Der schnelle Reaktor : Sinn, Konzept, Sicherheit und Zukunft

Autor(en): **Wydler, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **80 (1989)**

Heft 19

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-903723

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

Der schnelle Reaktor: Sinn, Konzept, Sicherheit und Zukunft

P. Wydler

Die zentrale Bedeutung der schnellen Reaktoren für die langfristige Nutzung der Kernenergie wurde schon in der Anfangszeit der Kerntechnik erkannt. Die Entwicklung dieser Reaktoren verlief wegen der anspruchsvolleren Technologie weniger rasch als die der Leichtwasserreaktoren, hat aber stetige Fortschritte gemacht. Von Anfang an wurden hohe Sicherheitsanforderungen an die schnellen Reaktoren gestellt.

L'importance décisive des réacteurs rapides pour l'utilisation à long terme de l'énergie nucléaire a été reconnue dès le début de l'ère nucléaire. A cause d'une technologie plus spécialisée, le développement de ce type de réacteurs a été moins rapide que celui des réacteurs à eau légère; pourtant il a bénéficié de progrès constants. Dès le début, les critères de sécurité imposés aux réacteurs rapides ont été de très haut niveau.

Adresse des Autors:
Peter Wydler, Dr. sc. nat., Paul-Scherrer-Institut, 5232 Villigen PSI.

Im April 1987 ist der schnelle Reaktor Superphénix in Creys-Malville durch ein Leck am natriumgekühlten Brennelementlager erstmals ins Bewusstsein der breiten schweizerischen Öffentlichkeit getreten. Über den betrieblich folgenschweren, sicherheitstechnisch aber wenig bedeutsamen Zwischenfall haben die Medien ausführlich berichtet; dabei wurde jedoch der besonderen Bedeutung dieses Reaktors für die Zukunft der Kernenergie nur geringe Aufmerksamkeit geschenkt.

Hinter dem erstmals 1986 ans Netz gekoppelten 1240-MWe-Demonstrationsreaktor Superphénix stehen eine lange Entwicklung sowie die Erfahrungen aus dem Betrieb von Versuchs- und Prototypreaktoren. Der Phénix, der 5mal kleinere Stammvater des Superphénix, liefert seit 1974 Strom und hat dabei den für einen Prototypreaktor sehr guten Lastfaktor von 62% erreicht. Einer klaren inneren Logik folgend, wird die Entwicklung des schnellen Reaktors weitergehen.

In diesem Beitrag sollen der Hintergrund, das technische Konzept, die Sicherheit und die Zukunft des schnellen Reaktors näher beleuchtet werden.

Hintergrund

Schnelle Reaktoren sind Reaktoren, in welchen die Kettenreaktion mit schnellen Neutronen aufrechterhalten wird. Im Unterschied dazu werden bei den heute gebräuchlichen Leichtwasserreaktoren (LWR) die bei der Spaltung des Kernbrennstoffs freigesetzten schnellen Neutronen durch elastische Stösse an den Wasserstoffatomen des Moderators Wasser, das in diesen Reaktoren gleichzeitig als Kühlmittel dient, zuerst abgebremst, bevor sie weitere Kernspaltungen erzeugen. Langsame Neutronen haben den Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeit für die Auslösung einer Kernspaltung grösser ist und die Kettenreaktion deshalb bei einer niedrigeren Anreicherung des Spaltstoffs aufrechterhalten werden kann. Zwei wichtige Merkmale des schnellen Reaktors sind daher das Fehlen eines Moderators und eine höhere Anreicherung des Spaltstoffs als beim LWR.

Ein wichtiger Vorteil des schnellen Reaktors ist die *bessere Neutronenökonomie*. Ein Mass dafür ist die Spaltneutronenausbeute pro absorbiertes Neutron, η. Je grösser diese materialspezifische Zahl, um so mehr Neutronen stehen für die sogenannten Konversionsprozesse zur Verfügung. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Konversion von Uran-238 zu Plutonium-239 und die Konversion von Thorium-232 zu Uran-233 durch Neutroneneinfang und anschliessenden doppelten Betazerfall. Wegen der günstigen η-Werte für schnelle Neutronen ist es möglich, mit schnellen Reaktoren mehr neuen Spaltstoff zu erbrüten als die Reaktoren selbst verbrauchen (Tabelle I). Der schnelle Reaktor wird deshalb meistens als schneller Brutreaktor (SBR) bezeichnet, obschon das Brüten bei diesem Reaktortyp keine

Reaktortyp	Pu-239	U-235	U-233
Leichtwasserreaktor	2.04	2.06	2.26
Schneller Reaktor	2.45	2.10	2.31

Tabelle I Über die Neutronengeschwindigkeit gemittelte η-Werte für die Spaltstoffe

η ist die Spaltneutronenausbeute pro absorbiertes Neutron. Ein Spaltneutron wird für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion benötigt. Ein Teil der überschüssigen Neutronen fliesst aus dem Reaktorkern aus. Die übrigen Neutronen stehen für Konversionsprozesse zur Verfügung. Am meisten Konversionsprozesse erhält man, wenn Pu-239 in schnellen Reaktoren eingesetzt wird.

