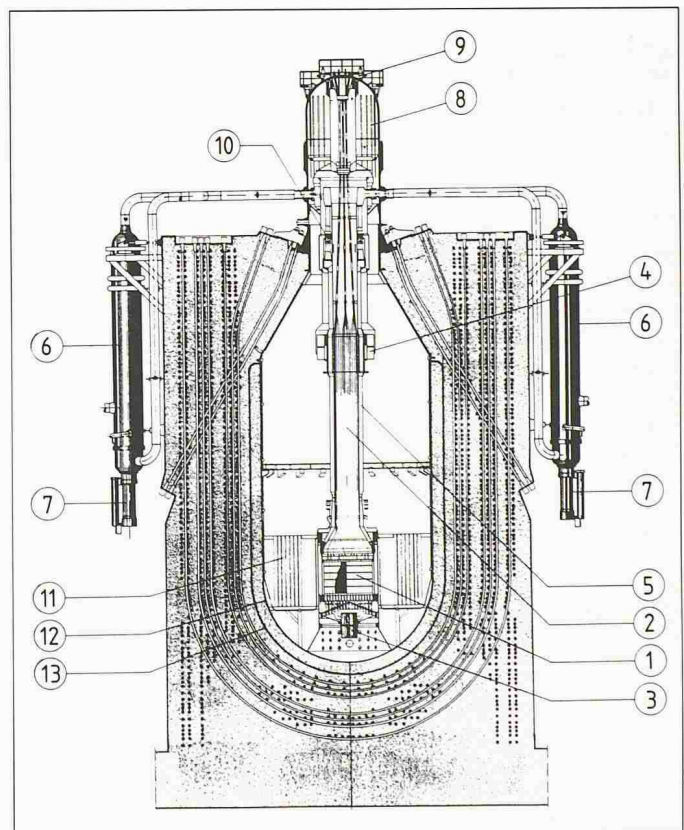


Bild 3. PIUS mit externem Dampferzeuger im Schnitt

- 1 Reaktorkern
- 2 Steigrohr
- 3 Untere Dichtesperre
- 4 Obere Dichtesperre
- 5 Fallrohrring
- 6 Dampferzeuger
- 7 Kühlmittelpumpen
- 8 Druckhalter-Dampfraum
- 9 Durchführungen der Kerninstrumentierung
- 10 Syphonunterbrecher
- 11 Gerüste für verbrauchte Brennelemente
- 12 Edelstahlmembrane (Auskleidung)
- 13 Einbetonierte Stahlmembrane

der Systeme durch die «eingebaute» Sicherheit.

Die inhärente Sicherheit, günstige Wirtschaftlichkeit in kleineren Anlagen und die Berücksichtigung der Erfahrungen mit Leichtwasserreaktoren sowie die Nutzung deren Brennstoffkreislaufs werden PIUS zu einem guten Ausgangspunkt für eine «zweite nukleare Epoche» machen, in der Missstrauen und Kontroversen in der Öffentlichkeit der Vergangenheit angehören.

## Grundlagen der Konstruktion

PIUS hat seine Anfänge im SECURE-Heizreaktor-Konzept, das in der Mitte der 70er Jahre vorgeschlagen wurde. Seine wichtigsten Eigenschaften sind die sofortige Verfügbarkeit einer sehr grossen Menge an Kühlmittel für den Reaktorkern und der Mechanismus der Selbstabschaltung bei Vorkommnissen, die normalerweise den Reaktorkern beschädigen würden. Diese Selbstabschaltung beruht nur auf Thermohydraulik und Schwerkraft und ist unabhängig von irgendwelcher Funktion von Ausrüstungen.

Da eine vollständige Unabhängigkeit von Pumpen, Ventilen und dergleichen angestrebt wird und da die möglichen Einwirkungen von aussen solche Anlagenteile wie Kühltürme zur Abfuhr der Nachzerfallwärme ausschliessen, ist das Konzept, den Reaktorkern in einem grossen Becken unterzubringen, die naheliegendste Lösung für einen Wasserreaktor.

Die Grösse des Beckens, beispielsweise für eine Anlage von 600 MWe, schliesst die Verwendung eines vorgefertigten Reaktorbehälters aus. Statt dessen wird ein Spannbetonbehälter verwendet, der durch mehrere hundert unabhängige Vorspannglieder zusammengehalten wird. Dadurch wird die gewünschte Redundanz der lasttragenden Glieder erreicht. Die starke Wanddicke (7–10 m) liefert die ausserordentliche Robustheit gegenüber äusseren Einwirkungen.

