

# Kernkraftwerke mit Hochtemperaturreaktoren

Autor(en): **Röhler, E. / Rotterdam, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

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

Heft 38

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77168>

## **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.

## Fortschrittliche Kernreaktoren

# Kernkraftwerke mit Hochtemperaturreaktoren

**Am 1. Juni 1987 wurde das 300-MW-THTR-(Thorium-Hochtemperatur-Reaktor-)Kernkraftwerk in Hamm-Uentrop, Nordrhein-Westfalen, an den Betreiber übergeben. Die erfolgreiche Inbetriebnahme des THTR-300 ist ein Meilenstein für die Markteinführung des Kugelbett-Hochtemperaturreaktors. Hiermit steht für die Energieversorgung ein neuer Reaktortyp zur Verfügung, der besondere Sicherheitseigenschaften besitzt und über die Stromerzeugung hinaus auf dem gesamten Wärmemarkt eingesetzt werden kann.**

### Entwicklung des Kugelbett-Hochtemperaturreaktors

Der Hochtemperaturreaktor (HTR) wurde in der Bundesrepublik Deutschland als Kugelbettreaktor seit mehr als

VON E. RÖHLER UND  
R. ROTTERDAM,  
MANNHEIM

30 Jahren von Asea Brown Boveri mit ihrer Tochtergesellschaft Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH (HRB) entwickelt. Die Firmengruppe Siemens/Interatom beteiligt sich an dieser Ent-

wicklung seit 1973, zusammen mit anderen Industriepartnern, insbesondere auf dem Anwendungsgebiet der Prozesswärmeerzeugung. Die Kernforschungsanlage Jülich erbrachte wesentliche Beiträge im Bereich der Forschung und Entwicklung. Die Entwicklung des Hochtemperaturreaktors in der Bundesrepublik Deutschland wurde massgeblich vom Bundesminister für Forschung und Technologie sowie vom Land Nordrhein-Westfalen gefördert.

Das erste Projekt war der Bau des 15-MW-AVR-Versuchsreaktors in Jülich, der im Auftrag der «Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor», einem Zusammenschluss kommunaler Ener-

gieversorgungsunternehmen, von der damaligen Firmengruppe BBC/Krupp errichtet wurde und 1967 in Betrieb ging (Bild 1). Dieser Reaktor hat in mehr als 20 Betriebsjahren das Prinzip des Kugelbett-Hochtemperaturreaktors erfolgreich demonstriert. Der langjährige Betrieb bei einer Kernaustrittstemperatur von 950 °C, die nur mit diesem Reaktortyp möglich ist, bewies die Eignung des HTR für die Erzeugung von nuklearer Prozesswärme. Nach dem Abschluss eines umfangreichen Versuchsprogrammes wurde der AVR-Versuchsreaktor Ende 1988 ausser Betrieb genommen.

Die positiven Ergebnisse mit dem AVR-Reaktor führten 1971 zum Bauauftrag für das 300-MW-THTR-Prototypkernkraftwerk in Hamm-Uentrop durch die Betreibergruppe Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH (HKG) an das Konsortium BBC/HRB/Nukem, wobei Nukem für die Lieferung der Brennelemente zuständig ist (Bild 2). Der THTR-300 hat seit der Aufnahme des Stromerzeugungsbetriebes, Ende 1985, bis Ende 1988 2,8 Mrd kWh erzeugt. Die vertraglich vereinbarten Leistungsdaten wurden vollumfänglich erreicht und die Auslegung des grossen Kugelbett-HTR bestätigt.

