



Reaktorsysteme der Zukunft: Strom für übermorgen

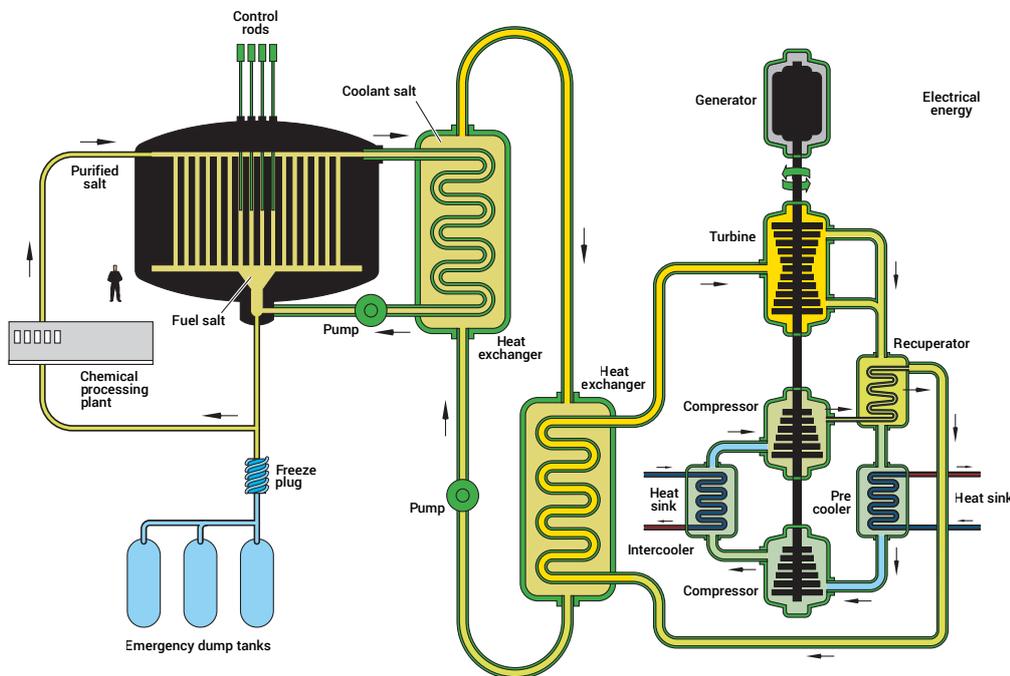
Derzeit werden vor allem Kernkraftwerke der sogenannten dritten Generation gebaut. Für morgen stehen die kleinen, modularen Reaktoren (Small Modular Reactors, SMRs) in den Startlöchern, von denen auch schon die ersten Prototypen und Demonstrationsanlagen in Bau oder sogar in Betrieb sind. Bereits arbeiten Wissenschaftler an den Reaktoren für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts.

▲ Abb:
Die Zukunft ist jetzt: Das chinesische Demonstrations-Kernkraftwerk Shidao Bay mit einem Hochtemperatur-Kugelhautenreaktor HTR-PM ist seit Ende 2021 in Betrieb.
Quelle: Tsinghua University

Zusammen mit den erneuerbaren Energien werden die Systeme der sogenannten vierten Generation einen Schlüsselbeitrag zur nachhaltigen Sicherung der Energieversorgung der Menschheit bilden. Auf Initiative der USA haben sich im Jahr 2000 neun Länder zum «Generation IV International Forum» (GIF) zusammengeschlossen. Heute sind neben der Europäischen Atomgemeinschaft Euratom 13 Länder am GIF beteiligt, darunter auch die Schweiz. Ziel ist, für die Zeit nach 2040 neue Reaktoren und Brennstoffkreisläufe zu entwickeln, die den Ressourcenverbrauch drastisch reduzieren, die Menge des radioaktiven Abfalls erheblich vermindern und den Missbrauch für Kernwaffen wesentlich erschweren. Das GIF hat sechs Reaktorsysteme für die Weiterentwicklung ausgewählt. Drei davon

sind sogenannte Schnelle Reaktoren (Fast Reactors). Das heisst, dass sich die Neutronen, die im Reaktor die Kettenreaktion aufrechterhalten, ungebremst bewegen. Diese Reaktortypen benötigen keinen Moderator. Vom Molten Salt Reactor und dem Supercritical Water-cooled Reactor gibt es sowohl Konzepte mit schnellen Neutronen als auch solche mit thermischen, sprich durch einen Moderator abgebremsten. Als Moderator dient je nach Reaktorkonzept normales (leichtes) Wasser, schweres Wasser oder Grafit.

Informationen zum «Generation IV International Forum» finden sich auf:
www.gen-4.org.



