

# Hat der Hochtemperaturreaktor Chancen ?

von Dieter Herrmann

e-mail [Dieter.Herrmann@energie-fakten.de](mailto:Dieter.Herrmann@energie-fakten.de)

## Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Gute Gründe und sich weltweit mehrende Anzeichen sprechen dafür, dass Kernenergie insgesamt große Zukunftschancen hat, darunter auch der Hochtemperaturreaktor (HTR). Dieser weist einzigartige Eigenschaften auf, die ihn für bestimmte Zwecke besonders geeignet erscheinen lassen. Insbesondere kann er durch den Einsatz des Edelgases Helium als Kühlmittel, die konsequente Verwendung nichtmetallischer (keramischer) Materialien im Reaktorkern (der Spaltzone) sowie eine relativ geringe Leistungsdichte (Kilowatt je Liter Spaltzonenvolumen) deutlich höhere Kühlmittel-Austrittstemperaturen erreichen als andere Reaktortypen. Jene haben andere „starken Seiten“. Einen „generell besten Reaktortyp“ gibt es nicht. Immer stehen spezifischen Vorteilen auch bestimmte Nachteile gegenüber.

In den 1950er bis 1970er Jahren standen insbesondere HTR, Schneller Brutreaktor (SBR) und Leichtwasserreaktor (LWR) untereinander im harten Wettbewerb um das gegenüber Kohle und Öl

„wirtschaftlich konkurrenzfähige Kernkraftwerk“. Dabei konnte sich der LWR dank seiner relativen Einfachheit durchsetzen. Kommt es jedoch bei künftig starkem Ausbau der Kernenergie zu kräftig steigenden Uranpreisen, wachsen die Chancen des SBR, da er den Kernbrennstoff ungleich besser ausnutzen kann als alle anderen Reaktortypen. Der HTR schließlich ermöglicht dank hoher Kühlmitteltemperaturen vor allem eine sehr effiziente Nutzung der bei der Kernspaltung erzeugten Wärmeenergie. Das macht entsprechende Kernkraftwerke weniger abhängig vom Kühlwasserangebot, begünstigt die weitere Steigerung von Kraftwerkswirkungsgraden und ermöglicht einen direkten Einsatz von Hochtemperatur-Processwärme für ausgewählte Prozesse in der chemischen Stoffwandlung. Die technische Machbarkeit des HTR konnte durch Versuchs- und Demonstrationsanlagen nachgewiesen werden – in Deutschland vor allem durch den langjährig erfolgreichen Betrieb des AVR Jülich.

Ehe es aber zu einer Markteinführung und breiten Nutzung des HTR kommen kann, muss ein entsprechender stabiler Bedarf vorliegen, und müssen weitere Voraussetzungen erfüllt sein. So sollten Einsparpotenziale an Niedertemperaturwärme (durch Wärmedämmung, Abwärmennutzung bzw. Kraft-Wärme-Kopplung) hinreichend erschlossen und die Spaltstoffversorgung langfristig gesichert sein. Bis dahin ist es für Know-how-Erhalt und Weiterentwicklung des HTR von großer Bedeutung, unter Ausnutzung seiner Vorzüge geeignete Teilmärkte bei der Strom- und gekoppelten Prozessdampf- bzw. Fernwärmeerzeugung zu besetzen. In diesem Sinne sind z. B. die gegenwärtigen Anstrengungen Südafrikas zu würdigen, den Einsatz des HTR als Erweiterungs- bzw. Ersatzlösung für Kraftwerksstandorte mit begrenztem lokalem Angebot an fossilen Brennstoffen und Kühlwasser vorzubereiten. Bemerkenswert sind auch die Aktivitäten Chinas, den HTR für den Kraftwerkseinsatz reif zu machen.

# Hat der Hochtemperaturreaktor Chancen ?

von Dieter Herrmann

e-mail [Dieter.Herrmann@energie-fakten.de](mailto:Dieter.Herrmann@energie-fakten.de)

