

Faktenblatt

Dezember 2019

Innovativer Reaktor mit Kugeln als Brennstoff

Wie alle Gebiete der Technik entwickelt sich auch die Nukleartechnik laufend weiter. So erlebt derzeit das bereits vor Jahrzehnten in Deutschland erprobte Konzept eines gasgekühlten Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktors in China eine Wiedergeburt. Dieses innovative Reaktorsystem verbessert die bereits sehr hohe Sicherheit moderner Kernkraftwerke nochmals: Ein Unfall mit Kernschmelze ist aus naturgesetzlichen Gründen nicht möglich.

Zurzeit stehen weltweit mehr als 50 Kernkraftwerke in Bau. Grossmehrheitlich handelt es sich dabei um grosse Leichtwasserreaktoren der fortgeschrittenen dritten Genera-

tion, den Nachfolgern der hierzulande in Betrieb stehenden zuverlässigen Kernkraftwerke der (modernisierten) zweiten Generation.

Parallel zu den grossen Anlagen sind in den vergangenen Jahren auch die sogenannten kleinen, modularen Reaktoren (Small Modular Reactors, SMR) mit neuer Dynamik weiterentwickelt worden (siehe dazu das Faktenblatt «Reaktorsysteme der Zukunft» des Nuklearforums). Zu ihnen gehört auch der chinesische HTR-PM, der «High-Temperature Gas-Cooled Reactor – Pebble Bed Module». Die ersten beiden Prototypen dieses innovativen Reaktorsystems nehmen derzeit am Standort Shidao Bay in der Provinz Shandong den Betrieb auf.

Chinesischer Pragmatismus

Der HTR-PM ist eine kleine, mit Heliumgas gekühlte Reaktoreinheit mit einer elektrischen Leistung von nur 100 Megawatt – weniger als ein Drittel der Leistung der Reaktoren in Beznau oder Mühleberg. Seine Technologie geht auf die Pionierarbeit in Deutschland zurück (vgl. Kasten S. 4) 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.

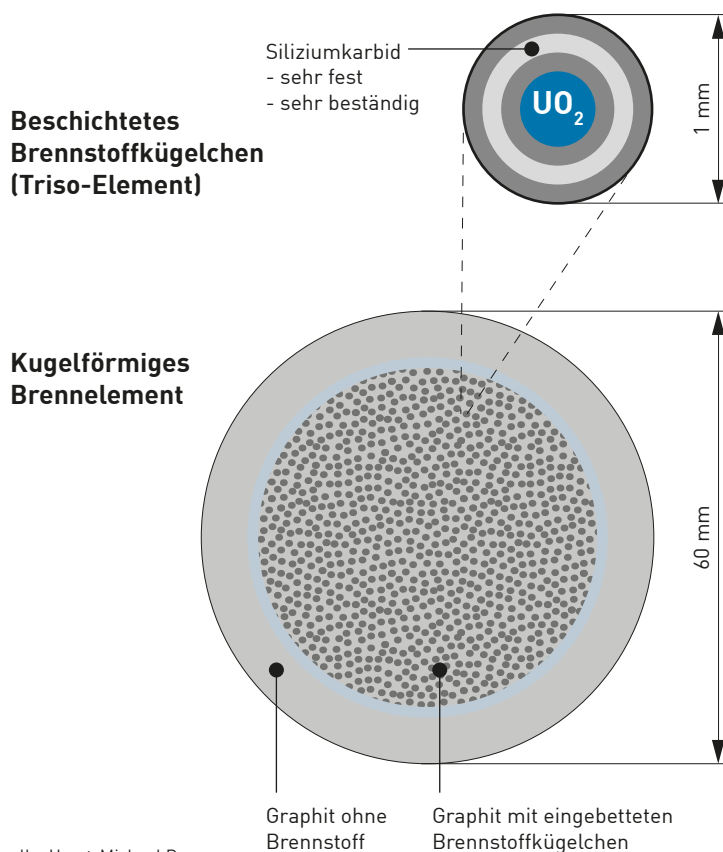
Der chinesische Ansatz zeichnet sich durch pragmatisches Vorgehen aus, um die Entwicklungsrisiken zu minimieren. So wurde die Austrittstemperatur des Heliums auf 750 °C beschränkt und vorerst auf eine Helium-Gasturbine verzichtet. Das heisse Helium aus dem Reaktor wird vielmehr zu einem Dampferzeuger geleitet, der wie bei herkömmlichen Druckwasserreaktoren Wasserdampf für die



Meilenstein in China: Im Kernkraftwerk Shidao Bay werden die ersten Graphitkugeln – hier noch ohne Urankern – angeliefert.