Grosse Spannbetonbehälter mit komplizierterer Konstruktion, als sie hier vorgeschlagen wird, sind für die britischen und französischen gasgekühlten Reaktoren verwendet worden. Obwohl bei diesen nie ein Leck durch die Behälterwandung als realistische Möglichkeit in Erwägung gezogen worden ist, wurde für PIUS eine zusätzliche Stahlmembrane im Beton vorgesehen, um eine redundante Leckbarriere zu schaffen.

Das Wasser im Becken innerhalb des Betonbehälters hat einen hohen Borgehalt, um sicherzustellen, dass der Reak-

tor nicht kritisch wird, wenn das Wasser zur Nachzerfallwärmeabfuhr verwendet wird. Wie die Wärme aus dem Kern abgeführt wird, ist in Bild 1 dargestellt.

In Bild 1 A ist eine Wärmequelle nahe dem unteren Ende eines Steigrohres (Riser) in einem Wasserbecken angeordnet. Die Wärmeentwicklung bewirkt einen natürlichen Zirkulationsfluss durch das Rohr. Das Becken steht mittels einer Dampfblase unter Druck.

In Bild 1 B wird der Fluss mit einer Pumpe zum Einlauf des Rohres zurückgeführt, anstatt im Becken vermischt zu werden. Die im Kern erzeugte Wärme bleibt damit im zirkulierenden Wasser. Es gibt keinen Fluss durch das Becken.

In Bild 1 C ist ein Wärmeaustauscher in das Kreislaufsystem eingeführt, um dessen Temperatur konstant zu halten. Die im Kern erzeugte Wärme wird jetzt zu Nutzzwecken abgeführt. Es befindet sich eine Schicht warmen Wassers über kaltem an beiden Enden in der Dichtesperre (3,4 in Bild 3). Die Pumpe und der Wärmeaustauscher können entweder innerhalb des Beckens oder ausserhalb des Betonbehälters angeordnet werden. Durch Steuerung der Pumpenleistung in einem engen Bereich, der durch die zulässigen Schichtschwankungen in der Dichtesperre bestimmt ist, kann das zirkulierende heisse Kühlmittel vom kalten Wasser mit hoher Borkonzentration im Becken getrennt gehalten werden.

Reaktivität und Leistungsabgabe können durch Änderung des Borgehaltes und der Kühlmitteltemperatur gesteuert werden, während stets ein offener natürlicher Zirkulationsweg durch den Kern und das Becken besteht.

Schliesslich zeigt Bild 1 D einen Fall ungenügender Reaktorkernkühlung (Verlust der Speisewasserzuführung zu den Wärmeaustauschern). Es zeigt sich, dass die zuvor beschriebene Anordnung den bereits erwähnten «Selbstschutz» bewirkt. Das System in Betrieb zu halten erfordert eine empfindliche Durchflusssteuerung (die jedoch unter normalen Betriebsbedingungen kein Problem darstellt). Bei grösseren Transienten von möglicher Bedeutung für die Sicherheit kann das nach den Gesetzen der Thermohydraulik und Schwerkraft arbeitende Steuerungssystem mit den auf das Kühlmittel einwirkenden Kräften nicht mehr fertigwerden. In diesem Fall dringt borhaltiges Wasser des Beckens durch die untere Dichtesperre 3 in Bild 3 in das Kühlsystem und bewirkt entweder die Abschaltung des Reaktors oder die Stabilisierung der Wärmeabgabe auf sicherem Niveau.

Beim in Bild 1 D dargestellten Fall bewirkt die Bildung von Dampfblasen im

Steigrohr 2 Bild 3 aufgrund mangelnder Kühlung einen Anstieg an natürlicher Zirkulation durch den Reaktorkern über die Kapazität der Kreislaufpumpen hinaus. Das Defizit wird dem borhaltigen Beckenwasser entnommen, was die Abschaltung des Reaktors zur Folge hat.

## Konstruktion des Reaktors

Das Grundmerkmal des PIUS-Konzepts ist ein Reaktorkern mit Naturzug-Kreislauf durch ein grosses Becken mit borhaltigem Wasser in einem Betonbehälter. Für die Anordnung der anderen Teile, wie Dampferzeuger, die Form und den Verschluss des Betonbehälters, den Druckhalter, die Lagerung verbrauchter Brennelemente u.a. gibt es verschiedene Optionen.