◀ Abb:
Molten Salt Reactor
(MSR)
Quelle: Generation IV
International Forum

Gas-cooled Fast Reactor (GFR):

mit Gas (Helium) gekühlter Schneller Hochtemperatur-Reaktor mit geschlossenem Brennstoffkreislauf; Weiterentwicklung aus den heutigen britischen Magnox- und AGR-Reaktoren. Der GFR verbindet die Eigenschaften von Schnellen Reaktoren (Minimierung von Abfällen durch mehrfache Wiederaufarbeitung des Brennstoffs und Spaltung langlebiger Aktinide) mit denen von Hochtemperatur-Reaktoren (hoher Wirkungsgrad des thermischen Kreislaufs und industrielle Nutzung der erzeugten Wärme, z. B. für die Wasserstoffherzeugung).

Lead-cooled Fast Reactor (LFR):

mit Blei gekühlter Schneller Reaktor mit geschlossenem Brennstoffkreislauf; Weiterentwicklung von bestehenden kleinen Reaktoren für Schiffsantriebe. Das LFR-Konzept zeichnet sich durch eine hohe passive Sicherheit aus. Blei als Kühlmittel macht es möglich, den Reaktor bei niedrigem Druck zu betreiben. Es hat einen sehr hohen Siedepunkt, was das Verdampfen des Kühlmittels im LFR praktisch unmöglich macht. Zudem ist Blei wenig reaktionsfreudig, was zum Beispiel Wasserstoffexplosionen verhindert, und hält Spaltprodukte gut zurück.

Sodium-cooled Fast Reactor (SFR):

mit Natrium gekühlter Schneller Reaktor mit geschlossenem Brennstoffkreislauf; Weiterentwicklung von seit Jahrzehnten erprobten Reaktorsystemen. Die Kühlung mit flüssigem Natrium ermöglicht eine hohe Leistungsdichte bei einem tiefen Anteil Kühlmittel am Volumen und den Betrieb bei niedrigem Druck. Während die sauerstofffreie Umgebung Korrosion verhindert, reagiert Natrium chemisch mit Luft und Wasser und erfordert ein geschlossenes Kühlmittelsystem.

Molten Salt Reactor (MSR):

Salzschmelze-Reaktor; Brennstoff und Kühlmittel bestehen aus einer Schmelze aus Uranfluorid. Ein experimenteller MSR stand in den 1960er-Jahren in den USA in Betrieb. MSR bieten ein beträchtliches Potenzial für die Minimierung von radioaktiven Abfällen. Kernschmelzen sind bei diesem Konzept ausgeschlossen und der Betrieb bei niedrigem Druck ist ebenfalls möglich. Schnelle MSR können auch mit Thorium betrieben werden.

Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR):

Leichtwasserreaktor mit überkritischem Dampf; Weiterentwicklung der heutigen Siedewasserreaktoren. Diese Hochtemperatur- und Hochdruck-Reaktoren arbeiten oberhalb des thermodynamisch kritischen Punkts von Wasser (374°C, 22,1 MPa). Sie haben einen höheren Wirkungsgrad als aktuelle Reaktoren und kommen ohne Kühlmittelpumpen sowie ohne Dampferzeuger und -abscheider aus. Sowohl die Größe des benötigten Containments wie auch der Dampfturbinen können beim SCWR gegenüber «herkömmlichen» Reaktoren erheblich verkleinert werden.

Very High Temperature Reactor (VHTR):

Weiterentwicklung der bisherigen Hochtemperatur-Reaktoren wie beispielsweise des modularen Kugelhaufenreaktors. Der VHTR ist ein nächster Schritt in der evolutionären Entwicklung von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren. Es handelt sich um einen grafitmoderierten, heliumgekühlten Reaktor mit thermischem Neutronenspektrum. Dieser ist für die Erzeugung von Strom und Wasserstoff bestimmt, wobei letzterer mit Hilfe von thermochemischen, elektrochemischen oder hybriden Verfahren aus Wasser gewonnen wird. Seine hohe Austrittstemperatur macht den VHTR auch für die Chemie-, Öl- und Eisenindustrie interessant.

Forschungsprogramm der EU

2007 hat die EU die «Sustainable Nuclear Fission Technology Platform» lanciert. Die Forschungsthemen umfassen u.a. den Bau eines natriumgekühlten Schnellen Reaktors («Astrid»), eines bleigekühlten Schnellen Reaktors («Alfred») sowie eines gasgekühlten Schnellen Hochtemperatur-Reaktors («Allegro»). Zudem wird im belgischen Mol ein multidisziplinärer Forschungsreaktor («Myrrha») für innovative Lösungen etwa zur Behandlung radioaktiver Abfälle oder zur Entwicklung fortgeschrittener Reaktorsysteme gebaut. Beim «Myrrha» kommt ein externer Beschleuniger zum Einsatz (ADS, Accelerator Driven System). Diese Technologie nutzt auch das Genfer Startup Transmutex (siehe Kasten).

