

Faktenblatt

November 2019

Reaktorsysteme der Zukunft Vielfältige Entwicklungen mit neuer Dynamik

Während zurzeit die leistungsstarken und sehr sicheren Leichtwasserreaktoren der dritten Generation in Bau stehen, arbeiten Wissenschaftler und Ingenieure weltweit an einer Vielzahl weiterer Reaktortypen. Dazu gehören kleine modulare Reaktoren für die Welt von morgen wie auch die Reaktorsysteme der nächsten, vierten Generation für eine nachhaltige Energieversorgung von übermorgen.

Wenig beachtet in der Öffentlichkeit stehen kleine Reaktorsysteme seit Jahrzehnten im Alltagseinsatz – vornehmlich als Schiffsantriebe im militärischen Bereich und in Eisbrechern. Gemäss der Definition der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) der Uno gelten Reaktorsysteme als «klein»,

wenn ihre elektrische Leistung geringer ist als 300 Megawatt. Zum Vergleich: Ein Block des Kernkraftwerks Beznau leistet 365 Megawatt und Leibstadt, das grösste Kernkraftwerk der Schweiz, hat eine Leistung von 1220 Megawatt.

Innovative Reaktorkonzepte

Die derzeit entwickelten kleinen Reaktoren umfassen eine Vielzahl unterschiedlichster Systeme, die mit dem Sammelbegriff «Small Modular Reactors» (SMR) bezeichnet werden. Bei den SMR handelt es sich jedoch nicht einfach nur um stark verkleinerte herkömmliche Kernkraftwerke. Teilweise beruhen sie auf seit Jahrzehnten bekannten, bisher aber noch nicht erprobten innovativen Reaktorkonzepten. Vorteile beim Einsatz von SMR sind:

- In der Regel erfüllen sie höchste Sicherheitsstandards. Die meisten SMR verfügen über ein hohes Mass an sogenannter passiver bzw. physikalisch inhärenter Sicherheit. Das bedeutet, dass bei Störfällen kein aktiver Eingriff von Pumpen und Ventilen nötig ist und die Sicherheit der Anlage auch ohne Energiezufuhr oder Eingriffe der Bedienungsmannschaft gewährleistet bleibt.
- SMR benötigen wenig Wartung und können ohne Nachladung während Jahren oder gar Jahrzehnten Wärme und Strom liefern. Entsprechend tief sind die Betriebskosten.
- Wegen ihrer geringen Grösse können SMR unterirdisch gebaut werden wie auch in unmittelbarer Nachbarschaft von Verbrauchern. Das können Siedlungen sein oder Grossindustrien mit hohem Wärme- und Strombedarf. Sie eignen sich auch für Regionen mit wenig ausgebautem Stromnetz, als Energiequelle für Anlagen zur Entsalzung von Meerwasser oder zur Stromversorgung von Inseln.



Bild: NuScale Power

Nukleartechnik für morgen: Kontrollraum-Simulator des modularen Reaktorsystems der amerikanischen Firma NuScale. Dieses auf tiefe Baukosten ausgerichtete System steht vor der Zulassung in den USA.

- Sie erfordern einen vergleichsweise geringen Kapitaleinsatz, was die Finanzierung erleichtert und Flexibilität gibt. Je nach Bedarf können SMR schrittweise Modul um Modul nach dem Baukastensystem zu grösseren Produktionsanlagen erweitert werden.
- Anders als grosse Reaktorensysteme, die vor Ort zusammengebaut werden müssen, können SMR in Serienfertigung in einer Fabrik montiert, danach per Lastwagen an den Einsatzort gebracht und nach Ende der Betriebszeit wieder zurückgebracht werden.

¹ Details dazu im Faktenblatt des Nuklearforums: «Innovativer Reaktor mit Kugeln als Brennstoff». www.nuklearforum.ch, Links «Fakten und Wissen», «Faktenblätter»

² Rosner R. & Goldberg S. (2011): Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.

³ Locatelli G., Bingham C. & Mancini M. (2014): Small Modular Reactors: A Comprehensive Overview of their Economics and Strategic Aspects.

⁴ Tomi J. Lindroos et al. (2019): A techno-economic assessment of NuScale and DHR-400 reactors in a district heating and cooling grid.

⁵ Konsta Värri & Sanna Syri (2019): The Possible Role of Modular Nuclear Reactors in District Heating: Case Helsinki Region.

