



Small Modular Reactors: Vielfältige Entwicklungen mit neuer Dynamik

Während zurzeit die leistungsstarken und sehr sicheren Leichtwasserreaktoren der dritten Generation in Bau stehen, wächst das Interesse an kleinen, modularen Reaktoren. Sie zeichnen sich aus durch passive Sicherheit, erhöhte Flexibilität, Serienfertigung sowie einem tieferen Wartungsbedarf.

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. In ihrer jüngsten Zusammenstellung listet die IAEO über 70 weltweit laufende Projekte mit unterschiedlichen Konzepten auf¹. Darin erwähnt die IAEO auch Mikroreaktoren mit Leistungen bis 10 Megawatt. Diese meist mobilen Anlagen können zum Beispiel Dieselgeneratoren ersetzen.

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.

▲ Künstlerische Darstellung des modularen Reaktorsystems der amerikanischen Firma NuScale. Dieses auf tiefe Baukosten ausgerichtete System ist der erste in den USA zertifizierte Small Modular Reactor.

¹ «Advances in Small Modular Reactor Technology Developments – 2020 Edition» https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

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*

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.*

- SMR benötigen wenig Wartung und können ohne Nachladung während Jahren oder gar Jahrzehnten Wärme und Strom liefern.
- 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.
- 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.

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 Vollendung. Ebenfalls in Bau steht in Argentinien der Prototyp eines kleinen Druckwasserreaktors. China und Argentinien wollen diese Systeme auf dem internationalen Markt anbieten.

▼ 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.



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 neben Grossbritannien besonders Estland, Polen, Rumänien, Bulgarien und Tschechien für SMR. In China sollen SMR in Zukunft in den Städten die Kohle als Wärmelieferanten ablösen und die enorme Luftverschmutzung reduzieren. Mit einem SMR in Betrieb und zwei weiteren in Bau beheimatet China mit Russland die an den weitesten fortgeschrittenen Projekten (Karte nächste Seite).

Erste Zertifizierungen im Westen

In den USA, Kanada und Grossbritannien fördert die Regierung die Entwicklung von SMR als «Clean Technology». So hat der NuScale-SMR 2020 in den USA die Auslegungszertifizierung (Design Certification Application, DCA) erhalten. 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.

Die derzeit am weitesten entwickelten Small Modular Reactors (SMR)



Förderung einheimischer SMR

Das Energieministerium der USA fördert die Entwicklung heimischer SMR im Rahmen von Programmen wie dem Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP) oder dem Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN). Ähnliches macht die britische Regierung, deren im Oktober 2021 veröffentlichte «Net Zero Strategy» ausdrücklich den Beitrag von SMR zur Erreichung der Klimaziele vorsieht. Hierbei spielt das Unternehmen Rolls Royce mit seiner Erfahrung beim Bau von Reaktoren für U-Boote eine tragende Rolle.

Kanada: breit abgestützter Aktionsplan

In Kanada sollen SMR eine entscheidende Rolle bei der Reduktion der Klimagase spielen und anspruchsvolle Arbeitsplätze sichern. Diese Überzeugung der Regierung basiert auf einer sorgfältig erarbeiteten und breit abgestützten Roadmap.

Das Erstellen des Berichts «A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors»⁶ brachte in einem zehnmonatigen Prozess alle interessierten und betroffenen Gruppen des Landes zu einer Diskussion über das Potenzial der SMR in Kanada zusammen. Die Dialogpartner reichten dabei von Experten bis hin zur indigenen Bevölkerung in den nördlichen Territorien. Daraus wurden sich konkrete Empfehlungen für das weitere Vorgehen abgeleitet, darunter die rechts abgebildeten Einsatzmöglichkeiten.

