

Chinas Demonstrations-Kugelhaufenreaktoren am Netz

Am 20. Dezember 2021 hat in China das erste Kraftwerk mit Kugelhaufenreaktoren den Betrieb aufgenommen. Diese vor mehr als fünfzig Jahren in Deutschland erprobte Reaktorauslegung verfügt über eine Reihe besonderer Eigenschaften. Prof. emeritus Horst-Michael Prasser erklärt die Vor- und Nachteile dieser Technik.

Der HTR-PM – der «High-Temperature Gas-Cooled Reactor – Pebble Bed Module» steht in Shidao Bay in der chinesischen Provinz Shandong, rund 600 Kilometer südöstlich von Peking. Der HTR-PM ist eine mit Helium gekühlte Reaktoreinheit mit einer elektrischen Leistung von 100 MW. Seine Technologie geht auf die Pionierarbeit in Deutschland zurück (vgl. Kasten Seite 10) und baut auf den dort gemachten Betriebserfahrungen auf. Entwickelt worden ist er an der Tsinghua-Universität in Peking, wo seit 2003 der Versuchsreaktor HTR-10 erfolgreich betrieben wird.

Vorteil: Brennstoff sehr gut eingeschlossen

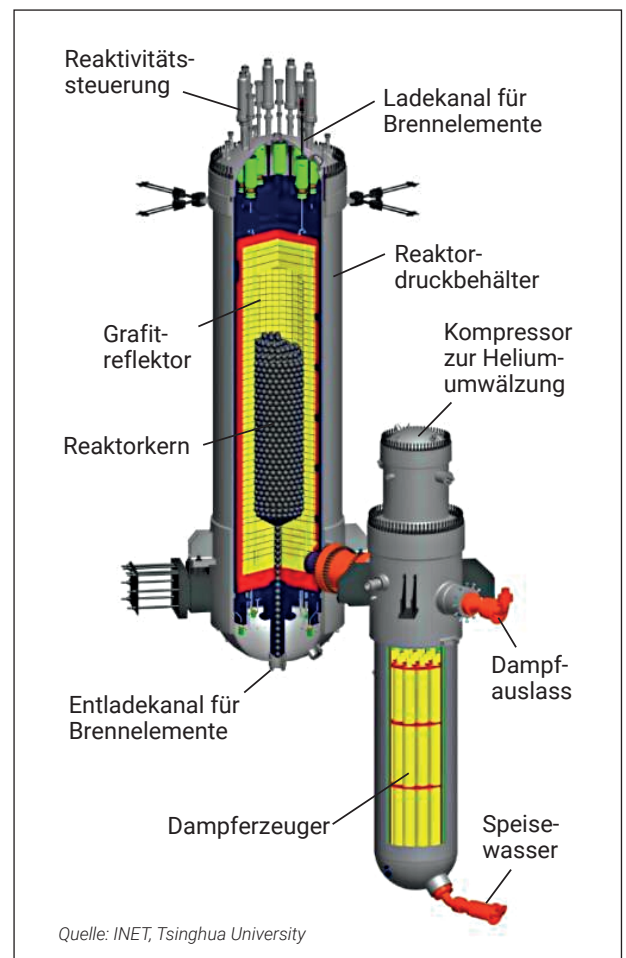
Horst-Michael Prasser, von 2006 bis 2021 ordentlicher Professor für Kernenergiesysteme an der ETH Zürich und von 2007 bis 2017 Leiter des Labors für Thermohydraulik am Paul Scherrer Institut (PSI), erklärt die wesentlichen Unterschiede zu den herkömmlichen Leichtwasserreaktoren (LWR) wie folgt: «Bei diesem Reaktortyp befindet sich der Brennstoff in kleinen, etwa 0,5 mm grossen Kügelchen, die von einer dünnen und dennoch beständigen und weitgehend undurchlässigen Schicht aus Siliziumkarbid umgeben sind. Etwa Zehntausend dieser sogenannten «Coated Particles» werden in billardkugelgrosse Grafitkugeln eingesintert.»