Die wichtigsten Konstruktionsvarianten sind in Bild 2 dargestellt. In Bild 2a sind die Zwangsdurchlauf-Dampferzeuger ausserhalb des Behälters angeordnet, während die Dampferzeuger bei der in Bild 2b gezeigten Alternative in den Behälter integriert sind, womit äussere Kühlkreisläufe vermieden werden. Bei beiden Ausführungen ist der Betonbehälter, in dem sich das für den Reaktorkern jederzeit verfügbare grosse Wasserbecken befindet, mit einer oberen Erweiterung aus Stahl versehen, die mit dem Betonmonolithen mittels besonderer Vorspannglieder verankert ist. Rohr- und Flanschverbindungen zum Dampferzeuger (für die Alternative in Bild 2b) und zum Druckhalter befinden sich in diesem Stahlaufbau.

Der grundsätzliche Vorteil der externen Anordnung (Bild 2a) liegt in der Anwendung von Dampferzeugern und Pumpen, die den in der Industrie genutzten ähnlich sind. Die interne Anordnung (Bild 2b) hat wahrscheinlich einige technische Vorteile und niedrigere Kosten wegen der kompakteren Bauweise. Sie erfordert jedoch mehr Entwicklungsarbeit für die Dampferzeuger.

Die wichtigsten Merkmale der Reaktor-konstruktion sind in Bild 3 dargestellt. Tabelle 1 zeigt einige Hauptdaten.

## Genehmigung und Disposition der Anlage

Das wichtigste Ziel der Reaktorsicherheit ist es, grössere Freisetzungen von radioaktiven Stoffen in die Umgebung, die zu schädlichen Auswirkungen führen können, zu verhindern. Unfälle, bei denen Kühlmittel in die Umgebung freigesetzt wird, ohne dass sie die Integrität des Reaktorkerns beeinflussen,

können nur unter im höchsten Masse übertriebenen Annahmen nennenswerte Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit haben. Die derzeitigen strikten Vorschriften betreffend geringfügiger Freisetzung aus herkömmlichen Leichtwasserreaktoren können dahingehend gedeutet werden, dass sie nicht aus Sorge um die möglichen Gesundheitsschäden diktiert sind, sondern eher aus der Annahme, dass sie Vorboten von Schlimmerem sein könnten, sollte der Betrieb fortgeführt werden.

Bei PIUS wird der Schutz gegen Reaktorkernzerstörung durch die Konstruktion des Primärsystems gewährleistet, das unabhängig ist vom Eingriff des Menschen von aussen oder von möglichem Versagen von Einrichtungen. Um seinen eingebauten Schutz gegen Unfälle mit schwerwiegenden Konsequenzen für die Umwelt zu erreichen, müssen bei PIUS Aufwendungen für den massiven Betonbehälter gemacht und gewisse Einschränkungen beim thermischen Wirkungsgrad beim Betrieb in Kauf genommen werden. Bei angemessener Berücksichtigung seiner eingebauten Sicherheit kann PIUS den Weg zu einer merklichen Vereinfachung der Anlage öffnen, da die meisten der bei derzeitigen Leichtwasserreaktoren üblichen ingenieurmässigen Sicherheitssysteme weggelassen werden können.

Noch ist es zu früh zu sagen, was das Ergebnis aus dem Konflikt zwischen wirklicher Sorge um die öffentliche Sicherheit, die für PIUS sprechen sollte, und der Neigung, bestehender Praxis zu folgen, die PIUS übermässig verteuern würde, sein wird.

Für die Ausführung mit externem Dampferzeuger ist ein Druckabbau-Sicherheitsbehälter vorgesehen, um dem Unfall mit Bruch einer grossen Rohrleitung begegnen zu können. Auf diese Weise kann die Strahlenbelastung der Öffentlichkeit von einem bereits recht niedrigen Niveau auf die extrem geringen Werte gesenkt werden, wie sie von den gegenwärtigen Genehmigungsvorschriften gefordert werden. Der Reaktorsicherheitsbehälter ist daraufhin bemessen, Flugzeugeinwirkungen standzuhalten. In ihm sind der Betonbehälter mit den Dampferzeugern untergebracht.