Notwendigkeit ist: Im Unterschied zum normalen LWR, der immer Plutonium erzeugt, kann nämlich die Spaltmaterialproduktion beim SBR durch Vergrösserung und Verkleinerung des den Reaktorkern umgebenden Brutmantels relativ einfach so gesteuert werden, dass nur soviel Spaltmaterial entsteht, wie gerade benötigt wird.

Anderseits erfolgt die zusätzliche Charakterisierung des schnellen Reaktors als Brutreaktor zu Recht, da das Brutprinzip der Kernenergie eine *vollständig neue Dimension* erschliesst. Während ein heutiger LWR ohne Rezyklierung des Brennstoffs wegen des geringen Anteils des spaltbaren Isotops 235 nur knapp 0,5% des Natururans in Energie verwandeln kann, erreicht der SBR eine Uranausnützung von 60% (Beim SBR ist die Uranausnützung nur durch die Verluste im Brennstoffkreislauf beschränkt). Dies bedeutet nicht nur eine energetische Streckung der bekannten Uranreserven um rund zwei Grössenordnungen, sondern auch die Erschliessung der praktisch unbeschränkten Reserven in Preiskategorien, die für andere Reaktortypen zu teuer sind. Durch den SBR wird also die Kernenergie den sogenannten erneuerbaren Energiequellen (Sonne, Biomasse, Hydroelektrizität, Wind, geothermische Energie usw.) gleichgestellt.

Dass der SBR in bezug auf die Schonung der Uranreserven einen fundamentalen Durchbruch schafft, lässt sich mit folgenden Zahlen zeigen: Bis heute wurden in westlichen Kernkraftwerken rund 10 000 TWh Strom erzeugt. Zur Produktion dieser Energie wurden etwa 320 000 t Natururan verbraucht, wovon bereits im Anreicherungsprozess, der Vorstufe zur Brennelementfabrikation, 250 000 t Uran als abgereichertes Uran verlorengingen. Genutzt im SBR, entspricht allein dieser auf Halde lagernde «Abfall» einem Energievorrat, mit welchem die Kernenergie während mehr als 1000 Jahren auf dem heutigen Niveau betrieben werden kann.

Da der Uranbergbau einen nicht vernachlässigbaren Beitrag zum Gesamtrisiko der Kernenergie liefert (Radonproblem, konventionelle Gefahren des Bergbaus), hat die gute Uranausnützung des SBR auch einen Sicherheits- und Umweltaspekt. Mit der vermehrten Betrachtung von Gesamtsystemen wird die Möglichkeit eines weitgehenden Verzichts auf den Uranbergbau einen zunehmenden Stellenwert erhalten.

Technisches Konzept

Brennstoff

Der Uran-Plutonium-Brennstoffzyklus ist heute der einzige grosstechnisch entwickelte Brennstoffzyklus. Uran und Plutonium können in der Form von Metall, Oxid, Nitrid oder Karbid verwendet werden. Die ersten schnellen Versuchsreaktoren benützten Metallbrennstoff, da dieser Brennstoff einen hohen Brutgewinn ermöglicht und grosse Zuwachsraten damals im Vordergrund standen. Später traten parallel mit der technischen Reife des LWR ökonomische Überlegungen in den Vordergrund. Der Brennstoffzyklus wurde als Ganzes betrachtet, und dabei wurde die Wichtigkeit der Erreichung eines hohen Abbrandes erkannt. Die heutigen schnellen Reaktoren benützen daher Oxidbrennstoff. Für eine zukünftige Generation von Reaktoren wird in Europa vor allem der Nitridbrennstoff und in den USA ein verbesserter Metallbrennstoff entwickelt.

Kühlmittel

Als Kühlmittel mit geringem Moderationseffekt kommen Flüssigmetalle und Gase in Frage. Da die Optimierung des Reaktorkerns zu einer wesentlich höheren Leistungsdichte als beim LWR führt, stand von Anfang an die Flüssigmetallkühlung im Vordergrund. Parallel dazu wurde in den sechziger und siebziger Jahren – unter anderem in der Schweiz – auch die Heliumkühlung verfolgt. Diese hat sich jedoch nicht durchsetzen können. Mit den Flüssigmetallen Quecksilber und Natrium sowie einer eutektischen Mischung von Natrium und Kalium, die im Unterschied zu Natrium bei Normaltemperatur noch flüssig ist, wurden in einer grösseren Anzahl von Versuchs- und Testreaktoren Erfahrungen gesammelt. Wegen der notwendigen hohen Pumpenleistung scheiden schwerere Metalle als Kühlmittel für grosse Leistungsreaktoren aus. Aus Kosten- und Sicherheitsgründen wurde schliesslich dem reinen Natrium der Vorzug gegeben. Folglich sind sämtliche sich im Betrieb, im Bau oder in der Planung befindenden schnellen Prototyp- und Demonstrationsanlagen (Tabelle II) natriumgekühlt.