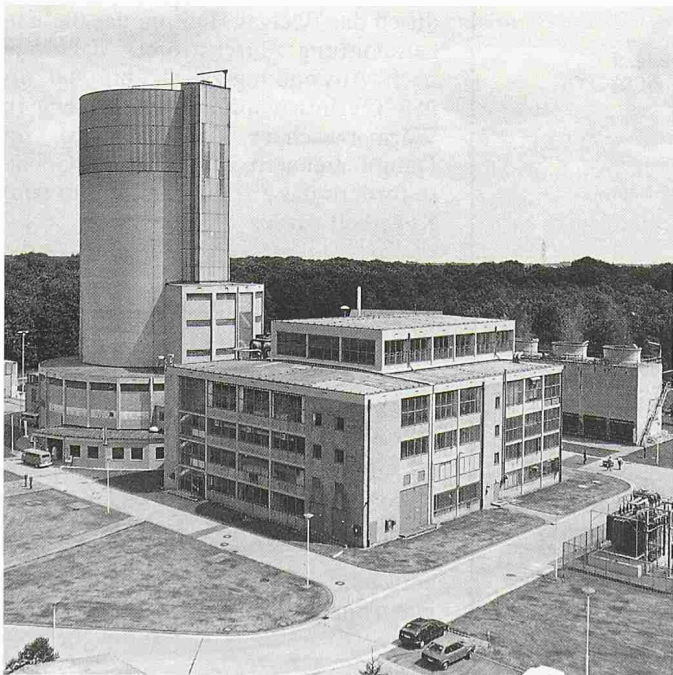


Bild 1. 15-MW-AVR-Kernkraftwerk Jülich

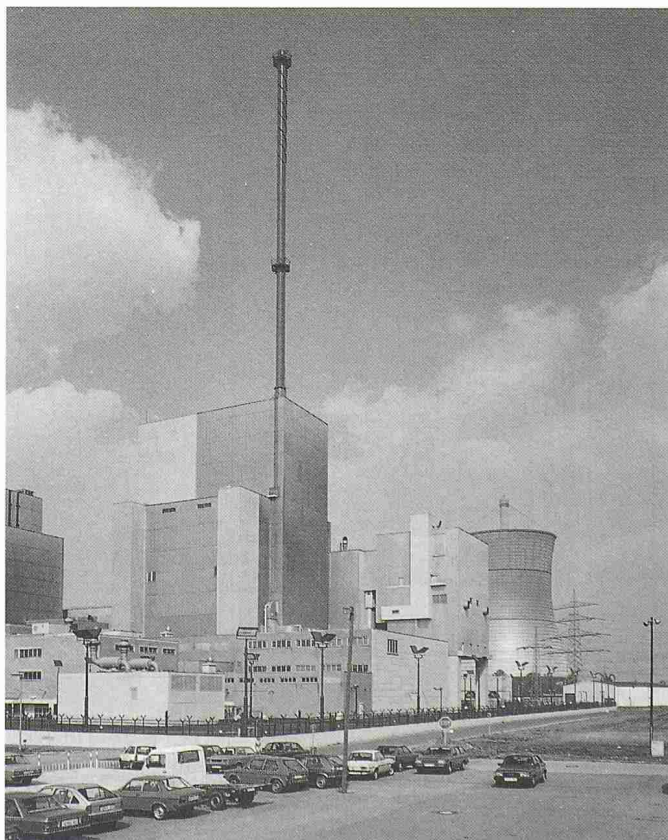


Bild 2. 300-MW-THTR-Kernkraftwerk Hamm-Uentrop

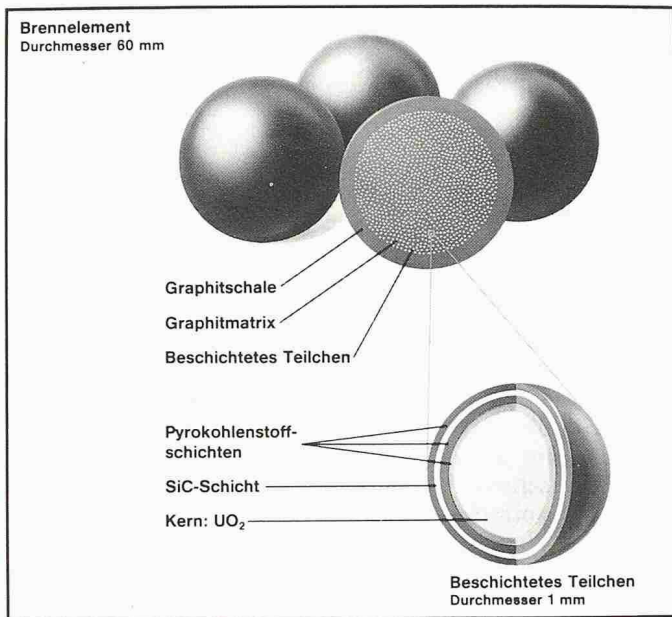


Bild 3. HTR-Brennelement und beschichtetes Teilchen

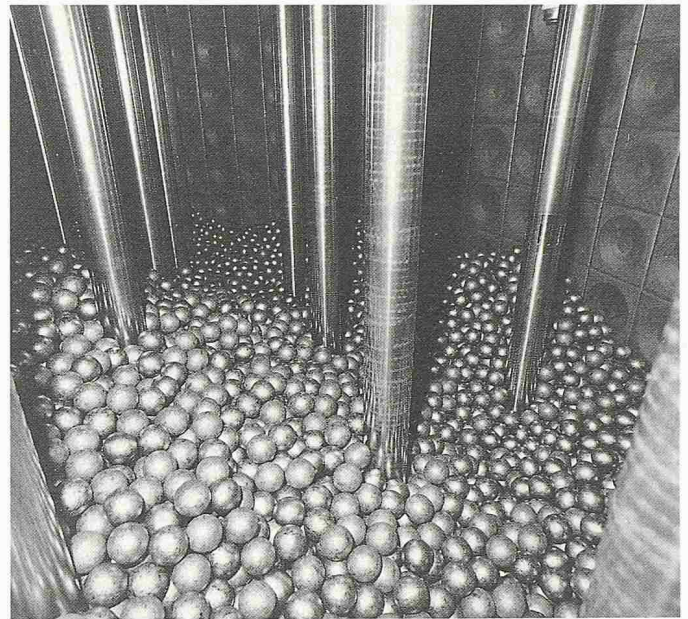


Bild 4. HTR-Reaktorkern mit eingefahrenen Abschaltstäben

**Aufbau und Wirkungsweise**

Der Kugelbett-Hochtemperaturreaktor ist ein Kernreaktor mit einfachem Aufbau. Sein charakteristisches Merkmal ist das kugelförmige Brennelement von 6 cm Durchmesser. Es besteht aus Graphit, in dem der Brennstoff Uran in Form von beschichteten Teilchen von weniger als 1 mm Durchmesser eingebettet ist (Bild 3). Die Beschichtung der Brennstoffteilchen mit Pyrokohlenstoff

und Siliziumkarbid dient der Spaltproduktückhaltung. Die nukleare Wärmequelle besteht aus einer losen Schüttung der tennisballgrossen Brennelemente. Etwa 300 000 bis 1 Million solcher Kugeln, je nach Leistungsgrösse zwischen 100 und 550 MW, bilden den Reaktorkern (Bild 4).

Bild 5 zeigt den schematischen Aufbau und die Wirkungsweise eines Hochtemperaturreaktors als Zweikreisanlage zur Strom- und Prozessdampferzeugung.

Der Reaktorkern ist von einem als Neutronenreflektor wirkenden zylindrischen Graphitaufbau umschlossen. Die Brennelemente werden während des Leistungsbetriebes kontinuierlich von oben zugegeben, durchwandern den Reaktorkern und werden schliesslich in einem oder mehreren trichterförmigen Kugelabzugsrohren durch Schwerkraft abgezogen. Sie können je nach gewähltem Brennstoffzyklus mehrfach in den Reaktorkern zurückgeführt werden oder diesen auch nur einmal durchlaufen.

