

# Schöne neue Reaktorwelt

**Hintergrund** | Derzeit diskutierte aktuelle oder künftige Reaktormodelle und was es mit ihnen auf sich hat

## Kleine modulare Reaktoren (Small Modular Reactors, SMR)

Kleine, in einer Fabrik produzierte und als fertige Einheit ausgelieferte Reaktoren sollen Kosten sparen, überall ohne großen Aufwand installiert werden können und flexibler regelbar sein als Großanlagen. „Klein“ ist aber relativ: Die Ideen reichen vom für einige Jahre mehr oder weniger autarken Vorgarten-Reaktor bis zu 300-Megawatt-Blöcken, die Turbinen eines Großkraftwerks antreiben sollen. Technologisch sind sowohl herkömmliche, zum Teil verbesserte Leichtwasserreaktoren, als auch neue Reaktormodelle (Generation IV, → MSR) darunter.

### Die Haken

Für die immensen Kosten von Atomkraftwerken ist vor allem die aufwändige Sicherheitstechnik verantwortlich. Viele Mini-Reaktor-Konzepte setzen deshalb darauf, Sicherheitssysteme einzusparen oder Abstriche beim Strahlenschutz zu machen. Selbst dann aber ist fraglich, ob Bau, Betrieb, Unterhalt und Kontrolle vieler kleiner Atomanlagen, gemessen am Strom-Output, billiger sind als wenige große AKW. Viele kleine Anlagen erhöhen zudem das Risiko, dass radioaktives Material in falsche Hände kommt.

### Status quo

Etlliche Firmen in den USA, Großbritannien und China verfolgen SMR-Pläne, darunter bekannte Reaktorbauer wie Rolls-Royce, GE-Hitachi und die China General Nuclear Power Corp und Startups wie Nuscale. Insgesamt waren 2015 knapp 70 Projekte bekannt. Die britische Regierung stellte 2016 im Haushalt 250 Millionen Pfund für einen „SMR Wettbewerb“ zur Verfügung, um geeignete SMR-Konzepte zu entwickeln. Bis zu vier Projekte sollen intensiv gefördert werden. Auch das US-Energieministerium und die chinesische Regierung fördern die Entwicklung von SMR. Ein integrierter Klein-Reaktor (Carem-25, siehe nächste Spalte) ist in Argentinien in Bau.

## Weiterentwickelte Druckwasserreaktoren (u.a. Evolutionary Pressurized Water Reactor, EPR)

Druckwasserreaktoren, wie sie weltweit hundertfach im Einsatz sind, entweder um ein paar zusätzliche Sicherheitsmerkmale ergänzt und mit größerer Leistung (z.B. EPR), was die Kosten pro Kilowattstunde senken soll. Oder extra kleine, sogenannte integrierte Modelle (→ SMR), bei denen der Primärkreislauf mit im Reaktordruckbehälter liegt und die passive Sicherheitsmerkmale aufweisen sollen.

### Die Haken

Bei den großen Reaktoren ist die Gefahr schwerer Unfälle bis hin zum Super-GAU keineswegs gebannt. Die beiden EPR in Olkiluoto und Flamanville sind nicht nur finanziell, sondern auch sicherheitstechnisch ein Fiasko: entscheidende Reaktorbauteile weisen haarsträubende Mängel auf. Auch der EPR übersteht keinen Absturz eines großen Flugzeugs, und der vielgerühmte Core-Catcher, eine Wanne unter dem Reaktor, die bei einer Kernschmelze den Brennstoff auffangen soll, könnte, wenn er gebraucht wird, sogar eine verheerende Explosion des Reaktors auslösen. Die angeblich überragenden, zum Teil passiven Sicherheitsmerkmale kleiner integrierter Reaktoren sind bisher ungeklärt, zumal unter Extrembedingungen. Bei Kopplung mehrerer Anlagen steigt das Risiko aber.

