

**Auswertung von
Informationen zu
kerntechnischen
Entwicklungen
im Ausland**

Auswertung von Informationen zu kerntechnischen Entwicklungen im Ausland

Abschlussbericht

Walter Klein-Heßling

März 2022

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4719I01430 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

kerntechnische Entwicklungen, Small Modular Reactors, Strategien

Kurzfassung

Weltweit wird die Kerntechnik weiterhin zur Stromerzeugung eingesetzt. Im geografischen Europa sind zurzeit 170 Reaktorblöcke in Betrieb, davon 32 Blöcke bereits über 40 Jahre. In den meisten EU-Ländern ist der Neubau von Kernkraftwerken weiterhin gesetzlich zulässig. Neubauprojekte werden zurzeit u. a. in Finnland, Großbritannien, der Slowakei, Ungarn und Frankreich realisiert. Neben Ländern mit Kernkraftwerken verfolgt auch Polen ernsthafte Pläne für den Einstieg in die Kernenergie.

In den letzten Jahren sind auch verstärkt kleine modulare Reaktoren (Small Modular Reactors – SMR) in den Fokus gerückt. Dies sind kleine Reaktoren mit einer Leistung von bis zu 300 MW_e, die u. U. neben der Stromerzeugung auch für andere Zwecke (z. B. Prozesswärmeerzeugung) genutzt werden können. Allerdings ergeben sich bei der Planung und Umsetzung von SMR-Projekten neue Herausforderungen.

Im Rahmen des Vorhabens 4719I01430 wurden politische und strategische Entwicklungen im Zusammenhang mit kerntechnischen Anlagen im Ausland systematisch verfolgt, analysiert und aufbereitet. In diesem Bericht wird ein Überblick zu den SMR-Entwicklungen sowie zu Förderprogrammen in China, USA, Russland, Großbritannien, Kanada, Frankreich gegeben. Weiterhin werden strategische Entwicklungen für Polen, Finnland, Ukraine kurz dargestellt.

SMR-Konzepte unterscheiden sich von leistungsstarken Reaktoren. Da die regulatorischen Anforderungen an die bestehenden und neuen KKW im Wesentlichen an leistungsstarken, ortsfesten Leichtwasserreaktoren ausgerichtet sind, stellt sich die Frage, inwieweit die bestehenden Regelwerke und Richtlinien auf SMR-Konzepte anwendbar sind. Ein Beispiel sind Anforderungen in Bezug auf die Notstromversorgung. Häufig müssen für eine Genehmigung von SMR-Konzepten Regelwerke angepasst oder entsprechend ausgelegt werden. Seitens der Industrie wird eine internationale Harmonisierung der Regelwerke angestrebt, um eine Standardisierung der Konzepte und somit eine höhere Stückzahl zu ermöglichen. Dies erfordert jedoch eine ausreichende Evidenzbasis, einschließlich Betriebserfahrungen, um Änderungen des Regelwerks zu rechtfertigen.

Die durchgeführten Arbeiten tragen zur Konsolidierung und Vertiefung des Wissens der GRS zu den kerntechnischen Aktivitäten im Ausland bei. Durch die systematische und

kontinuierliche Verfolgung der Entwicklungen wurde der Kenntnisstand der GRS fortgeschrieben und die Aussagefähigkeit der GRS gestärkt.

Abstract

Nuclear technology continues to be used to generate electricity around the world. In geographic Europe, 170 reactor blocks are currently in operation, of which 32 blocks are more than 40 years old. In most EU countries, the construction of new nuclear power plants is still permitted by law. New construction projects are currently being realised in Finland, Great Britain, Slovakia, Hungary and France, among others. In addition to countries with nuclear power plants, Poland is also pursuing serious plans to enter nuclear energy.

In recent years, the focus has also increasingly been on small modular reactors (SMRs). These are small reactors with a capacity of up to 300 MW_e that can be used for other purposes besides electricity generation (e. g. process heat generation). However, new challenges arise in the planning and implementation of SMR projects.

As part of project 4719101430, political and strategic developments related to nuclear facilities abroad were systematically tracked, analysed and processed. This report provides an overview of SMR developments and funding programmes in China, USA, Russia, Great Britain, Canada and France. Furthermore, strategic developments for Poland, Finland and Ukraine are briefly presented.

SMR concepts differ from high-power reactors. Since the regulatory requirements for existing and new NPPs are essentially geared to powerful, stationary light-water reactors, the question arises to what extent the existing regulations and guidelines are applicable to SMR concepts. An example are requirements related to emergency power supply. Often, regulations have to be adapted or interpreted accordingly for the approval of SMR concepts. The industry is striving for an international harmonisation of regulations to enable a standardisation of concepts and thus a higher number of units. However, this requires a sufficient evidence base, including operational experience, to justify changes to the regulations.

The work performed contributes to consolidating and deepening the knowledge of GRS on nuclear activities abroad. By systematically and continuously following the developments, the state of knowledge of GRS was updated and the informative capability of GRS was strengthened.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Informationsgrundlagen	2
3	Übersicht zu SMR-Entwicklungen	3
3.1	Gesamtschau	3
3.2	SMR-Entwicklungen in China.....	4
3.3	SMR-Entwicklungen in USA.....	8
3.4	SMR-Entwicklungen in Russland	13
3.5	SMR-Entwicklungen in Großbritannien	16
3.6	SMR-Entwicklungen in Kanada.....	18
3.7	SMR-Entwicklungen in Frankreich	20
3.8	SMR-Planungen in Polen.....	23
3.9	SMR-Planungen in Finnland	24
3.10	SMR-Planungen in der Ukraine	25
4	Auswertung von übergeordneten Berichten zu SMR	27
4.1	IAEO-Bericht „Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors”	27
4.2	OECD-Bericht „Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities”	27
5	Zusammenfassung	29
	Literaturverzeichnis	31
	Abbildungsverzeichnis	36
	Tabellenverzeichnis	36
	Abkürzungsverzeichnis	37

1 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens 4719I01430 wurden politische und strategische Entwicklungen im Zusammenhang mit kerntechnischen Anlagen im Ausland systematisch verfolgt, analysiert und aufbereitet. Länder von besonderem Interesse waren dabei die deutschen Nachbarstaaten. Dabei standen insbesondere Themen wie der strategischen Ausrichtung in Bezug auf Kernenergienutzung, Laufzeitverlängerungen bei bestehenden Anlagen, Neubauprojekte und die Entwicklung neuartiger Reaktortypen im Fokus.

Weltweit wird die Kerntechnik weiterhin zur Stromerzeugung eingesetzt. Im geografischen Europa sind zurzeit 170 Reaktorblöcke in Betrieb, davon 32 Blöcke bereits über 40 Jahre. In den meisten EU-Ländern ist der Neubau von Kernkraftwerken weiterhin gesetzlich zulässig. Neubauprojekte werden zurzeit u. a. in Finnland, Großbritannien, Slowakei, Ungarn und Frankreich realisiert. Neben Ländern mit Kernkraftwerken verfolgt auch Polen ernsthafte Pläne für den Einstieg in die Kernenergie. Die neueren, in Bau befindlichen und geplanten Anlagen unterscheiden sich hinsichtlich des Reaktorkonzepts wesentlich von denen der in Betrieb befindlichen älteren Anlagen. Die Unterschiede lassen sich insbesondere auf verschärfte Sicherheitsanforderungen und den Einsatz innovativer Technologien zurückführen.

In den letzten Jahren sind auch verstärkt kleine modulare Reaktoren sogenannte „Small Modular Reactors“ (SMR) in den Fokus gerückt. Dies sind kleine Reaktoren mit einer Leistung von bis zu 300 MW_e, die neben der Stromerzeugung auch für andere Zwecke (z. B. Prozesswärmeerzeugung) genutzt werden können. Bei der Planung und Umsetzung von SMR-Projekten ergeben sich neue Herausforderungen, welche in diesem Bericht diskutiert werden.

In diesem Bericht sind die Ergebnisse des Vorhabens 4719I01430 mit dem Fokus auf SMR zusammenfassend dargestellt. Hinsichtlich der Aktualität der Arbeitsergebnisse ist zu beachten, dass einzelne Arbeitsaufgaben bereits deutlich vor Ende der Laufzeit des Vorhabens abgeschlossen wurden.

2 Informationsgrundlagen

Die kerntechnischen Entwicklungen im Ausland wurden systematisch verfolgt. Wesentliche Informationen wurden aus verfügbaren öffentlichen Publikationen und Dokumenten sowie der Teilnahme an den folgenden Konferenzen und Webinaren zu SMR spezifischen Themen gewonnen:

- „Small Modular Reactors 2020“ (Prag, Februar 2020)
- „G4SR-2 Virtual Summit“ (virtuell, November 2020)
- „Small & Advanced Reactors“ (virtuell, Februar 2021)
- „EcoSMR Open Business Day“ (virtuell, März 2021)
- „High-temperature reactors and industrial heat application“, OECD-NEA Online-Workshop (virtuell, Oktober 2021)
- „G4SR-3 Virtual Summit“ (virtuell, November 2021)
- „Applicability of IAEA Safety Standards to the Design of Novel Advanced Reactors including SMR“ (IAEO-Webinar, Dezember 2021).

3 Übersicht zu SMR-Entwicklungen

3.1 Gesamtschau

Weltweit ist das Interesse an Small Modular Reactors gestiegen. Insgesamt werden zurzeit ca. 70 SMR-Konzepte entwickelt, wobei die meisten evolutionäre Varianten von Leichtwasserreaktoren sind. Die anderen Konzepte verwenden Kühlmittel wie Natrium, Blei, Helium oder Salzschnmelzen und gehören zu den sogenannten Generation-IV (Gen-IV) SMR. Die Abb. 3.1 zeigt das breite Spektrum der elektrischen Leistung als Funktion der Kühlmittelauslasstemperatur für ausgewählte Reaktorkonzepte.