Kreisläufe

Die Verwendung von Natrium hat für die Konstruktion der Kühlkreisläufe wichtige Konsequenzen. Ein klarer Vorteil des Natriums ist sein hoher Siedepunkt von 880°C, der eine praktisch drucklose Auslegung der Natriumkreisläufe erlaubt. Typisch für den SBR sind deshalb die relativ dünnwandigen Leitungen und Behälter. Anderseits erfordert die Reaktionsfreudigkeit des Natriums mit Luft und Wasser besondere konstruktive Massnahmen wie die doppelwandige Aus-

Land	Anlage	Leistung MWe brutto	Bauart	1. Kritikalität
Prototypreaktoren				
UdSSR	BN-350	130 [1]	Loop	Nov. 72
	BN-600	600	Pool	Feb. 80
F	Phénix	254	Pool	Aug. 73
UK	PFR	270	Pool	März 74
BRD [2]	SNR-300	327	Loop	[3]
Japan	Monju	280	Loop	im Bau
Indien	PFBR	500	Pool	
Kommerzielle Demonstrationsreaktoren				
Europa	Superphénix	1240	Pool	Sept. 85
	EFR	1520	Pool	
UdSSR	BN-800	800	Pool	im Bau
	BN-1600	1600	Pool	
Japan	DFBR	1000		
USA	Prism	9×140	Pool	

Tabelle II Schnelle Prototyp- und Demonstrationsreaktoren

[1] 700 MWth inkl. Meerwasserentsalzung (ursprünglich projektiert: 1000 MWth)
[2] mit Beteiligung von Belgien und den Niederlanden
[3] von politischen Bedingungen abhängig

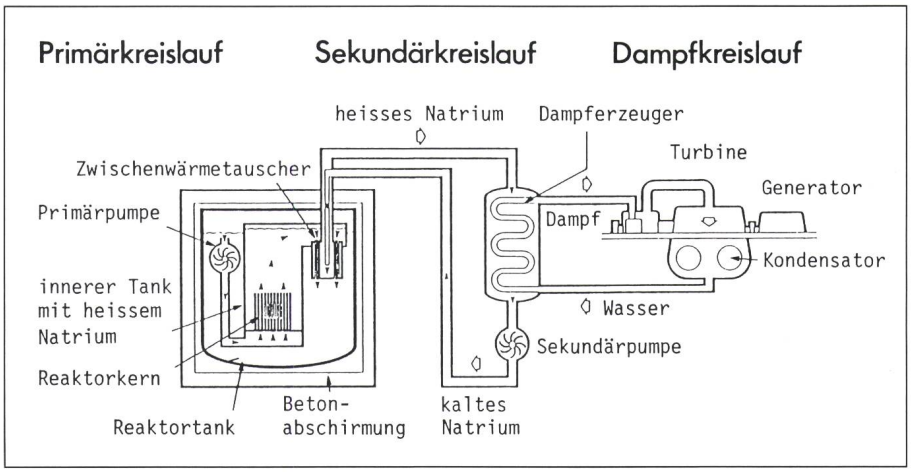
führung von Komponenten, die Inertisierung von Zwischenräumen mit einem Schutzgas und die Trennung des Dampfkreislaufs vom Primärkreislauf durch einen nicht-radioaktiven Zwischenkreislauf (Figur 1). Dies trägt natürlich dazu bei, dass natriumgekühlte Reaktoren tendenziell teurer als wassergekühlte Reaktoren sind.

Für die Anordnung der Komponenten kommen zwei verschiedene Konzepte zur Anwendung. Beim sogenannten *Loop-Konzept,* das z.B. beim deutschen Prototypreaktor SNR-300 in Kalkar zum Zuge kommt, sind die Komponenten ähnlich wie beim Druckwasserreaktor angeordnet, d.h. die Pumpen und Wärmetauscher sind vom Reaktorbehälter getrennt und mit diesem durch Leitungen verbunden. Dagegen werden beim *Pool-Konzept,* das erstmals 1963 mit dem amerikanischen Versuchsreaktor EBR-II verwirklicht wurde, sämtliche Komponenten des Primärkreislaufs in einem grossen Reaktortank ohne Durchführungen untergebracht (sämtliche Durchführungen erfolgen durch den Deckel des Tanks). Dies erfordert zwar einen grösseren Reaktorbehälter, hat aber die Vorteile, dass die gesamte Radioaktivität in diesem Behälter eingeschlossen ist und ein Kühlmittelverlustunfall praktisch ausgeschlossen werden kann. Eine Bilanz der herstellungstechnischen, betrieblichen, sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Aspekte ergibt keinen signifikanten Vorteil für eines der beiden Konzepte. Es zeichnet sich jedoch – vor allem in Europa – ab, dass sich schliesslich das Pool-Konzept, auf welchem auch der Superphénix beruht, durchsetzen wird (Fig. 2).

Der Dampfkreislauf des SBR ist im wesentlichen derselbe wie beim LWR. Die hohe Kühlmittelaustrittstemperatur des natriumgekühlten Reaktors von etwa 550 °C (Druckwasserreaktor etwa 330 °C) ergibt jedoch bessere Dampfparameter und einen höheren thermischen Wirkungsgrad (LWR etwa 33%, SBR bis zu 45%).

Regelung

Schnelle Reaktoren werden, wie andere Reaktoren, mit Stäben aus neutronenabsorbierenden Materialien geregelt. Im Normalbetrieb ist das Reaktorverhalten ausschliesslich durch die verzögerten Neutronen bestimmt. Diese entstehen im Anschluss an den radioaktiven Zerfall bestimmter Spaltprodukte und sind mit der Halbwertszeit τ dieser Spaltprodukte gekoppelt.