Neu gewecktes Interesse

Seit einiger Zeit zeigen Investoren wieder mehr Interesse an SMR für zivile Anwendungen. Vor allem in Argentinien, China, Grossbritannien, Kanada, Russland und den USA wird ihre Entwicklung vorangetrieben. Bereits fertiggestellt ist das weltweit erste schwimmende Kernkraftwerk mit zwei Einheiten des russischen Druckwasserreaktors KLT-40S mit je 38 Megawatt Leistung für den Einsatz an der Nordküste Sibiriens. In China steht der Bau eines Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktors vor der Vollendung¹. Ebenfalls in Bau steht in Argentinien der Prototyp eines kleinen Druckwasserreaktors. China und Argentinien wollen diese Systeme auf dem internationalen Markt anbieten.

Nächster Schritt: Zertifizierung

Sowohl in den USA wie in Grossbritannien fördert die Regierung die Entwicklung von SMR als «Clean Technology». So hat NuScale in den USA ein Gesuch für die Zertifizierung eines neu entwickelten SMR eingereicht, die Ende 2020 abgeschlossen sein soll. Das erste Kraftwerk mit zwölf Modulen soll auf dem Gelände des Idaho National Laboratory gebaut werden.

Das Zertifizierungsverfahren dauert in westlichen Ländern mehrere Jahre. Dabei sind jene SMR im Vorteil, die wie der Reaktor von NuScale auf erprobten Technologien basieren, da die Behörden auf langjähriger Erfahrung aufbauen können. Wichtig ist auch, dass ein System typenzertifiziert werden kann, sodass beim Zubau von weiteren Modulen nicht jedes Mal das gesamte Bewilligungsverfahren neu durchlaufen werden muss.

Nachweis der Wirtschaftlichkeit

Die für den kommerziellen Einsatz vorgesehenen SMR haben ihre Wirtschaftlichkeit noch nicht demonstriert. Energiewirtschaftliche Studien in den USA und Europa^{2,3} zeigen zwar ein bedeutendes Marktpotenzial, doch müssen zunächst die Einstiegsbarrieren überwunden werden. So kommt beispielsweise der Kostenvorteil der Serienproduktion erst zum Tragen, wenn eine gewisse Anzahl Module produziert und die Lernkurve durchschritten ist. Wenn dieser Punkt erreicht ist und die Bewilligungsverfahren zügig abgewickelt werden können, dürften SMR konkurrenzfähig werden.

Praxisnah durchgerechnet haben das zwei finnische Studien am Beispiel der Fernwärme- und Stromversorgung von Helsinki^{4,5}. Sie verweisen zwar ebenfalls auf die erhöhten Kosten der ersten gebauten Einheiten («First-of-a-kind»). Auf der anderen Seite seien SMR für die Wärmeversorgung interessant, da es wegen der ausgeschöpften Holzproduktion und des beschränkten Erdwärmepotenzials kaum CO₂-arme Alternativen gebe. Um auch auf dem nordischen Strommarkt konkurrenzfähig zu sein, seien international harmonisierte Bewilligungsverfahren und staatliche Starthilfen zur Aufnahme der Serienproduktion nötig.

In Europa interessieren sich besonders Estland, Polen, Rumänien und Tschechien für SMR. In China sollen SMR in Zukunft in den Städten die Kohle als Wärmelieferanten ablösen und die enorme Luftverschmutzung reduzieren.



Bild: Rosatom

Die «Akademik Lomonosow», das erste schwimmende Kernkraftwerk der Welt, auf dem Weg nach Ostsibirien. Die Reaktortechnik stammt von den heutigen russischen nuklear angetriebenen Eisbrechern. Derzeit stehen drei weitere Eisbrecher mit leistungsstärkeren Reaktoren in Bau.

Kleine modulare Reaktorsysteme in fortgeschrittener Entwicklung (Auswahl)

HTR-PM, chinesischer Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktor (Prototyp im Bau)

Beim High Temperature Gas-cooled Reactor – Pebble Bed Module (HTR-PM) handelt es sich um eine chinesische Weiterentwicklung des deutschen Kugelhaufenreaktors bzw. eines Versuchsreaktors an der Tsinghua-Universität in Beijing. Bei diesem mit Heliumgas gekühlten Reaktor werden sandkorn-grosse Brennstoffkugeln mit Schutzüberzügen versehen und anschliessend in tennisball-grosse Graphitkugeln eingeschlossen. Bei Versagen der Kühlung ist eine Kernschmelze nicht möglich. Dieser innovative Reaktortyp steht gegenwärtig in Shidao-Bay in China in Bau.