Die Siliziumkarbidschicht ersetzt dabei das Brennstabhüllrohr im LWR. Sie hält weit höhere Temperaturen aus als Zirkonium, aus dem die Hüllrohre bestehen. «Die radioaktiven Bestandteile des Brennstoffs, insbesondere die flüchtigen Radioisotope der Edelgase Krypton und Xenon sowie radioaktives Jod-131 und die besonders problematischen Cäsium-Isotope-137 und -134, die im Fall von Fukushima weite Landstriche kontaminiert haben, werden durch die Siliziumkarbidschicht zuverlässig eingeschlossen», erklärt Prasser.

Vorteil: Kernschmelze nicht möglich

Diese kugelförmigen Brennelemente werden in den Reaktorbehälter eingefüllt, bis die kritische Masse bei der

gewünschten Betriebstemperatur erreicht ist (vgl. Grafik). Der Abbrand wird nicht wie beim LWR durch die kontinuierliche Entnahme von Neutronenabsorbieren kompensiert, sondern durch die ständige Zufuhr von frischen Kugeln, während unten laufend Kugeln entnommen werden, auf ihren Abbrand geprüft und je nach Ergebnis oben wieder eingegeben oder entsorgt werden.



Der chinesische HTR-PM mit dem tiefelegten Dampferzeuger. Die Temperatur des Heliums am Reaktorausstritt ist 750 °C, die Dampftemperatur liegt bei 570 °C.

Nach durchschnittlich 15 Durchläufen ist dann der geplante Abbrand erreicht. «Es ist immer genau so viel Spaltstoff im Reaktor, wie es für eine selbsterhaltende Kettenreaktion braucht, nicht mehr», beschreibt Prasser einen weiteren Vorteil dieses Reaktortyps. «Zusammen mit den starken negativen Rückkopplungen, die die Kettenreaktion bei steigender Temperatur dämpfen, führt das zu einer wichtigen neuen Sicherheitseigenschaft: Selbst bei einem Totalausfall der Kühlung – hier zum Beispiel durch Ausfall des Heliumkompressors oder falls bei einem Leck das Helium aus dem Reaktor entweicht – kommt es, anders als beim LWR, nicht zu einer unzulässigen Überhitzung des Brennstoffs bzw. einer Kernschmelze.»

Der Grund dafür liegt darin, dass bei einem Temperaturanstieg die Reaktorleistung aus physikalischen Gründen selbsttätig – ohne Eingriff von Schutzsystemen oder der Operateure – auf ein Niveau abfällt, bei dem die noch freiwerdende Wärme über die Reaktorwand ins Containment abgeführt werden kann, selbst wenn keine Abschaltung durch die Steuerstäbe erfolgt. «Gänzlich ohne ein Kühlsystem kommt man jedoch auch beim HTR-PM nicht aus, denn die zusätzliche Wärme muss aus der Reaktorkaverne abgeführt werden. Das notwendige System funktioniert jedoch ohne Notstromversorgung, es ist ein passives Sicherheitssystem. Ausserdem», hält Prasser fest, «kann dieses Notkühlkonzept nur funktionieren, weil der Reaktorkern, gemessen an seiner Wärmeproduktion, ein grosses Volumen hat, also eine im Vergleich zum LWR viel geringere Leistungsdichte».

Geringe Leistung, dafür modular erweiterbar

«Das heisst: Der Reaktor selbst ist inhärent sicher in Bezug auf den Ausfall der Kühlung», fasst Prasser zusammen. «Allerdings muss die thermische Leistung auf eine Grössenordnung von 200 bis 300 MW begrenzt werden, sonst kann die Maximaltemperatur im Reaktor nicht unter 1600 °C gehalten werden.» Bei höheren Temperaturen könnten Jod und Cäsium durch die Siliziumkarbid-schicht hindurchtreten, in den Heliumkreislauf und von dort unter ungünstigen Umständen in die Umgebung gelangen. «Deshalb sind Kernkraftwerke mit Kugelhaufenreaktoren modular aufgebaut: Mehrere Reaktoren erzeugen Wärme für eine gemeinsame Turbine. Vorteilhaft ist die Dampf-Austrittstemperatur von rund 570 °C. Das

erlaubt den Einsatz einer normalen Dampfturbine statt der auf Satttdampf optimierten Turbinen wie bei den LWR.» Der Heissdampf erhöht den Wirkungsgrad des Kraftwerks auf über 40%.