Figur 1 Die Kühlkreisläufe eines natriumgekühlten schnellen Reaktors

Die schematische Darstellung zeigt die Kühlkreisläufe eines natriumgekühlten schnellen Reaktors. Durch die Verwendung eines Sekundär- oder Zwischenkreislaufs wird eine chemische Reaktion zwischen dem radioaktiven Natrium des Primärkreislaufs und dem Wasser des Dampfkreislaufs im Falle eines Lecks im Dampferzeuger verhindert. Der zusätzliche Kreislauf ermöglicht eine Anordnung, bei welcher alle radioaktiven Stoffe im Reaktortank eingeschlossen sind (sogenanntes Pool-Konzept). Beim Superphénix gibt es vier parallele Kühlkreisläufe.

Der Anteil der verzögerten Neutronen, β, an den bei der Spaltung insgesamt erzeugten Neutronen hängt vom Brennstoff ab; er ist bei Plutoniumbrennstoff etwa halb so gross wie bei Uranbrennstoff. Für kleine Reaktivitätsänderungen ϱ[1] verhält sich die zeitliche Änderung der Reaktorleistung proportional zu ρ/β und umgekehrt proportional zu τ. Die Reaktoren reagieren träg, weil τ – praktisch unabhängig von der Neutronengeschwindigkeit – im Mittel rund 10 s beträgt.

Bei einem Vergleich der Regeleigenschaften des SBR und des LWR müssen neben dem (für Plutoniumbrennstoff ungünstigeren) β-Wert auch die durch die Regelstäbe zu kompensierenden Reaktivitätsänderungen berücksichtigt werden. Diese sind stark von der Neutronengeschwindigkeit abhängig und beim SBR so viel geringer, dass ρ/β eher günstiger ist als beim LWR. Entgegen einer weitverbreiteten Meinung müssen deshalb schnelle Reaktoren *nicht rascher* geregelt werden als Leichtwasserreaktoren.

Zur Erhöhung der Abschaltsicherheit werden beim SBR unabhängige und konstruktiv unterschiedliche Abschaltsysteme verwendet. An diese Systeme werden jedoch wegen der oben beschriebenen Zusammenhänge keine erhöhten Anforderungen in bezug auf die Abschaltgeschwindigkeit gestellt.

[1] Als Reaktivitätsänderung wird die relative Änderung des Neutronenmultiplikationsfaktors bei der Kettenreaktion bezeichnet.