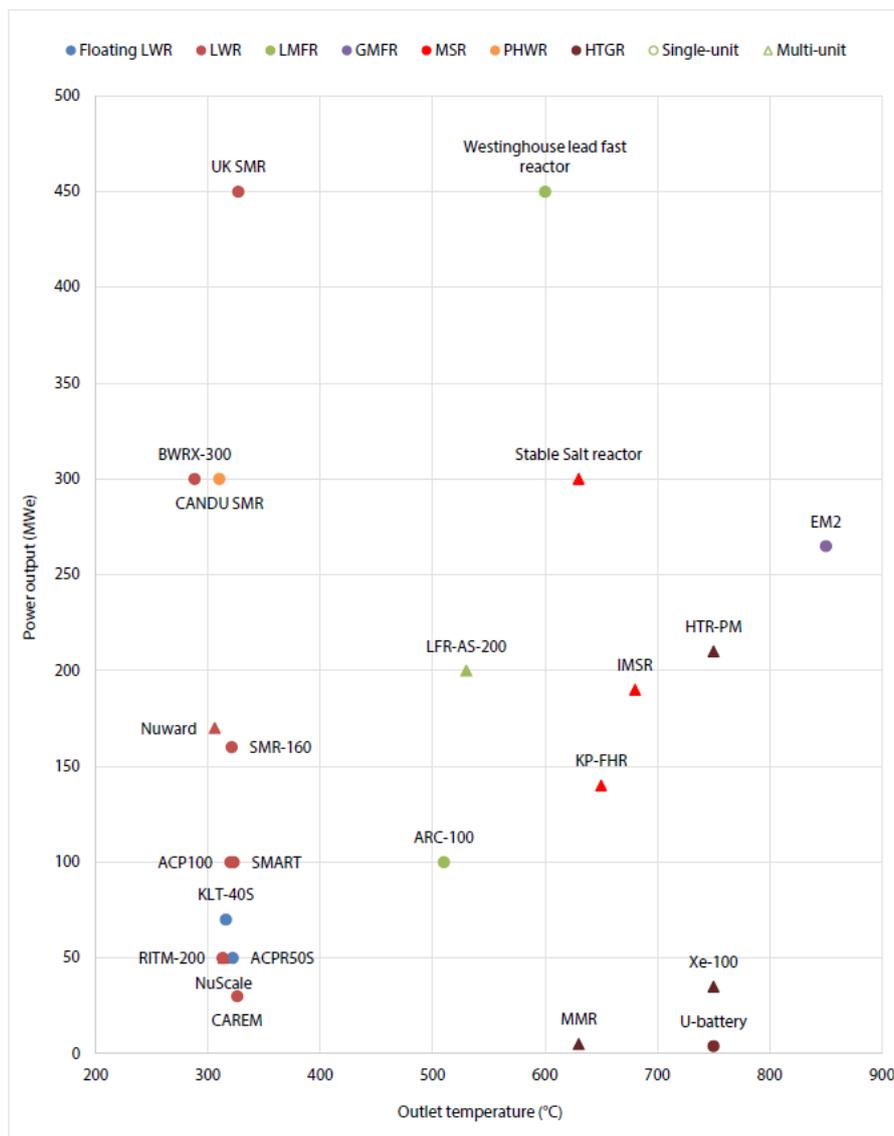


Abb. 3.1 Spektrum der elektrischen Leistung als Funktion der Kühlmittelauslasstemperatur für ausgewählte SMR/MMR-Reaktorkonzepte /OEC 21/

SMR- und MMR-Konzepte unterscheiden sich häufig von leistungsstarken Reaktoren durch

- Verwendung eines integralen, kompakten („modularen“) Designs,
- geringeres Kerninventar und geringere thermische Leistung,
- vermehrte Verwendung von passiven Systemen,
- einen modularen Aufbau mit einer möglichen Herstellung ganzer Komponenten in einer Fabrik,
- modulare Anlagenkonzepte (multi-block Anlagen) mit gemeinsamen Systemen (z. B. Warte, Turbine),
- transportable bzw. schwimmende SMR-Konzepte und
- Gen-IV-Konzepte.

Obwohl durch das Design u. U. einzelne Versagensmechanismen und Störfälle eine niedrigere Wahrscheinlichkeit haben oder ausgeschlossen sind, sind insbesondere bei sogenannten fortschrittlichen Reaktorkonzepten (Gen-IV SMR) noch technische Herausforderungen und Fragestellungen zu lösen.

Die regulatorischen Anforderungen an die bestehenden und neuen KKW sind im Wesentlichen an leistungsstarken, ortsfesten Leichtwasserreaktoren ausgerichtet. So stellt sich die Frage, inwieweit die bestehenden Regelwerke und Richtlinien auf SMR-Konzepte anwendbar sind. Zusätzliche Fragestellungen treten in Bezug auf die Herstellung ganzer Komponenten bzw. Reaktormodule in Fabriken, der Inbetriebnahme und der Wartung auf.

3.2 SMR-Entwicklungen in China

In China befinden sich zurzeit 54 Kernkraftwerksblöcke in Betrieb und 14 Blöcke in Bau.¹ Die Langzeitstrategie der Regierung im Energy Development Strategy Action Plan 2014 – 2020 strebte eine Kapazität von 58 GW_e bis 2020 an. Laut IAEO PRIS (Stand

¹ [IAEA PRIS](#), Stand 03.03.2022

März 2022) steht in China aktuell eine Kapazität von 51 GW_e zur Verfügung und 14,8 GW_e sind in Bau.

Bei den in Bau und Betrieb befindlichen Anlagen können drei Konzepte zu den SMR gezählt werden. Der CEFR (China Experimental Fast Reactor) wurde 2010 zum ersten Mal kritisch und kann bis zu 20 MW_e leisten. Der gasgekühlte Hochtemperatur-Kugelhafen-Reaktor HTGR-PM ist seit Dezember 2021 in Betrieb. Am 13. Juli 2021 begann mit dem Gießen des ersten Betons offiziell der Bau einer Demonstrationseinheit des ACP100 SMR am Standort Changjiang auf der Insel Hainan. Der auch als Linglong One bezeichnete Druckwasserreaktor mit einer Leistung von 125 MW_e soll sowohl Strom produzieren als auch zur Fern- und Prozesswärmeversorgung und zur Entsalzung von Meerwasser verwendet werden können.

Der Einsatz von bis zu 20 schwimmenden Kernkraftwerken wird in China insbesondere anvisiert, um Inseln im südchinesischen Meer mit Strom und Trinkwasser mittels Entsalzung zu versorgen. Auf den Inseln sind militärische Kräfte Chinas stationiert. Auch die Erschließung von Öl- und Gasvorkommen soll durch schwimmende KKW unterstützt werden.

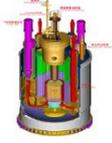
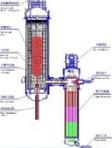
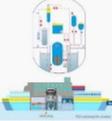
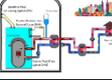
Alle chinesischen SMR-Konzepte mit dem jeweiligen Entwicklungsstand sind in Tab. 3.1 dargestellt.

Derzeit beschränkt sich Chinas Export noch auf Reaktoren großer Leistung. Unter anderem gründeten die beiden Unternehmen CGN (China General Nuclear Power Group) und CNNC (China National Nuclear Corporation) im Dezember 2015 ein Joint Venture – Hualong International Nuclear Power Technology Co –, um das Hualong One Design international zu vermarkten. So ist der erste Hualong One (HPR1000) im Mai 2021 in Pakistan in Betrieb gegangen. Konkrete Pläne für den Export von SMR sind nicht bekannt. Laut CNNC wurden jedoch bereits Gespräche mit Pakistan, Iran, Großbritannien, Saudi-Arabien, Indonesien, der Mongolei, Brasilien, Ägypten und Kanada zum Bau des ACP 100 geführt /CHI 17/.

Bezüglich der Regelwerke orientiert sich China an den internationalen Standards, wie z. B. IAEO SSR-2/1. So wurde der Code on the Safety of Nuclear Power Plant Design (HAF 102) im Jahr 2016 überarbeitet und soll nun einer Übersetzung des IAEO SSR-2/1 Dokuments entsprechen. Das grundsätzliche chinesische Genehmigungsverfahren

scheint keine Hürden für die Lizenzierung von SMR darzustellen. In den Unterlagen zur nuklearen Sicherheitskonvention werden SMR nicht thematisiert.

Tab. 3.1 Übersicht zu chinesischen SMR-Reaktorkonzepten

Name		Leistung	Reaktortyp	Entwickler	Status
CEFR		20 MWe	Schneller Brüter	INET, Tsinghua University	in Betrieb
HTR-PM		200 MWe	HTR	INET, Tsinghua University	in Betrieb
ACP 100		125	DWR	CNNC	in Bau
CAP 50/150/200		40/150/200 MWe	DWR	SNERDI/SNPTC	Konzeptionelles Design
ACPR 100		140 MWe	DWR	CGN	n. b.
ACPR 50S		60	DWR	CGN	Vorläufiges Design
DHR400		Fernwärme	Schwimm-badreaktor	CNNC	Basisdesign
NHR200-II		Fernwärme	Schwimm-badreaktor	CGN	n. b.
Advanced Happy200		Fernwärme	Schwimm-badreaktor	SPIC	n. b.
HHP25		n. b.	n. b.	China Shipbuilding Industry Corporation (CSIC)	n. b.

Während des TWG-SMR Meetings im Jahr 2018 wurde berichtet, dass NNSA (National Nuclear Safety Administration) ein Dokument mit der Position der Behörde zu den „Regulatory Review Principles of Small PWR’s Safety“ erstellt hat, da die aktuellen Sicherheitsanforderungen für die traditionellen LWR präskriptiv sind und nicht anwendbar auf SMR sein könnten. Das Dokument stellt einen Leitfaden für die Bewertung der wesentlichen Anforderungen speziell bei SMR dar /NNS 18/. Im Einzelnen sind dies:

1. *Safety Goal*: Das Sicherheitsziel soll das Gleiche wie bei leistungsstarken LWR sein. Größere Freisetzungen sollen praktisch ausgeschlossen sein. Es soll das gleiche oder ein höheres Level an Schutz für die Bevölkerung vorgehalten werden, ohne dass dabei Maßnahmen außerhalb der Anlage genutzt werden müssen wie bei leistungsstarken Anlagen.
2. *Gestaffeltes Sicherheitssystem*: Fünf Sicherheitslevel sind die grundsätzliche Anforderung, jedoch kann davon je nach Sicherheitsziel abgewichen werden.
3. *Design Basis*: Bei den auslegungsüberschreitenden Unfällen liegt der Fokus auf den relevanten Unfallabläufen. Diese sollen mit probabilistischer, deterministischer und „Engineering Judgement“ bestimmt werden.
4. *External Event Protection*: Schutz gegen EVA und zivilisatorische Gefahren
5. *Accident Source Term*: Konservative Wahl von DBA (Design Basis Accident) und relevanten BDBA (Beyond Design Basis Accident)
6. *Emergency planning*: Off-site Maßnahmen sollen limitiert oder ganz vermieden werden
7. *Application of PSA*: Der PSA soll mehr Bedeutung zugemessen werden
8. *Verifikation und Validierung von Software zur Sicherheitsanalyse*: Bei den Demonstrationsprojekten können alternative Ansätze akzeptiert werden.

