

Berlin, 22. April 2022

Hausruf: [REDACTED]

Hausruf: [REDACTED]

VERMERK

R4 2015

17

1. St Gr, II mit Dank Zurück
2. 17-BL Kontrolle und Ausfertigung des beigefügten Briefes

Betr.: Nukleare *Small Modular Reactors* (SMR)
hier: Aktueller Stand und Ausblick

Bezug: BM-Bitte um einen „Vermerk zu allen Aspekten SMR“ (auf Brief von [REDACTED] vom 26.02.2022)

GLA, LB, LB1

275

Anmerkung von St Gr: Das Thema SMR ist ein Hype, der in USA/Kanada existiert und der auch hier nach Europa herüber schwappt – und nicht nur keinen Erfolg haben wird, sondern eine gefährliche Neben-Diskussion aufmacht. Denn sie werden – wenn überhaupt – irgendwann in den 2030ern marktreif, bis dahin können wir jedoch nicht warten, die Industrieländer müssen ja schon bis 2035 laut IEA bei 100% klimaneutralen Stromsystemen angekommen sein. Und: Mitte der 2030er werden Wind, Solar und Batterien auch nochmal deutlich billiger werden gegenüber heute. Bei 1 ct/kWh für Solarenergie werden SMR niemals konkurrieren können.

0. Zusammenfassung

Warum nicht die Degradation - Annahme
 mehr fair, als bei Renewables

1. Definition: Als *Small Modular Reactors* (**SMR**) bezeichnet die Internationale Atom-Energie-Organisation (IAEO) Kernreaktoren **bis zu 300 Megawatt**¹ Stromerzeugungsleistung, die in Fabriken aus standardisierten Komponenten als kompaktes Reaktormodul in Serie vorgefertigt und dann vor Ort nur montiert und angeschlossen werden. Als *Micro Reactors* gelten Module bis 30 MW Leistung.
2. Nutzen: SMR sollen der sicheren, klimafreundlichen Energieversorgung dienen und
 - auch für kleinere Energieversorger finanzier- und handhabbar sein,
 - neben Strom auch Wärme für private und industrielle Anwendungen (H²) bereitstellen, - und zentral ebenso wie dezentral und ohne Netzanschluss eingesetzt werden können. - Innovative Salzschnmelze-SMR können radioaktiven Abfall als Brennstoff nutzen und so die Endlagerfrage entlasten.

¹ Zum Vergleich: die in Deutschland verbliebenen Kernkraftwerke haben jeweils eine elektrische Netto-Leistung von ca. 1.400 Megawatt. SMR sind ebenfalls regelbar und grundlastfähig:

7/22/15

1. 10/10/15

10/10/15

10/10/15

10/10/15

10/10/15

10/10/15

10/10/15

10/10/15

10/10/15 - 10/10/15

- Typgenehmigungen (statt individueller Genehmigungen wie bei großen Kraftwerken) sollen die Zeit- und Finanzplanung für Investoren (wieder) verlässlich machen.

3. Kosten: Die **serielle Fertigung der Reaktormodule** in großen Stückzahlen soll Kosten des einzelnen Moduls senken („economy of numbers“), um den prinzipiellen Nachteil gegenüber großen Kraftwerken („economies of scale“) auszugleichen.

4. Entwicklungsstand: SMR erfahren seit geraumer Zeit deutlich wachsende internationale Aufmerksamkeit, insbesondere in Nordamerika und nun auch Westeuropa. Entwicklungen werden von **staatlicher** wie von **privater** Investorensseite vorangetrieben, vieles auch unabhängig von der etablierten Energiewirtschaft.