Foto: CNI 23 Construction Co. Ltd

Schicht um Schicht zu widerstandfähigem Kernbrennstoff



Quelle: Horst-Michael Prasser
© 2019 Nuklearforum Schweiz

Kugeln statt Rohre

In herkömmlichen Leichtwasserreaktoren, wie sie derzeit in der Schweiz in Betrieb stehen, ist der Kernbrennstoff in dünne, mehrere Meter lange Rohre eingefüllt, die zu Brennelementen gebündelt werden.

Wie die Bezeichnung «Kugelhaufenreaktor» sagt, hat hier der Kernbrennstoff die Form von tennisballgrossen Kugeln. Diese Kugeln sind mehrschichtig aufgebaut. Das Kernstück bilden die sogenannten Triso-Elemente (tristructural-isotropic fuel). Das sind winzige Kugelchen von rund einem Millimeter Durchmesser. Im Kern befindet sich der Brennstoff Uranoxid (UO_2).

Der Brennstoffkern wird zunächst mit mehreren Schichten Graphit (Kohlenstoff) ummantelt. Das Graphit wirkt als Puffer zum Ausgleich von Volumenänderungen als Fol-

ge der Bildung neuer Elemente durch die Kernspaltung. Sonst könnten die Kugelchen aufbrechen. Darüber wird eine chemisch sehr widerstandsfähige Schutzschicht aus feuerfestem Siliziumkarbid aufgetragen und nochmals eine Schicht aus besonders dichtem Graphit. Damit ist sichergestellt, dass die radioaktiven Spaltprodukte zuverlässig eingeschlossen bleiben.

Zusammengepresst zu Tennisball

Diese gut geschützten Kugelchen werden in einem weiteren Produktionsschritt mit Graphitpulver gemischt und zu etwa tennisballgrossen Kugel gepresst (die Kugeln in diesem Faktenblatt sind in Originalgrösse abgebildet). Schliesslich werden sie nochmals mit einer Graphitschicht ohne Brennstoff überzogen. Das Graphit, in das die Kugelchen eingebettet sind, wirkt – zusammen mit dem Reflektor an der Reaktorwand – als Moderator zum Abbremsen der Neutronen, damit es überhaupt zu Kernspaltungen kommt. So entsteht ein Kernbrennstoff, der auch bei den denkbar höchsten Temperaturen im Reaktor intakt bleibt.

Das grundlegende Verfahren zur Herstellung dieses Brennstoffs ist in Deutschland entwickelt und danach von den Entwicklungsingenieuren in China übernommen worden. Die praktischen Erfahrungen mit diesem Brennstoff in den Versuchsreaktoren in Deutschland (siehe Kasten S. 4) und Tests mit chinesischen Kugeln im niederländischen Forschungszentrum Petten haben gezeigt, dass – wenn bei Herstellung und Betrieb die Qualitätsrichtlinien eingehalten werden – dieser Brennstoff einen ausgezeichneten Schutz gegen das Freisetzen radioaktiver Stoffen bietet – auch und gerade bei einem schweren Störfall.

Der Nachteil dieser extrem soliden Verpackung ist, dass die Wiederaufarbeitung zum Rezyklieren des Brennstoffs entsprechend aufwendiger ist bzw. bei gleicher Menge radioaktiver Stoffe ein vergleichsweise grosses Abfallvolumen entsteht.

Turbine liefert. Ziel der Demonstrationsanlage in Shidao Bay ist, Lösungen für den Einsatz im industriellen Massstab zu entwickeln. Die Anlage soll ab 2020 routinemässig genutzt werden und ist für 40 Jahre Betriebszeit ausgelegt worden.

Das Grundprinzip des Kugelhaufenreaktors besteht darin, dass die Brennstoffkugeln kontinuierlich von oben in den Reaktor-druckbehälter eingefüllt werden. Das Kühlmittel Helium durchströmt dabei die Hohlräume zwischen den Kugeln. Unten werden gleichzeitig die gebrauchten Kugeln fortlaufend wieder herausgenommen, ihr Abbrand gemessen und danach wieder oben in den Reaktorkern eingeführt. Ist die Abbrandgrenze erreicht, wird die Kugel ausgemustert und in das Lager für ausgedienten Brennstoff verbracht.