«Atommüllfresser» made in Switzerland

Die Transmutex SA mit Sitz in Genf entwickelt einen subkritischen flüssigmetallgekühlten Thoriumreaktor mit Teilchenbeschleuniger mit der Bezeichnung TMX-START (Subcritical Transmutation Accelerated Reactor using Thorium). Subkritisch bedeutet, dass der TMX-START nicht selbständig eine Kettenreaktion aufrechterhalten kann. Es braucht Neutronen aus einem Teilchenbeschleuniger, damit in einem Brutprozess aus Thorium-232 Uran-233 entsteht, das dann unter Freisetzung von Energie gespalten wird. Somit stoppt bei einem Unterbruch der Stromzufuhr automatisch der Neutronenfluss, was wiederum die Abschaltung des Reaktors selbst innert Millisekunden zur Folge hat. Dieser automatische Unterbruch der Kernspaltung bei einem Ausfall der internen oder externen Energieversorgung bedeutet ein hohes Mass an passiver Sicherheit. Durch die Flüssigmetallkühlung kann zudem die Nachzerfallswärme wirkungsvoll abgeführt werden und Wasserstoffexplosionen sind nicht möglich.

Im Transmutex-Reaktor können auch radioaktive Abfälle als Brennstoff eingesetzt werden. Die langlebigsten Abfallbestandteile werden unter Neutronenbeschuss in kurzlebige Abfälle umgewandelt. So bleibt am Ende weniger Abfall, der für rund 500 Jahre in einem Tiefenlager eingeschlossen werden muss, also um ein Vielfaches weniger lang als ohne Transmutation. Transmutex will in den frühen 2030er-Jahren einen Prototypen vorstellen.

www.transmutex.com

Technologie für übermorgen

Bei fast allen diesen Projekten handelt es sich um Demonstrationsanlagen, welche die Wirtschaftlichkeit noch nicht nachgewiesen haben. Unabhängig vom GIF hat Russland Ende 2016 einen natriumgekühlten Schnellen Reaktor mit 800 Megawatt elektrischer Leistung in Betrieb genommen. Auch China und Indien wollen in Zukunft Schnelle Reaktoren einsetzen. Das französische «Astrid»-Projekt wurde hingegen 2019 auf Eis gelegt, da die gegenwärtig tiefen Preise für Natururan dem vollständigen Recycling des Brennstoffs entgegenstehen.

Zurück in die Zukunft: Kugeln statt Rohre

Bereits in Betrieb ist in China das erste Kraftwerk mit Kugelhaufenreaktoren. 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. Entwickelt worden ist er an der Tsinghua-Universität in Peking, wo seit 2003 der Versuchsreaktor HTR-10 erfolgreich betrieben wird. Diese vor mehr als fünfzig Jahren in Deutschland erprobte Reaktorauslegung verfügt über eine Reihe besonderer Eigenschaften. 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. Im Kugelhaufenreaktor dagegen hat der Kernbrennstoff die Form von tennisballgrossen Kugeln. Diese Kugeln sind mehrschichtig aufgebaut. Das Kernstück bilden die sogenannten Triso-Elemente (tristructural-isotropic fuel), winzige Kügelchen von rund einem Millimeter Durchmesser. Im Kern befindet sich der Brennstoff Uranoxid (UO_2). Der Brennstoffkern wird zunächst mit mehreren Schichten Grafit (Kohlenstoff) ummantelt. Das Grafit wirkt als Puffer zum Ausgleich von Volumenänderungen als Folge der Bildung neuer Elemente durch die Kernspaltung. Sonst könnten die Kügelchen aufbrechen. Darüber wird eine chemisch sehr widerstandsfähige Schutzschicht aus feuerfestem Siliziumkarbid aufgetragen und nochmals eine Schicht aus besonders dichtem Grafit. Damit ist sichergestellt, dass die radioaktiven Spaltprodukte zuverlässig eingeschlossen bleiben.

Informationen zur «Sustainable Nuclear Fission Technology Platform» der EU finden sich auf: www.snetp.eu.