Dennoch Sicherheitssysteme nötig

Ganz ohne technische Sicherheitssysteme kommt der Kugelhaufenreaktor aber nicht aus, denn es sind auch andere Störfallszenarien als der oben beschriebene Kühlausfall zu beherrschen. «Falls zum Beispiel Wasser in den Kern eindringt und das Helium verdrängt, könnte der Grafit der Kugeln mit dem Wasserdampf reagieren. Dabei entsteht Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Ausserdem würde eindringendes Wasser den Reaktor überkritisch werden lassen. Das wäre bei einem Bruch eines Dampferzeugerheizrohrs zu erwarten», erklärt Prasser. «In diesem Fall wird unter anderem eine automatische Absperrung der Speisewasserzufuhr aktiv. Ausserdem ist beim HTR-PM – anders als beim AVR in Jülich (vgl. Kasten Seite 10) – der Dampferzeuger unterhalb des Reaktorkerns angeordnet. Wasserdampf ist schwerer als Helium und kann deshalb nur langsam nach oben in den Reaktorbehälter gelangen.»

Ein anderes Szenario betrachtet einen Lufteinbruch. Dabei käme es ebenfalls zu einer Beschädigung von Grafitstrukturen und Brennelementkugeln, wenn nicht zusätzliche Massnahmen getroffen werden. Prasser macht aber auch deutlich, dass ein massiver Lufteinbruch höchstens bei einem äusserst unwahrscheinlichen Extremereignis – etwa einem Megaerdbeben – denkbar wäre. «Der Vorteil gegenüber anderen Reaktortypen wäre allerdings, dass sich solche Störfälle sehr langsam entwickeln würden und sehr viel Zeit für Gegenmassnahmen bliebe.»

Ein weiterer Vorteil: Das durch den Reaktor strömende Helium wird während des Betriebs nicht radioaktiv. Es ist zudem nicht giftig und kann weder brennen noch explodieren. Sollte es bei einem Worst-Case-Störfall freigesetzt werden, könnten allenfalls mitgeführte radioaktive Staubpartikel oder Spuren von flüchtigen Spaltprodukten, die durch die Siliziumkarbid-schicht hindurch diffundieren, in die Umwelt gelangen – «kein Vergleich zu Freisetzungen, wie sie in Fukushima aufgetreten sind», merkt Prasser an. →

Viel Sicherheit, aber wenig Brüten und keine Transmutation

In den Jahren 2015 bis 2019 leitete Prasser ein von Swisselectric und Swissnuclear finanziertes Projekt zur Technologie des Kugelhaufenreaktors. Es gelang, den Entwickler dieses Reaktortyps als Partner zu gewinnen, das Institut für nukleare und neue Energietechnologien (INET) der Tsinghua-Universität. Ein wichtiges Ziel des Projekts war der Know-how-Erhalt. Viele Studierende des Masterprogramms in «Nuclear Engineering» der beiden ETH in Zürich und Lausanne haben ihre ersten wissenschaftlichen Sporen durch Beiträge zu diesem Projekt verdient. «Ausserdem konnten wir unserer Aufgabe gerecht werden, die Entwicklung auf dem Gebiet neuer Reaktorkonzepte zu verfolgen», fügt Prasser hinzu.