Leistung pro Modul: 250 MW_{th} / 100 MW_e

Besondere Herausforderungen: Materialtechnik für sehr hohe Temperaturen (~1000°C); Rezyklierung des ausgedienten Brennstoffs schwierig.

www.chng.com.cn



Carem-25, argentinischer Druckwasserreaktor (Prototyp im Bau)

Der Carem (Central Argentina de Elementos Modulares) geht auf eine aufgegebene Entwicklung eines U-Boot-Antriebssystems zurück. Es handelt sich um einen Druckwasserreaktor, bei dem die Dampferzeuger in den Reaktordruckbehälter integriert sind. Das System verfügt über passive Sicherheit. Der Prototyp Carem-25 steht derzeit neben dem Kernkraftwerk Atucha in Bau und soll 2020 in Betrieb gehen. Entwicklungsziel sind leistungsstärkere Versionen bis 120 MW_e.

Leistung pro Modul: 100 MW_{th} / 30 MW_e

www.cnea.gov.ar/carem



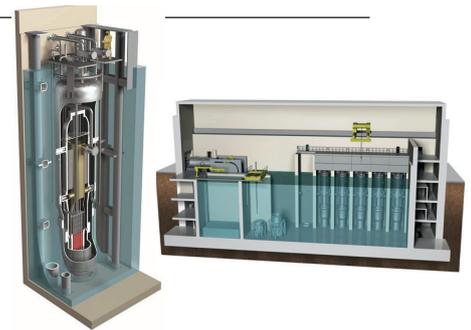
IPWR von NuScale

Der Integral Pressurized Water Reactor (IPWR) ist von der amerikanischen Firma NuScale Power Inc. an der Oregon State University entwickelt worden. Beim einzelnen NuScale Power Module™ handelt sich um einen kleinen, strassentransportierbaren Reaktor auf der Basis der bewährten Druckwasserreaktor-Technologie. Der Dampferzeuger befindet sich innerhalb des Reaktordruckbehälters. Vorgesehen sind Anlagen mit bis zu 12 Modulen (720 MW_e) in je einem eigenen Containment, die sich in einem unterirdischen, mit Wasser gefluteten Sicherheitsgebäude befinden.

Leistung pro Modul: 200 MW_{th} / 60 MW_e

Zertifizierung in den USA im Gang. Interessenten in Jordanien, Kanada, Rumänien, Tschechien und den USA.

www.nuscalepower.com



SMR-160 von Holtec

Der SMR-160 wird vom Nuklearausrüster Holtec International vorgeschlagen. Es handelt sich um einen teilweise unterirdisch gebauten, kompakten Druckwasserreaktor. Der Primärkühlkreis wird einzig von der Schwerkraft angetrieben und benötigt weder Pumpen noch Ventile und auch keine externe Energiezufuhr für die Nachkühlung. In Trockengebieten kann er auch mit Luftkühlung betrieben werden.

Leistung pro Modul: ~500 MW_{th} / 160 MW_e

Zertifizierung in Kanada im Gang. Projekt mit sechs Modulen in der Ukraine.

www.holtecinternational.com



BWRX-300 von GE Hitachi Nuclear Energy

Der von General Electric Hitachi entwickelte SMR ist ein kleiner Siedewasserreaktor auf der Basis des ESBWR, einem fortgeschrittenen Reaktorsystem der dritten Generation mit 1520 MW_e, der in den USA zertifiziert, aber noch nicht gebaut worden ist. Der BWRX-300 ist gegenüber dem ESBWR sehr stark vereinfacht worden und verwendet zahlreiche erprobte Komponenten und eine etablierte Lieferkette. Er verfügt über eine natürliche Zirkulation mit passiven Sicherheitssystemen.

Leistung pro Modul: ~900 MW_{th} / 300 MW_e

Zurzeit in Vorprüfung in Kanada. Interessenten in Estland und Polen.