Die Kühlung des Kugelbettes erfolgt durch das Edelgas Helium, das die Kugelschüttung durchströmt, dabei je nach Anwendungszweck auf 700 bis 950 °C erhitzt wird und seine Wärme in Wärmetauschern, insbesondere in Dampferzeugern, wieder abgibt. Gebläse fördern das abgekühlte Helium zum Kugelbett zurück.

Zur Regelung und Schnellabschaltung eines Kugelbettreaktors dienen Absorberstäbe, die in senkrechte Bohrungen des Seitenreflektors beziehungsweise direkt in das Kugelbett einfahren.

Alle Komponenten des Primärkreislaufs sind in einem Reaktordruckbehälter eingeschlossen. Ab einer Leistungsgrösse von 300 MW wird der Reaktordruckbehälter als Spannbetonbehälter ausgeführt; Kleinreaktoren besitzen entweder Stahldruckbehälter oder einen Spannbetonbehälter.

**Besondere Merkmale des Hochtemperaturreaktors**

Der Kugelbett-HTR besitzt folgende besondere technische und sicherheitstechnische Merkmale:

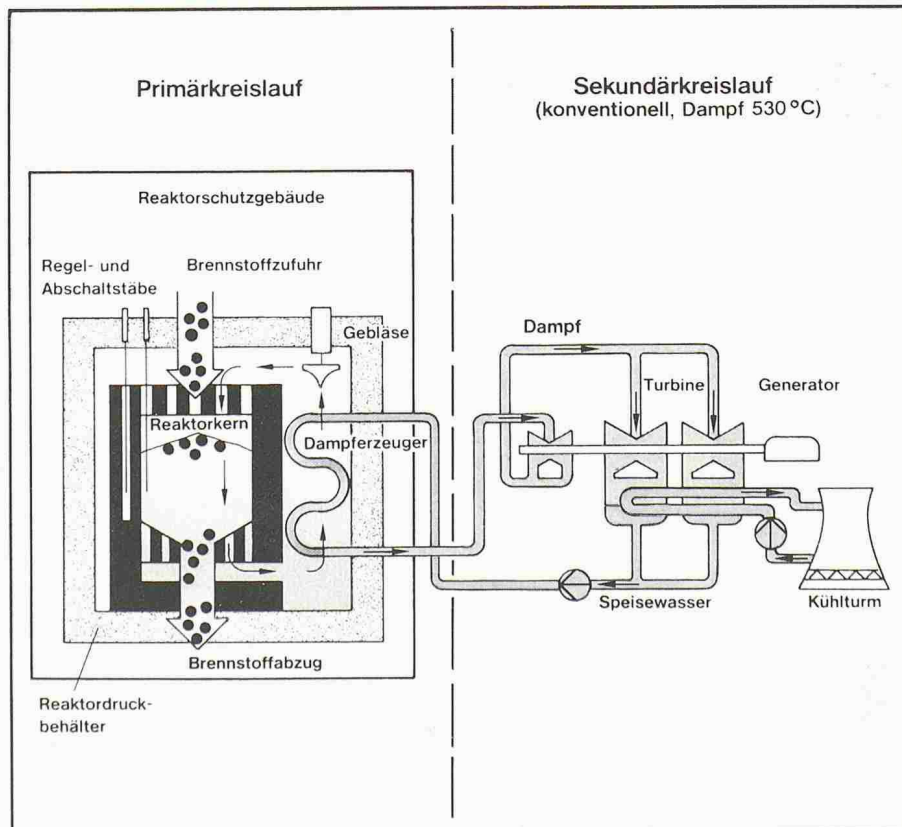


Bild 5. Kernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor

- günstige Sicherheitseigenschaften durch Nutzung passiver inhärenter Eigenschaften bei Störfällen;
- Kernschmelzen ist ausgeschlossen durch die Verwendung von keramischen anstelle von metallischen Werkstoffen für Brennelemente und Kernaufbau;
- keine Evakuierung der Bevölkerung auch bei der Betrachtung hypothetischer, d.h. wegen ihrer Unwahrscheinlichkeit nicht mehr bei der Auslegung zu berücksichtigender Störfälle notwendig;
- einfacher Betrieb, viel Zeit für die Betriebsmannschaft für operative Massnahmen bei Störungen;
- geringe Strahlenbelastung des Personals und der Umgebung;
- einfacher Brennstoffkreislauf, Entsorgung über direkte Endlagerung, d.h. keine Wiederaufbereitung erforderlich; diese ist aber möglich;
- kontinuierliche Brennelementzufuhr und -abgabe, d.h. hohe Zeitverfügbarkeit, da keine Abschaltung für Brennelementwechsel erforderlich;
- hoher thermischer Wirkungsgrad wie bei modernen konventionellen Anlagen (rund 530 °C Frischdampf-temperatur), d.h. geringe Abwärmelastung der Umgebung, Eignung für Trockenkühlung;
- neben der Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung ist Bedienung des gesamten Wärmemarktes bis zu Temperaturen von 950 °C möglich;
- wirtschaftlich konkurrenzfähige Alternative mit innovativer und fortschrittlicher Technik.

Der Kugelbett-HTR ist damit eine universell einsetzbare Energiequelle auf dem Strom- und Wärmemarkt. In den USA wird der HTR als «forgiving reactor» bezeichnet, der auf Störungen oder Fehlbedienungen auch ohne automatische Gegenmassnahmen gutmütig reagiert. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen am AVR-Reaktor und THTR-300 sowie umfassende theoretische Analysen haben gezeigt, dass die Gutmütigkeit des Hochtemperaturreaktors auch bei schwersten Störfällen erhalten bleibt.