### Status quo

In China ging vor Kurzem der erste EPR ans Netz, Russland nahm Anfang 2017 einen WWER-1200 in Betrieb. Die EPR-Baustellen in Finnland und Frankreich sind Jahre hinter ihrem Zeitplan zurück, die Kosten komplett aus dem Ruder gelaufen; Hersteller Areva musste deshalb vom französischen Staat gerettet werden. Der im britischen Hinkley Point geplante EPR kann wenn überhaupt, dann nur mit massiven Subventionen errichtet werden. Verzögert sich die Inbetriebnahme des EPR in Flamanville weiter, steht auch Hinkley Point wieder zur Debatte. Was die kleinen, integrierten Reaktoren angeht: siehe SMR

## Schneller Brutreaktor (Fast Breeder Reactor, FBR)

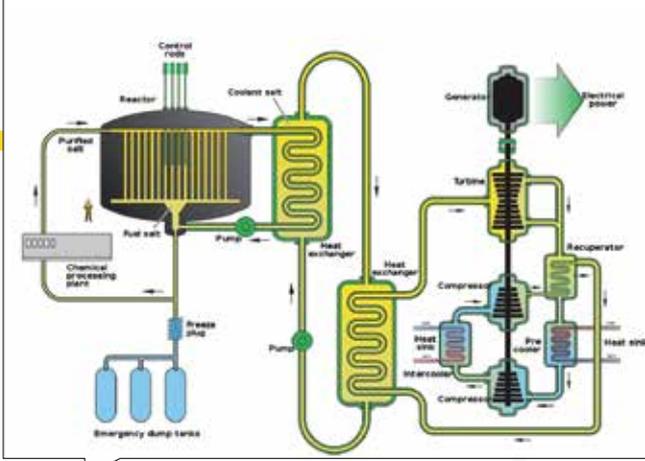
Nutzt statt Wasser flüssiges Natrium als Kühlmittel, dieses bremst die Neutronen weniger ab. Insgesamt werden bei der Kettenreaktion so mehr Neutronen freigesetzt. Für den Erhalt der Kettenreaktion nicht benötigte überschüssige Neutronen können dann in um den Reaktorkern herum angeordneten Brutzonen neuen Brennstoff erzeugen, indem sie etwa nicht spaltbares Uran-238 in Plutonium verwandeln. Ein funktionierender Brüter soll so mehr Brennstoff erbrüten als er selbst verbraucht. Andere Konzepte setzen auf Blei-Bismuth oder ein Gas als Kühlmittel.

### Die Haken

Das extrem brennbare Natrium ist eine immanente Gefahr; alle bisherigen Brutreaktoren hatten deshalb mit Bränden und anderen Problemen zu kämpfen. Der Schnelle Brüter Kalkar ging wegen gravierender Sicherheitsdefizite nie in Betrieb, der französische „Superphénix“ lag die meiste Zeit still. Um das erbrütete Plutonium zu nutzen, muss es in Wiederaufarbeitungsanlagen extrahiert und dann zu MOX-Brennelementen verarbeitet werden. Die Brüter-Technik bedeutet also ein Festhalten an der Plutoniumwirtschaft mit allen negativen Folgen.

### Status quo

Die European Industrial Initiative on Sustainable Nuclear Energy will bis 2040 einen kommerziellen Brüter entwickeln, ein Prototyp namens „Astrid“ soll 2023 in Bau gehen. Die Euratom fördert die Entwicklung ebenfalls. Der Bau des indischen Brüters beim AKW Madras ist Jahre in Verzug. Brüter gelten als die am weitesten entwickelte „Generation IV“-Reaktortechnik. Auch hier sind allerdings noch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Höhe von mehreren Milliarden Dollar nötig.



Grafik: US Department of Energy

## Flüssigsalzreaktor (Molten Salt [Fast] Reactor, MSR/MSFR)

Der Brennstoff ist in einer Salzschnmelze aufgelöst, die zugleich als Kühlmittel mit niedrigem Druck zwischen Reaktor und Wärmetauscher zirkuliert. Nur im Reaktorkern ist die Schmelze kritisch. Bei Störungen soll sie in einen Abflanstank abfließen, die Kettenreaktion so stoppen. Die meisten MSFR-Modelle sollen mit Thorium betrieben werden, aus dem der Reaktor dann spaltbares Uran erbrütet. Der von einem privaten Berliner Institut konzipierte sogenannte Dual Fluid Reaktor ist eine Sonderform des MSR mit einem vom Brennstoffkreislauf getrennten Kühlkreislauf, der etwa mit flüssigem Blei gefüllt ist.