## Hier die Fakten - Langfassung

### Entwicklungsgeschichte des Hochtemperaturreaktors (HTR)

Als gasgekühlte Kernspaltungsreaktoren haben Hochtemperaturreaktoren (HTR) eine lange Vorgeschichte, denn bereits die ab den 1940er Jahren in den USA gebauten Natururanreaktoren zur (militärischen) Plutoniumproduktion hatten Gaskühlung. Allerdings wurde die durch Kernspaltung erzeugte Wärme nicht genutzt und konnte bei problemlos niedrigen Temperaturen abgeführt werden. Das änderte sich mit der Weiterentwicklung des Konzeptes für die Elektroenergieerzeugung, die möglichst hohe Kühlmitteltemperaturen verlangt. Die ab Mitte der 1950er Jahre in Großbritannien und Frankreich gebauten Kernkraftwerke mit sogenannten Magnox-Reaktoren erreichten dank eines besonderen Hüllmaterials für die metallischen Brennstäbe Austrittstemperaturen des als Kühlmittel eingesetzten CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid) bis immerhin rund 400 °C und Wirkungsgrade bis 33 %. Diese Parameter konnten bei dem

„Advanced Gascooled Reactor“ (AGR) in Großbritannien bis Mitte der 1960er Jahre durch Übergang zu Urandioxid als Brennstoff und Edelstahl als Hüllmaterial auf etwa 670 °C bzw. 42 % gesteigert werden. Dennoch haben sich Kernkraftwerke mit AGR aus wirtschaftlichen Gründen international nicht durchzusetzen können.

Etwa parallel zum AGR wurde mit dem Konzept des HTR ein qualitativer Sprung in der Steigerung der Kühlmittelaustrittstemperatur eingeleitet. Statt einzelner großer Brennstäbe in Metallhüllen wird Kernbrennstoff in Form winziger Urandioxidpartikel (Durchmesser: 0,5 bis 0,9 mm) eingesetzt, die durch eine Mehrfachbeschichtung aus Grafit und Siliziumkarbid sicher und dicht eingeschlossen sind. Diese beschichteten Partikel („coated particles“) sind bis etwa 1600°C thermisch belastbar. Sie werden mit Grafit zu prismatischen oder kugelförmigen Brennelementen verarbeitet. Durch den gleichzeitigen Übergang zu dem Edelgas Helium als Kühlmittel ist es im

Prinzip möglich, Wärme bei Temperaturen bis zu 1100 °C und mehr bereitzustellen. Das sind Bereiche, die auch auf herkömmliche Weise nur mit hochwertigen Brennstoffen und geeigneter Technik erreichbar sind.

Das Konzept des HTR wurde in zunächst drei Versuchsanlagen realisiert:

- August 1964: das europäische Gemeinschaftsprojekt DRAGON in Großbritannien, mit prismatischen Brennelementen und einer thermischen Leistung von 20 Megawatt (MW; 1 MW = 1000 Kilowatt);
- März 1966: das Versuchskraftwerk in Beach Bottom (Pennsylvania, USA) mit prismatischen Brennelementen und einer elektrischen Leistung von 40 MW;
- August 1966: die Anlage der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) in Jülich, Deutschland, als Kugelhaufenreaktor mit einer elektrischen Leistung von 15 MW.

Mit diesen Versuchsanlagen wurde die grundlegende technische Machbarkeit des HTR nachge-

## LANGFASSUNG

wiesen und konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Speziell das Konzept des Kugelhaufenreaktors, bei dem der Brennstoff als Schüttung etwa tennisballgroßer kugelförmiger Brennelemente vorliegt, erwies sich als sehr zuverlässig, flexibel und sicher. Das betrifft besonders

- die mechanische Stabilität und thermische Belastbarkeit der Kugelschüttung,
- die Möglichkeit zur Brennstoffumladung bei laufendem Betrieb, die zu einer Minimierung des Spaltstoffinventars im Reaktor führt,
- die sich hiermit sowie durch die starke negative Rückkopplung der Brennstofftemperatur auf die Reaktorleistung ergebende hohe Sicherheit und gute Regelbarkeit des HTR (selbständige Drosselung der Kettenreaktion mit wachsender Temperatur).

Auf Grund dieser und anderer positiver Erfahrungen konnte beim AVR die Heliumaustrittstemperatur im Jahr 1974 von 850 auf 950 °C gesteigert werden.

Im Wettbewerb um das erste, gegenüber Kohle und Öl wirtschaftlich konkurrenzfähige Kernkraftwerk standen sich bis in die frühen 1970er Jahre neben dem HTR insbesondere der Leichtwasserreaktor (LWR) und der Schnelle Brutreaktor (SBR) gegenüber. Dabei hat sich der LWR durchgesetzt. Weniger erfolgreich war der Versuch, auch beim HTR durch Vergrößerung der Anlagenleistung möglichst rasch wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit bei der Grundlast-Elektroenergieerzeugung zu erreichen. Als notwendige

Zwischenschritte waren hierfür weltweit zwei Prototypanlagen gebaut worden:

- 1974 in Fort Saint Vrain (Colorado, USA) mit prismatischen Brennelementen und einer elektrischen Leistung von 330 MW sowie
- 1985 (Baubeginn 1971!) der Thorium-Hochtemperatur-Reaktor (THTR) in Hamm-Uentrop, (NRW, Deutschland) als Kugelhaufenreaktor mit einer elektrischen Leistung von 300 MW.