Unterstützer sehen große **Potenziale in der Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Entsorgung, kritische Stimmen äußern Zweifel.**

Erste Demonstrationsanlagen existieren bereits in RUS und CHN; in USA und CAN ist noch in diesem Jahrzehnt mit Indienststellungen zu rechnen. In Europa gibt es u.a. in UK, FRA, NLD, BEL, POL, CZE, ROU, UKR, EST und SWE Interesse an der Technologie mit unterschiedlich ambitionierten Bau- und/oder Entwicklungsplänen. Mit einer breiten **Kommerzialisierung ist nicht vor 2030** zu rechnen. Bemerkenswert sind **CAN** (Regierung hat SMR-Serienfertigung bereits 2018 zum **industriepolitischen Ziel** erklärt) und **USA** (Energie- und Verteidigungsministerium fördern Wettbewerb von innovativen („Advanced“) Reaktorentwicklungen. Staatliche Exportförderung schafft Gegengewicht zu CHN und RUS).

5. DEU-Sicht: In DEU gibt es keine Programme zur Entwicklung von SMR; Entwicklungen auf EU-Ebene verhindert DEU zusammen mit AUT und LUX. Dies befördert bei anderen EU-Staaten nationale Ansätze und sonstige Kooperationen, insbes. mit USA. Einzelne nukleare Sicherheits- und Entsorgungsforschung zu SMR dient eigenständigem DEU-Interesse an höchster Sicherheit in unserer Nachbarschaft.

1. Was sind SMR?

Zu *Small Modular Reactors* (SMR) (Definition siehe oben) gibt es eine Vielzahl von Entwicklungen weltweit; wir gehen von ca. 100 Projekten aus, von denen die meisten aber bisher nur auf dem Papier stehen. **Mehrere Demonstrationsanlagen existieren**

bereits in CHN und RUS; in USA plant NuScale noch in diesem Jahrzehnt die Indienststellung eines (inzwischen genehmigten) Prototyps. **Innovative** SMR-Reaktortypen (oft AMR Advanced Modular Reactors genannt) unterscheidet man von **konventionellen** SMR-Reaktortypen dadurch, dass als Kühlmittel und Moderator anstelle von Wasser etwa Edelgase, Flüssigmetall oder Salzschnmelzen verwandt und der Uran-Brennstoff anders eingesetzt wird. Davon erwartet man eine höhere Sicherheit, höhere Wirtschaftlichkeit und weniger radioaktive Abfälle.

Perspektivisch sollen solche Kraftwerke in mehreren zeitversetzten Schritten über zusätzliche Module erweiterbar und skalierbar sein. Aufgrund vergleichbarer Erzeugungsleistung, werden SMR auch als Ersatzkandidaten für Kohle- und Gaskraftwerke gehandelt.

Microreactors werden perspektivisch für Inselnetze, Bergbau, abgelegene Dörfer und militärische Stützpunkte, sowie besonders mobile Module für temporäre Einsätze in Katastrophen- oder militärischen Einsatzgebieten gedacht. Sie würden im Wesentlichen mit fossilen Brennstoffen betriebene Generatoren ersetzen. Ein 5 MW gasgekühlter Demo-Reaktor soll 2026 in Ontario (CAN) in Dienst gestellt werden.

Kleine Reaktoren sind nicht neu und werden bereits seit Jahrzehnten vor allem in militärischen, aber auch zivilen Anwendungen (U-Boote, Flugzeugträger, Eisbrecher, schiffgestützte Stromerzeuger) genutzt.

2. Nutzen, Nachteile, Fragen

SMR bieten Möglichkeiten zur Dekarbonisierung, Dezentralisierung, Kopplung mit erneuerbaren Energien, auch Lastfolgebetrieb der Stromerzeugung in Kombination mit Wasserstoffherstellung sowie Kraft-Wärme-Kopplung. Aufgrund vergleichbarer Erzeugungsleistung, werden SMR als Ersatzkandidaten für Kohle- und Gaskraftwerke gehandelt. Mikroreaktoren könnten ölbefeuerte Stromerzeuger in entlegenen Reaktoren ersetzen.