Diese Betriebsart hat den Vorteil, dass nicht der gesamte Brennstoffvorrat für einen Betriebszyklus gleichzeitig im Reaktor sein muss. Auf der anderen Seite haben die technischen und kernphysikalischen Besonderheiten des Kugelhaufenreaktors zur Folge, dass dieses Konzept aus sicherheitstechnischen Gründen nur für kleine Reaktoren geeignet ist.

Werden bestimmte Grenzen eingehalten, ist dieses Reaktorsystem inhärent sicher.

Kernschmelze nicht möglich

Die inhärente Sicherheit ergibt sich aus mehreren Eigenschaften des HTR-PM:

- **Gefahrloses Kühlmittel:** Das Kühlmittel Helium wird beim Durchströmen des Reaktors nicht radioaktiv und die Kontamination mit radioaktiven Stoffen bleibt sehr gering. Helium ist zudem ein Edelgas – es ist nicht giftig, und es kann weder brennen noch explodieren.
- **Kleine Leistungsdichte:** Der Reaktorkern hat gemessen an seiner Wärmeproduktion ein grosses Volumen. Bei einem Störfall kann daher viel Wärme schadlos im Reaktor zwischengespeichert und danach durch natürliche Prozesse abgeführt werden.
- **Hohe Temperaturen erlaubt:** Steigt bei einem Störfall die Temperatur an, kommt die Kernspaltung von selbst zum Erliegen.



Hochtechnologie für die Zukunft: Anlieferung des ersten Reaktor-druckbehälters im Demonstrations-Kernkraftwerk Shidao Bay.

Foto: Xinhua

Da Graphit sehr hohe Temperaturen verträgt, ist ein Schmelzen des Kerns durch die Nachzerfallswärme nicht möglich. Das ist ein sehr grosser Vorteil gegenüber den herkömmlichen Leichtwasserreaktoren.

Notstrom zu keinem Zeitpunkt nötig

Diese Sicherheitseigenschaften sind in praktischen Experimenten am Versuchsreaktor AVR in Jülich (siehe Kasten S. 4) und am HTR-10 in Peking nachgewiesen worden:

- Die Erhöhung der Brennstofftemperatur als Folge eines Störfalls mit totalem Verlust der Kühlung verursacht keine signifikante Freisetzung von radioaktiven Stoffen.
- Gelangt Wasser oder Luft in den Reaktor, laufen die dadurch ausgelösten chemischen Prozesse langsam ab und können über Tage oder Wochen gestoppt werden. Wasserstoffexplosionen wie in Fukushima sind nicht zu erwarten.
- Auch der Verlust der externen Stromversorgung (der Auslöser des Unfalls in Fukushima) oder der Ausfall des Heliumgebläses übersteht der HTR-PM ohne Schaden. Eine Versorgung mit Notstrom ist zu keinem Zeitpunkt nötig.

Weitere Informationen zum Thema auf:

Nuklearforum Schweiz, Faktenblatt «Reaktorsysteme der Zukunft»: www.nuklearforum.ch, Link «Fakten und Wissen»

Tsinghua University, Institute of Nuclear and New Energy Technology: www.inet.tsinghua.edu.cn

X-Energy, Maryland, USA: www.x-energy.com

Zu diesen attraktiven sicherheitstechnischen Eigenschaften kommt hinzu, dass die Austrittstemperatur des Heliums mit rund 750 Grad Celsius vergleichsweise hoch ist. Die hohen Temperaturen laden, neben einem hohen Wirkungsgrad bei der Stromproduktion, auch zur Auskopplung von Prozesswärme für die Industrie oder zur Versorgung urbaner Fernwärmenetze ein.