Beide Anlagen wurden nach „Kinderkrankheiten“ beim Probebetrieb stillgelegt. In Deutschland kam der politische Druck der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen hinzu. Das Ziel baldiger wirtschaftlicher Elektroenergieerzeugung mittels großer HTR wurde aufgegeben.

### Generelle Erfahrungen im Hinblick auf künftige Marktchancen des HTR

Das Scheitern frühzeitiger Markteinführung großer HTR war zwar ein Rückschlag, verlangt aber eine differenzierte Bewertung:

- Trotz des Rückschlags waren mit den Versuchs- und Prototypanlagen die prinzipielle großtechnische Realisierbarkeit des HTR sowie seine Überlegenheit in einigen Bereichen über LWR und SBR praktisch nachgewiesen worden.
- Der Versuch frühzeitiger Markteinführung kam vor allem historisch zu spät. Der Vorsprung des LWR, bei dem Mitte der 1970er Jahre bereits die ersten Anlagen von über 1000 MW in Betrieb gingen, war nicht mehr einzuholen.

- Infolge sich drastisch ver-ringernder Bedarfszuwächse nach den Ölpreiskrisen der 1970er Jahre sowie des besonders in Deutschland wachsenden öffentlichen Widerstands gegen die Kernenergie bestand kein Spielraum mehr für aufwändige Parallelentwicklungen zum LWR.

- Auslaufende Aktivitäten der HTR-Entwicklung in den bis dahin führenden Ländern beschränkten sich auf Grundlagenuntersuchungen, punktuelle technische Verbesserungen sowie auf das Ausloten vielfältigster künftiger Nutzungsmöglichkeiten.

- Wegen dieser besonderen Nutzungsmöglichkeiten war inzwischen das Interesse am HTR auch in Ländern wie Japan, Russland und China gewachsen. In Japan und China sind 1998 bzw. 2000 Versuchsreaktoren mit einer thermischen Leistung von 30 bzw. 10 MW in Betrieb genommen worden.

- Ungeachtet aller Bemühungen und erreichten Teilerfolge ist aber immer wieder auch deutlich geworden, dass eine praktische Markteinführung nicht gegen die aktuellen Erfordernisse und Bedingungen des Marktes zu erreichen ist.

Im Verlaufe seiner bisherigen Entwicklungsgeschichte hat der HTR den Status einer Art „Reserve-lösung“ für künftige Herausforderungen globaler Energieversorgung erreicht. Dieser Status wird auch dadurch unterstrichen, dass neben einem LWR für überkritische Dampfparameter sowie drei SBR-Konzepten auch

## LANGFASSUNG

ein HTR für sehr hohe Temperaturen mit zu den Prioritäten einer Initiative internationaler Forschungskoope-ration für die Entwicklung von Kernspaltungsreaktoren der „IV. Generation“ gehört (siehe [Hintergrundmaterial „Generation IV“](#)). Dennoch wird er erst dann zu endgültiger Marktreife geführt werden können, wenn entsprechend veränderte globale Rahmenbedingungen dies ermöglichen oder gebieten. Folglich sind solche Veränderungen heute der entscheidende Bewertungsmaßstab für die Zukunftsaussichten des HTR, während technisch-wirtschaftliche Details von zunächst eher untergeordneter Bedeutung sind.

### Zukunftsaussichten des HTR

Abhängig von den jeweiligen globalen Rahmenbedingungen sind im Wesentlichen zwei unterschiedliche Motive für Markteinführung und breiteren Einsatz des HTR zu erkennen:

- a) wirtschaftlich möglicher Einsatz bei weltweit stark wachsendem Energiebedarf,
- b) vorrangig ökologisch bedingter Einsatz auf hohem Niveau globaler Energieversorgung.