<https://nuclear.gepower.com>



ACP100 von CNNC (Linglong One)

Der chinesische ACP100 (Advanced Chinese Pressurized Water Reactor) stammt von der französischen Druckwasserreaktorlinie ab. Alle primären Systeme wie Druckhalter und Dampferzeuger sind im Reaktordruckbehälter integriert. Das passive Kühlsystem ist vom AP1000 von Westinghouse und dem fortgeschrittenen chinesischen Hualong One übernommen worden. Die Reaktor-auslegung des ACP100 ist 2016 von der IAEA erfolgreich geprüft worden.

Leistung pro Modul: 385 MW_{th} / 125 MW_e

Bau der ersten Einheit geplant in Changjiang auf der Insel Hainan. Baubeginn Ende 2019. Entwickelt werden auch weitere Leistungsvarianten und eine schwimmende Version.

www.cnncc.com.cn



Vierte Generation: heute noch Zukunftsmusik

Bereits arbeiten Wissenschaftler an den Reaktoren für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts. Zusammen mit den erneuerbaren Energien werden diese 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 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 die folgenden sechs Reaktorsysteme für die Weiterentwicklung ausgewählt:

- **Molten Salt Reactor (MSR):** Salzschnmelze-Reaktor; Brennstoff und Kühlmittel bestehen aus einer Schmelze aus Uranfluorid. Ein experimenteller MSR stand in den 1960er-Jahren in den USA in Betrieb.
- **Gas-cooled Fast Reactor (GFR):** gasgekühlter Schneller Reaktor; Weiterentwicklung aus den heutigen britischen Magnox- und AGR-Reaktoren.

- **Lead-cooled Fast Reactor (LFR):** mit Blei gekühlter Schneller Reaktor; Weiterentwicklung von bestehenden kleinen Reaktoren für Schiffsantriebe.
- **Sodium-cooled Fast Reactor (SFR):** mit Natrium gekühlter Schneller Reaktor; Weiterentwicklung von seit Jahrzehnten erprobten Reaktorsystemen.
- **Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR):** Leichtwasserreaktor mit überkritischem Dampf; Weiterentwicklung der heutigen Siedewasserreaktoren.
- **Very High Temperature Reactor (VHTR):** Weiterentwicklung der bisherigen Hochtemperatur-Reaktoren wie beispielsweise des modularen Kugelhaufenreaktors.

Allen diesen Reaktorsystemen ist gemeinsam, dass sie höchste Anforderungen an die Materialtechnik stellen. Oberste Priorität haben der SFR und der VHTR.

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 fortschrittlicher Reaktorsysteme gebaut. Beim «Myrrha» kommt ein externer Beschleuniger zum Einsatz (ADS, Accelerator Driven System).

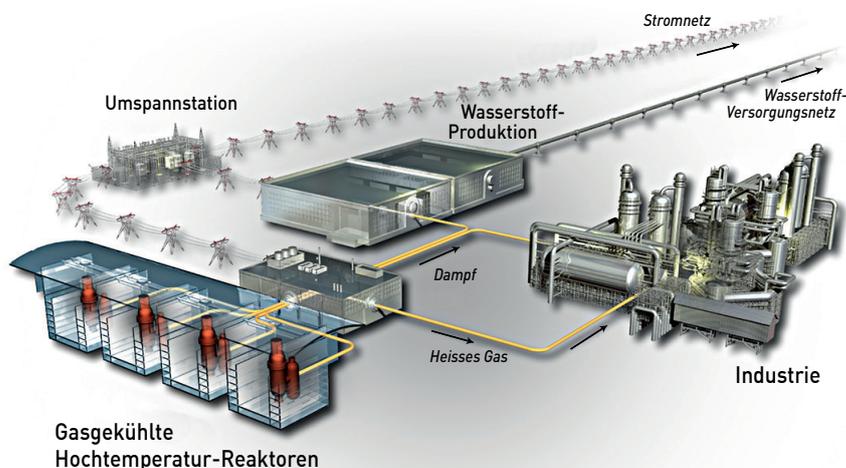
Technologie für übermorgen

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 aufs Eis gelegt, da die gegenwärtig tiefen Preise für Natururan dem vollständigen Recycling des Brennstoffs entgegenstehen.

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

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

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



Vorschlag aus den USA für die vierte Generation: gasgekühlte Hochtemperatur-Reaktoren für die gleichzeitige Produktion von Strom, Wasserstoff und Prozesswärme für die Industrie (www.ngnpalliance.org)

Quelle: Idaho National Laboratory