### Der THTR-300, Referenzanlage für die HTR-Baulinie

Die Ergebnisse der umfangreichen prototypspezifischen Inbetriebnahmeversuche und die Erfahrungen im nachfolgenden Leistungsbetrieb haben die Auslegung des ersten grossen Kugelbett-Hochtemperaturreaktors bestätigt:

- Die physikalische Auslegung des Reaktorkerns und allgemein die des

grossen Kugelbettreaktors wurde endgültig nachgewiesen. Dies gilt sowohl für die Reaktivitätsbilanzen als auch für die Dynamik, die Thermodynamik und das mechanische Verhalten des Reaktorkerns. Damit sind die besonderen Betriebs- und Sicherheitseigenschaften von HTR-Anlagen und die Auslegungsgrundlagen des Kugelbett-Reaktorkerns im praktischen Betrieb demonstriert worden.

- Die hohe Aktivitätsrückhaltung der Brennelemente hat einen ausserordentlich niedrigen Aktivitätsinhalt des Kühlgases Helium und eine sehr niedrige Aktivitätsfreisetzungsrates an die Umgebung zur Folge. So betrug z.B. 1987 die rechnerisch mögliche Strahlenbelastung an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Umgebung durch Ableitung mit der Fortluft rund 0,03 mrem (Ganzkörperdosis). Dies sind 0,1% der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung. Obwohl Inspektions- und Reparaturarbeiten am Primärsystem ausgeführt wurden, betrug die *Kollektivdosis* des gesamten Reaktorpersonals nur 4,4 man rem im Jahr 1986 und 10,3 man rem im Jahr 1987. Zum Vergleich: Nach Strahlenschutzverordnung sind für eine *einzelne* beruflich strahlenexponierte Person bis zu 5 rem pro Jahr zulässig.
  - Die gemessenen und berechneten Hauptauslegungsdaten des Primär- und Sekundärkreislaufs stimmen ausserordentlich gut überein. Unterschiede bewegen sich überwiegend in einem Bereich von weniger als 1%. Die gewährleistete Kraftwerksnettoleistung von 296,5 MW wurde genau erreicht. Der thermische Wirkungsgrad beträgt 40,2% und ist damit besser als gewährleistet.
  - Die Anforderungen des Betreibers an das Lastfolgeverhalten und die Frequenzstützung des Netzes werden erfüllt.
  - Abweichungen von der Planung, wie z.B. das Fließverhalten im Reaktorkern oder das zeitweilige Auftreten von mechanisch beschädigten Brennelementen, werden durch Anpassung des Beschickungsprogramms bzw. der Abschaltverfahren beherrscht. Die Förderkapazität der Beschickungsanlage wurde durch Änderungen an besonderen Anlageteilen den Anforderungen angepasst.
- Im Rahmen der jährlichen Revisionsarbeiten am THTR-300 wurden Beschädigungen an einigen Befestigungselementen der Wärmeisolierung in den Heissgaskanälen festgestellt. Die Schadensanalyse führte zu dem Ergebnis, dass keine betriebstechnischen oder sicherheitstechnischen Bedenken gegen eine Wieder-

aufnahme des Leistungsbetriebes bestehen. Der Weiterbetrieb hängt zurzeit von der Möglichkeit zur Finanzierung der allgemeinen wirtschaftlichen Risiken der Prototypanlage ab.

Der THTR-300 stellt die Referenzanlage für grosse Hochtemperaturreaktoren im Leistungsbereich bis 600 MW dar, da er als Prototyp grosse Auslegungsserven besitzt, so dass mit nahezu der gleichen Anlage höhere Leistungen, bis rund 600 MW, erreicht werden können. Der THTR-300 kann schnell auch in Drittländern realisiert werden, die sich jetzt der Kernenergie zuwenden wollen.

HTR-Anlagen mit 550 MW elektrischer Leistung (HTR-500) zur bedarfsgerechten Erzeugung von Strom bauen ebenfalls auf dem THTR-300-Reaktor auf. In der Ausführung als Doppelblockanlage wird bei grossem Leistungsbedarf ein Leistungsbereich bis 1100 MW abgedeckt.

Für den Wärmemarkt, der verglichen mit dem Strommarkt kleinere Versorgungsnetze erfordert, wurden Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung entwickelt. Der HTR in Modulbauweise (HTR-Modul) besteht aus einer standardisierten Reaktoreinheit in zwei Stahlbehältern mit einer thermischen Leistung von 200 MW. Durch Zusammenschaltung mehrerer Einheiten können Anlagen in einem weiteren Leistungsbereich errichtet werden. Die Technik des HTR-Moduls beruht auf dem AVR-Versuchsreaktor. Die Erfahrungen mit dem THTR werden genutzt.

Kleine Kugelbettreaktoren mit einer thermischen Leistung von 10 bis 20 MW können als Heizreaktoren Verwendung finden. Der Einsatz des Kugelbettreaktors als nukleares Heizwerk mit einer Leistung von 10 MWth (GHR-10) wird im Rahmen eines Vorprojektes in der Schweiz untersucht.

Der HTR steht damit an der Schwelle der Markteinführung und kann von den Energieversorgungsunternehmen und anderen potentiellen Versorgern des Wärmemarktes jetzt praktisch genutzt werden. Die Asea Brown Boveri AG und die Siemens AG beurteilen die langfristigen Aussichten des Hochtemperaturreaktors gleichermassen positiv. Die beiden Gesellschaften sind deshalb übereingekommen, bei der Markteinführung von Hochtemperaturreaktoren aller Leistungsgrössen auf allen Einsatzgebieten im In- und Ausland zusammenzuarbeiten. Aus diesem Grunde haben sie eine gemeinsame Gesellschaft gegründet - die HTR-GmbH -, an der die Muttergesellschaften zu je 50% beteiligt sind. Die gemeinsame Gesellschaft wird auf die Ressourcen der