In Bezug auf die Lizenzierung des HTR-PM befanden sowohl der Designer als auch die Behörde NNSA, dass die vorhandenen Sicherheitsanforderungen primär für Leichtwasserreaktoren entwickelt wurden und daher Änderungen für den HTR-PM vorgenommen werden mussten /MOE 17/. Jedoch wurde festgestellt, dass die meisten Anforderungen grundsätzlich auf den HTR-PM übertragbar sind. Dies gilt zumindest für die Ebenen der sogenannten Ministerial Rules und Richtlinien. Für die detaillierten Anforderungen wurde ein Design Criteria Document mit mehr als 40 Kapiteln von NNSA entwickelt. Darin

enthalten sind u. a. Anforderungen an Sicherheitsziel, gestaffeltes Sicherheitskonzept, generelle Auslegung des Konzepts, Containment, Quellterm, Notfallplanung, PSA Anwendung und sicherheitsrelevante Software.

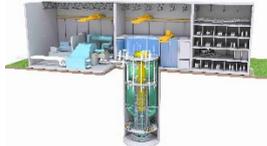
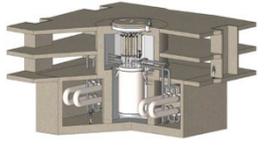
3.3 SMR-Entwicklungen in USA

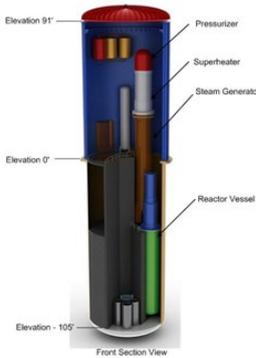
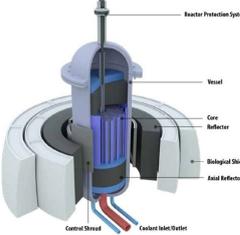
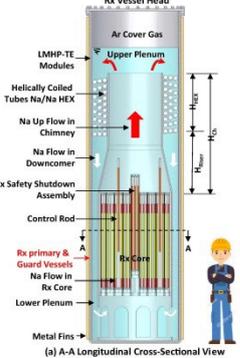
Aktuell werden Kernkraftwerke in den USA zur Grundlastversorgung eingesetzt. Die Planung für die zukünftige Entwicklung der Infrastruktur der Kernenergie sieht vor, diese leistungsstarken Leichtwasserreaktoren (LWR) weiter zu betreiben. Ergänzt werden soll das System jedoch durch SMR und Mikroreaktoren sowie nicht-leichtwassergekühlte Reaktoren. Neben der klassischen Verwendung zur Stromerzeugung (in Form flexibler, an den Bedarf angepasster Produktion) soll die erzeugte Wärme der Reaktoren auch als Prozesswärme für chemische und andere industrielle Prozesse sowie zur Wasserstoff- und Trinkwasserproduktion verwendet werden. Zusätzlich sind die Nutzung von Windkraft- und Solaranlagen sowie die Nutzung fossiler Brennstoffe für die Stromerzeugung vorgesehen /DOE 19/. Neben dem Einsatz im Inland ist auch die weltweite Vermarktung der SMR-Konzepte geplant.

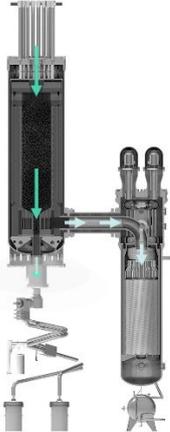
Bislang ist in den USA noch kein SMR in Betrieb genommen oder gebaut worden. Allerdings werden sowohl an verschiedenen Forschungseinrichtungen als auch durch private Unternehmen verschiedene Konzepte entwickelt (siehe Tab. 3.2). Teilweise gibt es bereits konkrete Pläne zum Bau von ersten Einheiten zu Demonstrationszwecken. Das NuScale Design hat im September 2020 eine Typgenehmigung (Design Certification) erhalten. Für den BWRX-300 von GE-Hitachi wurde die Typgenehmigung ebenfalls beantragt. Der Antrag einer kombinierten Bau- und Betriebsgenehmigung (Combined License, COL) für das Aurora Powerhouse Konzept der Firma Oklo wurde durch die U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) im März 2021 zur Überprüfung angenommen. Im Januar 2022 gab die NRC jedoch bekannt, dass sie die Überprüfung nicht fortsetzt und den Antrag ablehnt. Als Grund dafür gab sie an, dass Oklo mehrmals keine stichhaltigen Informationen als Antwort auf Anforderungen der NRC für zusätzliche Informationen eingereicht habe. Solche Anforderungen habe es zum schwersten denkbaren Unfall, zur Klassifizierung sicherheitsrelevanter technischer Einrichtungen und zu weiteren Themen gegeben /NRC 22/. Für den SMR-160 und den Xe-100 laufen Vorbereitungen für ein Genehmigungsverfahren in Zusammenarbeit mit der NRC. Die Tennessee Valley Authority (TVA) verfügt über eine Standortgenehmigung (Early Site Permit) zum Bau von zwei oder mehr SMR mit einer maximalen thermischen Nennleistung für einen einzelnen

Reaktorkern von 800 MW_{th} und mit insgesamt maximal 800 MW_e am Clinch River in Oak Ridge (Tennessee). Im Februar 2022 gab die TVA bekannt, dass sie für den Standort das Konzept des BWRX-300 von GE Hitachi bevorzuge, jedoch auch mit anderen Anbietern von SMR in Kontakt bleibe /WNN 22/.

Tab. 3.2 Auswahl von SMR-Konzepten der USA

Name	Abbildung	Leistung [MW _{th} /MW _e]	Reaktortyp	Entwickler	Status
Aurora Powerhouse		4/1,5	Wärmerohr, schneller Reaktor	Oklo Inc.	COL Antrag abgelehnt (01/2022)
BWRX-300		870/270 – 290	SWR	GE Hitachi	Typgenehmigung bei NRC beantragt (12/2019)
EM ²		500/265	Schneller HTGR	General Atomics	Konzept
eVinci		0,6 – 40/ 0,2 – 15	Wärmerohr	Westinghouse	Konzept, Vorbereitung des Genehmigungsverfahrens (NRC) seit 2021
KP-FHR		320/140	Salzschmelzegekühlter Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktor	Kairos Power	Konzeptentwicklung, Vorbereitung des Genehmigungsverfahrens (NRC) seit 2018
MMR [®]		15/5	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC)	VDR Phase 2, Genehmigungsverfahren bei CNSC begonnen

Name	Abbildung	Leistung [MW _{th} / MW _e]	Reaktortyp	Entwickler	Status
Natrium™		k.A./345	LFR (Natrium)	TerraPower	Konzeptentwicklung, Vorbereitung des Genehmigungsverfahrens (NRC)
NuScale		160/50	Integraler DWR	NuScale Power	Typgenehmigung durch NRC erteilt
SMR-160		525/160	DWR	Holtec International	Vorbereitung einer Genehmigung (NRC) seit 2020, Phase 1 des kanadischen VDR abgeschlossen
TCR		3/k. A.	HTGR	ORNL	Konzeptentwicklung
VSLIM		1 – 10/ k. A.	Schneller Reaktor	Institute for Space and Nuclear Power Studies	Konzeptentwicklung

Name	Abbildung	Leistung [MW _{th} / MW _e]	Reaktortyp	Entwickler	Status
Westinghouse SMR		800/> 225	Integraler DWR	Westinghouse	Konzept
Xe-100		200/80	HTGR	X-Energy LLC	Vorbereitung des Genehmigungsverfahrens (NRC) seit 2018

Die Entwicklung und Realisierung von SMR werden in den USA von Seiten der Regierung durch eine Vielzahl von unterstützenden Programmen und durch finanzielle Förderungen für SMR-Projekte unterstützt. Diese gehen überwiegend vom Department of Energy (DOE) aus, aber auch das Department of Defense (DOD) ist teilweise beteiligt. Im Haushaltsplan für das Wirtschaftsjahr 2022 sind insgesamt 1,68 Mrd. US\$ für Forschung im Bereich der Kernenergie vorgesehen. Auch in die Aufbereitung von Kernbrennstoff und die Produktion von High Assay Low-Enriched Uranium (HALEU) mit einer Anreicherung von U-235 auf bis zu 19,75 % investiert das DOE /DOE 19/. Die Programme sind:

- Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP)
- Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN)
- Advanced SMR Research and Development Program

- Nuclear Industry Funding Opportunity Announcement (FOA)
- Carbon Free Power Project (CFPP)
- National Reactor Innovation Center (NRIC)
- Pele Projekt
- Foundational Infrastructure for Responsible Use of SMR Technology (FIRST).