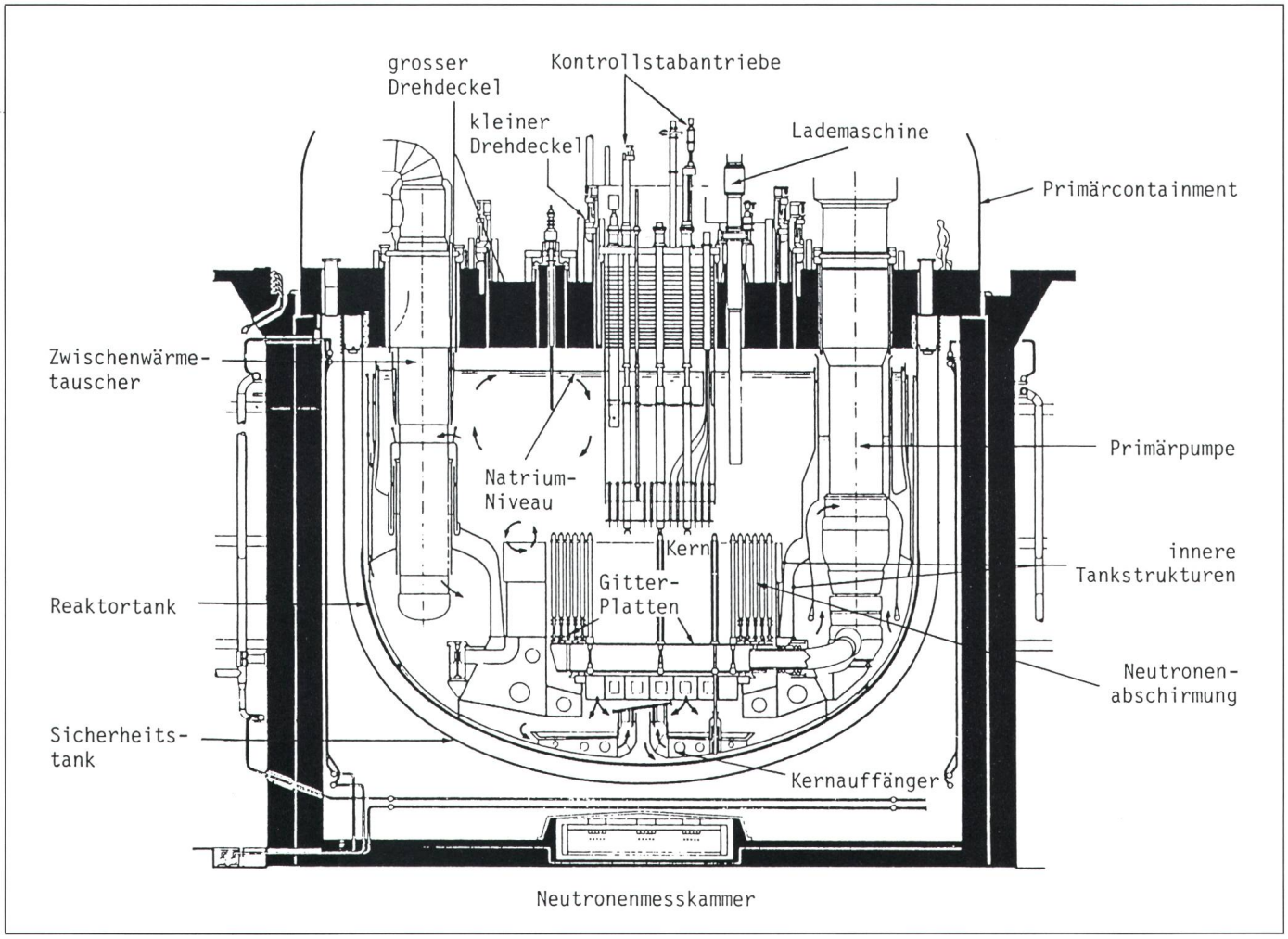
Sicherheit

Vorteile und Nachteile im Vergleich zum LWR

Von einem neuen Reaktortyp wird erwartet, dass er im Vergleich mit den existierenden Reaktoren, d.h. den Leichtwasserreaktoren, auch einen Fortschritt hinsichtlich der Sicherheit bringt. Die folgende Gegenüberstellung von sicherheitstechnischen Vor- und Nachteilen zeigt, dass der SBR insgesamt ein gutes Sicherheitspotential hat.

Die wichtigsten sicherheitstechnischen Vorteile von natriumgekühlten Reaktoren sind der *niedrige Druck* und die *guten Nachwärmeabfuhreigenschaften*. Wegen des niedrigen Drucks kann ein plötzlicher grösserer Kühlmittelverlust ausgeschlossen werden. Der SBR benötigt deshalb keine eigentlichen Notkühlsysteme wie der LWR, sondern nur Nachwärmeabfuhrsysteme. Die Nachwärme kann ohne Sieden des Kühlmittels rein passiv durch die natürliche Konvektion des Natriums abgeführt werden, wodurch ein Kernschmelzen infolge des Versagens der Nachwärmeabfuhr praktisch unmöglich ist.

Sicherheitstechnisch weniger günstig ist die im ersten Abschnitt begründete höhere Anreicherung des Spaltstoffs. Diese bedeutet, dass der Reaktorkern *nicht im reaktivsten Zustand* ist und Materialbewegungen im Kern unter Umständen zu einer Leistungsexkursion führen können. Der positive



Figur 2 Anordnung des Primärkreislaufs beim Pool-Konzept am Beispiel des Superphénix

Void-Effekt[2], d.h. die Zunahme der Reaktivität beim Auftreten von Blasen im Kern, steht mit dieser Eigenschaft in direktem Zusammenhang. Ein reaktivitätsinduzierter Kernzerstörungsunfall – auch unter dem Namen Bethe-Tait-Unfall bekannt – kann allerdings nur in Verbindung mit einem vollständigen Abschaltversagen eintreten. Zur Vermeidung von kernzerstörenden Unfällen benötigt der SBR daher vor allem zuverlässige Abschaltsysteme (siehe oben). Wegen des grossen Siedeabstandes (Differenz zwischen der Siede- und Betriebstemperatur des Natriums) von rund 350 °C bedeutet der positive Void-Effekt nicht, dass ein SBR im Betrieb instabil ist. Aus grundlegenden reaktorphysikalischen Gründen ist sogar das Gegenteil der Fall, und diesbezügliche Vergleiche mit dem Tschernobyl-Reaktor sind deshalb falsch.

Ein sicherheitstechnischer Nachteil ist natürlich auch die *chemische Reaktionsfreudigkeit des Natriums*. Diese erfordert besondere konstruktive Massnahmen, wie sie bereits weiter oben erläutert wurden. Bei einem Pool-Reaktor kann ein grösserer Austritt von radioaktivem Natrium aus dem Primärkreislauf ausgeschlossen werden. Nicht auszuschliessen sind ein Austritt von Natrium aus den Sekundärkreisläufen und Natrium-Wasser-Reaktionen in den Dampferzeugern. Dafür ist die Anlage jedoch ausgelegt. Als Gegenmassnahme ist vor allem eine rasche Entleerung der Kreisläufe vorgesehen. Für die Bekämpfung von Natriumbränden stehen spezielle, in Grossversuchen geprüfte Löschmethoden zur Verfügung. Da das Natrium in den Sekundärkreisläufen nicht radioaktiv ist, können diese Ereignisse nicht zu einer radioaktiven Freisetzung führen.

