

Small Modular Reactor (SMR) Vorstellung aktueller Projekte und des jeweiligen Status

Dr. Manfred Schroeder, Global Energy Solutions

Dr.-Ing. Bernhard Leidinger, Vereidigter Sachverständiger (IHK Essen-Mülheim-Oberhausen) und Unternehmensberater, leidinger.technology

6. Juni 2025

Inhalt

Vorbemerkung	3
Die Kernenergie als klimaneutrale Energie	5
Weltweite Nutzung konventioneller Kernenergie	6
Innovationstreiber SMR	12
USA	15
Europa	16
Weltweite Prognosen.....	18
Technik der SMR.....	20
Klassifizierung (8, 9)	20
Konventionelle SMR.....	21
Technologie fortschrittlicher (advanced) SMR-Konzepte (8,9,10)	24
Entwicklung von Generation IV Reaktoren	24
Molten Salt Reaktor (MSR).....	24
Liquid Metal Reaktor (LMR)	27
Dual Fluid Reaktor (DFR)	28
Hochtemperaturreaktor (HTR)	29
Neue Einsatzbereiche von SMR.....	31
Die Bereitstellung von Prozessdampf für die chemische und pharmazeutische Industrie	31
Einsatz von SMR zur Herstellung von Wasserstoff	32
Weitere Aspekte.....	33
Entsorgung abgebrannter Brennelemente	33
Sicherheit.....	36
SMR Nutzung in verschiedenen Regionen	37
Deutschland	37
Europäische Union (27,28)	37
USA (29)	39
Kosten von SMR	40
Quellen	41
Abkürzungsverzeichnis	43
Anhang: Überblick über die wichtigsten SMR Projekte weltweit	44

Vorbemerkung

Im Rahmen der Dekarbonisierung des gesamten Energieverbrauchs Deutschlands werden Verbrennungsprozesse zur Erzeugung Gebäudewärme und industrieller wie gewerblicher Prozesswärme durch Verfahren abgelöst, die den Einsatz elektrischer Energie erfordern.

Unter Berücksichtigung aller Wirkungsgradverbesserungen, die durch den Einsatz von Umgebungswärme aus Luft, Wasser und Boden entstehen, sowie die Nutzung der industriellen Abwärme ergibt sich eine Verdreifachung des Strombedarfs auf ca. 1.500 TWh jährlich bis 2045, falls der Endverbrauch von Energie über diesen Zeitraum stabil bleiben sollte. Tatsächlich muss davon ausgegangen werden, dass ein Teil des produzierenden Gewerbes und der Industrie entweder die Produktion aufgibt oder diese ins Ausland verlagert. Weiterhin werden voraussichtlich nicht alle Prozesse dekarbonisiert werden. Aus diesem Grund wird mit einem zukünftigen Strombedarf von nur 800 bis 1.000 TWh gerechnet, was etwa das Doppelte des Betrags in 2025 sein wird.

Denkt man an den zukünftigen Bedarf für Anwendungen der Künstlichen Intelligenz (KI), so stellt die Verdoppelung des Strombedarfs eine untere Grenze dar.

Die elektrische Energie muss zuverlässig verfügbar sein. Das bedeutet, dass die Tagesgänge der Photovoltaik und die saisonalen Profile von Photovoltaik und Windenergie durch Speicher ausgeglichen werden müssen, die über eine bislang nie dagewesene Kapazität verfügen müssen. Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher, Wasserstoffspeicher und Batterien stehen heute bereits im bislang deutlich zu kleinen Maßstab zur Verfügung. Ob sie in dem erforderlichen Maße ausgebaut werden können, wird stark bezweifelt. Wirkungsgradverluste und Investitionskosten sprechen deutlich dagegen.

Eine andere vorstellbare Lösung ist der überregionale Austausch von Strom mit den Nachbarländern. Aber auch hier muss man sich fragen, warum diese für den Winter, in dem der Energiebedarf besonders hoch und die Lieferfähigkeit der Photovoltaik besonders niedrig ist, steuerbare Kapazitäten für Deutschland errichten sollen, die nur wenige Monate im Jahr benötigt werden.

Insofern liegt es nahe, sich Gedanken über eine eigene Aufstellung steuerbarer Erzeugungskapazität zu machen. Diese sollte aufgrund des Potenzials an Wärmeauskopplung für Fernwärmesysteme und Prozessdampflieferung nahe an den Verbrauchern errichtet werden. Sie sollte nicht auf Verbrennungsprozessen kohlenstoffhaltiger Primärenergie beruhen oder aber mit Verfahren ausgestattet sein, CO₂ aus den Abgasen durch CCS oder CCU zu entfernen. Schließlich sollte die jeweilige Kapazität aufgrund der Vorteile dezentraler und damit netzdienlicher Energieversorgung

an den Bedarf im jeweiligen Umfeld angepasst sein. Die eingesetzte Technologie sollte keine negative Umweltauswirkungen auslösen – insbesondere werde Gefahren bzgl. der Freisetzung von gefährlichen Stoffen bergen, noch Entsorgungsaufgaben hervorrufen, die Generationen von Nachkommen mit der sicheren Lagerung beaufschlagen.

Mit dem Ziel, alle diese Anforderungen zu erfüllen, wurden weltweit eine größere Anzahl von Projekten zur Entwicklung von kleinen modularen Kernreaktoren – Small Modular Reactors (SMR) – initiiert. Der vorliegende Bericht hat sich zum Ziel gesetzt, die wesentlichen Informationen zu diesen Projekten darzulegen und die wichtigsten Eigenschaften bekannt zu geben.

Bei dieser Arbeit erfolgte eine starke Orientierung an den Veröffentlichungen der Internationalen Energieagentur (IEA) (2) sowie der Internationalen Agentur für Kernenergie (IAEA) (5). Insbesondere wurden mehrere Aussagen sowie Grafiken nach Überprüfung des Inhalts 1:1 übernommen.

Des Weiteren werden im vorliegenden Bericht die technischen Grundlagen, die speziellen Ausführungen und die potentiellen Anwendungen von SMR beschrieben.

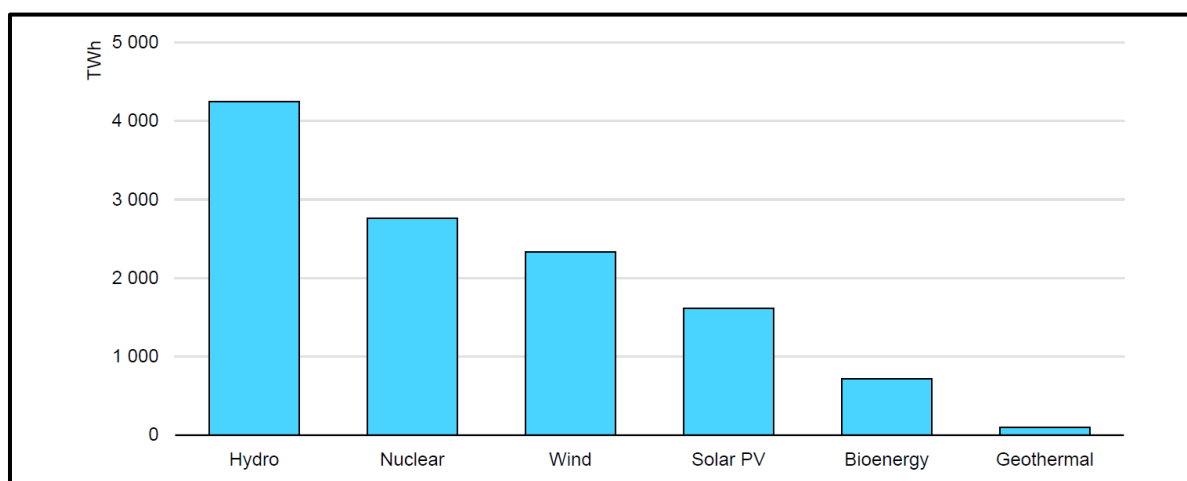
Global Energy Solutions hat bereits als Teil der Basisdokumentation des vom BMZ geförderten Projektes „Global Energy Perspectives“ das Kapitel „**Erzeugung von Strom durch Kernkraft**“ veröffentlicht (1). Darin wurden verschiedene Aspekte hauptsächlich der konventionellen Kernenergieanwendung behandelt: Reaktortypen, Kernbrennstoffe, Reaktorsicherheit, Entsorgung, Proliferation etc. Auf diese Themen wird im vorliegenden Bericht Bezug genommen.

Die Kernenergie als klimaneutrale Energie

Die Kernenergie ist nach der Wasserkraft die zweitgrößte Quelle für emissionsarmen Strom (Abb. 1). Sie erzeugte 2023 20 % mehr Energie als die Windenergie und 70 % mehr als die Photovoltaik und liefert außerdem Prozesswärme für die Industrie, zudem Fernwärme und Energie für Entsalzungsanlagen in mehreren Ländern.

Seit 1971 wurden durch Kernenergie 72 Gt CO₂-Emissionen vermieden, indem der Bedarf an fossilen Energieträgern für die Erzeugung von Strom sowie Prozess- und Fernwärme verringert wurde. Weltweit sind aktuell 410 Kernreaktoren in Betrieb. Sie erzeugen 9 % des Strombedarfs und vermeiden somit rund 1,5 Gt CO₂ Emissionen der jährlichen 37 Gt CO₂-Emissionen.

Abb. 1. Quellen für den CO₂-freien Betrieb von Stromerzeugungsanlagen weltweit, 2023 (2)



Die anteilige Bedeutung des Energieeinsatzes für verschiedene Produktionsverfahren kann grob über den Anteil an den Energiekosten relativ zum Umsatz geschätzt werden. Besonders energieintensiv sind hiernach die chemische Industrie, die Herstellung von Aluminium, Kupfer und hochlegierten Stählen sowie die IT. Letztere ist durch die bevorstehende Nutzung der künstlichen Intelligenz gerade im Aufbruch.

Die großen IT-Unternehmen fokussieren sich aus Gründen der für die Umwelterklärung geforderte Transparenz immer mehr auf eine emissionsarme Energieversorgung und nutzen dies als Differenzierungsmerkmal zu ihren Wettbewerbern. Inzwischen fordern immer mehr Kunden von den IT-Firmen klimaneutrale Rechenleistung ein.

Weltweite Nutzung konventioneller Kernenergie

Seit der ersten industriellen Kernspaltung im Jahr 1954 wurde die Kernenergie zu einem wichtigen Bestandteil der Energiesysteme vieler Länder. Ihr zunächst jährlich stark steigender Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs wurde durch die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl im Jahr 1986 gedämpft. Die raschen Entwicklungen von Photovoltaik und Windenergieanlagen sowie der durch Effizienzen und Abwanderungen produzierender Betriebe bedingte Rückgang der Energienachfrage in vielen Industrienationen hatte Einfluss auf die spätere Zubaurate.

Die weltweiten Investitionen in die Kernenergie waren daher um die Jahrhundertwende vor allem in den fortgeschrittenen Volkswirtschaften rückläufig. Neben trotz erwiesenermaßen guten statistischen Daten zur Sicherheit (Anzahl Toter je kWh erzeugter elektrischer Energie) wachsenden Sorgen in den Bevölkerungsgruppen bzgl. der Gefährdung durch die Anlagen gab es große Probleme durch Bauzeitverlängerungen und Kostenüberschreitungen verschiedener Projekte – insbesondere in Europa – die sich negativ auf das Image auswirkten. Darüber hinaus spielt das Entsorgungsthema eine besondere Rolle. Erst in letzter Zeit wurden Standorte für Endlager in Finnland errichtet sowie in der Schweiz festgelegt.

Das Deutsche Endlagersuchgesetz wurde aus Angst der Politiker so formuliert, dass es nicht gelingen kann, einen Standort festzulegen, denn die Anforderungen werden nicht bereits erfüllt, wenn ein Standort sich als geeignet erweist, sondern erst dann, wenn sichergestellt ist, dass es in ganz Deutschland keinen anderen Standort gibt, der noch besser geeignet ist.

Die Zunahme des elektrischen Energiebedarfs für die Dekarbonisierung der meisten thermischen Prozesse sowie für die Rechenzentren und Computer, deren Energiehunger durch die Nutzung künstlicher Intelligenz wächst, führt zu einem Umdenken.

Die Vermeidungsstrategie von anthropogenen Anteilen der Klimaerwärmung führt zur Dekarbonisierung vieler Prozesse:

- Gebäudewärme und Prozesswärme wird aus Umweltwärme – Geothermie, Aquathermie oder Aerothermie – sowie aus industrieller Abwärme mit elektrisch angetriebenen Wärmepumpen auf das für den jeweiligen Einsatz erforderliche Temperaturniveau angehoben.
- Traktionsenergie wird in der Mobilität elektrisch oder durch Verwendung von Wasserstoff, der vorzugsweise aus „grüner“ elektrischer Energie bereitgestellt werden soll, erzeugt.

Eine vollständige Dekarbonisierung zugrunde legend, würde sich der Strombedarf *in Deutschland* perspektivisch verdreifachen und die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas mit Ausnahme der Kraftwerksprozesse vollständig eliminiert werden. Tatsächlich

aber geht man maximal von einer Verdopplung aus, da verschiedene Prozesse auch weiterhin durch fossile Energie unterstützt werden und weil gleichzeitig ein großer Teil der industriellen und gewerblichen Produktion in Nachbarländer mit Kernenergiestrom oder aber in geografische Räume mit hohen Anteilen regenerativer Energie verlagert wird. Hier eignen sich neben Kanada die afrikanischen Staaten Äthiopien, die Zentralafrikanische Republik, der Kongo und Namibia, die alle über große Anteile an Wasserkraft sowie teilweise über ein sehr großes Potenzial an Photovoltaik verfügen.

Neben dem wachsenden Einsatz von Photovoltaik (PV) und Windenergie löst die Sorge um eine zuverlässige wirtschaftliche Energieversorgung Maßnahmen zur Nutzung regelbarer emissionsarmer Stromkapazitäten aus: weltweit kehrt man daher zur Kernenergie zurück. Eine besondere Attraktivität erhält die Kernenergie zudem durch die in letzter Zeit über erfolgreiche Prototypenanwendungen der nächsten Anlagengeneration bekannt gewordenen Erfolge.

Die Kernenergie spielt daher in den fortgeschrittenen Volkswirtschaften (3) eine immer größere Rolle und macht ca. 9 % der weltweiten Elektrizitätsversorgung im Jahr 2023 aus. Kurz vor der Jahrtausendwende (1997) entsprach die heutige Produktion von Strom aus Kernkraftwerken etwa 17,5 % des weltweiten Strombedarfs, der sich seitdem etwa verdoppelt hat, während der Zubau an Kernkraftwerken nur als Ersatz von außer Betrieb genommenen Anlagen gewertet werden kann, so dass die absolute Produktionsmenge in etwa konstant geblieben ist.

Nur durch den Einsatz von Kernenergie können die Strompreise stabil gehalten und damit die Abwanderung der Produktion verhindert werden. Inzwischen nutzen 19 Länder Reaktoren (Abb. 2). Weitere Länder entscheiden sich, ihren einst beschlossenen Ausstieg rückgängig zu machen, oder aber steigen erstmalig in die friedliche Nutzung der Kernenergie ein.