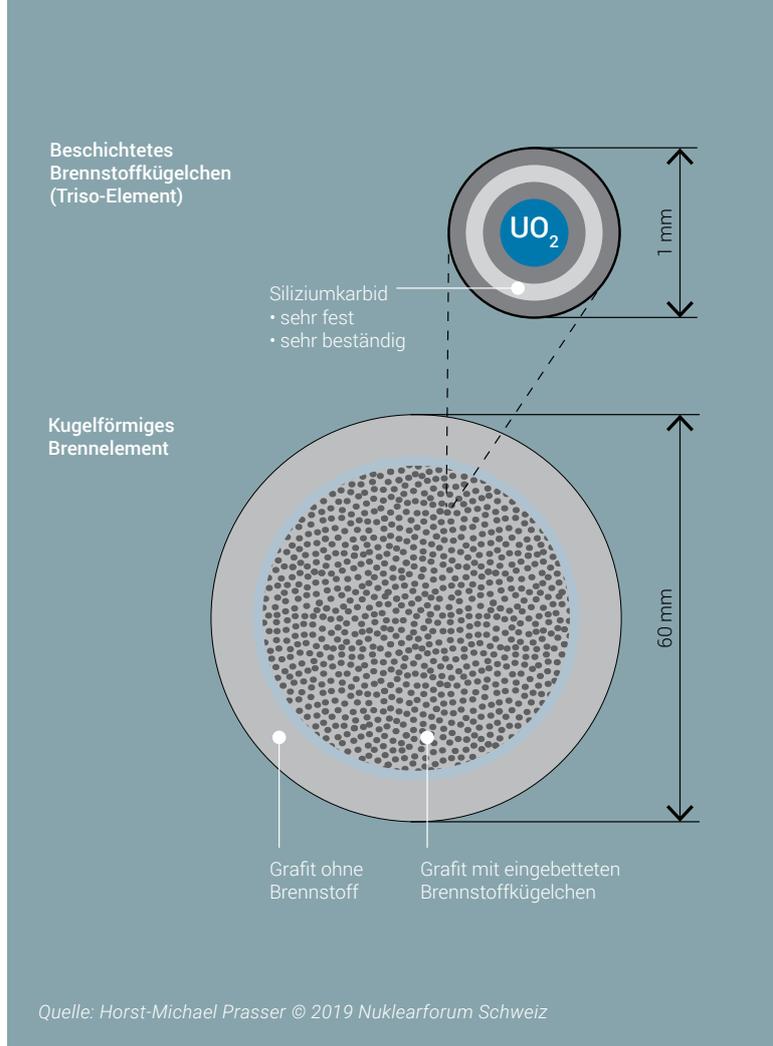
Zusammengepresst zu Tennisball

Diese gut geschützten Kügelchen werden in einem weiteren Produktionsschritt mit Grafitpulver gemischt und zu einer etwa tennisballgrossen Kugel gepresst. Schliesslich werden sie nochmals mit einer Grafitschicht ohne Brennstoff überzogen. Das Grafit, in das die Kügelchen 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 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 Stoffe 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.

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 er-

geben zusammen eine Leistung vergleichbar mit Leibstadt, dem grössten Kernkraftwerk der Schweiz. 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.



Quelle: Horst-Michael Prasser © 2019 Nuklearforum Schweiz

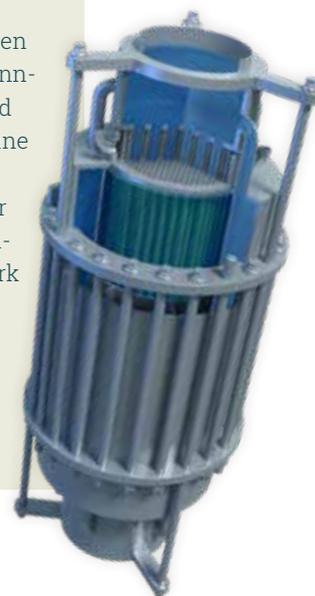
4

Kombinationen verschiedener Konzepte

Das deutsch-kanadische Unternehmen Dual Fluid bezeichnet seinen gleichnamigen Reaktor als «Kernkraft der fünften Generation». Der patentierte Dual-Fluid-Reaktor ist ein Schneller Reaktor mit flüssigem Brennstoff und separater Kühlschleife mit flüssigem Blei. Die Technologie kombiniert somit die passiven Sicherheitsmerkmale des LFR mit denen des MSR. Für zusätzlichen Schutz sorgen integrierte Schmelzstopfen in den Leitungen: Wenn die

vorgesehene Temperatur doch überschritten wird, lösen sie sich auf. Dann läuft der Brennstoff nach unten in sichere Behälter ab und die Kettenreaktion stoppt sofort. Durch seine geringe Grösse kann der Reaktor ausserdem in einem unterirdischen Betonbunker sicher untergebracht werden. Mehrere Einheiten lassen sich zu einem Grosskraftwerk kombinieren, was den Dual-Fluid-Reaktor wiederum zu einem kleinen, modularen Reaktor (SMR) macht.

www.dual-fluid.com



▼ Abb.:
Modelldarstellung des
Dual-Fluid-Reaktors.
Quelle: Dual Fluid