Risiko

Quantitative Abwägungen von sicherheitstechnischen Vor- und Nachteilen werden im Rahmen von Risikobetrachtungen durchgeführt. In diesem Zusammenhang besonders interessant ist die «Risikoorientierte Analyse zum SNR-300» der deutschen Gesellschaft für Reaktorsicherheit, da diese Studie auf denselben Methoden wie die «Deutsche Risikostudie für Leichtwasserreaktoren» beruht. Zwei wichtige Folgerungen aus diesen Studien sind:

- Die schwersten hypothetischen Unfälle eines SBR und eines LWR führen zu radioaktiven Freisetzungen mit vergleichbaren Konsequenzen. Diese Unfälle sind aber beim SBR noch unwahrscheinlicher als beim LWR.

- Sowohl beim SBR wie beim LWR rührt der dominante Beitrag zum Gesamtrisiko von kleineren, aber wesentlich häufigeren Unfällen her.

[2] Als Void-Effekt oder Blaseneffekt bezeichnet man die Änderung der Reaktivität bei Blasenbildung. Beim LWR ist er negativ, d.h. die Reaktivität nimmt bei Blasenbildung ab, beim SBR zu.

Die Risikostudien ergeben also, dass der SBR *mindestens so sicher* ist wie der LWR. Verschiedene Gründe sprechen dafür, dass dies für alle modernen schnellen Reaktoren gültig ist.

Zu den Argumenten der Kritiker

Viele Kritiker des SBR sind prinzipielle Gegner der Kernenergie. Sie bekämpfen den SBR nicht in erster Linie deshalb, weil sie ihn als unsicher betrachten, sondern weil er der Schlüssel für die langfristige Nutzung der Kernenergie ist. Auf der technischen Ebene bemängeln sie, dass schwere hypothetische Unfälle wie der Bethe-Tait-Unfall nicht mit streng wissenschaftlichen und absolut konservativen Methoden beurteilt werden. Im weiteren wird der Wert von Risikostudien grundsätzlich in Frage gestellt mit der Begründung, dass die darin enthaltenen Wahrscheinlichkeitsaussagen rein subjektiv sind. Schliesslich wird behauptet, dass durch das Plutonium ein Gefahrenpotential mit ganz neuen Dimensionen entsteht.

Es trifft zu, dass bei Analysen von hypothetischen Unfällen im Bereich des Restrisikos eine Modellierung im Sinne einer besten Schätzung[3] als genügend erachtet wird. Dies ist aber nicht nur in der Reaktorsicherheit, sondern bei allen Risiken – auch in den nichttechnischen Bereichen wie zum Beispiel der Medizin – so. Eine generelle Forderung nach absoluter Konservativität würde jeden Fortschritt verhindern und damit indirekt Gefahren erzeugen, die sehr viel grösser sind als diejenigen, die den Ausgangspunkt zu dieser Forderung bildeten. Wie bereits erwähnt, ist beim SBR vor allem die Abschaltsicherheit wichtig. Bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit eines Abschaltversagens greift man auf statistische Daten – unter anderem aus dem Betrieb der Prototypreaktoren – zurück. Der generelle Vorwurf eines rein subjektiven Vorgehens ist also unberechtigt.

Grössere Mengen von Plutonium sind auch im Kern des LWR enthalten. Wird das im LWR erzeugte Plutonium in diesem rezykliert, wie das heute als sinnvoll betrachtet und auch in schweizerischen Reaktoren in zunehmendem Mass praktiziert wird, haben die Plutoniuminventare des LWR und des SBR etwa dieselbe Toxizität. Bei schweren hypothetischen Unfällen müssen die Auswirkungen des Plutoniums zwar berücksichtigt werden, sie sind aber insgesamt nur von untergeordneter Bedeutung. Die Ergebnisse der Risikostudien sind deshalb auch hinsichtlich des Plutoniums nicht überraschend.