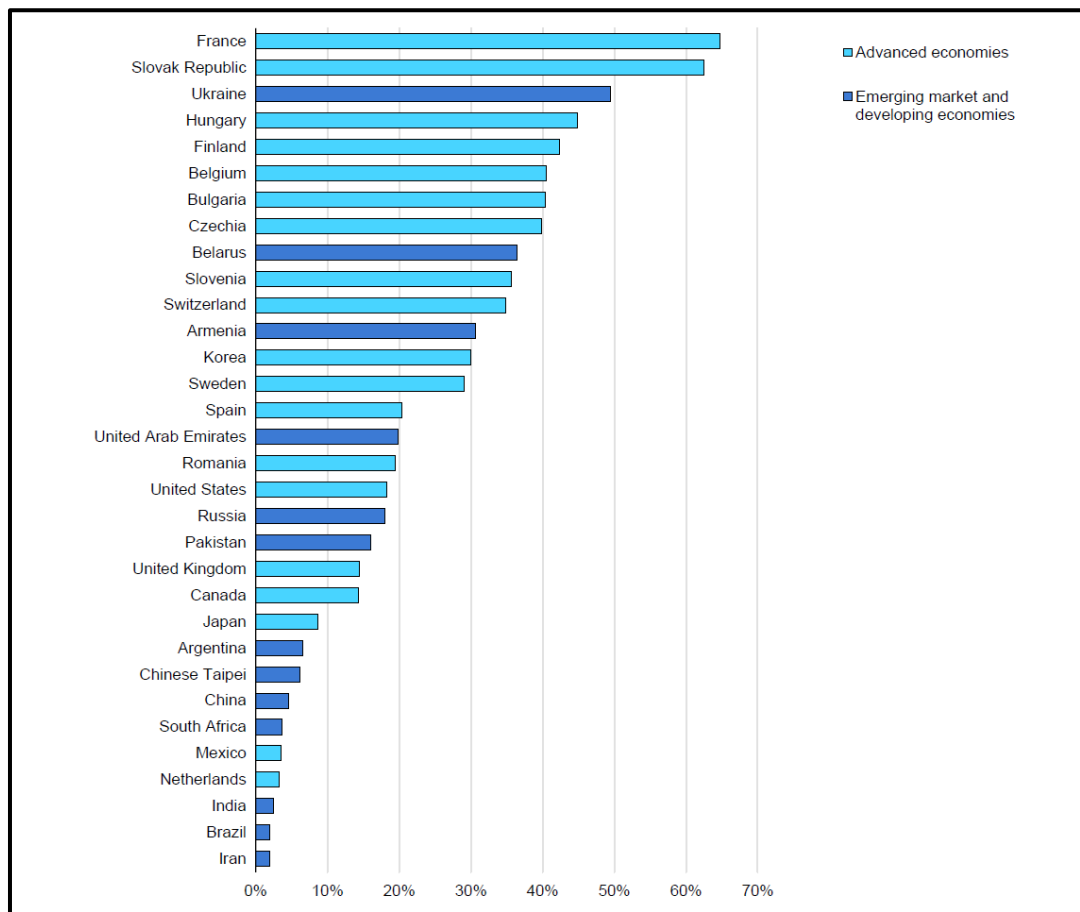
Bei den verwendeten Technologien für bestehende Kernkraft-Anlagen dominieren die Leichtwasserreaktoren, die Wasser als Moderator nutzen und sich in Siedewasser- und Druckwasserreaktoren aufteilen. Der Siedewasserreaktor nutzt den Reaktorkern mit den Brennelementen nicht nur zur Energieaufnahme, sondern auch direkt zur Verdampfung bei ca. 70 bar und ca. 280 °C. Das hat einen Vorteil hinsichtlich der Regelung der Kettenreaktion: Wird zu viel Wärme erzeugt und daher zu viel Wasser verdampft, so sinkt die Moderationsleistung und die Anzahl an Kernspaltungen nimmt ab. Ein Nachteil ist jedoch, dass sich radioaktive Partikel aus dem Kern im Dampf befinden können, die alle Bauteile im Wasser-Dampf-Kreislauf kontaminieren können. Das hat zur Folge, dass bei Instandhaltungsarbeiten an der Turbine vorsichtiger vorgegangen werden muss, was sich negativ auf die Instandhaltungskosten auswirkt. Im Druckwasserreaktor gibt es zwei Kreisläufe, die durch einen Wärmeübertrager, den Verdampfer, miteinander verbunden sind. Im ersten Kreislauf, der die Wärme aus dem Reaktorkern zum Dampferzeuger transportiert, steht das Wasser unter großem Druck (ca. 160bar), so dass es auch bei

den hohen Temperaturen zwischen 290 °C und 330 °C nicht verdampft. Erst im zweiten Kreislauf wird bei 60 bar und 280 °C verdampft und kann so die Turbine antreiben.

Aufgrund der niedrigen Temperaturen des Wasserdampfs liegen die Wirkungsgrade der Leichtwasserreaktoren mit ca. 35 % recht niedrig.

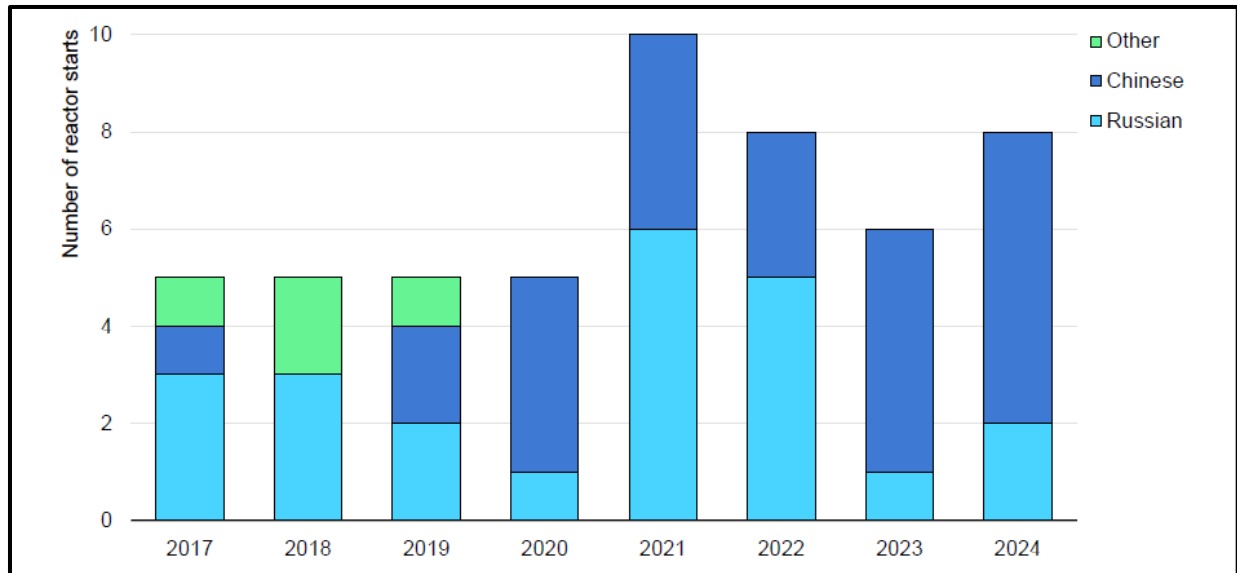
8 von 10 Ländern mit dem größten Nuklearanteil gehören zu den fortgeschrittenen Volkswirtschaften, darunter sind Frankreich mit 65 % und die Slowakische Republik mit über 60 % führend. In USA beträgt der Nuklearanteil zwar nur ca. 15 %, aber dort sind mit 94 Kernreaktoren die weltweit meisten in Betrieb. In den Emerging and Developing Economies (EMDE) macht die Kernenergie bislang bereits 5 % der gesamten Stromerzeugung aus. Unter diesen Ländern hatte die Ukraine mit rund 50 % den höchsten Anteil an Kernenergie und Weißrussland mit über 35 % den zweithöchsten. Vier weitere Länder – Armenien, die Vereinigten Arabischen Emirate, Russland und Pakistan – hatten 2023 einen Kernenergieanteil von mehr als 10 % im Strommix.

Abb. 2: Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung nach Ländern 2023 (2)



Die größten Anstrengungen beim Bau neuer Kernkraftwerke leisten weltweit aktuell **Russland und China**. Von den 52 Reaktorprojekten, die seit 2017 weltweit begonnen wurden, sind 25 chinesischer und 23 russischer Bauart (Abb. 3)

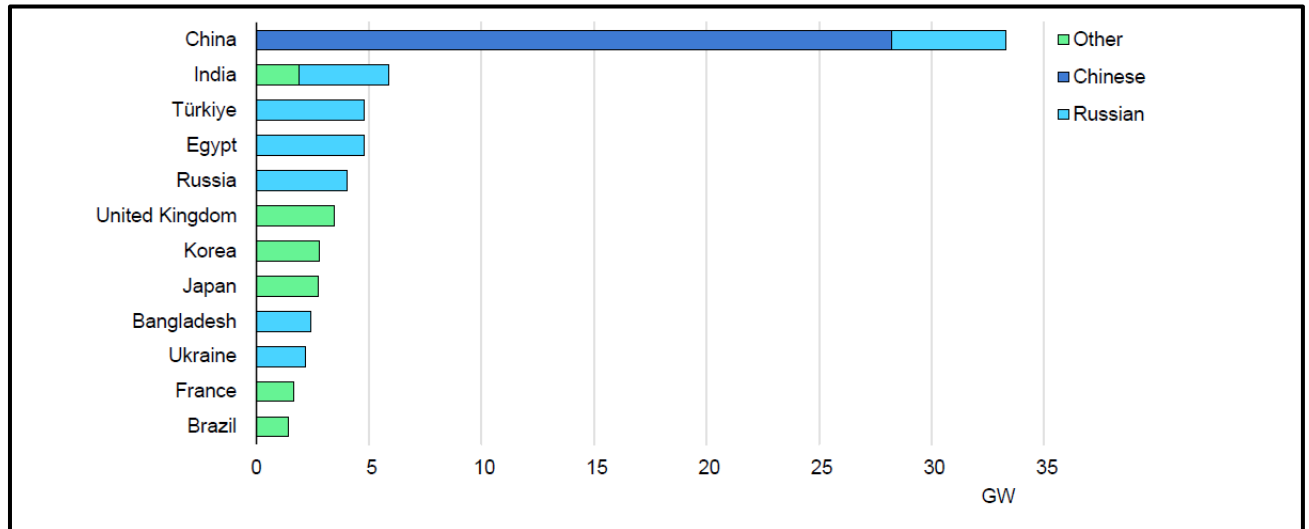
Abb. 3: Baustart von AKWs von 2017 bis 2024 weltweit nach nationaler Herkunft der Technologie (2)



Die Hälfte der heute in Bau befindlichen Reaktoren werden von chinesischen Herstellern in China selbst und außerhalb Chinas gebaut. China ist auf dem Weg, die Vereinigten Staaten und die Europäische Union bei der installierten Kernkraftkapazität bis 2030 zu überholen.

Obwohl die fortgeschrittenen Volkswirtschaften zwei Drittel der weltweiten Nuklearkapazität halten, basiert die überwiegende Mehrheit der Neubauten auf chinesischer oder russischer Technologie (Abb. 4).

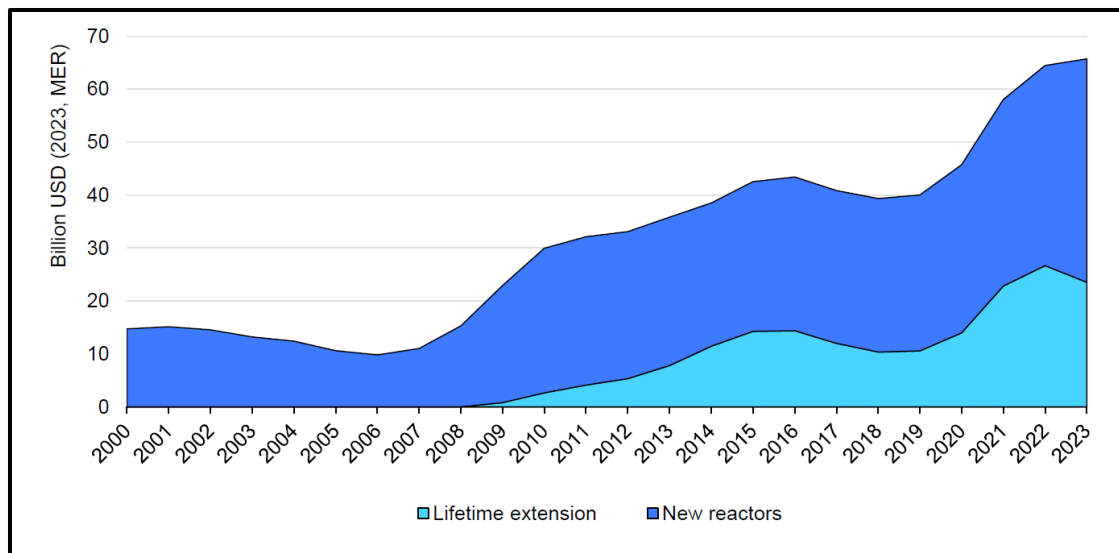
Abb. 4: Im Bau befindliche Kernkraftwerkskapazität nach Region und nationaler Herkunft der Technologie (2024) (2)



In der Europäischen Union hat der Anteil der Kernenergie am Strommix in den 1990er Jahren mit 34 % einen Höchststand erreicht und ist inzwischen auf 23 % gesunken. Im Gegensatz dazu wird erwartet, dass China die installierte Kapazität bis zur Mitte des Jahrhunderts mehr als verdreifachen wird. In anderen Schwellen- und Entwicklungsländern wird zumindest eine Verdopplung erwartet.

Nahezu alle Länder und Regionen erkennen die Vorteile der Kernenergie als eine emissionsarme und regelbare Quelle für Elektrizität an, die einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz, zur Energiesicherheit und zur Stabilität und Zuverlässigkeit der Stromsysteme leisten kann. Dies spiegelt sich in den jüngsten politischen Entscheidungen wider, eine Verlängerung der Betriebsdauer bestehender Kernreaktoren anzustreben: Ertüchtigungsprojekte zur Verlängerung der Laufzeiten machen einen Großteil aktueller Investitionen im kerntechnischen Bereich aus (Abb. 5).

Abb. 5: Globale Investitionen in Kernenergie (2)



Beschlüsse zu Laufzeitverlängerungen betreffen aktuell 64 Reaktoren in 13 Ländern mit einer Gesamtkapazität von etwa 65 GW. Das betrifft rund 15 % der derzeitigen weltweiten Kernkraftwerksflotte.

- In den USA haben insgesamt 22 Betreiber von in Betrieb befindlichen Reaktoren einen Antrag auf Laufzeitverlängerung beantragt.
- In Japan sollen Reaktoren über 60 Jahre in Betrieb bleiben können.
- In Frankreich wurde die Verlängerung des Betriebs von 20 mit einer gesamten installierten Kapazität von 27,4 GW bestätigt.
- In Belgien werden die Kernreaktoren Doel 4 und Tihange 3 länger am Netz bleiben.
- In Ungarn wurden die Laufzeiten der vier Blöcke des Kernkraftwerks Paks verlängert.
- In der Tschechischen Republik wurden die Laufzeiten von Dukovany-3 und -4 verlängert.
- Spanien hat den Atomausstieg gestoppt und die Laufzeit der Reaktoren verlängert.
- Finnland hat die Laufzeiten der Blöcke 1 und 2 des Kernkraftwerks Loviisa verlängert und Europas größten Kernenergieblock Olkiluoto 3 in Betrieb genommen.
- In Rumänien wird die Laufzeit von Block 1 des Kernkraftwerks Cernavoda verlängert und zwei weitere Blöcke erreicht.
- In den Niederlanden soll die Laufzeit der Bestandsanlage in Borssele verlängert werden und am gleichen Standort zwei weitere zwei Blöcke hinzugebaut werden.

Innovationstreiber SMR

Neben der Betriebsverlängerung bestehender Anlagen und dem Neubau von Anlagen der gleichen technologischen Generation befasst sich die Kerntechnik bereits mit der Einführung von Anlagen der Folgegeneration. Es ging ab den 80er Jahren zunächst um eine Standardisierung mit der man versuchte die Genehmigungs- und Baukosten zu reduzieren. In letzter Zeit kam die Idee, der modularen Bauweise hinzu und man entschied sich für kleinere Leistungsgrößen, um eine größere Anzahl geeigneter Anwendungen zu erreichen.