In den USA erfolgt die Genehmigung von Kernkraftwerken im Allgemeinen durch die NRC. Ausnahmen sind nur für durch das DOD betriebene Reaktoren möglich. Zur Optimierung des Zulassungsverfahrens für fortschrittliche Reaktoren, zu denen auch die SMR gezählt werden, arbeitet die NRC derzeit neue Regeln aus, die deren speziellen Eigenschaften besser gerecht werden sollen. Insbesondere im Hinblick auf die Genehmigung von SMR wurde im Jahr 2001 innerhalb des Office of Nuclear Reactor Regulation die sogenannte Future Licensing Organization eingerichtet, um der Frage nachzugehen, ob die NRC in der Lage wäre, neue Reaktorkonzepte zu genehmigen. Im Jahr 2008 wurde das Advanced Reactor Program initiiert, mit dem eine Vorbereitung auf das Auflaufen von Anträgen für die Genehmigung von SMR und nicht-leichtwassergekühlten Reaktoren erfolgen soll. Um der Vielfalt neuer Reaktortechnologien gerecht zu werden und deren sicherheitstechnische Eigenschaften zu berücksichtigen, fordert die Industrie neue Regelwerke für die Genehmigung fortschrittlicher Reaktoren. Dementsprechend hat die NRC begonnen, neue Regulatorien zu entwickeln, um die Genehmigung fortschrittlicher Reaktoren zu optimieren. Diese sollen letztendlich als 10 CFR Part 53 in das Regelwerk aufgenommen werden. Einer ersten groben Abschätzung zufolge ist geplant, den Part 53 bis August 2027 fertigzustellen. Dieser Zeitplan würde auch den Forderungen des Nuclear Energy Innovation and Modernization Act (NEIMA) von 2019 entsprechen, das ebenfalls die Entwicklung eines regulatorischen Rahmens für fortschrittliche Reaktoren anregt. Der Begriff „fortschrittliche Reaktoren“ soll in Bezug auf den neuen Part 53 nicht nur nicht-leichtwassergekühlte Reaktoren, sondern auch leichtwassergekühlte SMR und Fusionsreaktoren umfassen. Zudem soll der Part 53 nicht nur die reine Genehmigung der Reaktoren, sondern den gesamten Betriebszyklus von der Auslegung bis zum Rückbau regulatorisch abdecken.

3.4 SMR-Entwicklungen in Russland

Erstmals Mitte der 60er Jahre wurde die Aufgabe gestellt, ein kommerzielles KKW kleiner Leistung im Autonomen Kreis der Tschuktschen im äußersten Nordosten Russlands im Zusammenhang mit der Goldförderung zu errichten. Demzufolge wurden zwischen 1974 und 1976 am Standort Bilibino vier Reaktorblöcke mit graphitmoderierten Druckröhrenreaktoren des Typs EGP-6 mit einer elektrischen Gesamtleistung von 48 MW errichtet und in Betrieb genommen. Das Kernkraftwerk versorgt noch bis heute ein isoliertes Stromnetz mit Strom sowie die benachbarte Stadt Bilibino mit Fernwärme. Die Blöcke haben inzwischen ihre Betriebslaufzeit erreicht und eine Genehmigung für den Weiterbetrieb erhalten. Der Block 1 wurde im März 2018 nach fast 45 Betriebsjahren endgültig abgeschaltet. Drei weitere KKW-Blöcke sollen bis 2025 endgültig abgeschaltet und durch das schwimmende Kernkraftwerk „Akademik Lomonossow“ ersetzt werden.

Seit Dezember 2019 ist das schwimmende KKW „Akademik Lomonossow“ mit zwei kompakten Druckwasserreaktoren vom Typ KLT-40S mit jeweils bis zu 38 MW elektrischer Leistung und 73 Gcal/h Wärmeabgabe am Standort Pewek (Tschukotka) in Betrieb. Dabei handelt es sich um eine modifizierte Variante der Reaktoren, die in einigen russischen Eisbrechern und in einem Frachtschiff betrieben werden.

Die Entwicklung und Errichtung von Kernanlagen kleiner Leistung für Aufgaben der regionalen Energieversorgung ist seit vielen Jahren Bestandteil der russischen Strategie zur Entwicklung des Kernenergiesektors. Gegenwärtig gibt es in Russland eine breite Palette von Konzepten und Projekten der Nuklearanlagen im Leistungsbereich von 1 bis 300 MW_e, mit denen verschiedene Anwendungsfälle abgedeckt werden können: als schwimmender KKW-Block, als Kernheizkraftwerk, als Anlage zur Meerwasserentsalzung sowie als autonome Energiequelle. In Tab. 3.3 wird eine Übersicht über den Entwicklungsstand der SMR-Konzepte in Russland gegeben.

Tab. 3.3 Entwicklungsstand der SMR-Konzepte in Russland

Name	Typ	Entwickler	P, MW _{el}	Status	Standort
in Betrieb befindliche Reaktoren					
KLT-40S	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	38	2 Anlagen seit 2019 in Betrieb	Pewek (schwimmendes KKW „Akademik Lomonossow“)

Name	Typ	Entwickler	P, MW _{el}	Status	Standort
RITM-200	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	50	2 Anlagen in Betrieb	Eisbrecher „Arktika“
in Bau befindliche Reaktoren					
RITM-200	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	50	3 x 2 Anlagen im Bau	Eisbrecher Sibir, Ural, Yakutiya
Konzepte mit geplantem Bau					
RITM-200	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	50	2 Anlagen in Planung	Eisbrecher Chukotka
RITM-200M	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	50	2 KKW in Planung Baustart 2024	Regionen Tscheljabinsk (Süd-Ural) und Jakutien (nordöstlicher Teil Russlands)
RITM-400	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	120	3x2 Anlagen in Planung Baustart Ende 2020 geplant	Eisbrecher Rossiya und zwei weitere
Konzepte ohne konkrete Baupläne					
Name	Typ	Entwickler	P, MW _{el}	Status	
Vityaz	DWR	NIKIET	1	konzeptionelles Design	
ATGOR	HTGR	NIKIET	0,4-1,2	konzeptionelles Design	
SHELF	DWR	NIKIET	6,6	konzeptionelles Design	
UNITHERM	DWR	NIKIET	6,6	konzeptionelles Design	
KARAT-45/100	SWR	NIKIET	45/100	konzeptionelles Design	
NIKA-330	DWR	NIKIET	100	konzeptionelles Design	
VK-300	SWR	NIKIET	300	Entwicklung weit fortgeschritten	
ABV-6E	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	6-9	Entwicklung weit fortgeschritten	
Aisberg	DWR	OKBM	8-25	konzeptionelles Design	
SWBR-100	LBFR	IPPE Gidropress	100	detailliertes Design	
WBFR-300	DWR (Schiffsreaktor)	OKBM	170-600	detailliertes Design	
HTGR	HTGR	OKBM	8-25	konzeptionelles Design	

Die Grundlagen der Genehmigung von Tätigkeiten auf dem Gebiet der Kernenergienutzung sind im Föderalen Gesetz „Über die Nutzung der Kernenergie (Atomgesetz)“ festgelegt. Das Gesetz bestimmt die rechtlichen Grundlagen sowie Grundsätze der

Regulierung von Rechtsverhältnissen, die bei der Nutzung der Kernenergie entstehen. Das Atomgesetz legt fest, dass für Betreiber, die auf dem Gebiet der Kernenergienutzung ihre Arbeiten durchführen oder Leistungen erbringen, Genehmigungen für bestimmte Arten von Tätigkeiten erforderlich sind.

Grundlage für das Sicherheitskonzept der neuen Anlagen in Russland sind die in der russischen Regel NP-001-15 niedergelegten allgemeinen Sicherheitsgrundsätze und die in der NP-082-07 aufgeführten Richtlinien. Diese Regeln sehen ein fünfstufiges defense-in-depth-Konzept vor, das sich an den Vorgaben der IAEO orientiert. Gefordert wird die Einhaltung der Schutzziele: Unterkritikalität, Kernkühlung, langfristige Nachwärmeabfuhr und Einschluss der radioaktiven Stoffe nach dem Barrierenprinzip. Im Jahr 2011 wurde die Überprüfung des russischen kerntechnischen Regelwerks auf Änderungsbedarf unter dem Fukushima-Aspekt initiiert. 2015 wurde NP-001-15 unter Berücksichtigung von Erfahrungen, Änderungen in der Gesetzgebung sowie Harmonisierung mit den IAEO-Standards überarbeitet.

Für das seit 2019 in Betrieb befindliche „schwimmende“ KKW „Akademik Lomonossow“ wurden die geltenden Anforderungen an die sicherheitstechnische Auslegung, den Betrieb sowie die Stilllegung der nuklear angetriebenen Schiffsreaktoren in vollem Maße angewendet. Im Laufe des Genehmigungsverfahrens für die „Akademik Lomonossow“ erfolgte eine Überprüfung sowie Aktualisierung der existierenden Anforderungen an die nuklear angetriebenen Schiffsreaktoren.

Die Entwicklung neuer Reaktortechnologien in Russland, wie z. B. ein bleigekühlter, innovativer, schneller Reaktor mit inhärenter Sicherheit (BREST-OD-300) oder ein modularer Blei-Wismut-gekühlter innovativer schneller Reaktor SWBR-100, erfordert eine Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerks. Im Jahr 2015 hat die russische Aufsichtsbehörde Rostekhnadzor eine Standortgenehmigung für die Errichtung eines Energiekomplexes erteilt, welcher neben einem bleigekühlten Reaktor des Typs BREST-OD-300 alle erforderlichen Komponenten für einen geschlossenen Brennstoffkreislauf umfasst. Gemäß den Bedingungen der erteilten Standortgenehmigung sollen vom Betreiber unter anderem neue sicherheitstechnische Regeln und Anforderungen bis zur Erteilung der Errichtungsgenehmigung erarbeitet werden.

3.5 SMR-Entwicklungen in Großbritannien

Gemäß der von Großbritannien verfolgten Energiepolitik ist die Nutzung der Kernenergie ein wichtiger Baustein zur Reduktion der CO₂-Freisetzung und damit zum Erreichen der anvisierten Klimaziele. Neben den Projekten zum Bau von großen Leistungsreaktoren existieren Pläne zur Entwicklung und zum Bau von SMR. Großbritannien fördert die Entwicklung von SMR und fortschrittlichen Reaktorkonzepten (Advanced Modular Reactors, AMRs). Zielsetzung ist, dass Großbritannien weiterhin zu den führenden Ländern bei der Entwicklung von kerntechnischen Technologien gehört. Aus Sicht Großbritanniens haben SMR das Potential, kosteneffizient mittels Kernenergie Strom in den 2030er Jahren zu erzeugen. Im Fall einer behördlichen Genehmigung können innovative Fertigungstechniken und eine modulare Bauweise bedeuten, dass SMR im Vergleich zu großen Leistungsreaktoren schneller gebaut werden können und damit potentiell für den Einsatz an einer größeren Anzahl von Standorten im ganzen Land geeignet sind /EWP 20/.