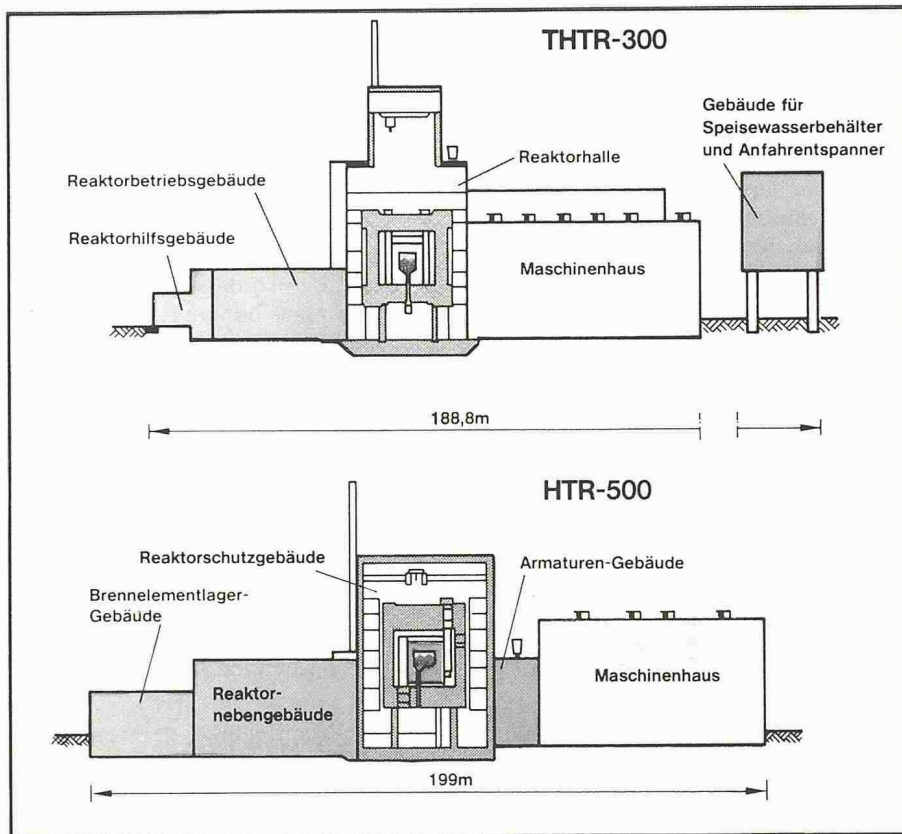


Bild 6. Grössenvergleich THTR-300 - HTR-500

Muttergesellschaft sowie deren Beteiligungsgesellschaften zurückgreifen.

**Der HTR-500**

Das Kernkraftwerk HTR-500 ist eine Zweikreisanlage zur Stromerzeugung mit der Möglichkeit zur Prozessdampf-

und Fernwärmeauskopplung. Die elektrische Leistung von 550 MW deckt einen Leistungsbereich ab, der bei verlangsamttem Zuwachs des Strombedarfs den zukünftigen Marktanforderungen entspricht. Weitere Vorteile der mittleren Leistungsgrösse sind geringere erforderliche Reserveleistung und Netzbelastung.

**Anlagenkonzept**

Die Gesamtanordnung der Kraftwerksanlage ist in Bild 6 mit dem THTR-300 verglichen. Beide Anlagen haben nahezu die gleichen Anlagendimensionen. Wesentliche Merkmale des HTR-500 sind:

- integrierte Anordnung aller Primärkreiskomponenten in einem Reaktor-druckbehälter aus Spannbeton in Grosskavernenbauweise,
- Übernahme standardisierter Bauelemente und erprobter Werkstoffe vom THTR,
- einfacher Aufbau durch Trennung der Betriebs- und Sicherheitssysteme,
- Störfallbeherrschung unter Ausnutzung des systemspezifischen langsamen HTR-Störfallverhaltens.

Bild 7 zeigt den Reaktor-druckbehälter mit Einbauten. Die thermische Leistung von 1390 MJ/s wird durch 1 145 000 Betriebselemente erzeugt. Die Elemente durchlaufen den Reaktor-kern einmal (sog. OTTO-Beschickung).

Das Entsorgungskonzept ist den Merkmalen der HTR-Baulinie angepasst. Abgebrannte Brennelemente werden in Fässer abgefüllt, 10 Jahre lang zwischengelagert und anschliessend in ein Endlager verbracht.

Zur Regelung und Abschaltung des Reaktor-kerns sind direkt einfahrende Kernstäbe und Reflektorstäbe vorgesehen. Das Helium durchströmt mit einem Systemdruck von 55 bar den Reaktor-kern von oben nach unten und wird von 266 °C auf 723 °C aufgeheizt. Der HTR-500 besitzt 6 Dampferzeuger in Helix-Bauweise, mit denen Dampf