So entstand der Small Modular Reactor als Oberbegriff einer sicheren, zuverlässigen und wirtschaftlichen Anlage zur Stromerzeugung.

- Mit „Small“ sind Leistungsgrößen von 10 bis etwa 300 MW Reaktoren, die Vorteile der für eine dauerhaft kostengünstige Stromproduktion unter Minimierung von Sicherheitsrisiken zu einem Bruchteil der Größe der bisherigen 1.300 MW Leistungsklasse erbringen können.
- Mit „Modular“ ist gemein, dass die Idee der Siemens/KWU zu einer Standardisierung (den sog. Konvoi-Reaktoren) aus den 1980er Jahren aufgenommen wurde und im Rahmen der Weiterentwicklung dieser Idee ein Baukastensystem entstand. Außerdem bestehen SMR aus baugleichen Einzelteilen, was den Transport, die Zertifizierung und die Bauzeiten zu erleichtert.

Durch die Modularität und die geringere Leistungsklasse werden die Reaktoren außer für die Stromindustrie auch für andere Industriezweige interessant, denn die Nachfrage des Privat- und Industriesektors nach kontinuierlich verfügbarer und klimaneutraler Energie ist gewaltig.

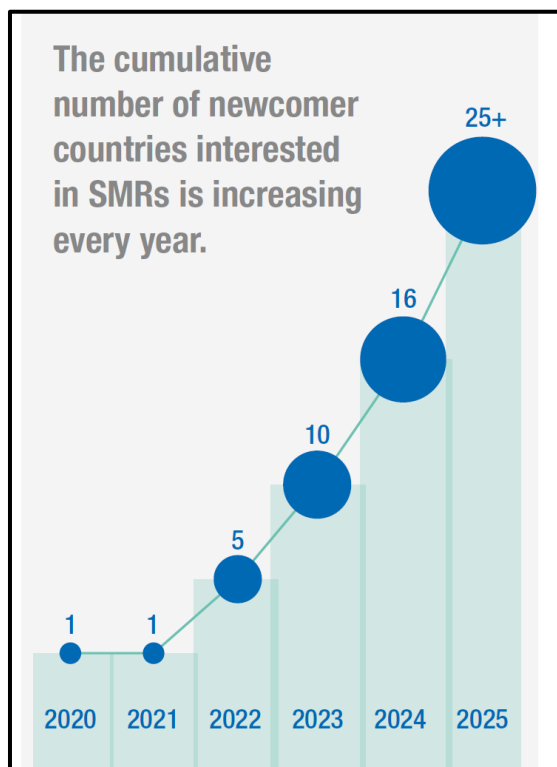
Es gibt eine Vielzahl an Plänen mit unterschiedlichem Reifegrad für eine zukünftige SMR-Nutzung, die vor allem zur Deckung des wachsenden Strombedarfs der Rechenzentren dienen soll. Man erwartet, dass ein Rollout des SMR bis 2050 mit etwa 40 GW zur Stillung des weltweit wachsenden Stromhungers beitragen kann (2). Das ist nicht als oberer Grenzwert zu verstehen, denn das SMR-Potenzial ist weitaus größer: Gemäß einem Szenario in einer IEA-Studie (2, 4), das eine wohlwollende politische Unterstützung für SMR voraussetzt, könnte die SMR-Kapazität bis Mitte des Jahrhunderts sogar 120 GW erreichen, wobei bis dahin mehr als tausend SMR in Betrieb sein würden. Dieses schnelle Wachstumsszenario würde nach Meinung der IEA die Investitionen in SMR von heute weniger als 5 Mrd. USD pro Jahr auf ca. 25 Mrd. USD pro Jahr bis 2030 ansteigen lassen und auf kumulierte Investitionen von ca. 670 Mrd. USD bis 2050 hinauslaufen.

Noch liegen die spezifischen Baukosten eines SMR höher, als die eines ohne Budgetüberschreitung errichteten „normalen“ Kernkraftwerks. Das hat mit den

Skalenfaktoren zu tun: Eine Pumpe für die doppelte Leistung kostet weniger als das Doppelte einer Pumpe für die Ausgangsleistung. Man rechnet jedoch damit, dass es Kosteneinsparungen durch die modulare Bauweise geben wird, die dann zum Tragen kommen, wenn statt der wenigen Prototypen bald ganze Serien hergestellt werden. Sobald die spezifischen Baukosten für SMR auf diese Art und Weise in den nächsten 15 Jahren auf die von im Budgetrahmen errichteten Großreaktoren gesenkt werden erwartet man eine 60 %-tige Steigerung des Absatzes von SMR, was einer weltweit installierten Leistung von 190 GW bis 2050 entspricht.

Durch die Einführung des SMR könnte der Nuklearmarkt eine Renaissance erfahren. Das Interesse an Neubauprojekten ist in den letzten Jahren progressiv gestiegen (Abb. 6) (5).

Abb. 6: kumulierte Zahl neuer Länder, die Interesse an SMR zeigen (5).



Der wesentliche Vorteil der SMR resultiert auf der Reduktion der Leistungsklasse. Dies wirkt sich auf die Vorlaufkosten, die Entwicklungszeiten eines konkreten Realisierungsprojekts und das Baurisiko aus.

Getrieben von dem weltweiten Bedarf für klimafreundliche Stromerzeugung sind SMR ein zentraler Innovationsschwerpunkt in der Nuklearindustrie. Mehrere führende Unternehmen haben in den letzten Jahren wichtige technologische Fortschritte gemacht. Die ersten SMR sollen bereits Ende der 20-iger Jahre in Betrieb gehen.

Die Leistungsklassen der SMR liegen zwischen 10 MW und 470 MW. Darüber hinaus sind bereits auch Mikroreaktorkonzepte (MMR) von 1 bis 10 MW Leistung in der Entwicklung.

Die technischen Konzepte basieren auf den Prozessen der erfolgreich betriebenen Leichtwasserreaktoren, auf denen des Thorium Hochtemperaturreaktors THTR 300, der in Jülich entwickelt und in Hamm als Prototyp erprobt wurde und auch auf völlig neuen Technologien.

Insgesamt versprechen SMR und MMR völlig neuartige Anwendungen. Insbesondere die IT-Branche zeigt großes Interesse an SMR, denn in einigen Ländern und Regionen machen Rechenzentren bereits einen beträchtlichen Teil der Stromnachfrage aus, was zu lokalen Netz- und Versorgungsengpässen führt. In Irland zum Beispiel verbrauchen Rechenzentren 20 % des Stroms. Im US-Bundesstaat Virginia beträgt der Anteil sogar mehr als 25%.

Technologieunternehmen suchen daher für die Versorgung ihrer Rechenzentren zunehmend kernphysikalische Lösungen. Die Nachfrage nach Elektrizität durch Rechenzentren wird weiter enorm steigen, denn die Digitalisierung und die zunehmende Nutzung der künstlichen Intelligenz führen hier zu einem großen Wachstum. Die erwarteten Leistungen liegen hier bei ca. 25 GW, wobei der Bedarf nahezu vollständig in den USA lokalisiert ist.

Einige weitere Beispiele für die SMR-Anwendungen sind:

- Strom- und Fernwärmeversorgung abgelegener Gemeinden
- Hochtemperatur-Prozesswärmeversorgung von Gewerbe und Industrien
- Stromversorgung für Rechenzentren
- Meerwasserentsalzung
- Erzeugung von Wasserstoff
- Mobile Traktionsenergie für Schiffe und Bahnen
- Bohrungen
- Bergbau

Derzeit befinden sich mehr als 80 SMR-Konzepte in der Planung und in der Prototypentwicklung. Einige Unternehmen haben ihre Technologien schon bis zur Marktreife vorangetrieben. Andere befinden sich noch in der Anfangsphase. In Anhang A, Tabelle 2, sind die wichtigsten Unternehmen auf dem Gebiet von SMR, die deren Technologien, Prototypmarkmale, Entwicklungspläne und bereits abgeschlossene LOIs, Beschaffungsverträge und begonnene bzw. abgeschlossene Projekte zusammengestellt.

Nachfolgend wird auf einzelne regionale Entwicklungen eingegangen:

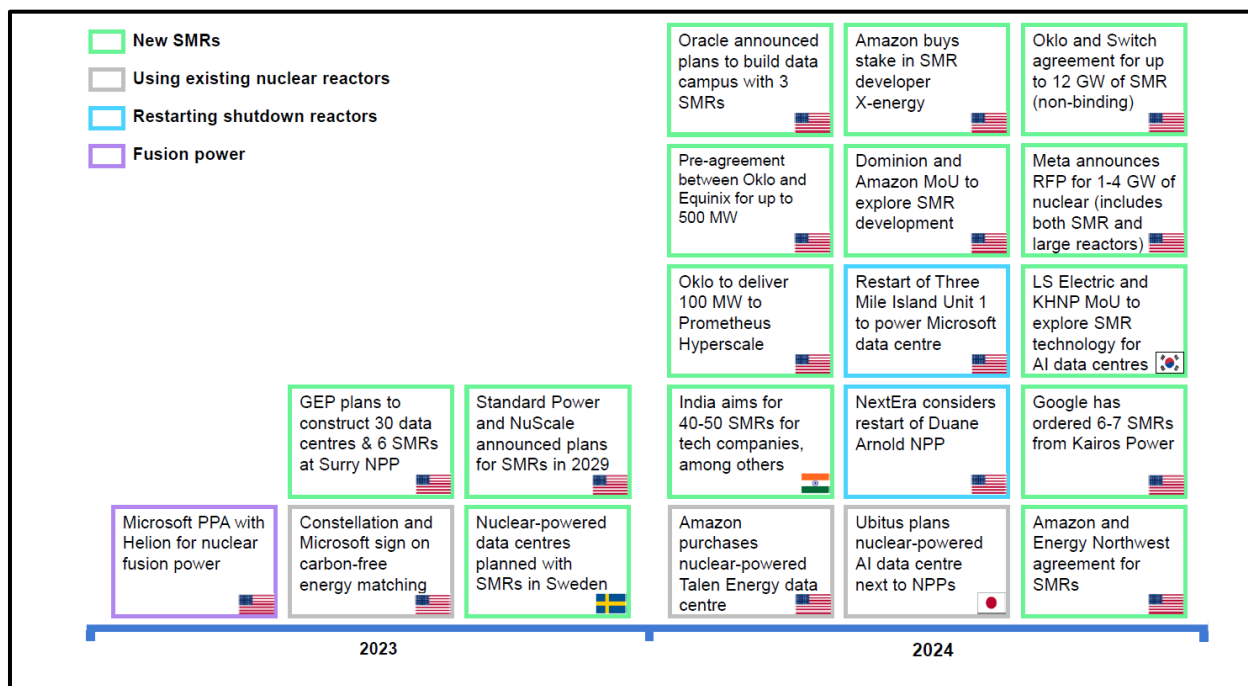
USA

In den USA geht man für einen Bedarf von 200 zusätzlichen Kernreaktoren bis 2050 aus. Dort wird durch das schnelle Wachstum der Rechenzentren eine Zunahme des Strombedarfs im IT-Bereich von aktuell 3 % auf bereits 11 % Anteil in 2030 erwartet. Die Kunden der Rechenzentren erwarten eine klimaneutrale Dienstleistung. Aus diesem Grund stehen Konzepte mit SMR oben auf der Liste möglicher Varianten (6).

Immer mehr Rechenzentren der USA planen eine autarke Stromversorgung mit Kernenergie (Abb. 7). Hiervon setzen immer mehr auf SMR. Da diese jedoch voraussichtlich frühestens gegen Ende des laufenden Jahrzehnts kommerziell verfügbar sein werden, wird auch die Wiederinbetriebnahme stillgelegter Reaktoren als eine Möglichkeit zur Deckung des unmittelbaren Bedarfs in Betracht gezogen. So ist der Unfallreaktor Three Miles Island in Harrisburg wieder ins Gespräch gekommen.

Die nukleare Stromversorgung von Rechenzentren wird zunehmend auch in Indien, Japan und Schweden überlegt. In den vergangenen Jahren wurde erkennbar, dass die Stromkunden das Heft nun selber in die Hand nehmen wollen und die Entwicklung und Errichtung neuer Nuklearprojekte unterstützen, anstatt nur Kernenergiestrom beim Lieferanten oder an der Börse zu erwerben.

Abb. 7: Jüngste Ankündigungen und Vereinbarungen im Zusammenhang mit der Beschaffung von Kernenergie für Rechenzentren (2)



Eine klimaschonende Versorgung von Rechenzentren mit Photovoltaik der Windenergie ist ohne enormen Aufwand in Speicher nicht vorstellbar. Die geplante

jährliche Zuverlässigkeit von Rechenzentren beträgt 99,999%, was einen tolerierten Ausfall von 0,001% der 8.760 Stunden im Jahr bzw. 5 Minuten entspricht.

Ihr Bedarf sicherer, unterbrechungsfreier und sauberer Energie führt dazu, dass die Betreiber von Rechenzentren grundsätzlich bereit sind, einen Aufpreis für die Stromversorgung mit Atomstrom zu zahlen. Dies ist jedoch nicht erforderlich. Genauso wie die hauseigene PV-Anlage den Eigenstrom des Hausbewohners zum doppelten Preis der öffentlichen Erzeugung produziert und dennoch durch den Entfall der Netzkosten wirtschaftlich wird, sind auf dem Betriebsgelände von Rechenzentren errichtete SMR aufgrund des Entfalls der Netzkosten in nahezu allen Fällen bereits heute wirtschaftlich.

Im Vergleich zur Wind- und PV-Erzeugung bleiben damit stets zwei wirtschaftliche Vorteile zu Gunsten der SMR: Entfall der Netzkosten nur beim SMR, da die erforderliche Leistung an PV- oder Windstrom nicht auf dem Betriebsgelände erbracht werden kann, und Entfall der Speicher, die bei wetterabhängigen Energien den saisonalen Verlauf sowie den Tagesverlauf glätten müssen. Darüber hinaus muss bei wetterabhängigen Energien der Teil des Stroms, der weder spontan für das Rechenzentrum noch latent über die Speicher selber genutzt werden kann, abgeregelt werden oder zu negativen Preisen verkauft werden. Dadurch steigen die spezifischen Erzeugungskosten der wetterabhängigen Stromversorgung im Vergleich zu denen der SMR-Stromerzeugung weiter an.

Europa

McKinsey (7) erwartet, dass in Europa die Nachfrage der Rechenzentren nach Stromleistung bis 2030 um 25 GW auf etwa 35 GW, was 5 % des Gesamtbedarfs entspricht, ansteigen wird. Dies wird als wichtigster kurzfristiger Wachstumstreiber für Europas Stromnachfrage gesehen.

Frankreich kündigte ein Investitionsprogramm an, mit dem in den nächsten 5 Jahren Investitionen in der Höhe von EUR 109 Mrd. in den Bau von Datenzentren und in die technische Infrastruktur getätigt werden soll. Der Strom soll aus Kernkraftwerken und erneuerbaren Quellen kommen. Frankreich scheint also hinsichtlich der Stromversorgung für Rechenzentren deutlich besser positioniert zu sein als Deutschland.