Die meisten Hilfssysteme sind in einem angrenzenden Gebäude untergebracht. Im wesentlichen sind dies das Reaktivitätskontrollsystem, das Wasser entweder borfrei oder mit hohem Borgehalt in das Primärsystem speist, die Systeme für Wasserreinigung und für Wasser-trennung in borfreies und hochborhaltiges Wasser, Abfallsysteme und Kühlsysteme. Es handelt sich bei allen um herkömmliche Systeme, meist mit Ge-

genstücken in den derzeitigen Druckwasserreaktoren.

Als Chemie des Kühlmittels wurde für PIUS das von den Sowjets für die finnischen Reaktoren in Loviisa entwickelte System übernommen, das ausgezeichnete Ergebnisse erbracht hat. Bei diesem System wird Lithium durch Kalium ersetzt (wegen des grossen Beckenvolumens), und Ammonium wird anstelle von molekularem Wasserstoff zur Unterdrückung der Wasserradiolyse verwendet.

Die Turbinenanlage wird mit Frischdampf von 4 MPa betrieben. Eine Frischdampf-Speisewasserheizung kann bei Teillast benutzt werden, um übermässige thermische Belastungen des Dampferzeuger-Speisewassereintritts zu vermeiden. Die Speisewasserpumpe ist turbinengetrieben.

Ein wichtiger Unterschied im Vergleich zu herkömmlichen Druckwasserreaktoren besteht darin, dass das Speisewassersystem keine Sicherheitsfunktion hat; es gibt kein Speisewasser-Notsystem. In der Tat können zum Beispiel bei Ausfall von Generator- oder Netzspannung die Dampferzeuger von der Turbinenanlage getrennt werden.

Wie bereits erwähnt, hängen die Kapitalkosten sehr stark vom Kompromiss ab, der in bezug auf die formale Einhaltung derzeitiger Vorschriften für Leichtwasserreaktoren gefunden wird. Unter Anwendung der erwähnten Konstruktionsmerkmale sind die geschätzten Anlagenkosten für eine PIUS-Anlage von 600 MWe etwas niedriger als für eine Standard-ABB-Siedewasserreaktor-Anlage gleicher Leistung.

### Betrieb und Wartung

PIUS ist ein abgewandelter Druckwasserreaktor, bei dem aufgrund des innerhalb des Betonbehälters verfügbaren Raumes kein wirtschaftlicher Zwang zu einem kompakten Reaktorkern hoher Leistungsdichte besteht und bei dem Temperaturen, Drucke und Strömungsgeschwindigkeiten niedriger sind. Die sich daraus ergebenden grossen Temperaturspielräume tragen zu einer Vereinfachung des Anlagenbetriebes und zu wenigen Beschränkungen bei Betriebs-transienten bei.

Ein anderer Faktor ist das Fehlen von Kontrollstäben und daher eine geringere Notwendigkeit für detaillierte Überwachung der Leistungsverteilung im Reaktorkern. Umfassender Gebrauch von abbrennbarem Gadolinium-Absorber sorgt für Reaktivitätskompensation beim Abbrand. Die Leistungssteuerung erfolgt lediglich über den Borgehalt des Kühlmittels und über die Temperatur.

Die Verwendung von Gadolinium bewirkt einen starken negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktivität des Moderators. Dies macht es in Verbindung mit einem Zwangsdurchlauf-Dampferzeuger möglich, rasche Laststeigerungen lediglich durch Erhöhung des Speisewasserflusses und Öffnen des Turbinendrosselventils zu erreichen.

Das Anfahren erfolgt durch Borverdünnung im Primärsystem, wobei zeitweise eine Stickstoffsperrung zur Trennung des Systems vom Beckenwasser mit hohem Borgehalt angewendet wird. Nachdem der Reaktor kritisch geworden ist, heizt die Reaktorleistung das Primärwasser, und die Pumpenleistung wird im Masse der Temperaturerhöhung des Kühlmittels bis zum Erreichen der Betriebswerte gesteigert. Die Beaufschlagung der Dampferzeuger mit Speisewasser kann beginnen, wenn die Primärseite die Betriebstemperatur erreicht.