Befürworter der Technologie sagen erhebliche Senkungen der Finanzierungslasten und Sicherheits- und Kostenvorteile gegenüber konventionellen Kernkraftwerken voraus. Die **Finanzierung** des Baus großer Kernkraftwerke und die damit einhergehenden Planungsrisiken stellen heute in der westlichen Welt eine der größten Hürden beim Bau eines neuen Kernkraftwerks dar. Beispiele in den USA, FRA und FIN haben gezeigt, dass nach mehreren Jahrzehnten ohne Neubauerfahrung die ohnehin

schon hohen Investitionskosten durch Verzögerungen, mangelnde Erfahrung und schlechtes Management in die Höhe schnellen können. Die **finanziellen Risiken könnten mit dem standardisierten Bau von Reaktor-Modulen mit reduzierter Komplexität bei höherer Sicherheit deutlich reduziert werden.**

Typengenehmigungen für das Modul und Bau- und Betriebsgenehmigungen für den jeweiligen Standort würden die bisher schwer kalkulierbaren Genehmigungsrisiken bereits im Vorfeld der Investition abklären.

Kritiker dagegen bezweifeln, dass die hohen Erwartungen erfüllt werden können und weisen darauf hin, dass in den 1950er und 60er Jahren kleine Reaktoren in den USA mit Sicherheitsproblemen zu kämpfen hatten und sehr teuer waren, dass durch den Einsatz der meisten SMR-Typen (außer Salzschnmelzen) die Menge des radioaktiven Abfalls pro MWh erzeugter Leistung nicht stärker als bei großen KKW gesenkt werden kann und dass die sicherheitstechnischen Vorteile der SMR gegenüber großen KKW durch die größere Anzahl von Reaktoren, die für die Erzeugung der gleichen Strommenge notwendig ist, kompensiert werden könnten.

- Sicherheit

Die konventionellen SMR Konzepte basieren tendenziell auf einem integralen Design. Hierbei sind die Hauptkomponenten (wie die Dampferzeuger/Zwischenwärmeübertrager sowie Hauptkühlmittelpumpen, sofern die Anlagen im Zwangsdurchlauf gekühlt werden) innerhalb des Reaktordruckbehälters angeordnet. Die meisten SMR erfüllen höchste Sicherheitsstandards, die Sicherheitskonzepte basieren weitgehend auf passiven Sicherheitssystemen. Folglich kann die Sicherheit dieser Anlagen ohne Energiezufuhr oder Maßnahmen der Bedienungsmannschaft langfristig gewährleistet werden. ?

Bei den innovativen SMR-Konzepten fallen wegen des Ersatzes von Wasser durch andere Kühlmittel/Moderatoren die wasserbezogenen Herausforderungen für die Sicherheit weg; gleichzeitig entstehen neue Fragestellungen, die abschließend zu klären sind. Eine Zielsetzung ist, externe Notfallvorsorge und Katastrophenschutz tendenziell überflüssig zu machen.

- Nichtverbreitung

Parallel zur Entwicklung von SMR wird in den zuständigen Gremien von IAEO und Mitgliedstaaten das Thema „Safeguards by Design“ für diese Anlagen behandelt. Dabei führen Kritiker an, dass Inspektionen einer Vielzahl solcher Anlagen in abgelegenen

Gebieten von der IAEA nur schwer durchgeführt werden könnten. Ziel der Entwickler der Anlagen ist es aber, bereits von der Bauweise her eine feste Verbauung des Brennstoffs zu erreichen; dieser soll wesentlich seltener ausgetauscht werden (aktuelle KKW führen Brennelementwechsel jährlich durch). Damit wären auch Kontrollen durch IAEA- Inspektoren wesentlich seltener erforderlich. Denkbar ist auch, dass Inspektionen nur noch in den Fabriken erforderlich werden, wenn nur dort die Module geöffnet werden. Durch weitere Vorkehrungen im Design in Abstimmung mit der IAEA soll deren Verifikation erleichtert werden.