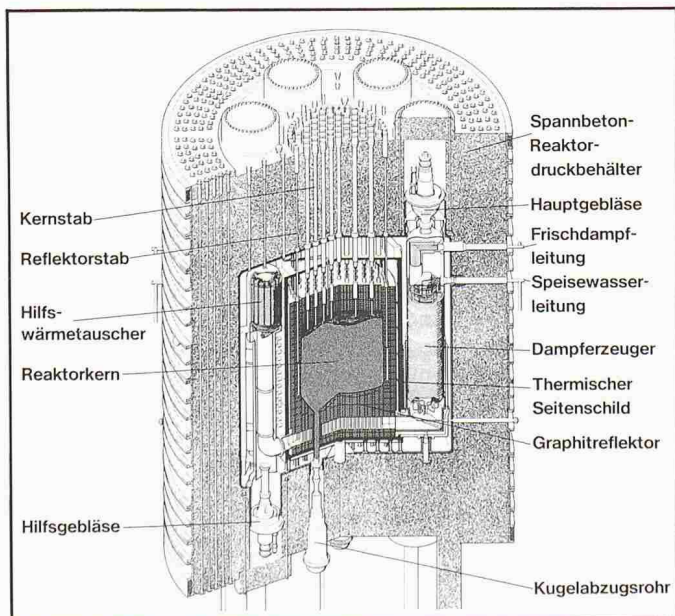
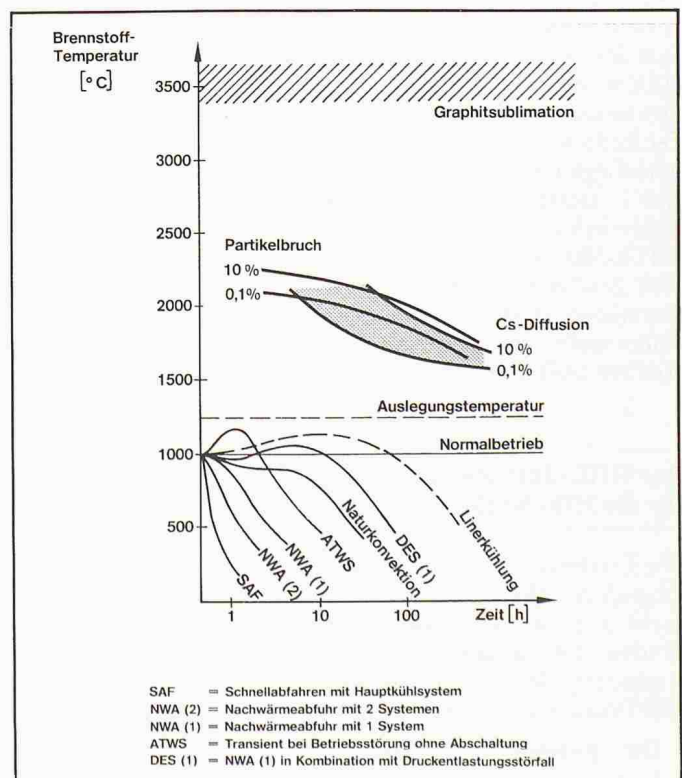


Bild 7. HTR-500, Reaktor-druckbehälter mit Einbauten

Bild 8. Belastungsgrenzen des Brennstoffs



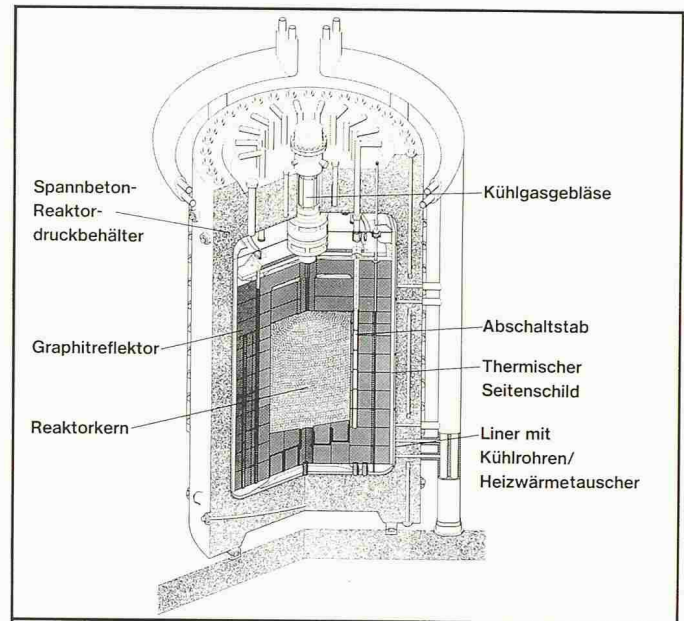
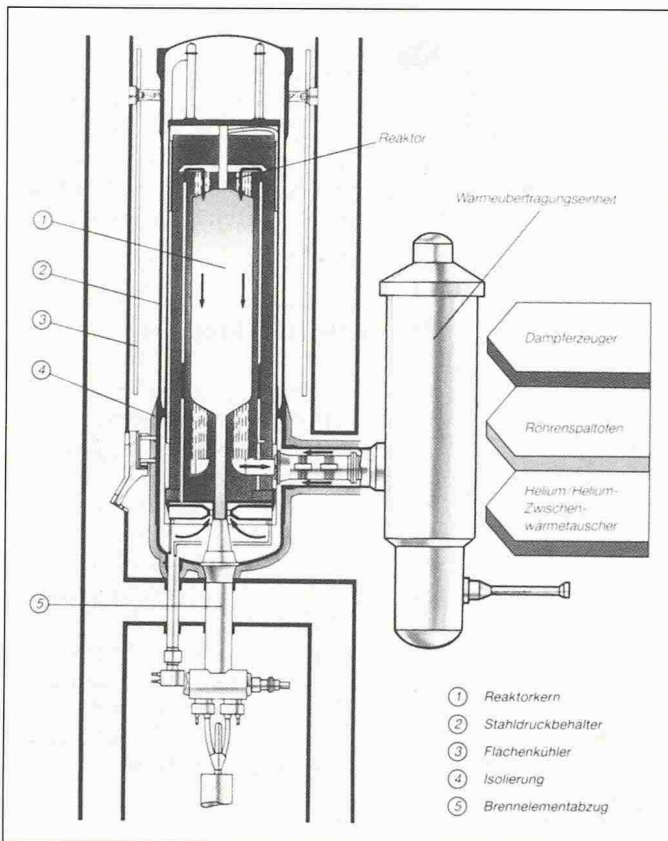


Bild 10. GHR-10, Gasgekühlter Heizreaktor

Bild 9. HTR-Modul

von 530 °C bei 180 bar erzeugt wird. Jedem Dampferzeuger ist ein senkrecht angeordnetes Gebläse mit Magnetlagerung zugeordnet. Zwei getrennte Hilfswärmetauscher sind zur Nachwärmeabfuhr vorgesehen.