⁶ https://smroadmap.ca/wpcontent/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf

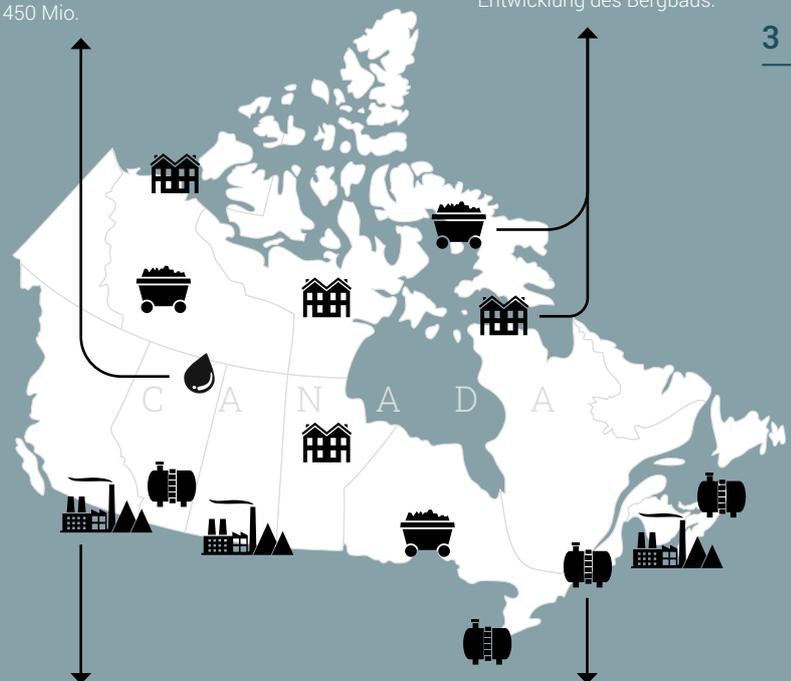
Einsatzmöglichkeiten von SMR in Kanada

Ölsande

- Dampf für den SAGD-Prozess (steam-assisted gravity drainage) und Strom für den Anlagenausbau an 96 Standorten
- Durchschnittliche Nachfrage nach Wärme und Strom von 210 MWe
- Ersatz von 5 % durch SMR zwischen 2030 und 2040 ermöglicht jährliche Wertschöpfung von CAD 350 bis 450 Mio.

Abgelegene Siedlungen und Minen

- 79 abgelegene Siedlungen mit Energiebedarf > 1 MWe
- 24 bestehende und potenzielle Minen ohne Netzanschluss
- SMR als Ersatz für teures Diesel- und Heizöl
- Derzeit ist die teure Energie aus Diesel ein Hindernis für die Entwicklung des Bergbaus.



Ersatz für Kohlekraftwerke

- 29 Blöcke an 17 Standorten mit mittlerer Leistung von 343 MWe
- Ersatz von 10 % durch SMR zwischen 2030 und 2040 ermöglicht jährliche Wertschöpfung von CAD 469 Mio.

Heissdampf für die Schwerindustrie

- 85 Zonen mit Schwerindustrie (z.B. Chemie, Raffinerien von Erdöl) mit mittlerem Bedarf von 25 bis 50 MWe
- Ersatz von 5 % durch SMR zwischen 2030 und 2040 ermöglicht jährliche Wertschöpfung von CAD 46 Mio.

Quelle: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, 2018

Kleine, modulare Reaktorsysteme in fortgeschrittener Entwicklung (Auswahl)

HTR-PM, chinesischer Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktor (Prototyp in 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 sandkorngrosse Brennstoffkugeln mit Schutzüberzügen versehen und anschliessend in tennisballgrosse 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);
Rezyklisierung des ausgedienten Brennstoffs schwierig.

www.chng.com.cn

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>

Carem-25 argentinischer Druckwasserreaktor (Prototyp in 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. Entwicklungsziel sind leistungsstärkere Versionen bis 120 MW_e.

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

www.cnea.gov.ar/carem

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.holteciinternational.com

NuScale Power Module

Das Power Module ist von der amerikanischen Firma NuScale Power Inc. an der Oregon State University entwickelt worden. Dabei handelt es 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

Auslegungszertifizierung (Design Certification Application, DCA) in den USA erhalten, Interessenten in Jordanien, Kanada, Rumänien.

www.nuscalepower.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 Reaktorauslegung des ACP100 ist 2016 von der IAEO erfolgreich geprüft worden.

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

Erste Einheit in Bau in Changjiang auf der Insel Hainan.

Entwickelt werden auch weitere Leistungsvarianten und eine schwimmende Version.

www.cnncc.com.cn