Nach Erreichen der Vollast kann die Reaktorleistung durch die Sekundärseite gesteuert werden. Das erfolgt vor allem durch Anpassung des Speisewasserflusses zum Dampferzeuger mit den Einlass-Steuerventilen zur Antriebsturbinen der Speisewasserpumpe. Auf diese Weise ist täglicher Lastfolgebetrieb mit nur geringer oder gar keiner Änderung des Borgehalts im Kühlmittel möglich. Längere Laständerungen erfolgen über Anpassung des Borgehaltes.

PIUS kann, wie andere Reaktoren, Störungen des Netzes wie Kurzschlüsse von kurzer Dauer ohne Zutritt von borhaltigem Beckenwasser in den Primärkreis überstehen.

Was die Wartung angeht, kann bemerkt werden, dass die Turbinenanlage denjenigen von herkömmlichen Druckwasserreaktoren ähnelt. Die übrigen Anlagen sind einfacher, weil eine grosse Zahl von Sicherheitssystemen entfallen können. Es genügt daher, die Wartung des nuklearen Dampferzeugersystems zu beschreiben.

Die Wartung hat gewisse Ähnlichkeiten mit der bei Siedewasserreaktoren. Für den Brennstoffwechsel werden die Behälterdeckelbolzen gelöst, nachdem die Kerninstrumentierung gezogen worden ist. Die beiden grossen Behältereinbauten der Strömungsführungsstruktur werden dann in ein anderes Becken überführt, wie das mit dem Dampftrockner und Tropfenabscheider bei Siedewasserreaktoren der Fall ist, obwohl die Komponenten bei PIUS höher sind. Nach ihrer Umladung können die Einbauten in ihrem Lagerbolzen mit gewöhnlichen Unterwassermethoden gewartet werden.

Nach Ausladen der Einbauten über dem Reaktorkern verbleiben nur noch

der mit der Bodenplatte des Betonbehälters verschweisste Reaktorkern und die ihn umgebenden Gestelle für verbrauchte Brennelemente, die den Brennelementanfall von 40 Betriebsjahren aufnehmen können, in dem Gefäss. Einbauten im Reaktorgefäss wie Stützgitter können mit Spezialwerkzeugen abgeschraubt und ausgewechselt werden, sollte das je notwendig sein.

Darüber hinaus gibt es innerhalb des Betonbehälters wenig Wartung. Leckagen der Auskleidung sind höchst unwahrscheinlich. Überwachung und Ortung von Lecks können jedoch erfolgen, und Reparaturen sind ohne Ablassen des Wassers möglich.

Die Wartungen des nuklearen Dampferzeugersystems ausserhalb des Betonbehälters sind einfach. Für die Zwangsumlauf-Gradrohr-Dampferzeuger sind die für Druckwasserreaktoren entwickelten Verfahren direkt anwendbar. Was die Kühlmittelpumpen angeht, wird angenommen, dass der Wartungsaufwand minimal ist und auf Grundlage der Erfahrungen vorgenommen werden kann, die mit ähnlichen Pumpen der ABB-Atom-Siedewasserreaktoren gewonnen wurden.

### Abschliessende Bemerkungen

Das Problem für die Kernenergie besteht in der negativen Vorstellung der

Öffentlichkeit über ihre Sicherheit, mit der Folge, dass die Technik übermässig kompliziert und/oder politisch als nicht mehr vertretbar angesehen wird. Wir in der kerntechnischen Industrie wissen, dass diese Vorstellung ungerichtet ist und dass wir fähig sind, in Zukunft Unfälle zu vermeiden. Indes, «Three Mile Island» und «Tschernobyl» sind Tatsachen.

Soll unsere Reaktortechnologie geändert werden, um der Besorgnis der Öffentlichkeit Rechnung zu tragen, und wenn ja, wie?

Diese Frage wird in verschiedenen Ländern unterschiedlich beantwortet. In Frankreich, zum Beispiel, ist die Antwort darauf heute sicherlich ein Nein, während es in Italien ein Ja ist. Eine Antwort wie die von Italien scheint auch ein Gebot für das Wiederaufleben der nuklearen Option in den USA zu sein.

Die Haltung von ABB ist, dass wir in Zukunft eine Reaktortechnik anwenden sollten, die weltweit sicherstellt, dass es nirgendwo einen ernsthaften Reaktorunfall gibt – dies wegen der internationalen Auswirkungen, die solche Unfälle haben würden. Wir meinen, dass wir mit PIUS diesem Ziel zumindest sehr nahe sind. Zusammenfassend kann der gegenwärtige Stand von PIUS wie folgt beschrieben werden:

– Es bestehen keine Probleme hinsichtlich der technischen Machbarkeit,

die einer Verwirklichung von PIUS als praktikables Leistungsreaktor-Konzept im Wege stehen würden.