Zu den betrachteten Themen gehörten Sicherheitsaspekte, mögliche alternative Brennstoffe (etwa Thorium), Entsorgungsszenarien sowie Kostenschätzungen. Nach seiner Beurteilung ist der HTR-PM strenggenommen kein Reaktor der Generation IV, obwohl er

vielfach mit einer gewissen Berechtigung als solcher bezeichnet wird, weil er kein Wasser als Kühlmittel verwendet: «Er beruht jedoch nicht auf schnellen Neutronen und kann daher nicht das gesamte Programm von Brüten bis Transmutation abdecken. Man kann zwar Thorium-232 einsetzen, aber das geht mit einem Schwerwasserreaktor vom kanadischen Typ Candu auch. Zudem ist er mit der aus Sicherheitsgründen auf 750 °C gesenkten Austrittstemperatur des Heliums kein echter Hochtemperaturreaktor. Damit lässt sich weder ein kombinierter Gas- und Dampfturbinenprozess gut fahren, noch lässt sich Wasserstoffgas direkt erzeugen.» Ein auf der Basis von Schwefelsäure und Jod als Katalysatoren beruhender Kreislaufprozess, der mit relativ niedrigen Prozess-temperaturen auskommt, ist seit langem als potentieller Kandidat im Gespräch, benötigt aber nach chinesischen Angaben immer noch mindestens 800–900 °C. «Sicher lässt sich die Temperatur später in Richtung höherer Werte optimieren, sobald mehr Betriebserfahrungen vorliegen», hofft Prasser.

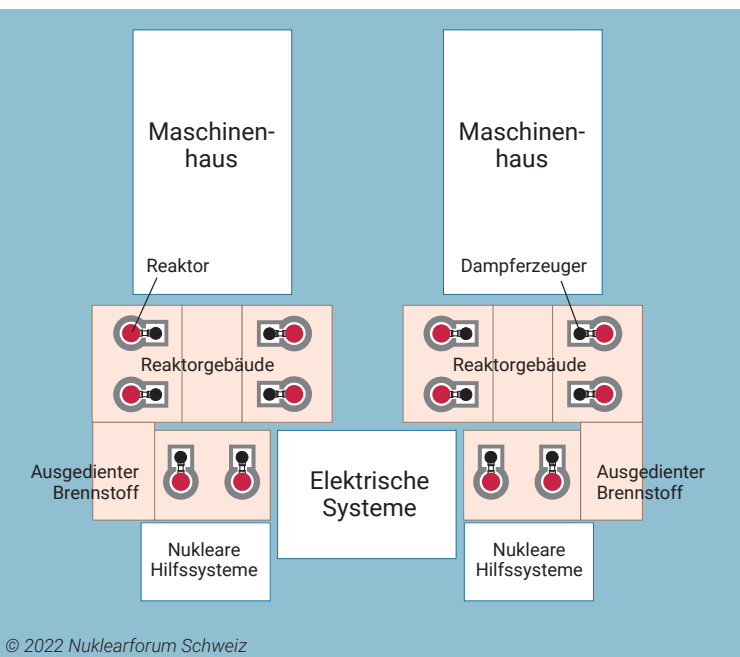
Nachteil: Abfallvolumen

Den Vorteilen der Brennstoffkugeln steht auch ein Nachteil entgegen: «Im Vergleich zu einem LWR ist das Volumen des ausgedienten Brennstoffs – also des hochaktiven Abfalls in einem Land mit direkter Entsorgung ohne Wiederaufarbeitung – pro produzierter Kilowattstunde 30- bis 50-mal grösser», merkt Prasser an. «Dass dabei die Aktivität bezogen auf das Volumen entsprechend geringer ist, macht aber keinen Unterschied.»

Vorteilhaft ist, dass die Kugeln relativ einfach in einem luftgekühlten Trockenlager auf dem Kraftwerksgelände zwischengelagert werden können. Der Platzbedarf in einem Tiefenlager wäre jedoch wegen des hohen Grafitanteils der Kugeln viel zu gross. Obwohl auch im Tiefenlager die Stabilität der Siliziumkarbidsschicht in den kleinen Brennstoffpartikeln wie auch die Grafitumhüllung sehr gute Barrieren darstellen, geht Prasser davon aus, dass man das nach heutigen Standards gängige Einschweissen des Abfalls in dickwandige Tiefenlagerkanister nicht einsparen könnte.

Option für die Schweiz?