- Entsorgung radioaktiver Abfälle

Bei innovativen SMR wird für den Brennstoff tendenziell mit einem höheren Anreicherungsgrad des Uranisotops ^{235}U in Höhe von bis zu 19% gerechnet, sodass neben einer höheren Energieausbeute eine Verringerung des Volumens radioaktiven Abfalls erreicht würde.

Darüberhinausgehend könnten Salzschnmelze-SMR einen Lösungsbeitrag zur nuklearen Entsorgung leisten. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass als Kühlmittel eine Salzschnmelze verwendet wird (z.B. flüssiges Natriumfluorid oder -chlorid), in der auch der Brennstoff gelöst ist. Salzschnmelzereaktoren gelten wie die meisten SMR-Konzepte aufgrund ihrer passiven Sicherheitssysteme als inhärent sicher: Im Falle eines Störfalls erlischt die Kettenreaktion von alleine und eine große Freisetzung von Radioaktivität ist nicht möglich.

Sie können so konzipiert werden, dass **abgebrannte Brennelemente** aus konventionellen Kernkraftwerken **als Brennstoff** eingesetzt werden, um den ansonsten als Abfall bezeichneten Urangehalt als Energiequelle zu nutzen und andere langlebige radioaktive Isotope unter Wärmeentwicklung in kurzlebige zu wandeln.

Die politische und unternehmerische Unterstützung für solche entsorgungsoptimierte Ansätze scheint bisher aber noch auf einzelne Initiativen wie z.B. Bill Gates' TerraPower, Terrestrial Energy, das sog. Dual-Fluid-Projekt (aus DEU nach CAN umgezogen) oder Forschungsansätze in UK begrenzt zu sein.

3. Kosten

Um Skaleneffekte aus der Aufteilung der Fixkosten des Kraftwerks auf eine möglichst hohe Menge veräußerten Stroms (*economies of scale*) zu nutzen, wurden Kernkraftwerke bisher zunehmend größer (mehr Leistung) gebaut.

SMR können dagegen perspektivisch Kostenvorteile über hohe Stückzahlen bei der Serienfertigung von SMR erreichen, indem die Fixkosten des Baus/der Fabrik auf viele produzierte Einheiten „verteilt“ werden (*economies of numbers*).

Ein weiterer Kostenvorteil soll über Standardisierung, planbare und deutlich geringere Bauzeiten und vereinfachte Genehmigungsverfahren erreicht werden. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass bei einer SMR-Serienfertigung in gleichbleibender Umgebung (Fabrik) Lerneffekte und Kostendegressionen wesentlich besser zu verwirklichen sein werden, als dies bei der Errichtung von großen KKW auf individuell verschiedenen Baustellen jeweils der Fall wäre.

Eine aktuelle Publikation berechnet die Stromgestehungskosten der Demoanlagen in CHN und RUS. Im Ergebnis werden im Grundlastbetrieb in Abhängigkeit von den Annahmen zum Uranpreis (zwischen 35 und 235 Euro pro Tonne Uran) und dem Kalkulationszins (zwischen sieben und 15 Prozent), **LCOE² (Levelized Cost of Electricity) zwischen 43 und 67 Euro pro Megawattstunde** für den chinesischen HTR-PM berechnet und **LCOE zwischen 45 und 75 US-Dollar pro Megawattstunde** für den russischen KLT-40S berechnet. Bei einem Lastfolgebetrieb, in dem die zeitweise fehlende Nachfrage nach Elektrizität durch Wasserstoffproduktion und -vertrieb ausgeglichen wird, liegen die LCOE ungefähr zehn Prozent höher.