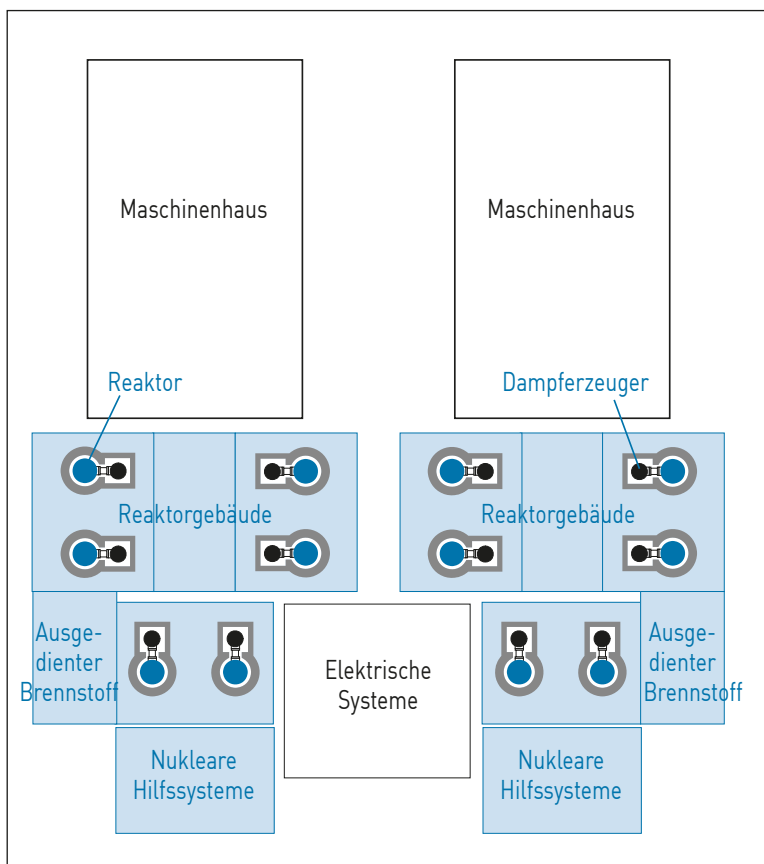
Flexibel, modular, erweiterbar

Der HTR-PM ist ein modulares System, das je nach Bedarf zu Gruppen von 200 Megawatt (zwei Reaktoreinheiten) bis 600 Megawatt zusammengesetzt werden kann – der Standardanlage HTR-PM600 mit sechs Reaktoren und einer einzigen Turbogeneratorgruppe. Zwei solche Anlagen ergeben zusammen eine Leistung vergleichbar mit Leibstadt, dem grössten Kernkraftwerk der Schweiz.

Nuklearforum Schweiz
 Frohburgstrasse 20
 4600 Olten
 Telefon 031 560 36 50
 info@nuklearforum.ch
 www.nuklearforum.ch

In China besteht grosses Interesse am Kugelhaufenreaktor. Bereits ist ein erster Standort für eine rein kommerzielle Anlage evaluiert worden: Ruijin in der Provinz Jianxi. Es wäre das erste Kernkraftwerk Chinas, das im Innern des Landes und nicht an der Küste gebaut wird.

China hofft auf Exporterfolge mit diesem Kraftwerkstyp, der sich für wenig ausgebaute oder kleine, isolierte Netze wie auch für das Entsalzen von Meerwasser eignet. Konkretes Interesse angemeldet haben bisher Saudi-Arabien, die Vereinigten Arabischen Emirate und Indonesien, aber auch Südafrika, wo ein ebenfalls auf deutscher Technik aufbauendes Projekt – der Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) – im Jahr 2010 vorerst eingestellt worden ist. Beim PBMR sollte das Kühlmittel Helium direkt eine Turbine antreiben, ohne den Umweg über einen Dampferzeuger.



Layout für ein Kraftwerk mit 1200 Megawatt, bestehend aus zwei HTR-PM600. Bei der Standardanlage HTR-PM600 treiben drei T-förmig angeordnete Module aus je zwei Reaktoreinheiten eine Dampfturbine an und können zusammen eine Leistung von maximal 600 Megawatt bereitstellen.

Am Anfang stand Deutschland

Die Mutter aller Kugelhaufenreaktoren ist der heliumgekühlte AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor) mit einer Leistung von 13 Megawatt elektrisch, der 1967 im Forschungszentrum Jülich in der Nähe von Köln den Betrieb aufgenommen hat. 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 Megawatt 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, u.a. mit steckengebliebenen Brennstoffkugeln. Im Verbund mit den hohen Betriebskosten und der politischen Abwendung von der Kernenergie in Deutschland wurde der THTR 1988 stillgelegt.

Neben China sind derzeit nur die USA bei Kugelhaufenreaktoren aktiv. Dort unterstützt das Energieministerium die Entwicklung des Xe-100 der Firma X-energy mit einer elektrischen Leistung von 35 Megawatt.