### ⚡ Die Haken

Die heiße, radioaktive Salzschnmelze verursacht immense Korrosionsprobleme; dagegen ausreichend beständige Materialien müssen erst noch gefunden werden. Im Betrieb entsteht viel Tritium, entsprechend hoch sind die Emissionen. Beim Erkalten des Reaktors kristallisieren die Salze aus, dabei kann die Brennstoffmasse kritisch werden. Bei einem Betrieb mit Thorium ist das unbemerkte Abzweigen atomwaffenfähigen Materials (Uran-233 bzw. Protactinium-233) möglich und nötig; die Proliferationsgefahr ist daher sehr hoch (siehe Interview Seite 10).

### ☢ Status quo

Euratom fördert die Entwicklung von MSFR-Reaktoren am JRC Standort Karlsruhe mit mehreren Millionen Euro. China will bis 2032 ein kommerzielles System entwickelt haben. Forschungen zu MSR gibt es auch in den USA, in Frankreich, China und in der Schweiz. Von Investitionen in den Dual Fluid Reaktor ist nichts bekannt.

## Kugelhaufenreaktor ([Very] High Temperature Reactor, [V]HTR)

Die Betriebstemperatur ist mit 700 bis 1.000 Grad etwa dreimal so hoch wie in herkömmlichen Druckwasserreaktoren, das erhöht den Wirkungsgrad und ermöglicht eine direkte industrielle Nutzung als Prozesswärme. Die kontinuierlich eingespeisten und entnommenen kugelförmigen oder prismatischen Brennelemente bestehen wiederum aus Tausenden millimetergroßen, mit Kohlenstoff und Siliciumcarbid überzogenen Brennstoffkügelchen, die die Spaltprodukte zurückhalten sollen. Die geringe Leistungsdichte im Reaktorkern soll sich positiv auf die Sicherheit auswirken.

### ⚡ Die Haken

In allen bisher betriebenen Kugelhaufenreaktoren kam es zu massiven Problemen, weil Kugeln steckenblieben, zerbrachen und sich anders im Kern bewegten als vorhergesagt. Die wesentlichen technischen Schwierigkeiten für die Sicherheit sowie eine kommerzielle Nutzung eines VHTR sind nach wie vor ungelöst. Die Ummantelung der Brennstoffkügelchen kann den Austritt radioaktiver Stoffe zudem nicht vollständig verhindern. Radioaktiver Grafitstaub kann bei Störfällen die Reaktivität ansteigen lassen, Wassereinträge in den Reaktor müssen unbedingt vermieden werden.

### ☢ Status quo

HTR-Projekte in Deutschland, USA und Südafrika sind allesamt gescheitert. Das am weitesten fortgeschrittene Projekt ist der chinesische Demonstrationsreaktor, dessen zwei Blöcke zusammen 210 Megawatt elektrische Leistung bringen sollen. In den USA haben Atomindustrie und Regierung mehr als 1,5 Milliarden Dollar für HTR-Entwicklungen ausgegeben; geplant ist der Bau einer aus mehreren Modulen (→ SMR) bestehenden 625-Megawatt-Anlage. Mit einem kommerziellen Reaktor ist erst gegen Mitte des Jahrhunderts zu rechnen, die Entwicklung wird noch mehrere Milliarden Dollar verschlingen.

## Fusionsreaktor

Beim Fusionsreaktor geht es nicht um Kernspaltung, sondern um Kernfusion – wie in der Sonne. Die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium sollen bei extrem hohem Druck und Temperaturen von mehr als 100 Millionen Grad verschmolzen, die dabei freiwerdende Hitze zur Stromerzeugung genutzt werden.

### ⚡ Die Haken

Die Fusion funktioniert nur unter Bedingungen wie auf der Sonne. Auf der Erde konnten diese bisher nur mit Wasserstoffbomben erzeugt werden. Die Reaktorbauteile werden stark radioaktiv kontaminiert und verspröden schnell. Als Brennstoff kommen große Mengen radiologisch problematischen Tritiums zum Einsatz, bei einem Unfall müsste die Bevölkerung evakuiert werden. Der Umgang mit Tritium stellt auch eine Proliferationsgefahr dar. Die technische Realisierbarkeit eines Fusionskraftwerks ist offen, an einen kommerziellen Reaktor nicht vor Ende des Jahrhunderts zu denken.

### ☢ Status quo

In Greifswald und Garching stehen Fusions-Forschungsanlagen. Im südfranzösischen Cadarache ist der internationale Versuchsreaktor ITER in Bau, dessen voraussichtliche Kosten inzwischen auf 20 Milliarden Euro angewachsen sind. Mit einem Beginn der ersten Fusionsexperimente ist nicht vor 2035 zu rechnen.