Wie in Frankreich wird der Strom für Rechenzentren auch in den meisten anderen EU-Länder hauptsächlich aus entsprechend den individuellen unterschiedlich definierten „grünen“ Quellen kommen. Die Herausforderung erscheint umso größer, da gleichzeitig ein großer Teil der Sektoren Transport und Logistik, Gebäudeenergie, Prozessindustrie und weitere dekarbonisiert werden soll. Die für die zuverlässige 24/7 Verfügbarkeit „grünen“ Stroms erforderliche Steuerbarkeit der Erzeugungsanlagen ist nur für Pumpspeicher- und Talsperren-Wasserkraft allerdings nur in sehr begrenzter Leistung

und nur für wenige Stunden erfüllbar. Laufwasserwerke, Windturbinen und Photovoltaikanlagen können nur abgeregelt werden, was bedeutet, auf die verfügbare Strömung oder Einstrahlung zur Stromerzeugung zu verzichten. Sie können bei wetterbedingter Teillast nicht auf Volllast hochgefahren werden.

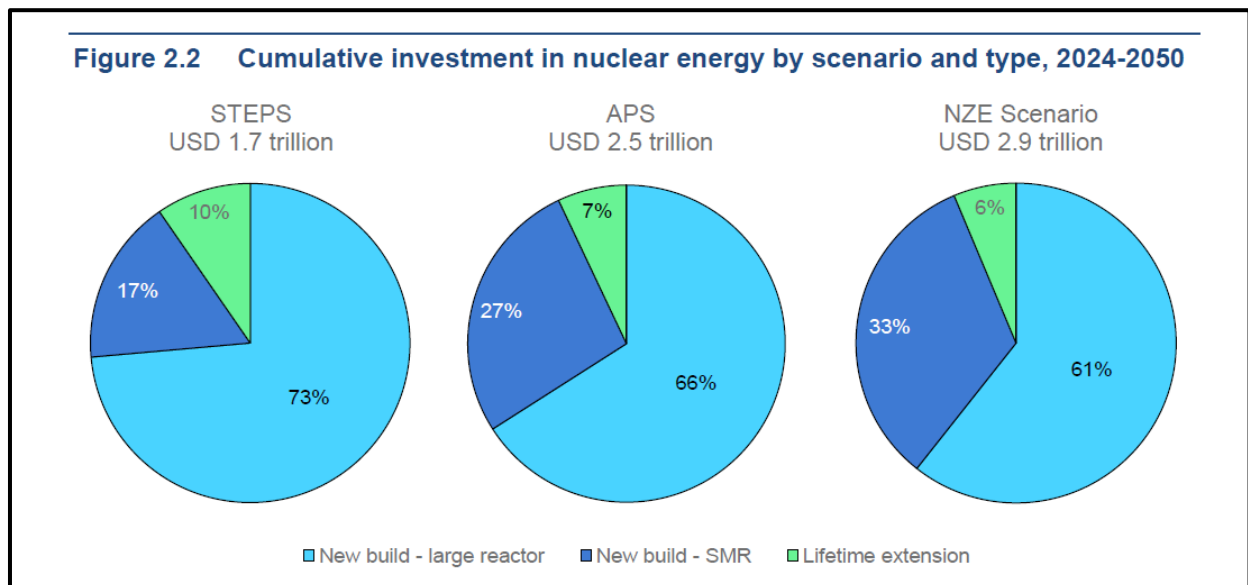
Ob man eine Grundlastfähigkeit benötigt oder nicht ist umstritten. Aber man benötigt ein stabiles Netz mit verlässlicher steuerbarer Einspeisung. Den Stabilisierungsbeitrag können SMR liefern. Innerhalb Europas steht insbesondere Deutschland steht vor hohen Herausforderungen, nachdem das Land 2023 aus der Kernenergie ausgestiegen ist und wie auch Spanien auf eine Erzeugungsstruktur mit sehr hohen volatilen Anteilen setzt.

Die Ursachen des landesweiten Blackouts in Spanien vom 28.04.2025 sind noch nicht abschließend geklärt. Die These, dass die Wechselrichter einer größeren Anzahl großer PV-Parks gleichzeitig bei Überschreitung der Netzfrequenz von 52 Hz eine Trennung ausgelöst haben, wodurch eine Mangellage entstand, die das Netz zum Ausfall gebracht hat, scheint realistisch zu sein. Ursache für den Anstieg der Netzfrequenz sollen Einspeiseüberschüsse aus PV-Anlagen gewesen sein. Mit mehr stabilisierenden rotierenden Massen von Turbinen und Generatoren größerer Kraftwerke sowie einer besseren Einspeisesteuerung hätte der spanische Blackout vermieden werden können.

Weltweite Prognosen

Die IEA (2) prognostiziert, dass die weltweiten Investitionen in die Kernenergie und die installierte Kapazität stark steigen werden. Die Prognosen wurden in 3 Szenarien untersucht ¹(4). Man geht heute davon aus, dass die kumulierten Investitionen in die Kernenergie im Zeitraum bis 2050 auf 1,7 Billionen bis 2,9 Billionen USD zunehmen werden. Der größte Anteil entfällt auf Großreaktoren, der Anteil der SMR (heute bei 0 % Anteil) soll zwischen 17 bis 33 Prozent liegen (Abb. 8).

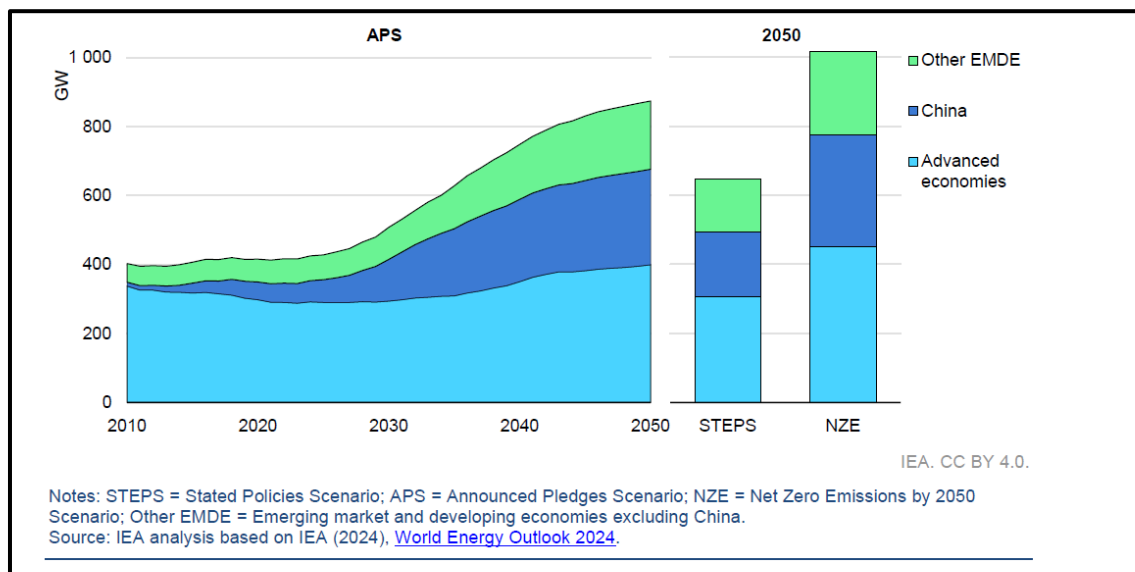
Abb. 8: Prognostizierte kumulative Investitionen in die Kernenergie, 2024-2050 (2)



¹ Die IEA-Szenarien veranschaulichen verschiedene Wege, die der Energiesektor einschlagen könnte, die Hebel, die Entscheidungsträger einsetzen können, um sie zu erreichen, und ihre Auswirkungen für Energiemärkte, Sicherheit und Emissionen:

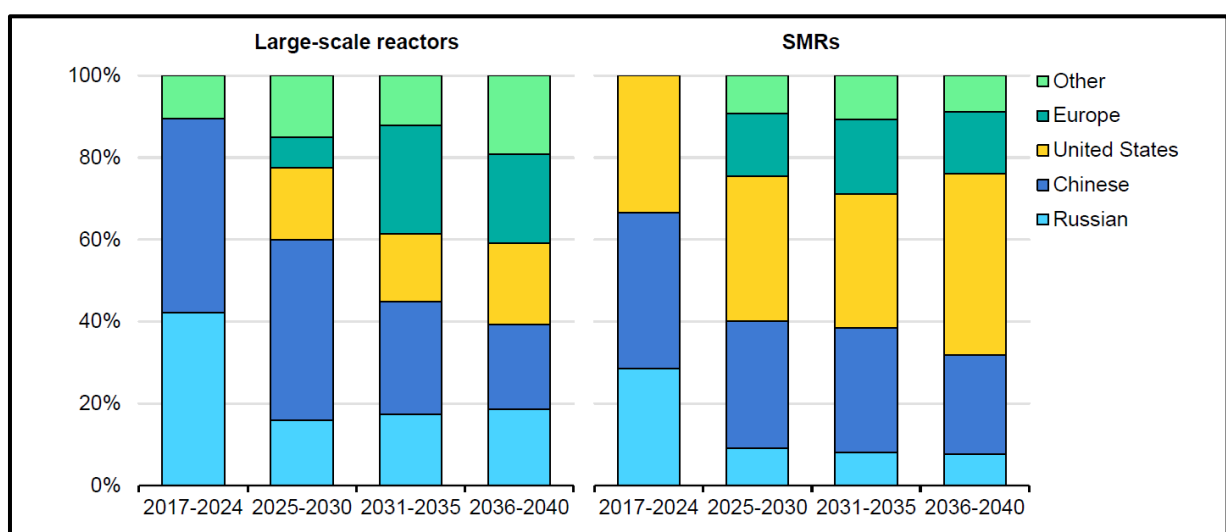
- Das Stated Policies Scenario (STEPS) ist ein Sondierungsszenario, das die heutigen politischen Rahmenbedingungen auf der Grundlage einer sektoralen und länderspezifischen Bewertung der energiebezogenen Politiken, die Ende August 2024 in Kraft sind August 2024 in Kraft sind, sowie derjenigen, die derzeit entwickelt werden. Das Szenario berücksichtigt auch auch die derzeit geplanten Produktionskapazitäten für saubere Energie Technologien.
- Das Announced Pledges Szenario (APS) ist ein Sondierungsszenario, das davon ausgeht, dass alle Klimazusagen von Regierungen und Industrie und Industrien weltweit bis Ende August 2024 eingegangen wurden (einschließlich der national festgelegten Beiträge (NDCs) und der längerfristigen Netto-Null-Ziele), sowie Ziele für Zugang zu Elektrizität und sauberem Kochen, vollständig und pünktlich erfüllt werden.
- „Netto-Null-Emissionen bis 2050“ (NZE) ist normativ und zeigt einen Pfad für den globalen Energiesektor, um bis zum Jahr 2050 einen Netto-Null-Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) Emissionen bis 2050 zu erreichen. Es stützt sich nicht auf Emissionssenkungen außerhalb des Energiesektor, um sein Ziel zu erreichen. Universeller Zugang zu Elektrizität und sauberem Kochen werden bis 2030 erreicht. Das Szenario wurde mit den neuesten Daten aktualisiert im Jahr 2024 aktualisiert.

Abb. 9: Kernenergiekapazität nach Regionen und Szenarien (4), 2010-2050 (2)



Die zunehmenden Entwicklungsaktivitäten und die erwartete Welle von Neubauten in den Ursprungsländern der Kernenergie könnte dazu führen, dass diese – insbesondere die USA, Frankreich und Großbritannien – wieder in den „driver seat“ kommen (Abb. 9 und 10).

Abb. 10: Baubeginn von Kernkraftwerken, auch SMR, nach nationaler Herkunft der Technologie , 2017-2040 (2)



Technik der SMR

Klassifizierung (8, 9)

Allen SMR ist gemeinsam, dass es sich um modulare Kernspaltungsreaktoren handelt, die kleiner als herkömmliche Reaktoren sind.

- Die Bezeichnung „Small“ bezieht sich auf den Leistungsbereich (bis unter 10 MWe (Mikroreaktoren) und typischerweise bis zu 300 MWe).
- Die Bezeichnung „Modular“ bezieht sich auf das Konstruktionsprinzip welches standardisierte Teilsysteme verwendet.
- Die Bezeichnung „Reactor“ bezieht sich auf die kernphysikalische Reaktion zur Bereitstellung von Wärme für den Energiekonversionsprozess.

Die Klassifizierung unterscheidet zwischen bisherigen „konventionellen“ Technologien der Leichtwasserreaktoren und den fortschrittlichen „advanced“ Technologien der nachfolgenden Generation. Als Untergruppen der Advanced SMR wird der eingesetzte Kernbrennstoff (Uran, Thorium, oder andere), der verwendete Moderator (Wasser, Graphit oder andere), das verwendete Kühlmittel (leichtes oder schweres Wasser, Flüssigmetall, Flüssigsalz, Helium oder andere) und die Anzahl der Kreisläufe (ein, zwei, drei oder weitere) als Unterscheidungsmerkmal verwendet.

Tabelle 1: SMR Klassifizierung (8,9)

SMR Klassifizierung									
SMS (Small Modular Reactor): die Bezeichnung SMR bezieht sich auf den Leistungsbereich, typischerweise 300 – 500 MW, und auf die Modularität als Konstruktionsprinzip. SMR werden in der klassischen Technologie (DWR oder SWR) oder in fortschrittlicher Technologie gebaut. Bei Letzteren spricht man auch von AMR (advanced modular reactor)									
		Typ (s. Kapitel F)	Brennstoff	Beispiele:		Typ (s. Kapitel F)	Brennstoff	Beispiele:	Kommentare
konventionelle SMR	Leichtwasserreaktor engl. (light water reactor)	DWR Druckwasserreaktor (englisch PWR, pressurized water reactor)	Uran	Westinghouse, Rolls Royce, Neward, Nuscale					
		SWR Siedewasserreaktor (englisch BWR, boiling water reactor)	Uran	GE Hitachi					
Advanced SMR (AMR), langsame Neutronen	MSR Molten salt reaktor	gasgekühlter Hochtemperatur -reaktor	Uran	Kairos (Amazon)	Advanced LMR, schnelle Neutronen				
		langsamer Brüter	Thorium	Copenhagen Atomic					
	LMR (Liquid Metal Reaktor)					Kühlung Natrium	Natururan	Terrapower	
						Kühlung Blei	Mox	Newcleo	
	HTGC Hochtemperatur gasgekühlt					Kühlung Natrium, BN - Serie	Uran	russische Reaktoren	
		X Energy	Uran						
		DFR (Dual Fluid Reactors).							Konzeptphase
		HTR Hochtemperatur-Reaktor	Thorium						in Deutschland aufgegeben, wird in China weiterverfolgt

Konventionelle SMR

SMR-Typen mit konventioneller Technologie

Die bisherigen SMR basieren auf dem Einsatz von Uran als Kernbrennstoff und der Nutzung von (leichtem) Wasser als Kühlmittel und Moderator. Es handelt sich um Leichtwasserreaktoren (LWR)

- **LWR**

Ein LWR ist ein Kernreaktor, bei dem sogenanntes leichtes Wasser – im Gegensatz zu Wasser mit Deuterium-Isotopen – als Kühlmittel und Moderator verwendet wird. Es gibt zwei Grundtypen des Leichtwasserreaktors, den Siedewasserreaktor (**SWR**, englisch BWR, boiling water reactor) und den Druckwasserreaktor (**DWR**, englisch PWR, pressurized water reactor).

- **SWR** (Siedewasserreaktor)

Durch die bei der Kernspaltung entstehende Wärme verdampft Wasser (Siedekühlung) bei z.B. 71 bar und 286 °C im Reaktordruckbehälter; der Dampf wird direkt auf die Turbine geleitet und treibt diese an. Die weltweite Verbreitung des SWR aller Baugrößen beträgt etwa 50 Exemplare.