Ausblick

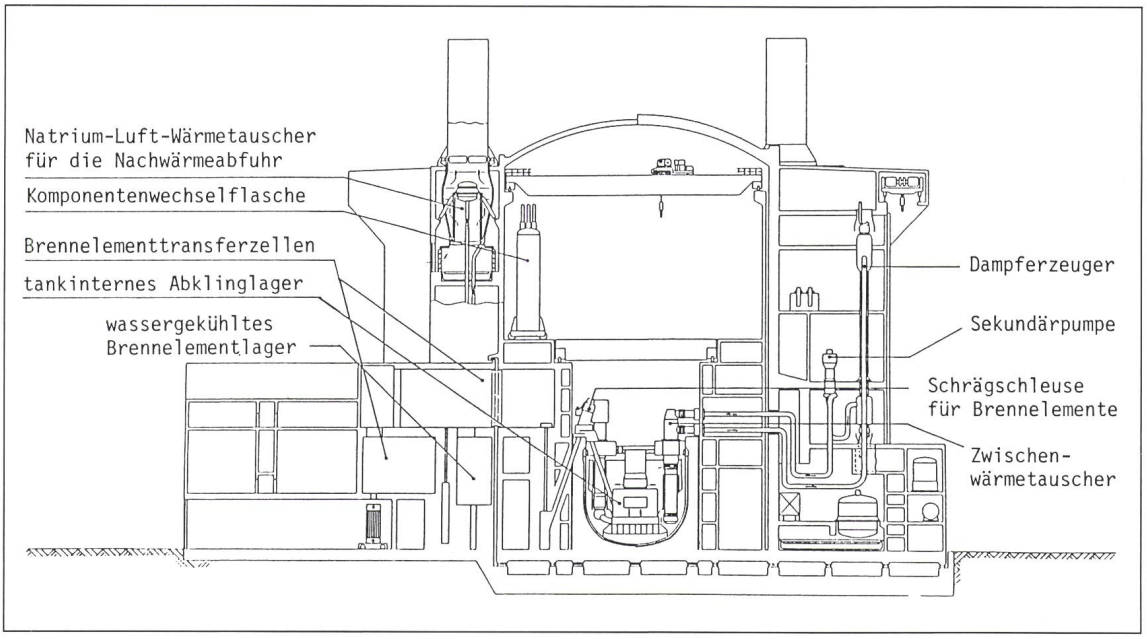
Die heutige Situation zeichnet sich dadurch aus, dass die zentrale Bedeutung des SBR in der Kerntechnik zwar allgemein anerkannt ist, aus politischen und wirtschaftlichen Gründen im Augenblick jedoch ein Anreiz für eine rasche Einführung dieses Reaktortyps fehlt. Wirtschaftlichkeitsrechnungen zeigen, dass die tendenziell höheren Investitionskosten des SBR durch niedrigere Brennstoffzykluskosten ausgeglichen werden können. Das ist aber erst längerfristig mit dem Bau von grösseren Wiederaufbereitungsanlagen für Schnellbrüterbrennstoff möglich, und dafür fehlt eben heute der politische Wille. Die an der SBR-Entwicklung beteiligten Länder haben sich durch eine längerfristige Ausrichtung ihrer Programme und eine verstärkte internationale Zusammenarbeit dieser Situation angepasst.

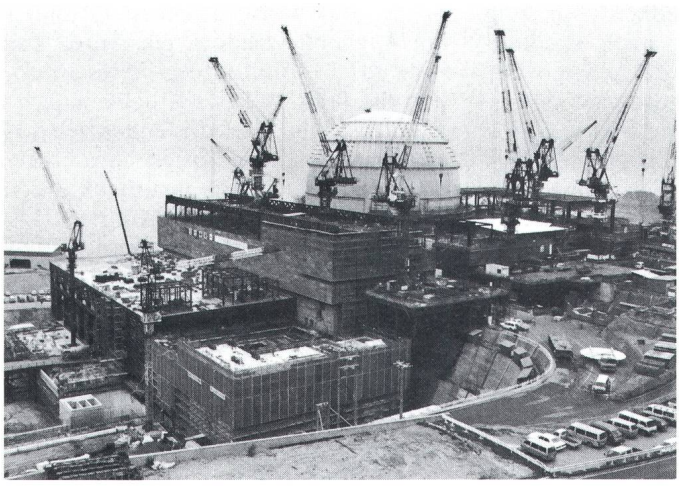
In Europa erfolgt die Weiterentwicklung des SBR unter einem im Jahr 1984 von Belgien, der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Grossbritannien und Italien unterzeichneten Rahmenvertrag. Das Ziel ist die gemeinsame Entwicklung des *European Fast Reactor* (EFR). Der EFR wird von der European Fast Reactor Utility Group (Efrug), einer Arbeitsgemeinschaft der wichtigsten europäischen Stromversorgungsunternehmen, unterstützt und soll in allen Partnerländern genehmigungsfähig sein. Durch den Abschluss von konkreten Forschungs- und Entwicklungs-, Industrie- und Kenntnisverwertungsverträgen am 16. Februar 1989 hat diese Entwicklung starke zusätzliche Impulse erhalten.

Mit dem EFR (Figur 3) wird die Entwicklungslinie der *grossen Pool-*

[3] Bei Analysen im Sinne einer besten Schätzung werden für die benötigten Parameter Mittelwerte anstelle von konservativen Grenzwerten verwendet.

Figur 3
Der EFR, das nächste Projekt für einen grossen Pool-Reaktor in Europa





Figur 4
Der japanische Monju, ein Prototypreaktor nach dem Loop-Konzept
Aufnahme vom 24. Oktober 1988, dem Tag des Einbaus des Reaktortanks