4. Internationaler Entwicklungsstand

Verschiedene Staaten, darunter insbesondere RUS, USA, CAN, CHN, FRA, KOR, ARG, und UK verfolgen, unterschiedlich ambitioniert, Bau-, Forschungs- und Entwicklungsprogramme (weitere Staaten in Europa u.a. NLD, BEL, POL, CZE, ROU, UKR, EST und SWE). Bei den erzielten Fortschritten und den anvisierten Zeitskalen zeigen sich deutliche Unterschiede. FRA StP Macron kündigte Ende letzten Jahres an, dass bis 2030 eine Anlage bereits in Betrieb sein soll (gefördert mit 1 Mrd. Euro). In CHN und RUS sind erste Demoanlagen bereits in Betrieb. BEL hat angekündigt, den

² LCOE ist ein Maß für die (Voll-)Kosten pro Einheit erzeugter Elektrizität über die Lebensdauer einer Erzeugungstechnologie und berücksichtigt alle Fix- und variablen Kosten. Es hängt wesentlich vom veranschlagten Kalkulationszins und Volllaststunden ab. Achtung: Die Eigenschaft der Dargebots(un)abhängigkeit schlägt sich nicht in den Zahlen nieder. Der Vergleich mit Wind und PV ist demnach nur eingeschränkt möglich. Zum Vergleich die Zahlen von Fraunhofer ISE (2018) für Deutschland: Großflächenphotovoltaik 39-63 EUR/MWh, Wind-Onshore 40-80 EUR/MWh, Braunkohle 45-80 EUR/MWh, Steinkohle 62-98 EUR/MWh, Gas- und Dampfturbine 78-100 EUR/MWh, Gasturbine 110 bis 220 EUR/MWh. Achtung: Aktuell sehr hohe Preise fossiler Brennstoffe sind hier nicht berücksichtigt.

Bau von SMR in Betracht zu ziehen (ggf. in Zusammenarbeit mit NLD und FRA; evtl. auch FuE). Auch in EST, ROU und POL gibt es erste Überlegungen SMR zu bauen.

Hervorzuheben sind u.a. die Entwicklungen in CAN; ähnliche Ambitionen sind im Vereinigten Königreich zu beobachten (Rolls-Royce). Die CAN Regierung hat den Aufbau einer einheimischen SMR-Fertigung bereits 2018 zum industriepolitischen Ziel erklärt, um damit zukünftig nationale und Exportmärkte zu bedienen und im Wettlauf um Technologieführerschaft zu bestehen. Aus dortiger Sicht leistet Kernenergie einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung. Im März 2022 haben vier kanadische Provinzen Planungen für den Bau konventioneller SMR mit 300, 100 und 5MW Leistung bis zum Jahr 2029, sowie für einen innovativen 300MW-Salzschnmelzereaktor zur Abfallverwertung Anfang der 2030er Jahre vorgelegt.

In den **USA** gibt es **neben etablierten Akteuren³ weiterhin eine Reihe von neuen, privat finanzierten Start-Ups**, die mit innovativen Konzepten modulare Reaktoren bauen wollen. Laut US-Genehmigungsbehörde (NRC) befinden sich derzeit sechs Unternehmen mit ihren Reaktorkonzepten in der Genehmigungsphase. Dazu gehören u.a. die Unternehmen Terrestrial Energy (USA/CAN) und Oklo, die **von den amerikanischen und kanadischen Regierungen politische Unterstützung auf höchster (Minister-) Ebene** erfahren.

Terrestrial Energy setzt auf ein innovatives SMR-Konzept mit einer Nennleistung von 195 Megawatt elektrisch, basierend auf dem Prinzip des sogenannten Salzschnmelzereaktors⁴. Der CEO des Unternehmens geht davon aus, dass die erste Anlage Ende der 2020er Jahre in Betrieb genommen werden kann.

Oklo Inc. dagegen ist ein in Kalifornien basiertes Unternehmen, das sich zum Ziel gesetzt hat, auf innovativen Konzepten basierende *Microreactors* zu bauen.