- **DWR** (Druckwasserreaktor):

Im Druckwasserreaktor transportieren zwei Wasserkreisläufe die bei der Kernspaltung entstehende Wärme zur Turbine. Der Betriebsdruck (ca. 160 bar) des Wassers wird anders als beim SWR im Primärkreislauf, der durch den Reaktorkern zum Dampferzeuger strömt, so hoch gewählt, dass es bei der vorgesehenen Betriebstemperatur nicht siedet. Die Brennstäbe sind daher gleichmäßig benetzt, die Wärmeverteilung an ihrer Oberfläche ist ausgeglichen, und die Dampfphase mit ihrer besonderen Korrosionswirkung entfällt. Das im Reaktorkern erhitzte Wasser des Primärkreislaufs gibt in einem Dampferzeuger seine Wärme an einen getrennten Wasser-Dampf-Kreislauf ab, den Sekundärkreislauf. Der Sekundärkreislauf ist frei von Radioaktivität aus Abrieb und Korrosionsprodukten, was z.B. die Wartung der Dampfturbine wesentlich erleichtert. Die weltweite Verbreitung der DWR aller Baugrößen beträgt etwa 300 Exemplare.

Exkurs: Da das Wasser nicht nur als Kühlmittel, sondern auch als Moderator fungiert, verfügt der SWR über eine inhärent sichere eigene Abregelung: Steigt die Temperatur und verdampft mehr Wasser als vorgesehen, so sinkt die Moderationswirkung des Wassers, was dazu führt, dass weniger thermische Neutronen für die Spaltung verfügbar sind. Dadurch nimmt die Leistung ab. Dieses Prinzip hatte in den 80er Jahren dazu geführt, selbst regulierende Reaktoren auf Basis des SWR mit einem Naturumlauf zu entwickeln. Damals gab es jedoch keine interessierten Auftraggeber, so dass dieses Konzept nicht weiter vertieft wurde.

Besondere Eigenschaften (8,9)

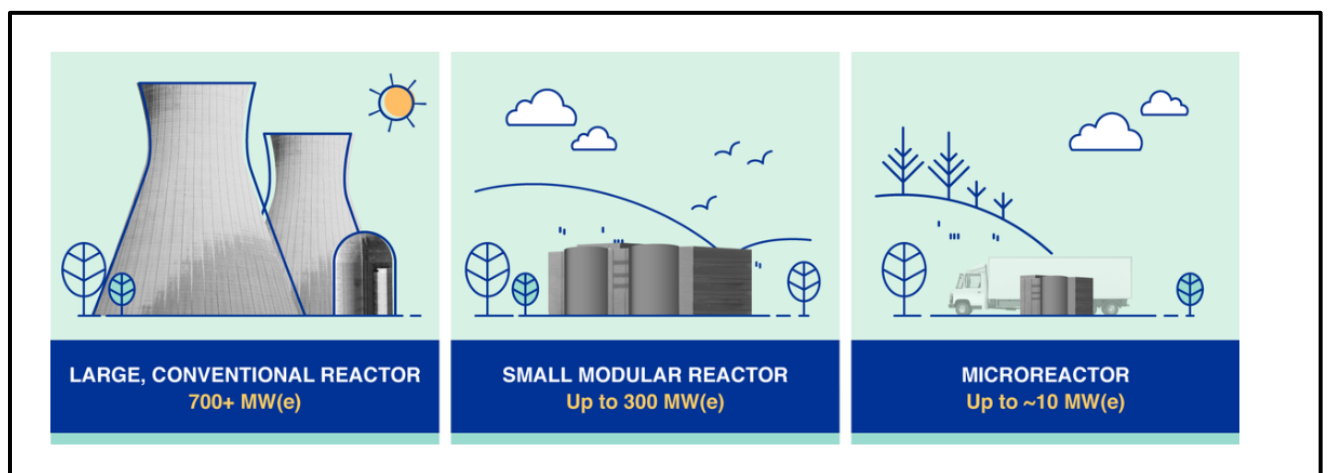
SMR sind charakterisiert durch den Leistungsbereich (10 – 300 MW) und durch die Modularität. Eigenschaften:

- einfaches Design, modular, größere Flexibilität
- kostensparend, flexibel bei den Aufstellungsorten, transportierbar

Die Ersten SMR-Reaktoren wurden bereits in den 50-iger Jahren für verschiedene Einsatzgebiete entwickelt. Unter anderem handelte es sich dabei um mobile Einsätze als Antrieb für Schiffe und insbesondere für U-Boote. Der Vorteil bei der militärischen Nutzung in U-Booten waren die langen stillen Tauchzeiten, die erreicht werden konnten, da kein Luftsauerstoff für die Verbrennung erforderlich war und keine Abgase abgeleitet werden mussten.

Die U-Boot-Reaktoren waren Paten für die Entwicklung auf dem Land genutzten größeren Anlagen, wie die Kernkraftwerke Würgassen (SWR) und Stade (DWR), die beiden ersten größeren Leistungsreaktoren Deutschlands mit je 670 MW. Spätere Kernkraftwerke in Deutschland entsprachen der 1.300 MW Blockgröße.

Abb. 11: schematischer Größenvergleich: großer konventioneller Reaktor, SMR, MMR (IAEA)



Im Zuge der Klimadiskussion wurden SMRs wiederentdeckt.

Weltweit bestehen derzeit etwa 80 verschiedene SMR-Projekte die kleinen konventionellen LWR-Reaktoren entsprechen.

Neben der klassischen Anwendung für die öffentliche Stromversorgung (Regel- und Reserveenergie sowie stabilisierende rotierende Massen und Absicherung von Dunkelflauten) öffnen sich für SMRs viele neuartige Anwendungen:

- Prozesswärmeversorgung für Gewerbe und Industrie
- Stromversorgung für Rechenzentren oder die Aluminium- und Kupferindustrie

- Stromversorgung für Regionen, die über keinen Anschluss an ein Netz verfügen
- Meerwasserentsalzung
- Elektrolytische Herstellung von Wasserstoff

Vorteile konventioneller SMR

Geringeres gebundenes Kapital: SMR-Reaktoren können an den tatsächlichen Leistungsbedarf angepasst werden und sind daher ohne Überdimensionierung verwendbar. Es entfällt die Vermarktung der nicht selber benötigten Kapazitäten. Die Anfangsinvestitionen entsprechen dem eigenen Energiebedarf. Der industrielle Investor wird nicht zum Energieversorger für Dritte.

Kostendegression durch Stückzahlen: Die modulare Bauweise und die kleinen Leistungsklassen machen es möglich, eine größere Anzahl identischer SMR herzustellen. Das wirkt sich auf die spezifischen Herstellkosten aus.

Genehmigungsverfahren: Die Anlagensicherheit, die Sicherheit des Anlagenbetriebs, die potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt und die Nachbarschaft sowie die Gefahren des Brennstoffpfades von der Mine bis zur Entsorgung und auch der Abriss der Anlage selber und ihre Entsorgung können für die ersten Prototypen bewertet werden. Die Gutachten stehen den Genehmigungsverfahren aller Folgeprojekte 1:1 zur Verfügung. Lediglich die individuellen meteorologischen Konditionen müssen in Einzelberichten zur Immissionsprognose standortspezifisch erstellt werden.

Fertigbau: Die geringen Größen und die Modularisierung führt dazu, dass viele Bauteile im Herstellwerk, statt auf der Baustelle gefertigt werden können. Hierdurch reduziert sich die Montagezeit auf der Baustelle erheblich.

Standortverwertung: SMR können an allen Standorten betrieben werden, an denen bislang herkömmliche Kernkraftwerke oder Kohlenkraftwerke standen. Sie können die bestehenden Netzeinspeisepunkte nutzen und können mit Trockenkühltürmen ausgestattet werden, um unabhängig von Flusswasser zu sein, sodass selbst bei Hitze und Niedrigwasser 100% Leistung erzeugt werden kann.

Technologie fortschrittlicher (advanced) SMR-Konzepte (8,9,10)

Entwicklung von Generation IV Reaktoren

Neben den konventionellen SMR auf Basis der DWR- und SWR-Technologie gibt es inzwischen die Untergruppe der im Rahmen des Generation IV Programms entwickelten fortschrittlichen Advanced Small Modular Reactors (ASMR).

Kernkraftwerke der sogenannten IV. Generation wurden entwickelt, um erweiterte Anforderungen an Sicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen.

- Betriebsfähigkeit ohne den aktiven Eingriff durch Bedienpersonal oder leittechnische Steuerung führt zur inhärenten Sicherheit
- Brennstoffmanagement ohne die Möglichkeit zur Abzweigung von spaltbarem Material vermeidet die militärische Nutzbarkeit der in den Anlagen verwendeten Betriebsstoffe
- Verzicht auf Uran-Anreicherung vermeidet den Umgang mit militärisch nutzbaren Isotopen
- Verbesserung der Sicherheit gegen Terror-Anschläge ist als Eigenschutz und Bevölkerungsschutz wirksam
- Brennstoffrecycling mit Wiederverwendung der radioaktiven Reststoffe als Brennstoffe führt zur Minimierung der Endlagermengen
- Reduktion des betrieblichen Aufwands verringert die Lebenszykluskosten gegenüber anderen Energieformen

Mit dem Ziel einer gemeinsamen Entwicklung der vierten Generation von Kernreaktoren schloss sich 2001 eine größere Anzahl von Staaten zum Generation IV International Forum (GIF) zusammen. Diese sind: Argentinien, Brasilien, UK, F, J, Ca, Südafrika, Südkorea und die USA, Schweiz, Russland, China, Australien. Deutschland ist bislang nur indirekt über die Europäische Atomgemeinschaft vertreten.

Die bereits in der Entwicklung befindlichen Reaktoren der vierten Generation werden nachfolgend beschrieben.

Molten Salt Reaktor (MSR)

Der MSR ist ein fortschrittlicher Reaktor, in dem flüssiges Salz als Kühlmittel des Primärkühlkreislaufts verwendet wird und welcher im Rahmen des Generation IV Programms entwickelt wird. Der MSR hat im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Leichtwasserreaktoren zusätzliche besondere Eigenschaften im Hinblick auf die Verhinderung einer Kernschmelze.

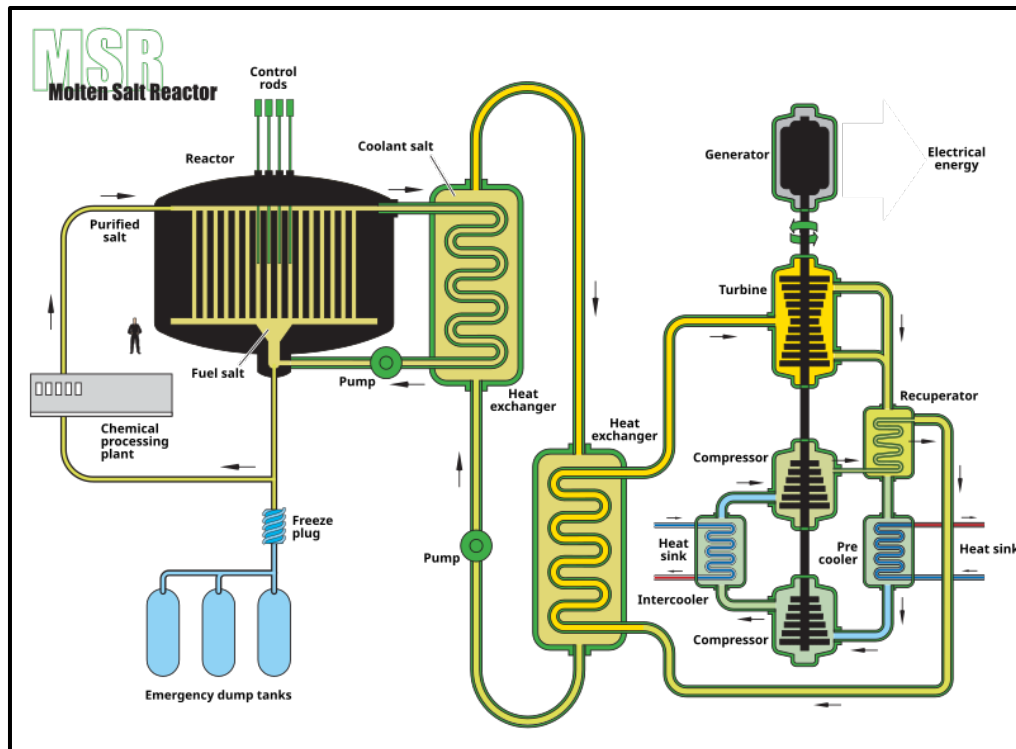
Der MSR besteht typischerweise aus 3 Kreisläufen (Abb. 13).

1. Im ersten Kreislauf, dem Primärkreislauf, zirkuliert ein Flüssigkeitsgemisch aus Kernbrennstoff und geschmolzenem Salz auf dem Niveau von 700 °C. Sie gibt die beim kernphysikalischen Prozess freigewordene Wärme über einen ersten Wärmeübertrager an den zweiten Kreislauf ab. Der bestimmungsgemäß geschmolzene Kernbrennstoff ist in flüssiger Form gleichmäßig im Primärkreislauf des Reaktors verteilt. Aufgrund des konstruktiv gewählten Aggregatzustands „flüssig“ kann keine ungewollte Kernschmelze auftreten. Da der Primärkreis darüber hinaus unter atmosphärischem Druck arbeitet, ist auch eine Explosion ausgeschlossen. Darüber hinaus sind die Bauteile aufgrund des geringen Drucks dünnwandig, was dazu führt, dass eine Leichtbauweise ausgeführt werden kann, die den Reaktor für die Luft- und Raumfahrt nutzbar macht.
2. An den Primärkreislauf ist bei der in Abb. 12 gezeigten Variante ein Wärmetransportkreislauf angeschlossen, der den ersten mit dem dritten Kreislauf verbindet. Dieser Kreislauf ist einphasig flüssig und steht daher unter Druck.
3. Der eigentliche Wasser-Dampf-Kreislauf wird als dritter Kreislauf ausgeführt. Aufgrund der hohen Temperaturen des MSR können Wirkungsgrade erreicht werden, die über denen heutiger modernster Kohlenkraftwerke liegen.

Die Brennstoffe, die im MSR verwendet werden, können je nach Konzept Uran, Plutonium oder Thorium sein. Je nach Ausführung kann sowohl mit schnellen Neutronen gebrütet werden (fast MSR bzw. MSFR), als auch mit thermischen Neutronen, die durch einen Moderator abgebremst wurden, nur gespalten werden. Es besteht die Möglichkeit, einen inhärenten Schutz zu integrieren, der die Kettenreaktionsgeschwindigkeit reduziert oder die Reaktion sogar vollständig anhält, wenn sich die Leistung entgegen dem beabsichtigten Fahrplan erhöht.

Exkurs: Ein Beispiel für einen Thorium-MSR ist der MSR des dänischen start-ups Copenhagen Atomics (11). Hierbei wird schweres Wasser als Moderator verwendet. Mit Thorium spaltbares U233 wird durch thermische Neutronen gewonnen (thermischer Brüter). Dieser Reaktortyp hat ein großes Potenzial, weil die Thorium-Vorräte weltweit 3 Mal größer sind als die von Uran.

Abb. 12: Schema eines Flüssigsalzreaktors vom Typ Single Fluid MSR (12)



Nachfolgend werden die besonderen Eigenschaften des MSR aufgeführt:

- Das Risiko von Wasserstoffexplosionen (wie in Fukushima) kann ausgeschlossen werden.
- Die gasförmigen Spaltprodukte (z. B. Xe und Kr) können einfach aufgefangen werden, wenn sie aus dem Brennstoff herausgelangen bzw. herausgeblasen werden.
- MSR-Brennstoffe können während des Leistungsbetriebs nachgefüllt werden (herkömmlichen Reaktoren müssen zum Nachfüllen abgeschaltet werden).
- Die Betriebstemperaturen von MSR liegen bei etwa 700 °C und damit deutlich höher als bei herkömmlichen DWR (300 °C). Dies erhöht die Effizienz der Stromerzeugung und ermöglicht die Nutzung von MSR zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme.
- Der atmosphärische Druck im Primärkreislauf ist niedriger als die 160 Bar beim Druckwasserreaktor was sicherheitstechnisch große Vorteile bietet. Die Wahrscheinlichkeit sowie auch die möglichen Auswirkungen eines unfallbedingten großen Bruchs mit Kühlmittelverlust liegen deutlich niedriger.
- Beim Betrieb des MSR fallen weniger hochradioaktive Abfälle an.