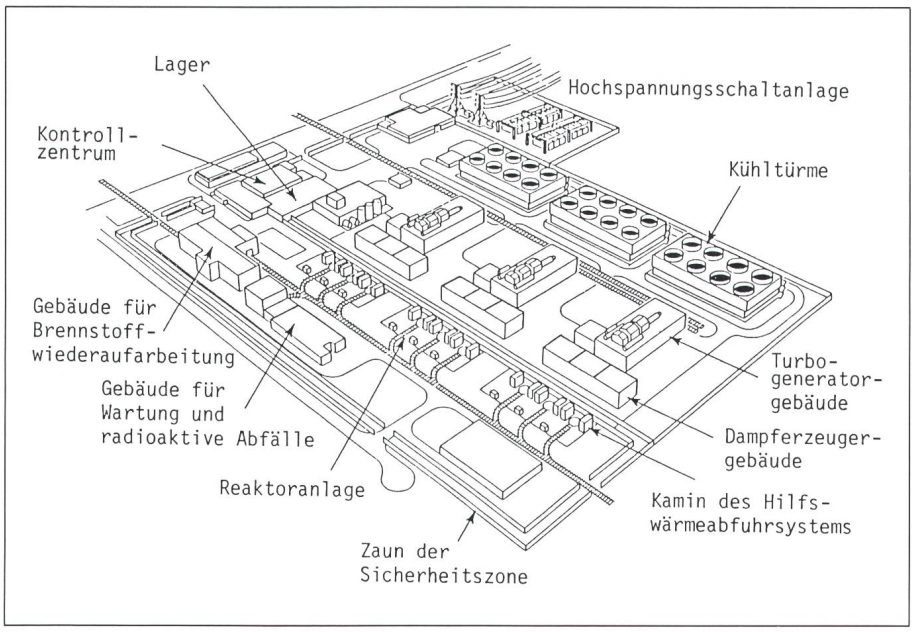
Reaktoren konsequent weitergeführt. Einige ins Auge gefasste Änderungen gegenüber dem Superphénix sind eine etwas höhere Leistung bei einem etwas kleineren Reaktortank, drei anstelle von vier Zwischenkreisläufen, eine direkte Nachwärmeabfuhr mit Naturkonvektion und einfachere Einrichtungen für die Brennstoffmanipulation (kein natriumgekühltes Brennelementlager). Durch diese und andere konstruktive Massnahmen sowie den koordinierten Einsatz des gemeinsamen Know-hows scheint es möglich, auf dem Weg zu den gesteckten Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitszielen einen bedeutenden Schritt zu machen.

Eine evolutionäre Entwicklung wird auch in Japan und der UdSSR verfolgt. In Japan befindet sich der 280-MWe-Prototypreaktor Monju (Figur 4) in einem fortgeschrittenen Bauzustand, und in der UdSSR wurde mit dem Bau eines BN-800 (800 MWe) begonnen. In Planung befinden sich ein 1000-MWe-Demonstrationsreaktor in Japan und ein BN-1600 in der UdSSR. Am Anfang einer ähnlichen Entwicklung steht auch Indien, das 1985 den 15-MWe-Testreaktor FBTR in Betrieb genommen hat.

Einen ganz anderen Weg haben seit einigen Jahren die USA mit den *Modulreaktoren,* d.h. kleinen, standardisierten Reaktoren mit erhöhter passiver Sicherheit, eingeschlagen. Die Motivation für diese Entwicklung ist die Überwindung der dortigen nun gut zehn Jahre alten Kernenergiekrise mit innovativen Ideen. Die Vertreter dieser innovativen Linie glauben, dass sie die tendenziell höheren Stromgestehungskosten der kleineren Anlagen durch Einsparungen bei den Investitions- und Brennstoffzykluskosten in den Griff bekommen können. Die höhere passive Sicherheit ermöglicht im Prinzip eine Vereinfachung der Systeme und eine Reduktion der Anforderungen an diese Systeme, und die kleineren Komponenten können in der Fabrik billiger hergestellt werden.

Nach einer Evaluation von verschiedenen Varianten konzentriert sich die amerikanische Entwicklung heute auf den vom US Department of Energy unterstützten Power Reactor Inherently Safe Module *(Prism).* Eine typische Prism-Anlage (Figur 5) setzt sich aus 9 Modulreaktoren, 9 Dampferzeugern und 3 Turbogeneratoren zusammen, die insgesamt 1245 MWe leisten. Charakteristisch für den Prism sind eine besonders gute Selbststabilisierung des Reaktorkerns und ein nicht abschaltbares, rein passives Hilfswärmeabfuhrsystem, dank welchen die Erwärmung des Natriums auch im äusserst unwahrscheinlichen Fall des Versagens aller aktiven Wärmeabfuhrsysteme und aller Kontrollstäbe in ungefährlichen Grenzen gehalten werden kann. Heute existiert der Prism allerdings nur auf dem Papier. Die Befürworter der evolutionären Entwicklung, wie sie zum Beispiel beim EFR verfolgt wird, bezweifeln die Wirtschaftlichkeit der kleinen Modulreaktoren und sind davon überzeugt, dass grosse schnelle Reaktoren ebenso sicher sind wie die Modulreaktoren.

In der Schweiz besteht die paradoxe Situation, dass man sich einerseits für alle Varianten der Hochtechnologie sehr interessiert, über die SBR-Entwicklung aber nur schlecht informiert ist. Der Grund dafür ist das geringe Interesse für diesen Reaktortyp in der schweizerischen Industrie. Die grossen kerntechnischen Entwicklungen werden in Zukunft mehr und mehr überregional erfolgen. Kleine Länder können die grossen Linien dieser Entwicklung nicht beeinflussen, haben aber die Möglichkeit, im Rahmen von internationalen Projekten mit dabei zu sein. Anderseits hat jedes Land natürlich auch das Recht, sich von bestimmten Entwicklungen zu distanzieren. Allerdings kann es dann passieren, dass man gelegentlich von den Nachbarn «umfahren» wird, wie das in jüngster Zeit bei der Planung der europäischen Schnellbahnen zu beobachten ist.



Figur 5 Anordnung einer Prism-Anlage mit 9 Modulreaktoren