### Sicherheitseigenschaften

Die niedrige Leistungsdichte, hohe Wärmekapazität, Graphit als temperaturbeständiges Strukturmaterial, Helium als Kühlmittel und die Selbststabilisierung der Leistung durch den negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktivität kennzeichnen die sicherheitstechnische Auslegung des HTR. Zerstörung des Reaktorkerns durch Kernschmelzen ist ausgeschlossen. Bild 8 zeigt den zeitlichen Verlauf der maximalen Brennelementtemperatur für repräsentative Störfälle. Sie bleibt in allen Fällen weit unter den Belastungsgrenzen der Brennelemente und sinkt innerhalb weniger Stunden auf Werte unter 500 °C, so dass auch sehr unwahrscheinliche Störfallkombinationen mit Wasser- und Lufteinbruch ohne unzulässige Reaktionen mit dem Graphit beherrscht werden.

Die Analyse hypothetischer Störfälle mit dauerhaftem Ausfall aller redundanten Möglichkeiten der Nachwärmeabfuhr ergab, dass auch in diesem Fall der Spannbetonbehälter als Strukturelement langfristig erhalten bleibt. Die Freisetzung von Aktivität wäre so gering, dass aus diesem Grund die Evakuierung der Bevölkerung nicht notwendig wäre.

### Der HTR-Modul

Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung, d.h. im Bereich von 200 MW thermisch, wurden als eine robuste und marktgerechte Wärmequelle für einen weitgespannten Anwendungsbereich konzipiert. Kurzfristig realisierbar und wirtschaftlich attraktiv ist der Einsatz zur kombinierten Erzeugung von Strom, Prozessdampf und Fernwärme für energieintensive Industrieanlagen (z.B. chemische Industrie, Raffinerien) sowie bei kommunalen Energieversorgungsunternehmen. Leistungsgrösse, Sicherheits- und Betriebseigenschaften machen den HTR kleiner Leistung auch für Länder mit wenig entwickelter Infrastruktur geeignet. Darüber hinaus kann er für die Dampferzeugung zur Tertiärölgewinnung oder bei der Meerwasserentsalzung eingesetzt werden.

Insbesondere kann der kleine HTR mittel- und langfristig für die Erzeugung von Hochtemperaturwärme bis 950 °C für chemische Prozesse eingesetzt werden.

### Anlagenkonzept

Der HTR-Modul besteht aus Reaktor und Wärmeübertragungseinheit. Wesentliches Merkmal ist die getrennte Anordnung von Kerneinheiten und Dampferzeuger bzw. Wärmetauscher in zwei getrennt nebeneinanderstehenden Stahldruckbehältern (Bild 9).

Der Reaktorkern besteht aus 360 000 Brennelementen, die den Reaktorkern mehrfach durchlaufen. Zur Regelung und zur Heissabschaltung des Kerns sind 6 Absorberstäbe in Bohrungen des Seitenreflektors vorgesehen. Abschaltung in den kalten Zustand erfolgt durch die Zugabe von Absorberkugeln in Löcher des Seitenreflektors.

Das Helium strömt von oben nach unten durch die Kugelschüttung, erwärmt sich dabei von 250 °C je nach Anwendung auf 700 °C bis 950 °C und wird zur Wärmeübertragungseinheit geführt. Diese ist je nach Anwendungszweck ein Dampferzeuger für Dampf von 530 °C/190 bar, ein Röhrenspaltofen im Fall der Erzeugung von Synthesegas als chemisches Vorprodukt oder ein Helium/Helium-Wärmetauscher zur Auskoppelung von Hochtemperaturwärme.

Das Kaltgas wird über den koaxial um das Heissgasführungsrohr angeordneten Verbindungsbehälter zum Reaktorkern zurückgeleitet. Der Reaktor und der Dampferzeugerdruckbehälter bilden zusammen mit dem Verbindungsbehälter die Druckbehältereinheit. Sie kommt nur mit Kaltgas von 250 °C in Berührung.

Durch Vervielfachung von Modulen können Kraftwerks- und Prozesswärmanlagen den verschiedenen Leistungsgrößen und Anwendungszwecken angepasst werden.