Im Fall a) geht es um die Deckung eines wachsenden Bedarfs an beliebigen Energieformen, die auf Basis HTR wirtschaftlich bereitgestellt werden können. Die Chancen im Wettbewerb mit fossilen Brennstoffen, erneuerbaren Energien oder nuklearen Lösungen auf der Basis anderer Reaktortypen nehmen zu, je stärker der Bedarf insgesamt wächst und je besser der HTR unter den jeweiligen Bedingungen seine spezifischen Vor-

züge zur Geltung bringen kann. Das sind vor allem seine hohen, sonst nur in der konventionellen Kraftwerkstechnik erreichten wärmetechnischen Parameter, seine günstigen Sicherheitseigenschaften sowie seine Eignung zu modularer Bauweise. Letzteres bedeutet, dass HTR bis zu elektrischen Leistungen von etwa 200 MW konstruktiv erheblich vereinfacht und relativ kostengünstig gefertigt werden können. Damit ist z. B. eine viel bessere Anpassung an lokal begrenzten Bedarf möglich als mit heutigen LWR, deren wirtschaftliche Anlagenleistung bei rund 1500 MW liegt. Solche Eigenschaften sind nicht nur bei Industriekraftwerken für die gekoppelte Erzeugung von Grundlast-Elektroenergie und Prozessdampf gefragt, sondern sind z. B. auch für den schrittweisen Ausbau der Versorgung in Schwellen- und Entwicklungsländern von großem Interesse.

Im Fall b) geht es darum, dass sich der globale Energiebedarf in den kommenden Jahrzehnten trotz größter Einsparanstrengungen in dem Maße vervielfachen wird, wie sich eine wachsende Weltbevölkerung dem materiellen Lebensniveau heutiger Industriestaaten annähert. Moderne Technologien und Kernenergie machen das grundsätzlich möglich. Aber bereits heute kann Kühlwasser für Kraftwerke zum Engpass werden und Abwärme aller Art in Ballungsgebieten zu Veränderungen des Mikroklimas führen. Zur Verringerung solcher Belastungen stehen zunächst die Minderungsmöglichkeiten im Niedertemperaturbereich im Vordergrund, etwa durch Wärme-

dämmung, Kraft-Wärme-Kopplung oder die Nutzung industrieller Abwärme. Je weiter dieses Potenzial ausgeschöpft ist, desto wichtiger wird die effizientere Nutzung von Wärme auf hohem Temperaturniveau. Das aber verlangt den Ersatz anderer nuklearer Lösungen durch HTR, um die Ausnutzung der durch Kernspaltung erzeugten Wärme bei der Umwandlung zu Elektroenergie oder bei der Anwendung in Chemie und Metallurgie weiter deutlich erhöhen zu können.

Wie sich inzwischen aus vielen Anzeichen ableiten lässt, wird in den kommenden Jahrzehnten weltweit mit einem wieder stark wachsenden Energiebedarf zu rechnen sein. Damit entstehen die wichtigsten Voraussetzungen für eine Markteinführung des HTR entsprechend Fall a). Wie groß sein diesbezügliches wirtschaftliches Einsatzpotenziale schließlich sein wird, ist gegenwärtig schwierig vorherzusagen. Ein breiter Einsatz aus vorrangig ökologischen Gründen nach Fall b) dürfte indes erst später in Betracht kommen, wenn der dringendste Nachholbedarf heutiger Entwicklungsländer gedeckt und die Umweltbelastung durch Abwärme weiter gewachsen ist. Nicht zuletzt aber ist eine Verdrängung thermisch weniger effizienter Reaktorsysteme durch HTR auch mit Aspekten langfristiger Spaltstoffversorgung gekoppelt. Zwar können Hochtemperaturreaktoren den Brutstoff Thorium-232 sehr effektiv in den Spaltstoff Uran-233 umwandeln, im Unterschied zu den deutlich möglichen Spaltstoffüberschüssen aus SBR im Uran-238-

## LANGFASSUNG

Plutonium-Zyklus bleiben sie in der Regel aber weiter auf externe Spaltstoffzufuhr angewiesen.

### Fazit

Die Markteinführung und breitere Nutzung des HTR im Rahmen einer sich rasch und global ausweitenden Energieversorgung

kann als relativ sicher angesehen werden. Sie ist z. Z. vor allem durch konkrete Planungen in Südafrika und China unterlegt. Der HTR ist aber nicht nur ein wichtiges Element bei der künftigen quantitativen und qualitativen Ausweitung globaler Kernenergienutzung. Er stellt mit sei-

nem spezifischen Hochtemperaturpotenzial auch eine wichtige „Sicherheitsreserve“ dar, wenn nukleare Energieerzeugung auf anderer Basis an Grenzen lokaler/regionaler thermischer Belastbarkeit der Umwelt stößt. ■