- Die Stromerzeugungskosten mittels eines PIUS-Reaktors im Leistungsbe- reich von 600 bis 700 MWe und dar- unter werden nach den Schätzungen niedriger sein als solche in herkömm- lichen Leichtwasserreaktoren, weil Vereinfachungen der Anlagen mög- lich sind.
- Analytische Arbeiten, unterstützt durch Überprüfungen in Grossepe- rimenten, unterstreichen die Be- hauptung, dass im Hinblick auf das Risiko von schweren Unfällen mit bedeutenden Belastungen der Um- welt, PIUS ein «narrensicherer» Reaktor ist.
- Ernsthafte Probleme hinsichtlich Be- trieb und Wartung sind nicht zutage getreten.

Die Zeit ist jetzt reif für die Entschwei- dung zum Bau einer Demonstrations- anlage, die zu Ende der 90er Jahre ihren Betrieb aufnehmen könnte.

Adresse des Verfassers: Kåre Hannerz, ABB Atom AB, Reactor Division, SECURE Pro- ject, S-721 63 Västerås, Schweden.

## Ideelle Wärmeleitfähigkeit

Wirkung von Dämmplatten bei hinterlüfteten Fassaden

**Hinterlüftete Fassadensysteme gelten landläufig als bauphysikalisch sicherste und konsquenteste Aussenwandkonstruktionen. Die bauliche Trennung der Funktionen «Dichten-Dämmen-Tragen» reduziert das Schadenrisiko gegenüber einschaligen, mehrschichtigen Fassadenkonstruktionen ganz erheblich.**

Die höheren Investitionskosten für die hinterlüftete Aussenwand werden dank statistisch belegter längerer Lebens-

VON HEINZ BANGERTER,  
KLOTEN

dauer und geringerer Jahreskosten für Reparaturen und Fassadenunterhalt mehr als kompensiert.

Die qualitativen Zusammenhänge und Funktionen einer hinterlüfteten Fassa- de können nach Abbildung 1 darge- stellt werden. Jedem Element der Ge- samtkonstruktion kommt demnach eine definierte, «primäre» Hauptfunk- tion zu. Hierbei erbringt die eingebaute

Wärmedämmschicht selbstverständlich und definitionsgemäss die Hauptlei- stung an die Wärmeschutzfunktion der Fassade. Die Dämmschicht wird dabei in ihrer Wirkung mehr oder weniger unterstützt durch den spezifischen Wärmedurchlasswiderstand der Innenschale, durch das konstruktionsbeding- te Verhalten der Belüftungsebene und indirekt sogar durch die Art und konstruktive Ausbildung der Aussenschale (vgl. Bild 1).

Beim wärmetechnischen Vergleich ver- schiedener hinterlüfteter Fassadensy- steme ist somit von Interesse, wieweit sich die «passiven Sekundärfunktionen» einer Innenschale, einer Belüf-

tungsebene oder der dem Wetterschutz dienenden Aussenschale auf den Wär- medurchlasswiderstand der eigentli- chen Dämmschicht, bzw. auf deren rechnerischen  $\lambda$ -Wert, auswirken. Weil diese Einflüsse ihrerseits weitgehend von der Art des verwendeten Dämm- stoffes vorbestimmt sind, ist es zweck- mässig und gerechtfertigt, den Begriff einer systembedingten «ideellen Wär- meleitfähigkeit»  $\lambda_{id}$  des verwendeten Dämmstoffes einzuführen.

Der nach Norm SIA 279 zu verwenden- de  $\lambda$ -Rechenwert ( $\lambda_r$ ) je nach Dämm- stoff-Art wird mit den entsprechenden Koeffizienten zur Ermittlung der ideellen Wärmeleitfähigkeit eingesetzt (vgl. Kästchen). Auf eine mathematische Herleitung der genannten Koeffizien- ten wird an dieser Stelle verzichtet; die fraglichen Zusammenhänge sind in einem vertiefenden Sonderdruck zum vorliegenden Thema ausführlich be- schrieben und mit Literaturhinweisen versehen; die Publikation kann direkt über die Anschrift des Autors angefor- dert werden.