Ist der HTR-PM eine Option für die Schweiz? «In Ländern, in denen die Wiederaufarbeitung ausgedienten Kern-



© 2022 Nuklearforum Schweiz

Schematisches Layout für ein Kraftwerk mit 1200 MW, bestehend aus zwei Standardanlagen HTR-PM600. In der Standardanlage treiben drei T-förmig angeordnete Module aus je zwei Reaktoreinheiten eine gemeinsame Dampfturbine an, die eine Leistung von maximal 600 MW elektrisch bereitstellt.

brennstoffs gesetzlich untersagt ist, wird das hohe Volumen hochaktiven Abfalls zum Problem. Mindestens erforderlich wäre eine Konditionierung des ausgedienten Brennstoffs, sonst hat der HTR-PM bei einer direkten Tiefenlagerung keine Zukunft», macht Prasser deutlich. «Wenigstens der Grafit, in den die Brennstoffkügelchen eingesintert sind, müsste abgetrennt werden. Denkbar wäre eine Wiederverwendung zur Produktion neuer Kugeln.»

Eine Vorgehensweise für eine experimentelle Fragmentierung von echten ausgedienten und entsprechend stark radioaktiven Kugeln mit einer in der Schweiz entwickelten Technologie wurde in Rahmen des bereits genannten Forschungsprojekts erarbeitet. Momentan sieht Prasser jedoch kaum Chancen für ein solches Experiment in der Schweiz, geschweige denn für den Bau dieses Reaktortyps selbst. Wer die Vorteile des HTR-PM nutzen will, müsse «politisch über die Bücher», wie bei jedem anderen Kernreaktor auch. Eine Alternative zur Abfallkonditionierung im eigenen Land wäre, ausgediente Kugeln zum Produzenten zurückzuschicken. «Auch die Uran mit etwa 9% Anreicherung enthaltenden Kugeln werden derzeit einzig in China produziert», merkt Prasser an. «Für eine Kernbeladung sind 420'000 Stück nötig. Zudem erreichen täglich 400 Kugeln den Zielabbrand und müssen durch frische ersetzt werden.»

Entsprechend gross ist der Reaktordruckbehälter, der eine Höhe von 25 m bei einem Durchmesser von 5,7 m erreicht – viermal so gross wie bei einem LWR. Dass der HTR-PM als «Small Modular Reactor» gilt, ist der geringen Leistung und nicht seiner Grösse zuzuschreiben. Dafür sind die Kugeln einfacher herzustellen als Brennstäbe für einen LWR. «Für einen Einsatz in der Schweiz müssten die Versorgungs- und die Entsorgungsfrage gelöst werden», macht Prasser deutlich. «In beiderlei Hinsicht wären wir von China abhängig, falls sich keine Alternative aufbauen lässt. Unter den derzeitigen politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen sieht es also insgesamt schlecht aus für einen Schweizer Kugelhaufenreaktor, selbst wenn das Neubauverbot fallen würde», meint Prasser.

Nach Angaben der Tsinghua-Universität dürften die Stromgestehungskosten der ersten HTR-PM (first of a kind, FOAK) etwa 15–20% höher liegen als bei einem Druckwasserreaktor gleicher Leistung. Für die erste HTR-PM600-Standardanlage sollen die Gestehungs-

kosten auf 75% sinken und beim Aufnehmen der kommerziellen Serienproduktion auf weniger als 40%. Als Hauptvorteil der Kugelhaufenreaktoren wird die bessere Eignung für Standorte weitab vom Meer und näher zu Ballungszentren gesehen. (M.S.) →

Standardanlage mit 600 MW_{el}

Die beiden Ende 2021 am Standort Shidao Bay in Betrieb gegangenen HTR-PM haben eine thermische Leistung von je 250 MW und eine elektrische Nettoleistung von je 100 MW. Die beiden als Demonstrationsprojekte bezeichneten Einheiten versorgen eine gemeinsame Dampfturbine und wurden für eine Betriebszeit von 40 Jahren ausgelegt.