Das **amerikanische Start-Up NuScale Power**, das von der amerikanischen Regierung bei der Zertifizierung gefördert wird, plant den Bau eines ersten auf konventioneller Leichtwasser-Technologie basierenden Kraftwerks. Aktuell rechnet das Unternehmen mit einer Inbetriebnahme in 2030. Das **Reaktordesign wurde 2020 als erstes SMR-Design bei der zuständigen Behörde (Nuclear Regulatory Commission) genehmigt (Standard Design Approval)**. In Europa hat das Unternehmen Absichtserklärungen mit **ROU, CZE, UKR, UK und POL** unterschrieben. Das POL Unternehmen KGHM Polska

³ GE Hitachi Nuclear Energy mit einem konventionellen 300 MW-SMR namens BWRX-300.

⁴ Innovativer Reaktortyp, der passive Sicherheitssysteme aufweist und abgebrannte Brennelemente aus konventionellen Kernkraftwerken wiederverwenden kann. Neben Terrestrial Energy, gibt es auch andere private Initiativen: Bill Gates TerraPower, das sog. Dual-Fluid-Projekt (aus DEU nach CAN umgezogen) oder Forschungsansätze in UK.

Miedz SA (Bergbau, Marktwert: ca. 7,5 Mrd. Euro) bspw. erwägt den Bau eines NuScale SMR als Ersatz eines Kohlekraftwerks.

5. Wertung/DEU-Sicht

Die Entwicklung von SMR hat mittlerweile neben der Verlängerung bestehender und dem Neubau großer Kernkraftwerke weltweit erhebliche Bedeutung gewonnen. Die stark gestiegene Dynamik in Umfang und Intensität dürfte einerseits auf den allgemein steigenden Druck für Klimaschutz und dezentrale Strom- und Wärmelösungen zurückzuführen sein, der gerade auch private Investoren und Entwickler jenseits der etablierten Energiewirtschaft angezogen hat. Andererseits hat die in letzten Jahren von der US-Regierung initiierte nukleare Innovations- und Exportförderung für einen bisher nicht gekannten Schub gesorgt, der eine ernsthafte Konkurrenz zu RUS und CHN erwarten lässt. Kritik speist sich aus grundsätzlicher Ablehnung der Kernenergie oder Vorbehalten gegen die konkrete Erreichbarkeit der Ziele.

Aktuell gibt es noch erheblichen Forschungs-, Entwicklungs- und Genehmigungsbedarf für SMR. Einige Anlagen sind schon für dieses Jahrzehnt geplant, mit einer breiteren Kommerzialisierung ist aber frühestens ab 2030 zu rechnen.

Nichtdestotrotz erfahren SMR derzeit international eine beachtliche politische Unterstützung auf höchster Ebene. In Folge der aktuellen Krisen (Gaspreise, Versorgungssicherheit und Ukraine) hat diese Unterstützung noch einmal zugenommen.

Mit dem Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung hat sich DEU gegen die Kernkraft und damit auch gegen die Nutzung von SMR entschieden. In DEU gibt es daher keine Programme zur Entwicklung von SMR; Entwicklungen auf EU-Ebene verhindert DEU zusammen mit AUT und LUX. Dies befördert bei anderen EU-Staaten nationale Ansätze und sonstige Kooperationen, insbes. mit USA.

Die Bedeutung für DEU ergibt sich besonders aus der Tatsache, dass in unserer unmittelbaren Nachbarschaft ernsthafte Vorbereitungen laufen, um SMR bauen zu können (u.a. FRA, NLD, CZE, POL, EST, BEL). Es ist daher wichtig, sowohl die sicherheitstechnischen Aspekte im Blick zu behalten, als auch die mit SMR

verbundenen energiewirtschaftlichen Entwicklungen. Nationale nukleare Sicherheits- und Entsorgungsforschung dient DEU-Interesse an eigenständiger Kompetenz.