Im November 2015 wurde ein £ 250 Mio. umfassendes Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur Wiederbelebung der kerntechnischen Expertise im Vereinigten Königreich insbesondere durch die Entwicklung von SMR bekannt gegeben. Die Finanzierung erfolgte durch das damalige „Department of Energy and Climate Change“ (DECC), das heute ein Teil des BEIS (Business, Energy and Industrial Strategy) ist /WNA 21/.

Ausreichend privates Kapital für die Finanzierung von Neubauprojekten zu aktivieren, stellt eine Herausforderung dar. Die britische Regierung beabsichtigt, die mögliche Rolle einer staatlichen Finanzierung während der Bauphase zu untersuchen, unter der Voraussetzung, dass für die Verbraucher und Steuerzahler ein klares Preis-Leistungs-Verhältnis gegeben ist.

Die Confederation of British Industry (CBI) empfiehlt zur Finanzierung das RAB-Modell, „Regulated Asset Base Model“. Mit dem Modell kann die Last der Investition reduziert werden, indem die Investitionen durch regulierte Rendite zurückfließen. Man erhofft sich, hierüber die privaten Investitionen in das Projekt zu erhöhen. Nach diesem Modell würden die Energieerzeuger das Projekt durchführen und die Verantwortung für das eingesetzte Kapital und die Betriebskosten übernehmen. Im Gegenzug ist es ihnen gestattet, Gewinnmargen festzulegen, üblicherweise über Kundenverträge, und ihnen können staatliche Subventionen angeboten werden. Vom 22. Juli bis zum 14. Oktober 2019 wurde im Auftrag der britischen Regierung eine Befragung der Stakeholder durchgeführt,

wie die Eignung des RAB-Modells zur Finanzierung von Neubauprojekten gesehen wird /RAB 20/.

Die Regierung hat einen „Advanced Nuclear Fund“ £ 385 Mio. bereitgestellt. Davon sind bis zu £ 215 Mio. für die Entwicklung eines britischen SMR vorgesehen und bis zu £ 170 Mio. für die Entwicklung eines AMR. Es wird erwartet, dass dadurch bis zu £ 300 Mio. an zusätzlichen Investitionen im Rahmen eines sogenannten Match Funds im privaten Sektor erreicht werden /EWP 20/.

Zur Entwicklung des regulatorischen Rahmens für fortschrittliche kerntechnische Technologien und Unterstützung der britischen Zuliefererketten beabsichtigt die Regierung, £ 40 Mio. zu investieren /EWP 20/.

Im Juli 2020 hat die britische Regierung £ 40 Mio. für die Entwicklung fortschrittlicher kerntechnischer Technologien bereitgestellt. Drei Viertel der Finanzierung gehen mit jeweils £ 10 Mio. an die drei AMR-Projekte:

- Bleigekühlter schneller Reaktor von Westinghouse
- U-Battery von Urenco (gasgekühlter Hochtemperaturreaktor)
- Fusionsreaktor von Tokamak Energy in Zusammenarbeit mit der Universität Oxford.

Das Office for Nuclear Regulation (ONR) ist die Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde im Vereinigten Königreich und zuständig für die Genehmigung und Aufsicht kerntechnischer Anlagen. Sie veröffentlicht SAPs (Safety Assessment Principles), TAGs (Technical Assessment Guides) und SyAPs (Security Assessment Principles), nach denen sich die Behörde im Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren richtet. Die 2019 überarbeitete ONR-Veröffentlichung „Licensing Nuclear Installations“ enthält Richtlinien, nach denen die Behörde kerntechnische Einrichtungen genehmigt und beaufsichtigt /CNS 19/. Bisher berücksichtigen die „Licensing Nuclear Installations“ noch keine SMR oder AMRs und sollen daher in Hinblick auf Advanced Nuclear Technologies (ANT) überarbeitet werden /ONR 19/, /CNS 19/.

Der Genehmigungsprozess für den Neubau von Leistungsreaktoren wird vom ONR und der EA (Environment Agency) durchgeführt und teilt sich auf in einen standortunabhängigen und standortspezifischen Prozess. Der standortunabhängige GDA-Prozess (Generic Design Assessment) gliedert sich ab 2018 in drei Schritte und endet mit der

Erteilung der „Design Acceptance Confirmation“ (DAC) durch das ONR und dem „Statement of Design Acceptability“ (SoDA) durch die EA /EAG 13/. Mit dem neuen GDA-Prozess soll flexibler und effizienter auf die unterschiedlichen Grade der Ausgereiftheit der verschiedenen SMR-Konzepte eingegangen werden. Im Rahmen des Programms zur Entwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen hat die Regierung den GDA-Prozess für SMR geöffnet, über den die SMR-Entwickler die behördliche Genehmigung für ihr Auslegungskonzept erhalten können /ANT 18/.

3.6 SMR-Entwicklungen in Kanada

Aufgrund der geografischen und demografischen Bedingungen bieten sich in Kanada verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für SMR. Zum einen ist dies die Energieversorgung von Kommunen in abgelegenen Gebieten. Zum anderen bietet vor allem der Rohstoffabbau ein großes Potential für den Einsatz von SMR. In beiden Fällen dieser „off-grid“-Nutzung würden dadurch vor allem Dieselgeneratoren ersetzt. Zudem existieren weitere Industriezweige, die von SMR beispielsweise zur Erzeugung von Prozesswärme profitieren könnten. Die reine Stromerzeugung an das Verbundnetz, bzw. der Einsatz von SMR anstelle leistungsstarker Kraftwerke spielt in den Überlegungen eine eher untergeordnete Rolle, findet aber dennoch statt.

Kanada hat im Vergleich zu anderen potenziellen SMR-Einsteigerländern bereits solide Voraussetzungen. Neben der Erfahrung mit Leistungsreaktoren ist durch die zahlreichen Forschungsreaktoren, unter denen auch einige FOAK (First of a kind) Anlagen sind, auch Erfahrung mit kleinen Reaktoren und deren Besonderheiten vorhanden. Damit stehen nach kanadischer Einschätzung insbesondere der regulatorischen Seite durch vorhandene Prozesse keine großen Hürden im Wege /CSM 18/. Hier bieten auch das risikoorientierte Regelwerk und der mögliche abgestufte Ansatz einen Vorteil, da hier ein gewisses Maß an Flexibilität zur Verfügung steht.

Auf Wunsch des Herstellers kann ein sogenanntes Pre-Licensing Vendor Design Review durchgeführt werden (Tab. 3.4). Ziel des Pre-Licensing Vendor Design Review ist es, die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit eines neuen Designs festzustellen und Hürden für die Lizenzierung frühzeitig zu identifizieren. Der Prozess ist nicht verpflichtend und es wird auch keine Zertifizierung vergeben.

Die Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) beschreibt sich selbst als „world class regulator“ und verweist auf die aktuell zwölf laufenden pre-licensing vendor design review Verfahren. Auch die internationalen Kooperationen mit Aufsichtsbehörden anderer SMR-affiner Staaten (USA, UK) werden als großer Vorteil dargestellt, da man so von den jeweiligen Erfahrungen der anderen profitieren könne.

Die Nuklearindustrie in Kanada zählt zu den weltweit führenden und verfügt über eine eingespielte Zuliefererkette. Es wurde das Potential erkannt, mit einer zügigen Einführung und Demonstration von SMR im eigenen Land zu einem Weltmarktführer im Bereich SMR werden zu können.

Durch die aktive Zusammenarbeit aller beteiligten Institutionen in Kanada wird die Entwicklung und Einführung von SMR, insbesondere durch die Unterstützung der kanadischen Regierung stark vorangetrieben /CSM 18/. Es ist zu erwarten, dass diese Aktivitäten weitergeführt werden und mehrere Demonstrationskraftwerke errichtet werden. Mit erfolgreichen Demonstrationskraftwerken erscheint der Export in interessierte SMR-Einsteigerländer dann auch möglich, sowie politisch gewollt.

Tab. 3.4 Derzeitige SMR-Konzepte im Pre-Licensing Vendor Design Review /CNS 22/

Vendor	Name of design and cooling type	Approximate electrical capacity (MW electrical)	Applied for	Review start date	Status
Terrestrial Energy Inc.	IMSR Integral Molten Salt Reactor	200	Phase 1	April 2016	Complete
			Phase 2	December 2018	Assessment in progress
Ultra Safe Nuclear Corporation	MMR-5 and MMR-10 High-temperature gas	5-10	Phase 1	December 2016	Complete
			Phase 2	June 2021	Assessment in progress
LeadCold Nuclear Inc.	SEALER Molten Lead	3	Phase 1	January 2017	On hold at vendor's request
ARC Nuclear Canada Inc.	ARC-100 Liquid Sodium	100	Phase 1	September 2017	Complete
			Phase 2	February 2022	Assessment in progress
Moltex Energy	Moltex Energy Stable Salt Reactor Molten Salt	300	Series Phase 1 and 2	December 2017	Phase 1 completed
SMR, LLC. (A Holtec International Company)	SMR-160 Pressurized Light Water	160	Phase 1	July 2018	Complete
NuScale Power, LLC	NuScale Integral pressurized water reactor	60	Phase 2*	January 2020	Assessment in progress
U-Battery Canada Ltd.	U-Battery High-temperature gas	4	Phase 1	Pending	Project start pending
GE-Hitachi Nuclear Energy	BWRX-300 boiling water reactor	300	Phase 2*	January 2020	Assessment in Progress
X Energy, LLC	Xe-100 High-temperature gas	80	Phase 2*	July 2020	Assessment in Progress

*Phase 1 objectives will be addressed within the Phase 2 scope of work.