Strategisches Ziel in China ist, die Vorteile des HTR-PM – hohe inhärente Sicherheit, hohe Energieeffizienz, hohe Dampftemperaturen, modulare Bauweise und weitgehende Standortfreiheit (kein Kühlwasserbedarf) – gezielt zu nutzen. Im Vordergrund stehen das Auskoppeln von Prozesswärme für die Industrie sowie der Ersatz der heutigen sowohl Strom wie auch Fernwärme liefernden Kohlekraftwerke in der Nähe von Städten. Am Horizont steht die Absicht, diesen Reaktortyp auch für die Produktion von Wasserstoff einzusetzen.

Als nächsten Schritt sollen die Basiseinheiten je nach Bedarf zu Gruppen bis 600 MW_{el} zusammengesetzt werden – die geplante Standardanlage HTR-PM600 besteht aus sechs Reaktoren mit einer einzigen Turbogeneratorgruppe. Zwei solche Anlagen ergeben zusammen eine Leistung vergleichbar mit einem grossen, herkömmlichen LWR (vgl. Grafik gegenüber). Nach chinesischen Angaben soll dieser Reaktortyp auch exportiert werden – zum Beispiel in aride Länder mit Wassermangel, wo er fern von Flüssen oder Meeresküsten gebaut oder zur Meerwasserentsalzung eingesetzt werden kann.

Am Anfang stand Deutschland

Prototypen von Kugelhaufenreaktoren wurden zuerst in Deutschland gebaut. Die Mutter aller Kugelhaufenreaktoren ist der heliumgekühlte AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor) mit einer Leistung von 13 MW_{el}, der 1967 im Forschungszentrum Jülich in der Nähe von Köln den Betrieb aufgenommen hat. Der insgesamt sehr erfolgreiche AVR hatte aber auch unausgereifte technologische Lösungen, so beispielsweise die Anordnung des Dampferzeugers über dem Reaktorkern. Dies erlaubt es dem schweren Dampf bei einem Heizrohrbruch in den vom leichteren Heliumgas durchströmten Reaktorkern abzusinken. Der AVR wurde 1988 im Nachgang zum Unfall in Tschernobyl stillgelegt.

Nach dem AVR wurde 1971 mit dem Bau des ebenfalls heliumgekühlten Thorium-Hochtemperatur-Reaktors (THTR) mit einer elektrischen Leistung von 300 MW begonnen. 1985 ging diese Anlage in Hamm-Uentrop in Nordrhein-Westfalen erstmals ans Netz. Es zeigte sich jedoch, dass diese Anlage zu gross und zu komplex war, sodass zahlreiche technische Probleme auftraten, beispielsweise mit steckengebliebenen Brennstoffkugeln. Als Konstruktionsfehler erwiesen sich unter anderem die direkt in die Kugelpackungen zu pressenden Abschaltstäbe. Im Verbund mit den hohen Betriebskosten und der politischen Abwendung von der Kernenergie in Deutschland wurde der THTR 1988 stillgelegt.

Das deutsche Wissen und die mit den Prototypen gemachten Erfahrungen wurden danach in China und Südafrika wieder aufgenommen. Anders als in China, wo vorsichtigerweise auf Dampferzeuger und -turbine gesetzt wird, sollte in Südafrika beim «Pebble Bed Modular Reactor» (PBMR) das Kühlmittel Helium direkt eine Gasturbine antreiben. Dieses Projekt wurde 2010 vorerst eingestellt.



Kommerzielle Brennstoffkugelfabrik in Baotou, Innere Mongolei, mit einer Produktionskapazität von 300'000 Kugeln pro Jahr. (Foto: CNEC)

Weiterführende chinesische Quellen

- Zhang Zuoy et al. (2019): Development Strategy of High Temperature Gas Cooled Reactor in China. Publiziert in: Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, Vol. 21, Issue 1, pp 12–19. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.01.003
- Zhang Ping et al. (2019): Nuclear Hydrogen Production Based on High Temperature Gas Cooled Reactor in China. Publiziert in: Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, Vol. 21, Issue 1, pp 20–28. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.01.004