Der MSR wurde bereits in den 60-er Jahren in den Oak Ridge National Laboratories entwickelt. Heute setzen viele Entwicklungsteams auf diese Technologie. Insbesondere

die beim Einsatz von Salz entstehenden Korrosionsprobleme stehen im Vordergrund der Weiterentwicklung. Darüber hinaus werden auch Sicherheitseigenschaften verbessert und Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit angestrebt.

Gerade durch die grundsätzliche Eigenschaft einer Nutzbarkeit als Brutreaktor kann der MSR eingesetzt werden, um mit einem geringen Kernbrennstoffeinsatz eine sehr lange Reisezeit zu erreichen:

- Durch das Aufbrüten von Kernbrennstoff über den Beschuss mit schnellen Neutronen verlängern sich die Brennstoffeinsatzzeiten und erhöht sich der Nutzungsgrad der Brennstoffe.
- Die Spaltprodukte können in Isotope mit deutlich geringerer Toxizität und/ oder deutlich kürzere Halbwertszeiten aufgebrütet werden.
- Abgebrannte Brennelemente aus konventionellen Kernkraftwerken können aufbereitet im SMR eingesetzt werden. Das reduziert den Brennstoffverbrauch und das Endlagervolumen.

Die meisten Arbeiten konzentrieren sich aktuell auf den MSFR. China scheint diese Technologie zu favorisieren.

Exkurs Schnelle Reaktoren: Im LWR kann von den in der Natur vorhandenen Uranisotopen nur das Uran-235 (Anteil 0,7 %) gespalten werden. Der Prozess kann aber in einem speziellen Reaktortyp so gesteuert werden, dass auch das Uran-238 (Anteil 99,3 %) genutzt wird. Uran-238 nimmt dabei ein Neutron auf und es entsteht Uran-239, das sich über Neptunium-239 in spaltbares Plutonium-239 umwandelt. Durch diesen Vorgang lässt sich mehr spaltbares Material erzeugen als durch Kernspaltungen für den Reaktorbetrieb verbraucht wird. Da in einem solchen Reaktor schnelle Neutronen für den Prozess genutzt werden nennt man diesen Reaktortyp auch „Schneller Brüter“.

Da solche Reaktoren nur mit schnellen Neutronen betrieben werden, darf kein Moderator vorhanden sein. Als Kühlmittel ist deshalb Wasser ungeeignet, da es die Neutronen auf geringe Geschwindigkeiten abbremst (moderiert). Als Kühlmittel wird deshalb z. B. flüssiges Natrium oder flüssiges Blei verwendet.

Liquid Metal Reaktor (LMR)

LMR (Liquid Metal Reaktor) sind Flüssigmetallreaktoren. Flüssigmetalle haben eine sehr hohe Wärmekapazität sowie gleichermaßen auch eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit. Das ist der Grund, warum ein LMR eine besonders hohe Leistungsdichte aufweist. Flüssigmetalle wie z.B. Natrium oder Blei haben keine Moderationswirkung, mit der die bei der Kernspaltung entstehenden schnelle Neutronen auf das Energieniveau thermischer Neutronen gebremst werden könnte, die für die Spaltung von Uran erforderlich sind. Daher werden LMR grundsätzlich als schnelle Brutreaktoren ausgeführt.

Die zuvor für die MSFR genannten Vorteile gelten auch hier:

- Durch lange Brennstoffzyklen wird eine vollständige Nutzung des Brennstoffinventars zu erreicht.

- Durch Beschuss mit schnellen Neutronen wird eine Reduktion der Anzahl und der Radiotoxizität der Spaltprodukte erreicht.

LMR dienen sowohl der Stromerzeugung als auch zum Erbrüten von neuem spaltbarem Material. Durch den Brutvorgang mit schnellen Neutronen ist es im Prinzip möglich, das Natururan etwa sechzig Mal besser auszunutzen als im Leichtwasserreaktor mit thermischen Neutronen. LMR entschärfen durch die Absorption von schnellen Neutronen in Spaltprodukten die Problematik der Endlagerung.

Dual Fluid Reaktor (DFR)

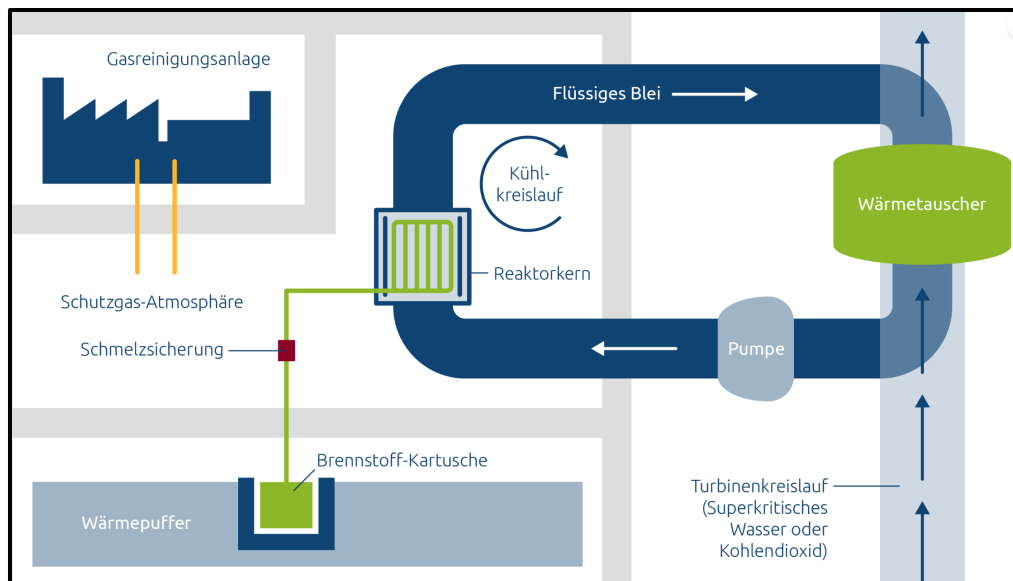
Im DFR werden die Vorteile des Flüssigsalzreaktors mit denen metallgekühlter Reaktoren kombiniert. Es handelt sich um einen mit schnellen Neutronen arbeitenden Brutreaktor, der über einen primären Blei- und einen sekundären Wasser-Dampf-Kreislauf verfügt.

Wie beim MSFR, in dem der erste Kreislauf aus einem Gemisch aus flüssigem Kernbrennstoff und flüssigen Salz besteht, entsteht die Wärme durch Spaltungsprozesse im Reaktorkern. Im Gegensatz zum MSFR zirkuliert dieses Gemisch jedoch nicht als Kreislauf zwischen Wärmeerzeugung im Kern und Wärmeabfuhr im Wärmeübertrager, sondern verbleibt im Kern, der selber wie ein Wärmeübertrager mit Rohren für den ersten Kühlkreislauf ausgestattet ist.

Die Wärme der Spalt- und Brutprozesse wird durch das Blei aufgenommen und an einen zweiten Wärmeübertrager weitergeleitet. In diesem wird das Wasser des Wasser-Dampf-Kreislaufs verdampft und überhitzt zur Turbine geleitet.

Mit dem DFR-Konzept lassen sich alle zuvor genannten Vorteile der LMFR realisieren. Der besonders kompakte Reaktor wurde in Deutschland konzipiert und wird derzeit in Kanada weiterentwickelt.

Abb. 13: schematisches Bild des DF300 von Dual Fluid



Hochtemperaturreaktor (HTR)

Als HTR werden Kernreaktoren bezeichnet, die wesentlich höhere Arbeitstemperaturen ermöglichen als andere bekannte Reaktortypen (14), was besonders für die Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme vorteilhaft ist. Hierzu muss das Kühlmittel gasförmig sein. Beim Prototyp des HTR, dem in der Kernforschungsanlage Jülich entwickelten und in Hamm Uentrop errichteten Thorium Hochtemperatur Reaktor THTR 300 hat man sich für Helium als Kühlmittel entschieden.

Neben dem gasförmigen Kühlmittel werden auch aus Temperaturgründen keramische statt metallischer Werkstoffe im Reaktorkern verwendet. Der Moderator ist wie beim von Ferni gebauten weltweit ersten Kernreaktor Chicago Pile 1 Graphit. Beim HTR besteht der Kern aus tennisballgroßen Graphitkugeln, in die als Brennstoff kleine Partikel aus Uran- oder Thorium-Keramik eingebacken sind. Brennstoff und Moderator sind daher untrennbar miteinander verbunden. Bei steigender Temperatur der Brennstoff-Moderator-Kugeln verändert sich der Wirkungsquerschnitt für die Kettenreaktion und die Leistung nimmt ab. Dadurch wird der Prozess inhärent sicher. Für eine Schnellabschaltung besteht ein Kugelschnellabzug mit dem die Brennstoff-Moderator-Kugeln über Schwerkraftmechanismen aus dem Kern entfernt werden. Beim THTR 300 Prototypen in Hamm Uentrop gab es Probleme mit dieser Schnellabschaltung, weswegen das Forschungsprojekt abgebrochen wurde. Diese Entscheidung ist umstritten.

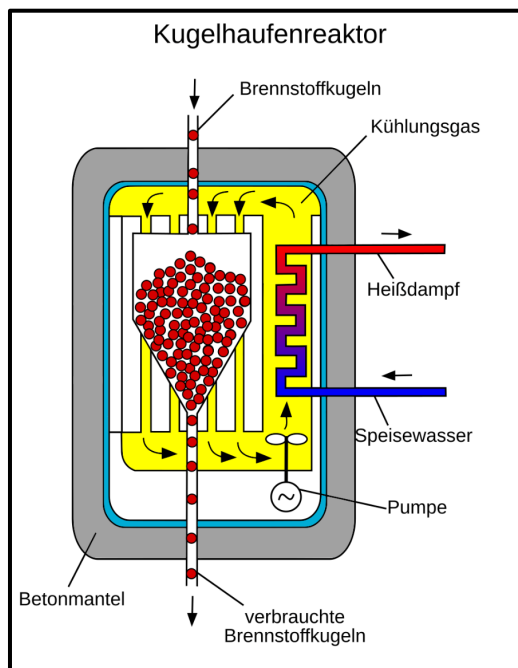
Wie bereits beschrieben, wird die bei der Spaltung entstehende Wärme vom Helium aufgenommen, welches sich dabei auf ca. 1.000 °C erhitzt. Es wird zu einer Turbine

geleitet, die den aus der Wärmeaufnahme entstandenen Druck in Rotationsenergie umwandelt, mit der der Generator betrieben wird.

Nachdem das Konzept in Deutschland aufgegeben wurde, hat China die Technologie übernommen und betreibt seit 2003 einen 300 MW Versuchsreaktor.

Aufgrund der hohen Helium-Temperaturen verfügt der THTR über einen besonders hohen Wirkungsgrad. Die große Wärmemenge kann zudem als Prozesswärme verwendet werden, um Wasserstoff herzustellen oder Kohle zu veredeln.

Abb. 14: Schema des in Jülich (KFA-Jülich, jetzt JEN) entwickelten Kugelhaufenreaktors



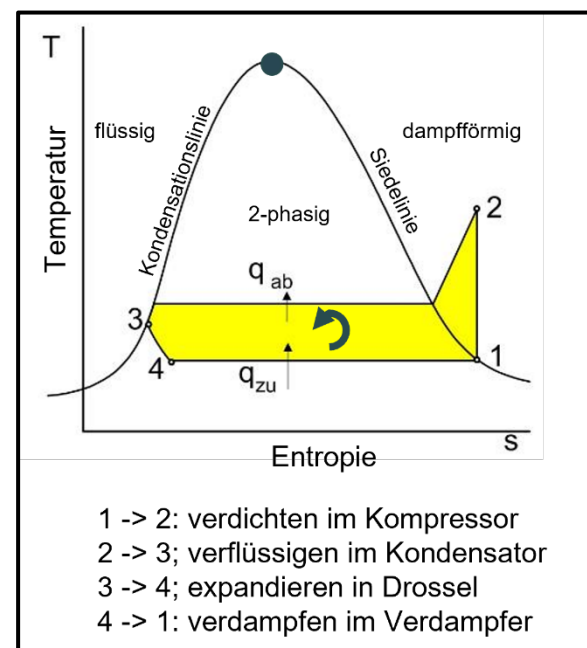
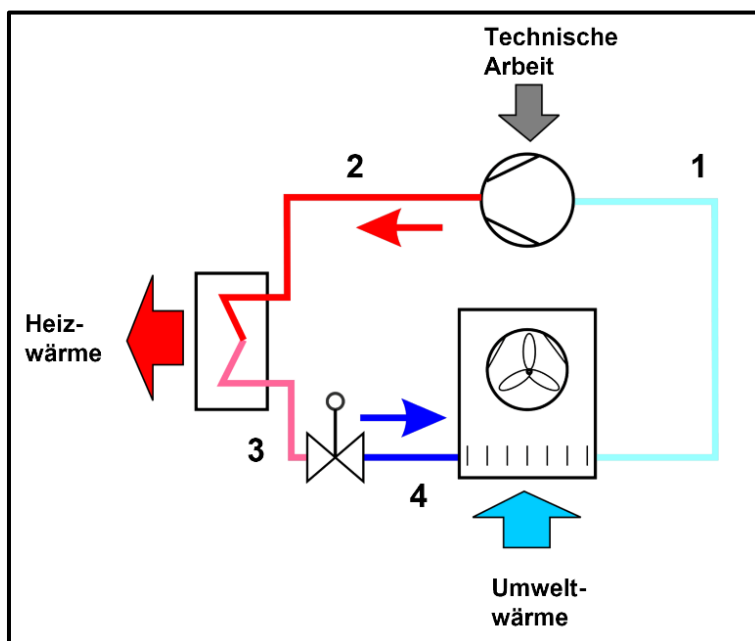
Neue Einsatzbereiche von SMR

Die Bereitstellung von Prozessdampf für die chemische und pharmazeutische Industrie

Die Dekarbonisierung aller Prozesse stößt beim Einsatz von Wärmepumpen an Grenzen; Je größer der erforderliche Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Anwendung ist, umso mehr elektrische Energie ist für die Anhebung der Temperaturen erforderlich. Die Wärmepumpe ist die Umkehrung des Kraftwerksprozesses. Während im Kraftwerk aus hohen Temperaturen im Dampferzeuger in der Turbine mechanische Energie gewonnen wird, die den Generator dreht, mit dem Strom erzeugt wird, dreht bei der Wärmepumpe ein Elektromotor den Kompressor, mit dem die Druckdifferenz gewonnen wird, die bewirkt, dass das Kreislaufmedium bei geringen (Umgebungs-)Temperaturen verdampft und bei hohen (Wärmesenken-)Temperaturen wieder kondensiert (Abb. 15).

Die direkte Nutzung des Prozessdampfes aus Kernreaktoren auf hohem Temperaturniveau ist für die chemische und pharmazeutische Industrie eine Chance, die Dekarbonisierung wirtschaftlich darzustellen.