3.7 SMR-Entwicklungen in Frankreich

Der französischen Aufsichtsbehörde Autorité de sûreté nucléaire (ASN) liegt derzeit kein Antrag zur Errichtung eines SMR vor. Seit 2012 laufen in Frankreich allerdings Voruntersuchungen zur Entwicklung eines SMR. Diese unterstützt die französische Regierung seit 2017. Im Jahr 2019 wurde ein Konsortium zur Entwicklung des integrierten SMR NUWARD gegründet. Dieser SMR wird hauptsächlich für den internationalen Markt entwickelt. Eine Demonstrationsanlage (FOAK) soll aber in Frankreich errichtet werden. Das Programm fördert auch aktiv die internationale Zusammenarbeit, einschließlich einer Partnerschaft mit Westinghouse. Im Rahmen des Konjunkturprogramms der französischen Regierung („Plan de Relance“) wurden 100 Mio. Euro zur Unterstützung der Entwicklung der NUWARD-Auslegung bereitgestellt /OEC 21/.

Das französische Regelwerk ist im Hinblick auf den Bau und Betrieb von großen DWR-Anlagen konzipiert. In dem Erlass vom 7. Februar 2012 /LEG 21/ wird für die sinnvolle Anwendung auf andere kerntechnische Anlagen festgelegt, dass diese dem Risiko der betrachteten Anlage entsprechen muss². Damit ist die Möglichkeit eines abgestuften Ansatzes des Regelwerks (graded approach) implizit im französischen Regelwerk verankert.

In der Praxis hängt das Niveau, der vom Genehmigungsinhaber zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen, von vielen Faktoren ab und wird von Fall zu Fall nach ingenieurtechnischer Einschätzung beurteilt. Der Sicherheitsnachweis basiert in erster Linie auf einem deterministischen Ansatz. Probabilistische Sicherheitsbewertungen werden zur Beurteilung der Effizienz der angewandten Auslegungs- und Betriebsvorschriften herangezogen. Die zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen werden entsprechend den allgemeinen Sicherheitszielen definiert, die zuvor von der Sicherheitsbehörde für die Anlage festgelegt wurden. Der Genehmigungsinhaber kann seinen Standpunkt mit risikobezogenen Argumenten begründen. Die Aufsichtsbehörde nimmt dann Stellung zur Annehmbarkeit der vom Genehmigungsinhaber vorgeschlagenen Auslegung und Organisationsmaßnahmen.

Ein abgestufter Ansatz des Regelwerks würde sich hauptsächlich auf technische Nachweise stützen, z. B. auf Rückflüsse aus der Betriebserfahrung oder zur Auslegung, sowie auf Ergebnisse laufender Forschungsarbeiten. Eine Validierung der verwendeten Codes ist für alle Anwendungen (z. B. Sicherheitsnachweise) erforderlich. Die Sicherheitsmargen sollten gut begründet sein, und das Risiko von Kippeffekten („cliff-edge“) sollte so weit wie möglich ausgeschlossen werden.

Generell sieht Frankreich Herausforderungen im Zusammenhang mit der Genehmigung und Errichtung von SMR im Prozess der Mehrfachlizenzierung/Lizensierung in verschiedenen Ländern im Rahmen des weltweiten Einsatzes vom SMR. Weitere Herausforderungen sind für Frankreich spezielle Fragen im Zusammenhang mit SMR-spezifischen Merkmalen wie modulare Fertigung, integriertes Design, Multi-Reaktorarchitektur und Human Factors /SMR 18/.

An dem Konsortium zur Entwicklung des SMR NUWARD sind CEA (Commissariat à

² „Leur application repose sur une approche proportionnée à l'importance des risques ou inconvénients présentés par l'installation.“ /LEG 21b/

l'énergie atomique et aux énergies alternatives), EDF (Electricité de France), die Naval Group und TechnicAtome beteiligt /NUC 21/. NUWARD wird als Generation III+ SMR entwickelt. Eine Einheit hat eine elektrische Leistung von 170 MW_e. Es ist geplant, Anlagen mit geraden Vielfachen unabhängiger Reaktormodule zu bauen. NUWARD ist ein Integral-PWR (iPWR), der die Hauptkomponenten des nuklearen Dampfversorgungssystems (Nuclear Steam Supply System, NSSS) vollständig integriert. Dies schließt den Steuerstabantrieb, Dampferzeuger und Druckhalter ein. Dieser Aufbau wird in ähnlicher Form auch in den nuklear angetriebenen französischen Unterseebooten verwendet. Durch den Einsatz eines verkürzten Reaktordruckbehälters wird das NSSS in einem Stahlcontainment installiert, das in einem unterirdischen Wasserbecken eingesetzt werden soll. Das NUWARD-spezifische Design soll Auslegungsstörfälle (Design Basis Conditions) durch passive Systeme ohne die Notwendigkeit einer externen elektrischen Stromversorgung beherrschen und soll für mehr als drei Tage unabhängig von einer Nachbespeisung des Wasserbeckens (ultimate heat sink) sein.

Unter anderem zielt das Konsortium darauf ab, das NUWARD-Design (Abb. 3.2) ohne grundlegende Designänderungen in verschiedene Länder exportieren zu können, um einen Serieneffekt zu gewährleisten und eine wettbewerbsfähige Lösung zu bieten. Als die wichtigsten Segmente, für die der NUWARD bestimmt ist, werden der Ersatz von Kohlkraftwerken mit 300 – 400 MW_e, die Versorgung von abgelegenen Kommunen und energie-intensiver Industrie sowie der Einsatz in kleinen Netzen angegeben. Des Weiteren strebt EDF an, eine europäische SMR-Plattform aufzubauen, die eine pan-europäische Lieferkette für SMR einschließt und darauf abzielt, SMR in Europa und weltweit leichter zu vermarkten.



Abb. 3.2 Darstellung einer NUWARD-Einheit (Containment teilweise entfernt)
/TEC 21/

3.8 SMR-Planungen in Polen

Gegenwärtig befindet sich in Polen weder ein Kernkraftwerk im Betrieb noch in Bau. Das Land plant aber seit dem Jahr 2014 den Einstieg in die Nutzung der Kernenergie. Im Jahr 2014 wurde das „Kernenergieprogramm Polens“ (im Weiteren KEP) vom Ministerrat beschlossen /KEP 14/. Laut diesem Programm wird die Errichtung von zwei KKW mit einer Gesamtleistung von ca. 6.000 MW_e bis 2035 geplant. Das KEP sollte die „Energiepolitik Polens bis 2030“ aus dem Jahre 2009 unterstützen /ENE 09/. Darin wurde u. a. die Einführung der Kernenergie zur Diversifizierung der Stromerzeugung geplant sowie damit einhergehend die Reduktion des Anteils der Kohle an der polnischen Stromerzeugung bis zum Jahr 2030 auf 60 % und die Schaffung eines Kernenergieanteils zuzüglich erneuerbarer Energien auf 19 bzw. 20 % festgelegt. Im Jahr 2015 wurde auf Grund der gesamten politischen Ereignisse beschlossen, eine neue „Energiepolitik Polens bis zum Jahre 2050“ zu erarbeiten. Zwischenzeitlich erfolgte stattdessen die Erarbeitung eines Entwurfes der „Energiepolitik Polens bis zum Jahre 2040“. Auf Basis dieser neuen Energiestrategie-2040 sollte dann eine Anpassung und Aktualisierung des KEP Polens erfolgen.

Am 14.02.2017 verabschiedete der Ministerrat Polens eine vom Ministerium für wirtschaftliche Entwicklung erarbeitete „Strategie für eine verantwortungsvolle Entwicklung für den Zeitraum bis 2020 (einschließlich der Perspektive bis 2030)“ (auf Polnisch „Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju“) /MIN 17/, womit Folgendes festgelegt wurde:

- die Entwicklung und Errichtung von Hochtemperaturreaktoren (HTR) allgemein,
- die Entwicklung von Hochtemperaturreaktoren HTR für die Kraft-Wärme-Kopplung in der chemischen Industrie,
- die Unterstützung der polnischen Forschung und Entwicklung von Werkstoffen für die Reaktorgeneration-IV unter Nutzung des polnischen industriellen und wissenschaftlichen Potenzials.

Zu diesem Zweck hat das polnische Energieministerium (Abteilung für Kernenergie) am 13.7.2016 ein „Komitee für die Analyse und Vorbereitung der Bedingungen für den Einsatz von HTR“ (Zespół ds. analizy i przygotowania warunków do wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych) gegründet, das unter der Leitung von Prof. Gregorz Wrochna vom Nationalen Zentrum für Nuklearforschung /NCF 17/ steht. Das HTR-

Komitee sollte Chancen und Möglichkeiten der HTR-Technologie zur Strom- oder Technologiewärmeerzeugung in Form von Heizwärme ($> 250\text{ °C}$) und den potentiellen Umfang des Bedarfs formulieren. In dem erstellten Bericht wird die Implementierung von HTGRs in Polen vorgeschlagen. Der Bericht enthält unter anderem auch eine Roadmap bis zur Inbetriebnahme des ersten kommerziellen HTGR mit einer Kapazität von ca. $165\text{ MW}_{\text{th}}$ im Jahr 2031 sowie eine Kostenschätzung für dieses Vorhaben (780 Mio. Euro) /MIN 18/.

Zum September 2019 gab es sechs aktive HTR-Projekte in Polen sowie noch ein geplantes. Aktuell sind vier Projekte in Arbeit:

- Das GOSPOSTRATEG-HTR-Projekt ist ein strategisches nationales Projekt eines Konsortiums aus dem Energieministerium, dem NCBJ (National Centre for Nuclear Research) und dem Institut für Kernchemie und -technologie ICHTJ.
- NOMATEN ist ein Projekt zur Unterstützung des „NOMATEN-Kompetenzzentrums für multifunktionale Materialien für industrielle und medizinische Anwendungen“, das im September 2018 in Polen gegründet wurde.
- Basierend auf früheren Arbeiten in Europa und international wurde das GEMINI+ Projekt im September 2017 bis 2020 eingeführt. Es soll die industrielle Machbarkeit der nuklearen Hochtemperatur-Kraft-Wärme-Kopplung nachweisen.
- Das nationale PHD4GEN-Projekt bietet Kurse für Promotionsstudenten zu den Themen „Neue Reaktorkonzepte und Sicherheitsanalysen für das polnische Kernenergieprogramm“ im Narodowe Centrum Badań Jądrowych, National Centre for Nuclear Research (NCBJ). Damit werden Forschungsarbeiten zur HTGR-Technologie und zu einem Dual-Fluid-Reaktor der Generation-IV durchgeführt.