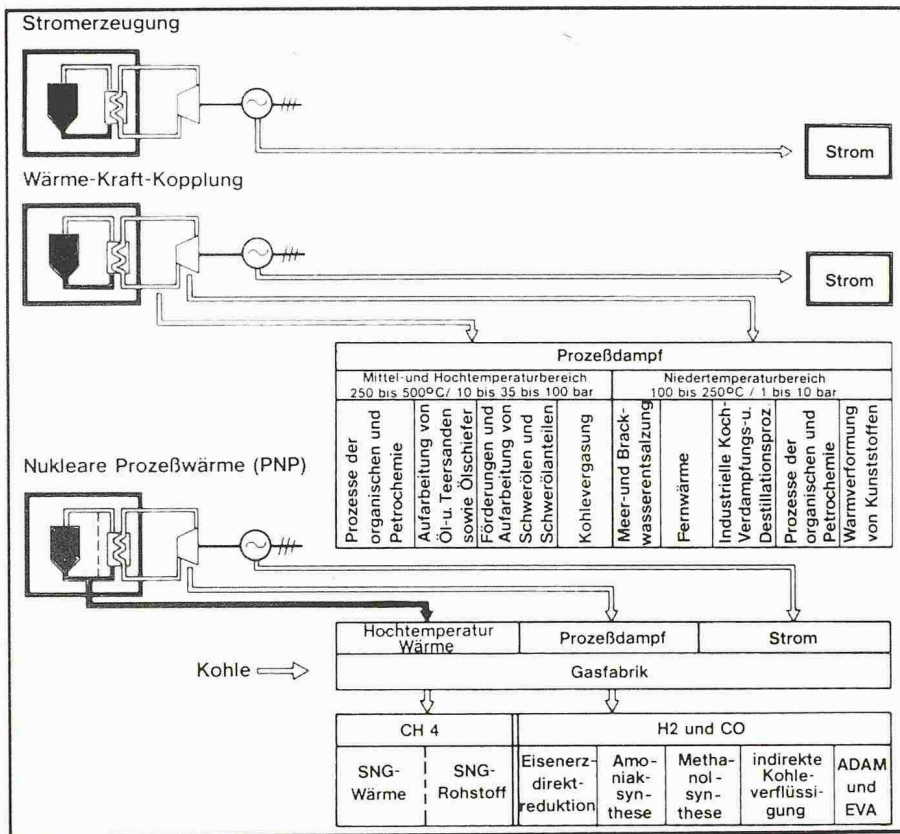


Bild 11. Anwendungsmöglichkeiten des Hochtemperaturreaktors

**Sicherheitseigenschaften**

Ein besonderes Merkmal des HTR mit kleiner Leistung ist, dass durch die Abmessungen des Reaktorkerns und die Begrenzung der Reaktorleistung auf 200 MW sowie der mittleren Leistungsdichte auf 3 MW/m die Brennelementtemperaturen bei allen Kernaufheizstörfällen, auch bei Ausfall der externen Kühlsysteme, auf maximal 1600 °C begrenzt werden. Damit wird die Zerstörung von Brennelementpartikeln und die unzulässige Freisetzung von Spaltprodukten ausgeschlossen. Die Anlage erfordert weniger aktive Sicherheitseinrichtungen. Deshalb reichen zur Nachwärmeabfuhr Flächenkühler ausserhalb des Primärsystems aus, um den Reaktordruckbehälter mit Einbauten und die umgebende Betonstruktur vor erhöhten Temperaturen zu schützen.

**Heizreaktor**

Überlegungen, die Kernenergie auch dezentral in kleinen Einheiten zur Erzeugung von Warmwasser für Heizwärme einzusetzen, gewinnen zunehmend an Interesse. Für diese Einsatzzwecke haben ABB/HRB einen Heizreaktor mit 10 MW thermischer Leistung konzipiert (GHR-10).

Der gasgekühlte Heizreaktor zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau und

eine hohe passive Sicherheit aus, die die Anlage bedarf nicht der ständigen Beaufsichtigung durch Bedienungspersonal (Bild 10).

Der Reaktor ist aus Wirtschaftlichkeitsgründen unterirdisch angeordnet, zur Minimierung der Schutzmassnahmen, was aufgrund seiner geringen Abmessungen zu einer einfachen Bauweise führt. Grössere Leistungen werden durch Zuschalten weiterer Blöcke abgedeckt. Die Wärmeezeugungskosten beim Verbraucher sind für den GHR konkurrenzfähig zur Einzelgebäudeheizung mit leichtem Heizöl.

**Nukleare Prozesswärme**

Langfristige Entwicklungsziele des HTR sind die direkte Anwendung der hohen Gastemperaturen, z.B. für Kohlevergasung in einer Prozesswärmanlage (Bild 11). Die Erzeugung von SNG (Substitute Natural Gas) erschliesst z.B. der deutschen Braun- und Steinkohle die vorhandenen inländischen Verteilungsnetze und Märkte von Erdgas. Gleichzeitig können die Importe um die jeweils erzeugte SNG-Menge verringert werden, was zu einer deutlichen Entlastung der Zahlungsbilanz führt. Ebenso können flüssige Kohlenwasserstoffe erzeugt und damit das Erdöl erforderlichenfalls ersetzt werden.

Die Erzeugung von Wasserstoff ist langfristig für die Lösung des Energie-

problems ebenfalls von Bedeutung. Mit der Erzeugung von Strom, einschliesslich Prozessdampf und Fernwärme, und mit der Erzeugung der genannten Gase, einschliesslich der daraus gewinnbaren Folgeprodukte, können Kohle und Kernenergie unter Einsatz des HTR alle Bereiche des Energiebedarfs abdecken.

**Stand der HTR-Projekte**

Die Hochtemperaturreaktor-Gesellschaft (HRG), ein Zusammenschluss mehrerer deutscher Energieversorgungsunternehmen, erteilte im Juli 1988 den Auftrag zur Erarbeitung eines Sicherheitsberichtes für den HTR-500. An dem Auftrag werden sich auch Schweizer Energieversorgungsunternehmen beteiligen.

Dieser Auftrag ist der erste Schritt eines Planungsprogramms über 5 Jahre mit dem Ziel einer vergabereifen Detaillierung und vollständigen Errichtungsgenehmigung für den HTR-500.

Das Bundesministerium für Forschung und Technologie sieht ein planungsbegleitendes Entwicklungsprogramm für die HTR-Technologie für sinnvoll an und fördert dieses seit mehreren Jahren. Die Kernforschungsanlage Jülich ist wesentlicher Partner in diesem Programm, ebenso die Schweizer Industrie, die in der schweizerischen «Interessengemeinschaft zur Wahrnehmung gemeinsamer Interessen an der Entwicklung nuklearer Technologien» (IGNT) zusammengeschlossen ist (Asea Brown Boveri AG in Baden, Gebrüder Sulzer AG, Elektrowatt AG, Motor Columbus AG, Bonnard und Gardel AG), unter finanzieller Beteiligung der Schweizer Regierung sowie des Paul-Scherrer-Instituts (vormals EIR und SIN).

Für den HTR-Modul wurde im April 1987 beim niedersächsischen Umweltminister ein Genehmigungsantrag nach § 7a Atomgesetz auf Erteilung eines Konzeptvorbescheides für eine HTR-2-Modul-Kraftwerksanlage gestellt. Die sicherheitstechnische Begutachtung durch die Gutachter wird voraussichtlich bis Herbst 1989 abgeschlossen sein.

Im Oktober 1988 haben Asea Brown Boveri und der Unternehmensbereich KWU der Siemens AG in Moskau einen Generalvertrag über die industrielle Zusammenarbeit bei Planung und Bau von Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung abgeschlossen. Vertragspartner auf sowjetischer Seite ist das Staatskomitee für die Nutzung der Atomenergie. Gegenstand des Generalvertrages sind in einer ersten Phase die gemeinsame Planung und der

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