Abb. 15: Schematische Darstellung einer Wärmepumpe (links) und Prozessabbildung im T-s-Diagramm zur Veranschaulichung, dass es sich um den rückwärtslaufenden Kreisprozess des thermischen Kraftwerks handelt



Exkurs (Abb. 16) Während bei Kraftwerken eine möglichst große Temperaturdifferenz zwischen überhitztem Dampf und Kondensatorvakuum angestrebt wird, um mit einem hohen Wirkungsgrad möglichst viel Strom zu erzeugen, ist es im Wärmepumpenprozess genau umgekehrt: Umso höher die angestrebte Prozesstemperatur und umso niedriger die Wärmequellentemperatur ist, umso mehr elektrische Energie muss für den Verdichter eingesetzt werden. Bei Temperaturerhebungen von 10 °C auf 40 °C, wie sie im Gebäudeenergiebereich für Heizzwecke erforderlich sind, braucht man etwa 1/3 elektrische Energie, um Umweltwärme auf Nutzwärmeniveau zu bringen. Bei 100 °C sind es schon etwa 50 Prozent. Die Prozesstemperaturen in chemischen Produktionsanlagen liegen weit höher und erfordern 500 °C und mehr. Hier liegt der Anteil an elektrischer Energie an der bereitgestellten Wärme schon weit über 70 Prozent. Ein weiteres Problem der Hochtemperaturwärmepumpen ist die Materialeignung der Bauteile und Dichtungen. Bereits über 100°C wird es schwierig, geeignete Komponenten zu finden.

Die Dekarbonisierung von Hochtemperaturprozessen muss entweder direkt mit 100 Prozent elektrischer Energie oder aber mit Prozessdampf aus Kernkraftwerken erfolgen, andernfalls müssen weiterhin fossile Energieträger zum Einsatz kommen. Dies ist ein Anwendungsbereich, den der Entwickler des Thorium-Hochtemperatur-Reaktors THTR, Prof. Rudolf Schulten, vor Augen hatte, als er den THTR 300 als Prototypen konzipierte. Wenn auch dieser erste Reaktor keinen technischen und erst recht keinen wirtschaftlichen Erfolg hatte, so stand er doch bei der Entwicklung der SMR Pate.

Einsatz von SMR zur Herstellung von Wasserstoff

Eine weitere mögliche Anwendung für SMR ist die Herstellung von Wasserstoff. Aufgrund der hohen Investitionskosten von Elektrolysen sollten diese kontinuierlich mit möglichst mehr als 7.000 Volllaststunden im Jahr genutzt werden. Ein Betrieb durch eine Windenergieanlage (WEA), die onshore auf etwa 2.000 bis 2.500 Volllaststunden kommt, ist wenig wirtschaftlich, da es durch die Volatilität zu geringerer Haltbarkeit der Elektrolysen kommt. Die Bündelung von in verschiedenen Regionen stehenden WEAs erhöht die gemeinsame Volllaststundenzahl, macht aber die Nutzung des Transport- und/ oder Verteilnetzes für den Strom erforderlich, was wiederum die Kosten erhöht.

Aus diesem Grund sollten Elektrolysen zur Herstellung von Wasserstoff möglichst auf dem Gelände eines Grundlastkraftwerks stehen. Der Wasserstoff wiederum kann genutzt werden, um – in einer Gasturbine entspannt – Minderlasten im Netz auszugleichen. Somit ergäbe sich eine sinnvolle Symbiose von SMR, Elektrolyse, Wasserstofftank und mit Wasserstoff betriebenen Gasturbinen.

Bei Temperaturen von ca. 3.000 °C ist eine direkte Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff möglich. Somit könnte es – vorausgesetzt die Temperaturen sind großtechnisch beherrschbar – gelingen, zukünftig Wasser unter Nutzung Wärme aus SMR direkt zu zerlegen.

Weitere Aspekte

Entsorgung abgebrannter Brennelemente

Das Thema Entsorgung von Atommüll ist in der Basisdokumentation von GES (1) bereits ausführlich behandelt worden. Im Hinblick auf die SMR sind noch folgende Aspekte zu beachten.

Reduzierung der Radioaktivität der Spaltprodukte

SMFR sowie DFR werden und LMR können als Brüter ausgeführt werden. Der primäre Nutzen ist die eigene Erzeugung des Brennstoffs. Der Beschuss der Spaltprodukte aus dem Reaktorprozess sowie möglicherweise auch der Beschuss von abgebranntem Kernbrennstoff aus anderen Kernreaktoren kann dazu genutzt werden, die bei der Spaltung entstandenen Isotope aufzubreiten und somit entweder kürzere Halbwertszeiten für den radioaktiven Zerfall zu erreichen, oder sie sogar unmittelbar durch die Absorption eines Neutrons stabil zu machen.

Wiederaufbereitung

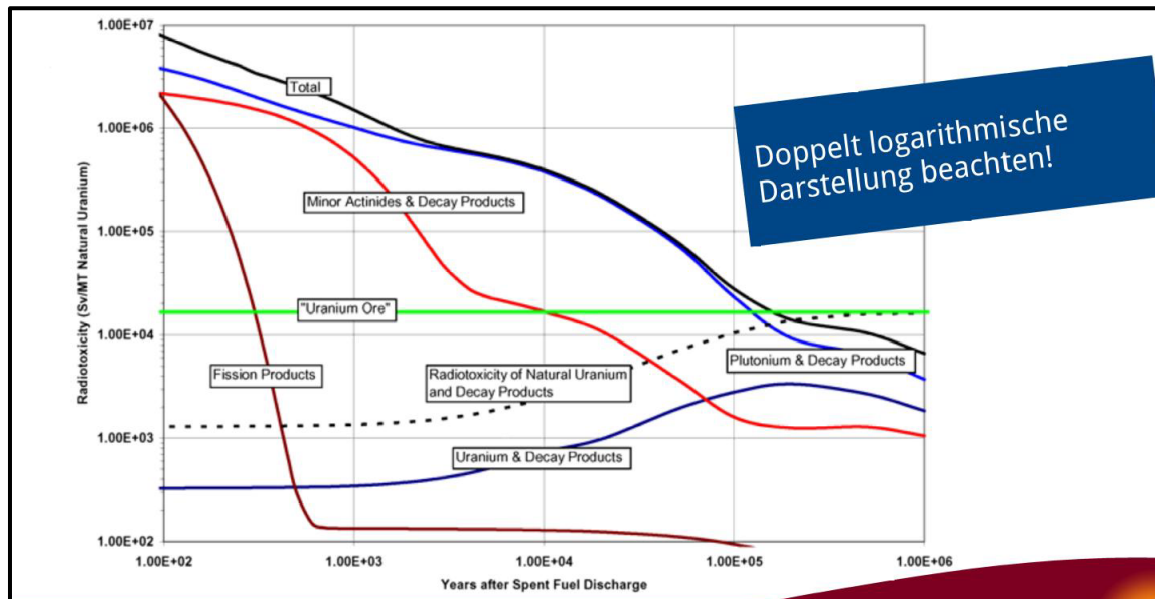
Eine weitere Option zur Entschärfung der Problematik von radioaktivem Müll besteht in der Wiederaufbereitung. In Deutschland wurde das Projekt einer Wiederaufbereitungsanlage in Wackersdorf (WA 350) als Folge des Protestes der Bevölkerung bereits im Vorstadium aufgegeben. Verschiedene Länder, wie Frankreich und Großbritannien, betreiben Wiederaufbereitungsanlagen. In einer Wiederaufbereitungsanlage werden aus den Brennstäben z. B. Uran und Plutonium extrahiert (PUREX-Verfahren). Daraus wird MOX- (Mischoxid) Brennstoff hergestellt. Dadurch wird auch eine Volumenreduktion der radioaktiven Abfälle erreicht.

Exkurs: Nach der Wiederaufarbeitung kann der hochradioaktive Abfall nur noch etwa 20 % des ursprünglichen Volumens einnehmen. Nach etwa 30 Jahren ist die Wärmeabgabe des wiederaufgearbeiteten Abfalls um etwa 70 % gesunken. (16)

Abfälle aus deutschen Kernreaktoren werden in einer Wiederaufbereitungsanlage nur verglast, um später nicht rückholbar in ein Endlager verbracht zu werden. Dieses ist im deutschen Atomgesetz so geregelt.

Die Suche nach einem Endlager für hochradioaktiven Atommüll gestaltet sich in den meisten Ländern schwierig. Die Verbringung unter die Erde stößt auf Widerstand in der Bevölkerung.

Abb. 16, Radiotoxizität des Atommülls (17)



Reaktoren, die auf Basis schneller Neutronen arbeiten, können – wie oben ausgeführt – auch zur „Verbrennung“ radioaktiven Abfalls eingesetzt werden. Hierfür sind alle bereits bestehenden Reststoffe, die derzeit oberirdisch in CASTOR-Behältern gelagert werden, geeignet (35, 36). Mit SMFR könnte ein Großteil des für die Endlagerung vorgesehenen Materials als auch dessen Langlebigkeit markant verringert werden, aus mehreren 100.000 Jahren würden mehrere 100 Jahre, so dass eine oberflächennahe Verbringung ausreichen würde. Bzgl. Abklingkurven der Radiotoxizität von Atommüll siehe Abb. 16.

Endlager

Die Endlagerfrage haben die verschiedenen Staaten, in denen Kernkraftwerke betrieben werden, unterschiedlich gelöst. Für alle Staaten aber gilt, dass der abgebrannte Kernbrennstoff in dem Land gelagert werden muss, in dem das Kraftwerk stand, bei dessen Betrieb die Reststoffe entstanden sind.

- Laut Endlagersuchgesetz soll innerhalb Deutschlands der Standort für ein Endlager für hochradioaktiven Müll gefunden werden - ergebnisoffen, transparent, nach gesetzlich festgelegten fachlichen Kriterien und unter Beteiligung der Öffentlichkeit. Es reicht bei dem gesetzlich vorgeschriebenen Auswahlprozess nicht aus, einen geeigneten Standort für ein Endlager zu finden. Der festzulegende Standort muss darüber hinaus nachweislich der beste aller möglichen Standorte in Deutschland sein. Dieses Kriterium macht es unmöglich, einen Standort festzulegen, denn der Beweis des Superlativs in der Bewertung kann nicht geführt werden.

- Die Standortfestlegung soll bis 2031 abgeschlossen sein und das Endlager soll bis 2050 in Betrieb genommen werden. Die Politiker der jeweilig zum Zeitpunkt der Entscheidungen amtierenden Regierung werden Gründe für eine Verschiebung finden.
- Aus heutiger Sicht ist keine Wiederaufbereitung vorgesehen. Das gleiche gilt für eine mögliche Transmutation.
- International ist die Rückholbarkeit der Abfälle gefordert. Das ist auch eine Konsequenz der erforderlichen Räumung des Endlagers Asse für mittelaktive Reststoffe aus medizinischer und industrieller Nutzung sowie in Teilen auch aus der Kernenergie

Es ist davon auszugehen, dass die Endlagersuche und die Verbringung radioaktiven Mülls sich noch mindestens bis nach 2100 hinziehen wird (18).

Transmutation

Eine weitere Methode zur Verringerung der Radioaktivität von nuklearem Abfall ist die Transmutation. Hierbei werden Spaltprodukte mit schnellen Neutronen aus Neutronenquellen beschossen. Hierdurch werden die Spaltprodukte aufgebrütet oder weiter gespalten bis neue Isotope entstehen, deren Nachzerfall entweder sehr schnell erfolgt, oder die bereits stabil sind. Entwicklungsprojekte zur Transmutation bestehen z. B. in Frankreich, Belgien, Großbritannien, USA und Kanada. Das schweizerisch/deutsche Unternehmen Transmutex entwickelt ebenfalls eine solche Anlage (19).

Durch Transmutation könnten die Strahlungsintensität des Atommülls und die Strahlungsdauer markant verkürzt werden. Auf Basis der bisherigen Ergebnisse von Transmutex können folgende Prognosen gemacht werden:

- Das Volumen des radioaktivsten Abfalls wird um das 8,8-Fache reduziert.
- Die erforderliche Einschlussdauer kann von 1 Million auf 830 Jahre gesenkt werden.

Die Transmutation selber steht zwar im Einklang mit bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen. Der Einsatz hochradioaktiver Abfälle in Transmutationsanlagen setzt jedoch Gesetzesänderungen voraus.

Wenn die Entwicklungen der Transmutation zum Erfolg führt, würde sich die Endlagerfrage von alleine lösen. Das US-Energieministerium hat bereits das Verfahren von Transmutex als Referenztechnologie für die Reduktion der radioaktiven Reststoffe definiert (20,21).

Sicherheit

Die Beaufsichtigung der Sicherheit von Kernreaktoren obliegt den zuständigen nationalen und übernationalen Behörden. Eine Detailbeschreibung für Deutschland (22) und Europa (23) befindet sich im Internet. Die entsprechenden Regelungen für große Kernkraftwerke gelten zunächst unverändert auch für SMR. Da diese bislang maximal als Prototyp bestehen, ist damit zu rechnen, dass die Regelwerke mit zunehmender Erfahrung modifiziert und ergänzt werden, da heute noch keine statistischen Aussagen zur Sicherheit von SMR gemacht werden können, die auf Betriebserfahrungen beruhen.

Eine Extrapolation der mit bestehenden Anlagen gewonnenen und über Versuche und Berechnungen gewonnenen Ergebnisse auf SMR lässt jedoch bereits folgende Schlüsse zu:

- SMR verfügen über eine höhere Sicherheit wegen der kleineren Leistungsgröße und des geringeren radioaktiven Inventars.
- Insbesondere MSR verfügen über inhärente Sicherheit und wegen des niedrigeren Betriebsdrucks über ein geringeres Integritätsrisiko.
- Ebenso verfügen HTR über inhärente Sicherheit.
- Mit schnellen Neutronen arbeitende MSFR, LMR und DFR haben den Vorteil der Brutprozesse sowie der integrierten Transmutation der Spaltprodukte, was zu einer Entschärfung der Endlagerungsproblematik führt.

Zu den Risikoaspekten wird auf die weiterführende Literatur (24, 25) verwiesen.

SMR-Nutzung in verschiedenen Regionen

Deutschland

Der aktuelle Stand der Analysen des Potenzials von SMR durch das Bundesamt für Sicherheit und nukleare Entsorgung BASE ist enttäuschend. BASE erkennt beim SMR gegenüber den konventionellen Reaktoren keine Vorteile hinsichtlich der Kosten und der Sicherheit (26).

Durch die neue Bundesregierung wird sich das voraussichtlich ändern. Die Forschung an Zukunftsthemen zur Kerntechnik ist ausdrücklich im Koalitionsvertrag aufgenommen worden. Eine Forschung ohne Umsetzungswillen im Falle positiver Ergebnisse darf nicht mit Steuergeldern unterstützt werden. Insofern folgt im Umkehrschluss, dass sich Deutschland auf den Bau von SMR-Prototypen vorbereitet.

Europäische Union (27,28)

Die EU-Kommission hat ein eigenes Programm für die Entwicklung neuartiger Reaktortechnologien bereits im Februar 2024 gegründet: „European industrial alliance on SMR“. Die EU-SMR-Industrieallianz wird sich darauf konzentrieren, den Einsatz dieser Reaktortypen zu beschleunigen und eine starke EU-Lieferkette, einschließlich qualifizierter Arbeitskräfte, sicherzustellen.