3.9 SMR-Planungen in Finnland

Finnland strebt die Klimaneutralität bis zum Jahr 2035 an. Dazu sollen vermehrt erneuerbare Energiequellen genutzt werden, was zur Vergrößerung der Leistungsfluktuation im Stromnetz führt. Kleinere KKW-Einheiten werden laut finnischem Wirtschaftsministerium künftig benötigt, um die Netzstabilität gewährleisten zu können /NEI 19/. Der Betreiber FORTUM (KKW Loviisa) regt an, dass in 10 bis 15 Jahren erste SMR in Finnland zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden könnten /FOR 20/. Diese Reaktoren sollten in Serie gefertigt werden, um Zeit und Kosten einzusparen. Die finnische

„Radiation and Nuclear Safety Authority“ STUK hat die Entwicklungsperspektiven für das Genehmigungssystem für SMR beschrieben /STU 20/. Dort wird zunächst klar definiert, dass es sich auch durch die bei SMR veränderte Bauweise um Kernkraftwerke handelt, die dem nationalen Genehmigungsverfahren unterliegen. Des Weiteren wird gefordert, dass die Sicherheit der KKW zuverlässig nachgewiesen werden muss. Der Bericht definiert Leitlinien für eine wissenschaftliche Fachdebatte über notwendige Modifizierungen im Genehmigungsverfahren.

3.10 SMR-Planungen in der Ukraine³

Die in der Ukraine in Betrieb befindlichen Anlagen vom Typ WWER gingen zwischen 1980 und 2004 ans Netz. Sie hatten alle eine projektierte Lebensdauer von 30 Jahren. Zwölf der insgesamt 15 Anlagen haben den Auslegungszeitraum bereits überschritten. Der staatliche Betreiberkonzern aller Kernkraftwerke NAEK Energoatom strebt für alle Anlagen eine Genehmigung zur Betriebsdauerverlängerung an. Im Jahr 2020 wurden Pläne der ukrainischen Regierung für ein „Green Energy Transition Concept“ für die weitere Entwicklung der ukrainischen Energiewirtschaft bis zum Jahr 2050 bekannt /EMU 20/, /EMU 20a/. Der Anteil von Kernenergie soll auf einen Anteil von ca. 20 – 25 % gesenkt werden, wobei neue Nuklearanlagen vorrangig auf dem Prinzip von SMR errichtet werden sollen.

Pläne zur Entwicklung (Stand September 2020) und Errichtung von SMRs in der Ukraine werden vorrangig durch die US-amerikanische Firma HOLTEC International vorangetrieben. Die Firma HOLTEC International ist bestrebt, den durch sie entwickelten Reaktortyp SMR-160 in den USA und im Ausland genehmigen zu lassen und in großer Zahl zu errichten. Der Leiter der Firma schlug dem ukrainischen Präsidenten im Jahr 2017 vor, dort einen Hub für die Produktion von wichtigen Komponenten und zur Verbreitung der Reaktoranlage in Europa, Asien und Afrika zu installieren /EA 19/. Es wird davon ausgegangen, dass es in der Ukraine einen großen Markt für die Errichtung von SMR gibt. Entsprechend der ukrainischen Energiestrategie bis zum Jahr 2035 wird das Land an der Nutzung der Kernenergie festhalten. Am 28. Februar 2018 wurde durch den damaligen Präsidenten des ukrainischen Konzerns NAEK Energoatom, Yury Nedashkovsky und den Direktor der Firma HOLTEC International, Kris Singh eine

³ Der Abschnitt beschreibt den Stand 2020 und berücksichtigt nicht den im Februar 2022 erfolgten russischen Angriff auf die Ukraine.

Absichtserklärung unterzeichnet /EA 18/. In dem Memorandum geht es um die Zusammenarbeit zwischen HOLTEC International und SSTC NRS. Dabei ist als ein Ziel die Genehmigung der SMR-Technologie in der Ukraine genannt. Das Genehmigungsverfahren in der Ukraine ist bisher auf Druckwasserreaktoranlagen vom Typ WWER zugeschnitten. In der Ukraine wurden bisher nur standortbezogene Genehmigungen für Kernkraftwerke erteilt. Für den Fall der Genehmigung des SMR-160 soll erstmals eine typenbezogene Genehmigung erteilt werden /UE 20/.

4 Auswertung von übergeordneten Berichten zu SMR

Im Rahmen des Vorhabens wurden auch zwei übergeordnete, themenspezifische Berichte internationaler Organisationen zu SMR ausgewertet.

4.1 IAEO-Bericht „Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors“

Der IAEO-Bericht /IAE 20/ beschreibt eine generische Vorgehensweise für die Implementierung eines UVP-Prozesses (Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)) zur Unterstützung der SMR-Genehmigung und umfasst die Umweltauswirkungen aus der Anwendung von SMR-Technologien, basierend auf dem Vergleich mit typischen Leistungsreaktoren. Es wird erwartet, dass das UVP-Verfahren für die Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen für größere LRs und für SMRs ähnlich sein werden. Die wesentlichen inhaltlichen Unterschiede bei der UVP von SMR ergeben sich danach durch

- die spezifischen Merkmale, die SMR von Leistungsreaktoren bezüglich der Umweltauswirkung unterscheiden,
- durch mögliche nachteilige Auswirkungen von SMR während Bau, normalem Betrieb und Stilllegung sowie
- durch mögliche SMR-spezifische Auswirkungen bei Störfällen und Fehlfunktionen.

Die in diesem IAEO-Bericht dargestellten Überlegungen basieren auf den aktuellen Entwürfen und dem Entwicklungsstand der SMRs. Die vorliegenden Überlegungen müssen möglicherweise während der Entwicklung der Technologien überarbeitet werden, da sich viele der SMR-Designs in verschiedenen Mitgliedstaaten noch auf einer konzeptionellen Ebene befinden. Die Erfahrungen bei der Genehmigung, bei der Konstruktion und beim Betrieb können zu Änderungen an den SMR-Designs und dadurch zu abgeänderten Umweltauswirkungen führen.

4.2 OECD-Bericht „Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities“

In dem OECD-Bericht /OEC 21/ werden die aus der Sicht der Hersteller und Betreiber erforderlichen Rahmenbedingungen und noch bestehenden Herausforderungen für

einen verbreiteten Einsatz von SMR-Konzepten dargestellt. Die in Entwicklung befindlichen SMR-Konzepte sind sowohl im Leistungsspektrum als auch technologisch sehr unterschiedlich. Im Hinblick auf die Genehmigung solcher Anlagen führt dies zu besonderen Herausforderungen. Häufig müssen für eine Genehmigung von SMR-Konzepten Regelwerke angepasst oder entsprechend ausgelegt werden. Seitens der Industrie wird eine internationale Harmonisierung der Regelwerke angestrebt, um eine Standardisierung der Konzepte und somit eine höhere Stückzahl zu ermöglichen. Nach Ansicht des SMR Regulators' Forum erfordert dies jedoch eine ausreichende Evidenzbasis, einschließlich Betriebserfahrungen, um Änderungen des Regelwerks zu rechtfertigen /SMR 18/, /SMR 21/.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens wurden politische und strategische Entwicklungen im Zusammenhang mit kerntechnischen Anlagen im Ausland systematisch verfolgt, analysiert und aufbereitet. Länder von besonderem Interesse waren dabei die deutschen Nachbarstaaten. In dem vorliegenden Bericht stehen dabei Entwicklungen zu SMRs im Vordergrund.

Weltweit ist das Interesse an SMR gestiegen. SMR sind neuere Reaktorkonzepte mit einer elektrischen Leistung von 10 MW bis zu 300 MW, deren Komponenten in einer Fabrik vorgefertigt und als Teilmodule zum jeweiligen Standort transportiert werden können. Reaktorkonzepte mit einer elektrischen Leistung unterhalb von 10 MW werden als Micro Modular Reactors (MMRs) bezeichnet. Insgesamt werden zurzeit ca. 70 SMR-Konzepte entwickelt, wobei die meisten evolutionäre Varianten von Leichtwasserreaktoren sind. Die anderen Konzepte verwenden Kühlmittel wie Natrium, Blei, Helium oder Salzschnmelzen und gehören zu den Generation-IV SMR.

Führende Länder im Bereich SMR-Entwicklung sind die USA, China, Kanada, Russland, Großbritannien und Frankreich. In diesen Ländern wird die Entwicklung von SMR gefördert und es werden zahlreiche SMR-Konzepte entwickelt. Realisiert werden SMR-Konzepte bereits in China und Russland.

SMR- und MMR-Konzepte unterscheiden sich von leistungsstarken Reaktoren u. a. durch die Verwendung eines integralen, kompakten („modularen“) Designs, das geringere Kerninventar sowie eine geringere thermische Leistung, die vermehrte Verwendung von passiven Systemen. Obwohl durch das gewählte Design einzelne Versagensmechanismen und Störfälle u. U. eine niedrigere Wahrscheinlichkeit haben oder ausgeschlossen sind, sind insbesondere bei sogenannten fortschrittlichen Reaktorkonzepten (Gen-IV SMR) noch eine Reihe technischer Herausforderungen und Fragestellungen zu lösen.

Die regulatorischen Anforderungen an die bestehenden und neuen KKW sind im Wesentlichen an leistungsstarken, ortsfesten Leichtwasserreaktoren ausgerichtet. So stellt sich die Frage, inwieweit die bestehenden Regelwerke und Richtlinien auf SMR-Konzepte anwendbar sind. Zusätzliche Fragestellungen treten z. B. in Bezug auf die Herstellung ganzer Komponenten bzw. Reaktormodule in Fabriken, der Inbetriebnahme und der Wartung auf. Im Hinblick auf die Genehmigung solcher Anlagen führt dies zu

besonderen Herausforderungen. Häufig müssen für eine Genehmigung von SMR-Konzepten Regelwerke angepasst oder entsprechend ausgelegt werden. Seitens der Industrie wird eine internationale Harmonisierung der Regelwerke angestrebt, um eine Standardisierung der Konzepte und somit eine höhere Stückzahl zu ermöglichen. Dies erfordert jedoch eine ausreichende Evidenzbasis, einschließlich Betriebserfahrungen, um Änderungen des Regelwerks zu rechtfertigen.