Die Allianz wird sich auf folgende Schlüsselbereiche konzentrieren:

- Die vielversprechendsten, fortschrittlichsten, sichersten und kosteneffizientesten SMR-Technologien zu ermitteln, die für eine Unterstützung durch die Allianz in Frage kommen
- Unterstützung von SMR-Projekten, Stärkung der europäischen Versorgungskette (einschließlich Brenn- und Rohstoffen) durch Beseitigung möglicher Lücken und Beratung von SMR-Projekten vom Beginn bis zur Einführung
- Ermittlung von Investitionshindernissen, Analyse von Finanzierungsmöglichkeiten und Erkundung neuer finanzieller Mischoptionen für die SMR-Entwicklung
- Wege zur Information und Einbeziehung potenzieller industrieller Nutzer von SMR wie energieintensive Industrien, Wasserstoffhersteller usw. zu finden
- Ermittlung des künftigen Forschungsbedarfs im Bereich der Kernreaktoren und der fortgeschrittenen modularen Reaktoren (AMR), Ermittlung von Qualifikationslücken entlang der Versorgungskette, die im Rahmen des Euratom-Forschungs- und Ausbildungsprogramms und der nationalen Programme angegangen werden könnten

- Intensivierung des Austauschs und der Kontakte zwischen Projektträgern, europäischen Aufsichtsbehörden für nukleare Sicherheit und Aufsichtsbehörden in den EU-Ländern
- Förderung des öffentlichen Engagements für die Kernenergie durch Zusammenarbeit mit einschlägigen Organisationen der Zivilgesellschaft und NRO
- die Einrichtung einer Nuclear Skills Academy zu erleichtern und den künftigen Bedarf an Kompetenzen und Qualifikationsentwicklung zu ermitteln
- Zusammenarbeit mit einschlägigen internationalen Gremien, um europäische SMR-Projekte auf den internationalen Märkten zu unterstützen

Das Euratom-Arbeitsprogramm für Forschung und Ausbildung 2023–2025 verfügt über ein Budget von EUR 132 Mio. Daraus sind EUR 15 Mio. vorgesehen, um die Sicherheit europäischer Leichtwasser-SMR zu unterstützen und EUR 12 Mio. für die Kofinanzierung von Forschern und Industrie, um gemeinsam an der Sicherheit fortgeschrittener modularer Reaktoren, einschließlich SMR, zu arbeiten.

Die SMR-Allianz betont: Durch den Ausbau der Zusammenarbeit auf EU-Ebene wird die Allianz die Einführung der ersten SMR in der EU bis Anfang der 2030er Jahre beschleunigen. Dies geschieht unter Einhaltung der höchsten Standards für nukleare Sicherheit.

Die Allianz hat erste Projekte für Arbeitsgruppen ausgewählt (https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-industrial-alliance-smallmodular-reactors_en). In diesen Arbeitsgruppen soll die Realisierung verschiedener Konzepte von SMR untersucht werden. Zum Teil finden sich diese Konzepte bereits im **Anhang**, welcher die weltweiten SMR-Projekte auflistet, die sich bereits in der Realisierungsphase befindet

- EU-SMR-LFR-Projekt (Ansaldo Nucleare, SCK-CEN, ENEA, RATEN)
- CityHeat-Projekt (Calogena, Steady Energy)
- Project Quantum (Last Energy)
- European-LFR-AS-Projekt (Newcleo)
- Nuward (EDF)
- European BWRX-300 SMR (OSGE)
- Rolls-Royce SMR (Rolls-Royce SMR Ltd)
- NuScale VOYGR SMR (RoPower Nuclear SA)
- Thorizon-One-Projekt (Thorizon)

An dem ersten Treffen der SMR-Allianz nahmen 14 Länder teil. Deutschland nahm nicht teil und schickte auch keinen Beobachter.

USA (29)

Die US-Regierung geht davon aus, dass bis 2050 zusätzlich 1.500 bis 2.000 GW klimaneutrale Erzeugungskapazitäten benötigt werden. Hierbei soll neben Erneuerbaren Energien insbesondere die Kernenergie (sowohl SMR, als auch Mikro- und große Reaktoren), eine zentrale Rolle spielen. Es wurden mehrere Initiativen zur Förderung dieser Technologien eingerichtet beziehungsweise werden regierungsseitig unterstützt.

Darüber hinaus wurden im sogenannten IRA-Programm (Inflation Reduction Act) im September 2022 neue Anreize für die Nuklearindustrie geschaffen, unter anderem durch Steuererleichterungen und Vereinfachungen bei der Kreditvergabe. In eine vergleichbare Richtung zielt das im Juli 2024 in Kraft gesetzte Advance-Gesetz, in dem festgelegt wird, welche Anforderungen erfüllt sein müssen, um den Einsatz von Kernenergietechnologien (u. a. fortschrittliche Reaktoren) zu beschleunigen.

Kosten von SMR

Die Investitionskosten (CAPEX) und die Betriebskosten (OPEX) für einen SMR sind aus heutiger Sicht mangels konkreter Projekterfahrung nur mit großer Unsicherheit schätzbar. Es kann aber festgestellt werden, dass folgende Merkmale große Potentiale bieten, die Kosten von SMR gegenüber herkömmlich AKW von der Leistungsgröße von 1 – 2 GW deutlich zu senken:

- Baugleichheit von Modulen
- Wegfall von standortspezifischen Merkmalen
- Hohes Skalierungspotential
- Industrielle Fertigung in zentralen Werken
- Vereinfachung von Zulassungsverfahren

Ein Bericht von Elsevier (30) „Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe“ welcher auf einer systematischen Sichtung und Auswertung der einschlägigen Fachliteratur beruht, kommt zu folgendem Ergebnis:

Die durchschnittlichen Kapitalkosten pro kW für SMRs werden auf ca. 7.000 €/kW geschätzt. Sie sind damit um ca. 40 % höher als bei großen Reaktoren.

Die Stromgestehungskosten von SMR werden auf 0,08 bis 0,09 €/KWh geschätzt. Das liegt nur geringfügig höher, als die Einspeisevergütung von PV-Strom von privaten Anlagen auf Hausdächern. Es liegt in der Größenordnung heutiger Industriestrompreise.

Im Rahmen der Weiterentwicklung ist von einer Kostendegression auszugehen.

Quellen

- (1) BMZ-report, Titel 687 01
- (2) IEA „Der Weg in eine neue Ära der Kernenergie“ 10/2024
- (3) Definition fortgeschrittene Volkswirtschaften:
www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2023/April/groups-and-aggregates
- (4) IEA-Szenarien
- (5) www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15790-PUB9062_web.pdf,
- (6) Mc Kinsey: How data centers and the energy sector can satiate AI's hunger for power
- (7) www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-role-of-power-in-unlocking-the-european-ai-revolution
- (8) www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs
- (9) www.motive-power.com/visualized-the-four-benefits-of-small-modular-reactors/
- (10) Wikipedia “Molten Salt Reaktor”
- (11) www.copenhagenatomics.com
- (12) Wikipedia “Dual Fluid Reaktor”,
- (13) www.dual-fluid.com
- (14) Wikipedia Hochtemperaturreaktor
- (15) Werner Schnurberger “Wasserspaltung mit Strom und Wärme“
- (16) Wikipedia Wiederaufbereitung
- (17) Nuklearia, Rainer Klute, <https://nuklearia.de/>
- (19) www.zeit.de/wissen/2024-08/atommuell-endlager-suche-steffi-lemke-faq
- (20) www.transmutex.com
- (21) www.nuklearforum.ch/de/news/transmutex-erzielt-wichtige-fortschritte-den-usa-und-deutschland/
- (22) www.nuklearesicherheit.de
- (23) www.nuklearesicherheit.de/europa-und-internationales/
- (24) www.base.bund.de/de/nukleare-sicherheit/kerntechnik/alternative-reaktorkonzepte/alternative-reaktorkonzepte_inhalt.html
- (25) www.sprind.org/worte/magazin/sprind-und-transmutex

- (26) www.base.bund.de/de/nukleare-sicherheit/kerntechnik/alternative-reaktorkonzepte/alternative-reaktorkonzepte_inhalt.html
- (27) https://energy.ec.europa.eu/news/commission-ally-industry-small-modular-reactors-2024-02-09_en
- (28) www.nucleareurope.eu/press-release/commission-launches-european-industrial-alliance-on-smrs/
- (29) US politische Rahmenbedingungen (world Nuclear news)
- (30) www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032124004696
- (31) www.nuklearforum.ch/de/news/grossbritannien-sechs-anbieter-fuer-nationalen-smr-ausgewaehlt/ (Nuklearforum der Schweiz)
- (32) www.world-nuclear-news.org/articles/reactor-internals-in-place-at-chinese-smr
- (33) www.nuklearforum.ch/de/news/russland-baut-kleines-kernkraftwerk-aus-sechs-smrs-usbekistan/
- (34) www.grs.de/en/nuclear-energy-russia-16082023
- (35) Leidinger, B.J.G.: Auslegung eines luftgekühlten Übergangslagers für Brennelemente aus Kernkraftwerken. (VDI-Fortschritt-Berichte. Reihe 6: Energietechnik/Wärmetechnik. Nr. 177), 1985.
- (36) Leidinger, B.J.G.: Economical Dry Storage of Large Amounts of Spent Fuel and Vitrified High Level Radioactive Waste, OECD-NEA Specialist Workshop on Dry Storage of Spent Fuel Elements, Madrid, pp. 79/87, May 1982

Abkürzungsverzeichnis

AKW	Atomkraftwerke
LWR	Leichtwasserreaktoren
DWR	Druckwasser Reaktor
SWR	Siedewasser Reaktor
SMR	Small Modular Reactor
MSR	Molten Salt Reactor
MSFR	Molten Salt fast Reactor
FMR	Liquid Metal Reactor
DFR	Dual Fluid Reactor
HTR	High Temperature Reactor
IEA	International Energy Agency
EMDE	emerging market and developing economies
GB	Großbritannien
HUB	Knotenpunkt (z. B. für Computer)

Anhang: Überblick über die wichtigsten SMR Projekte weltweit

Region	Land	Unternehmen	Eigentümer	Bezeichnung	Funktionsprinzip (siehe Kapitel G)	Modulleistg. (MW)	Erläuterungen
Nord-amerika	USA	NuScale Power	verschiedene	VOYGR-6	PWR	77	[1]
		Westing- house	Westing- house	AP300	PWR	300	[2]
		GE Hitachi Nuclear	GE Hitachi Nuclear	BWRX-300 SMR	BWR	300	[3]
		Terrapower	Gates Stiftung		LMR, Na	345	[4]
		X-Energy	Amazon		gasgekühlt	320	[5]
		Kairos Power	Google		MSR, Uran/Keramik	140	[6]
		Holtec	Holtec		DWR	160	[7]
		Oklo	Dunedin/ Kanada		Nutzung verbrannten Brennstoffs	MSR	[8]
	Kanada	Moltex Energy					[9]
Asien	China	CNNC	CNNC	APC100	DWR	125	[10]
	Korea	KHNP		iSMR	DWR	170	[11]
Europa	GB	Rolls-Royce SMR	Rolls-Royce		DWR	470	[12]
	F	Nuward	EDF		DWR	200 - 400	[13]
	I/F	Newcleo	italienisch		LMR Blei	30, 200	[14]
Russland	Russland/ Usbekistan /Kasachs	Rosatom	Rosatom	RITM-200N	LWR, Blei	200	[15]
	Russland	Rosatom	Rosatom	Brest 300	LMR Blei	300	[16]
	Russland	Rosatom	Rosatom	RITM-200N	LWR	200	[17]

Kommentare zu Tabelle (2)

Kommentar 1

Wenn man die Zahl der Projekte, die Zahl der verschiedenen Ausführungen, die verfügbaren finanziellen Mittel und die angestrebten Realisierungstermine zugrunde legt, sind die USA in der SMR-Entwicklung und -Nutzung weltweit eindeutig führend.

Kommentar 2

Die britische Regierung hat 2023 einen Wettbewerb veranstaltet, um den besten SMR für Großbritannien auszuwählen und dessen Entwicklung zu fördern. 6 Herstellern kamen in die nächste Runde: EDF, GE-Hitachi, Holtec Britain, NuScale Power, Rolls Royce SMR und Westinghouse (31).

Kommentar 3

China (26): Als Inbetriebnahme-Termin des chinesischen SMR ist 2026 anvisiert. Damit läge China auf der Zeitachse an der Spitze!

Kommentar 4

Russland hat wahrscheinlich die längste Erfahrung mit SMR. Diese deckt viele verschiedene Einsatzgebiete ab: Energieversorgung, Versorgung von Städten, Wärmeversorgung, Transport auf Schiffen, Eisbrecher etc. Es wäre wünschenswert, wenn sich Russland nach der aktuellen Eiszeit mit seiner breiten Erfahrung bald wieder am internationalen Informationsaustausch beteiligen würde. Es ist nicht zu erkennen, dass Russland anstrebt, sich am internationalen Wettbewerb bei den Datenzentren zu beteiligen. Wahrscheinlich fokussiert Russland auf Anwendungen für EMDE-Ländern. Russland ist mit seinen guten Beziehungen dorthin gut vorbereitet. Russland ist zudem im Ausland sehr aktiv: Ägypten, Bangladesch, Weißrussland, China, India, Türkei und Ungarn (32,33).

Bzgl. der Auswahl europäischer SMR-Konzepte im Rahmen der europäischen SMR-Allianz siehe H 4.

Erläuterungen zu den verschiedenen Projekten

[1] LOIs bzw. Vereinbarungen mit Bulgarien, Kanada, der Tschechischen Republik, Ghana, Indonesien, Korea, Polen, der Ukraine und den Vereinigten Staaten. In Rumänien ist ein 462-MW-SMR-Kraftwerk mit sechs Modulen geplant. Im GB - Auswahlverfahren unter den letzten 6. In 2024 gab NuScale seine SMR-Pläne auf. Nuscale ist aber weiter im Geschäft.

[2] wurde in die engere Auswahl des SMR-Auswahlverfahrens in GB genommen. Der erste Block soll Anfang der 30-iger Jahre gebaut werden. 2030 gebaut werden. Westinghouse mit Kanada, der Tschechischen Republik, Rumänien und der Ukraine unterzeichnet.

[3] der erste BWR 300 soll an Ontario Power Generation gehen. 3 weitere in Planung. Baustart 2024, Inbetriebnahme 2029. Ist auch in der 1. Stufe des GB - Wettbewerbs. LOIs mit Tschechien, Estland, Polen und Schweden. Polen plant mit GE Hitachi 79 SMRs

[4] Inbetriebnahme 2030

[5] erster Reaktor in Texas, Inbetriebnahme 2029, 3 weitere in Washington geplant. In USA sind bis 5 GW bis 2039 geplant. Vorlizensierung für Projekte in Canada abgeschlossen. Abkommen mit dem lokalen Energieversorger Dominion Energy.

[6] Google hat 7 SMRs bestellt. Der erste SMR soll 2027 betriebsbereit sein. 500 MW bis 2035.

[7] Im GB-Auswahlverfahren unter den letzten 6. Kooperationspartner Hyundai.

[8] Fertigstellung bis 2027 geplant. 2 weitere Reaktoren in der Planung

[9] LOI für SMR Bau in Kanada, Betriebsdatum Anfang der 30-iger

[10] Baustart 2021, Inbetriebnahme 2026, könnte die erste Inbetriebnahme weltweit eines SMR weltweit werden (32)

[11] Ziel: Design approval 2028

[12] In Tschechien als bevorzugter Lieferant ausgewählt. Baustart 2025. LOIs mit Schweden, Polen. Anfang der 30-iger erster MSR in GB. Kooperation mit Siemens Energy bei Turbinen.

[13] Baubeginn 2030, LOIs mit Finnland, Indien, Italien, Polen, der Slowakei und Slowenien

[14] 30-MW-LFR Inbetriebnahme 2031, 200-MW Inbetriebnahme in 2033

[15] Russland und Usbekistan planen den Bau von 6 SMRs (Typ RITM-200N. Baustart 2024. Russland baut in Jakutien einen RITM SMR, Fertigstellung 2027. Russland baut in Kasachstan 6 SMR mit einer Gesamtleistung von 180 MW (30)

[16] Russland baut in Omsk einen schnellen Brüter auf Basis Blei (33)

[17] Russland baut und betreibt verschiedene SMR auf Eisbrechern und Transportschiffen; Brennstoff ist 20 % angereichertes Uran (34)