Im Rahmen des durchgeführten Vorhabens wurden die Kenntnisse der GRS zu den kerntechnischen Aktivitäten sowie der politischen und strategischen Ausrichtung im Ausland fortgeschrieben und damit die Wissensbasis der GRS erweitert.

Literaturverzeichnis

- /ANT 18/ Vortrag von ONR und EA beim Advanced Nuclear Technologies Seminar, November 2018.
- /CHI 17/ Pressemitteilung: Countries interested in ACP100 reactor, https://www.chinadaily.com.cn/business/2017-04/28/content_29122633.htm , 28.04.2017
- /CNS 19/ The United Kingdom's Eighth National Report on Compliance with the Convention on Nuclear Safety, Department for Business, Energy & Industrial Safety, August 2019.
- /CNS 22/ Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC): Pre-Licensing Vendor Design Review, Zugriff: 07.03.2022
- /CSM 18/ Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee: A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors. Ottawa, Ontario, Canada, November 2018.
- /DOE 19/ U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Baranwal, R.: Analysis: FY2020 Spending Bill Points to Nuclear Resurgence, 23.12.2019,
Online: <https://www.energy.gov/ne/articles/analysis-fy2020-spending-bill-points-nuclear-resurgence>, Zugriff: 14.09.2020.
- /EA 18/ NAEK Energoatom "Энергоатом и Holtec подписали Меморандум о взаимопонимании по сотрудничеству в сфере использовании малых модульных реакторов" (Energoatom und Holtec haben ein Memorandum of Understanding zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Nutzung kleiner modularer Reaktoren unterzeichnet) März 2018, aus dem Informationsdienst der Kontaktstelle Kiew

- /EA 19/ NAEK Energoatom “Энергоатом, ГНТЦ ЯРБ и Holtec International подписали Соглашение о партнерстве, предусматривающее создание международного консорциума“ (Energoatom, SSTC NRS und Holtec International haben eine partnerschaftliche Vereinbarung unterschrieben, die die Schaffung eines internationalen Konsortiums vorsieht) Juni 2019, aus dem Informationsdienst der Kontaktstelle Kiew
- /EAG 13/ Environment Agency A guide to the Regulatory Process, Publication, September 2013.
- /EMU 20/ Energieministerium der Ukraine „Презентован проект Концепции "зеленого" энергетического перехода Украины к 2050 году“ (Der Entwurf des Konzepts des „grünen“ energetischen Übergangs der Ukraine bis zum Jahr 2050 wurde präsentiert) Januar 2020, aus dem Informationsdienst der Kontaktstelle Kiew
- /EMU 20a/ Energieministerium der Ukraine „Ukraine Green Energy Transition Concept – Ukraine Green Deal“ 2020
- /ENE 09/ Ministry of Economy of Poland: Energy Policy of Poland until 2030, Appendix to Resolution No. 202/2009 of the Council of Ministers of 10 November 2009
- /EWP 20/ Energy White Paper: Powering our Net Zero Future, HM Government, Dezember 2020.
- /FOR 20/ Fortum Blog: First small nuclear reactor in Finland in 10 – 15 years? 2020-06-03 <https://www.fortum.com/about-us/blog-podcast/forthedoers-blog/first-small-nuclear-reactor-finland-10-15-years>
- /IAE 20/ IAEA: Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors, IAEA-TECDOC-1915, Wien, Juni 2020
- /KEP 14/ Dr. J. Sobolewski, Department of Nuclear Energy, Ministry of Energy of Poland: Nuclear power program in Poland, Spotlight Nuclear Poland, 20th of November 2019, Warsaw

- /LEG 21/ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000025338573/>, abgerufen am 16. August 2021.
- /MIN 17/ Ministry of Economy Development of Poland: Strategy for responsible Development for the period up to 2020 (including the perspective up to 2030), Warsaw 2017.
- /MIN 18/ Ministry of Energy of Poland: Possibilities for development of high-temperature nuclear reactors in Poland, Report of the Committee for Analysis and Preparation of conditions for deployment of high-temperature nuclear reactors, 2018
- /MOE 17/ Development and Related Regulation Practice of SMR in China, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2017, <https://gnssn.iaea.org/NSNI/SMRP/Shared%20Documents/TM%204%20-%208%20September%202017/Development%20and%20Related%20Regulation%20Practice%20of%20SMR%20in%20China.pdf>
- /NCF 17/ G. Wrochna, National Centre for Nuclear Research of Poland: HTR reactors within polish strategy of nuclear energy development, 9th International School on Nuclear Power, Warsaw, 15.11.2017
- /NEI 19/ Nuclear Engineering International, 2019-04-03 <https://www.neimagazine.com/features/featurelook-north-small-is-beautiful-7134094/>
- /NNS 18/ https://nucleus.iaea.org/sites/htgr-kb/twg-smr/Documents/TWG-1_2018/13_CHINA_Tong_TWG_SMR_240418.pdf
- /NRC 22/ United States Nuclear Regulatory Commission: Oklo Inc. – Denial of the Aurora Combined Operating License Application for Failure to Supply Information, 06.01.2022, Verfügbar unter: <https://www.nrc.gov/docs/ML2135/ML21357A034.pdf>, Zugriff: 24.02.2022.
- /NUC 21/ NucNet Feature/France In Race For Share Of SMR Market As NUWARD Project Makes Most Of Domestic Technology, 7. September 2021.

- /OEC 21/ OECD: Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, NEA NO. 7560, 2021.
- /ONR 19/ Licensing Nuclear Installations, ONR, 2019.
- /RAB 20/ RAB Model for Nuclear, Government Response to the Consultation on a RAB Model for New Nuclear Projects, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2020.
- /SMR 18/ SMR Regulators' Forum Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors, Januar 2018.
- /SMR 21/ SMR Regulators' Forum: Phase 2 Summary Report, Covering Activities from November 2017 to December 2020 for: Licensing Issues Working Group, Design and Safety Analysis Issues Working Group, Manufacturing, Construction, Commissioning, Operation Working Group, Juni 2021
- /STU 20/ Säteilyturvakeskus Edellytykset pienreaktorien turvalliselle käytölle – lupajärjestelmän ja valvonnan kehitysnäkymiä – ISBN: ISBN 978-952-309-451-2 (pdf)
- /TEC 21/ <https://www.technicatome.com/activites/nucleaire-civil/smr/>, abgerufen 18. August 2021.
- /UE 20/ Ukrainskaja Energetika „Перед внедрением малых модульных реакторов надо убедиться в их безопасности — Григорий Плачков“ (Vor der Einführung kleiner Modularer Reaktoren muss man sich von ihrer Sicherheit überzeugen) (Interview mit dem Leiter der ukrainischen atomrechtlichen Reguli-erungsbehörde Hryhorii Plachkov) April 2020
- /WNA 21/ World Nuclear Association Country Profile: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>, Zugriff: 02.03.2021.

/WNN 22/ World nuclear news: TVA announces new nuclear programme,
11.02.2022,
Online: [https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TVA-announces-
new-nuclear-programme](https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TVA-announces-new-nuclear-programme), Zugriff: 16.02.2022.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Spektrum der elektrischen Leistung als Funktion der Kühlmittelauslasstemperatur für ausgewählte SMR/MMR-Reaktorkonzepte /OEC 21/	3
Abb. 3.2	Darstellung einer NUWARD-Einheit (Containment teilweise entfernt) /TEC 21/	22

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Übersicht zu chinesischen SMR-Reaktorkonzepten	6
Tab. 3.2	Auswahl von SMR-Konzepten der USA	9
Tab. 3.3	Entwicklungsstand der SMR-Konzepte in Russland	13
Tab. 3.4	Derzeitige SMR-Konzepte im Pre-Licensing Vendor Design Review /CNS 22/	20

Abkürzungsverzeichnis

AMR	Advanced Modular Reactor
ANT	Advanced Nuclear Technology
ARDP	Advanced Reactor Demonstration Program
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
BDBA	Beyond Design Basis Accident
BEIS	Business, Energy and Industrial Strategy
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEFR	China Experimental Fast Reactor
CFPP	Carbon Free Power Project
CGN	China General Nuclear Power Group
CNNC	China National Nuclear Corporation
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
COL	Combined License
DAC	Design Acceptance Confirmation
DBA	Design Basis Accident
DECC	Department of Energy and Climate Change
DOD	Department of Defense
DOE	Department of Energy
EA	Environment Agency
EDF	Electricité de France
EVA	Einwirkungen von außen
FIRST	Foundational Infrastructure for Responsible Use of SMR Technology
FOA	Funding Opportunity Announcement
FOAK	First of a kind
GDA	Generic Design Assessment
GAIN	Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear
HTGR	High Temperature Gas-cooled Reactors
HTR	High Temperature Reactor
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
ICHTJ	Institute of Nuclear Chemistry and Technology
KEP	Kernenergieprogramm Polens
LWR	Light Water Reactor
MMR	Micro Modular Reactor
NEIMA	Nuclear Energy Innovation and Modernization Act

NNSA	National Nuclear Safety Administration
NCBJ	Narodowe Centrum Badań Jądrowych, National Centre for Nuclear Research
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NRIC	National Reactor Innovation Center
NSSS	Nuclear Steam Supply System
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ONR	Office for Nuclear Regulation
PSA	Probabilistic Safety Analysis
PWR	Pressurized Water Reactor
SAP	Safety Assessment Principles
SMR	Small Modular Reactor
SoDA	Statement of Design Acceptability
STUK	Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority
SyAP	Security Assessment Principles
TAG	Technical Assessment Guide
TANR	Technische Aufbereitung neuer Reaktorkonzepte
TVA	Tennessee Valley Authority
TWG	Technical Working Group
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de