



ABSCHLUSSBERICHT
ENCO-FR-(22)70 REV 5

**ANALYSE VON KONZEPTEN VON SMALL
MODULAR REACTORS (SMR) – STAND 2022**
VERTRAGSREFERENZ: 2022-0.492.653

**ANALYSE VON KONZEPTEN VON
SMALL MODULAR REACTORS (SMR)
– STAND 2022**

VERTRAGSREFERENZ:2022-0.492.653

Abschlussbericht
ENCO-FR-(22)70 Rev 5

Erstellt von:



Erstellt für:

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	7
2	AUSWAHL DER ZU ANALYSIERENDEN SMR	9
3	ALLGEMEINE HERAUSFORDERUNGEN FÜR SMR	13
4	KRITISCHE ANALYSE DER AUSGEWÄHLTEN SMR-MODELLE	15
4.1	Grundkonzept der SMR	18
4.2	SMR-Entwickler und ihre Erfahrung, gesetzte Ziele	18
4.3	Design, technologie und Reifegrad	19
4.4	Lizenzierung	20
4.5	Konstruktion und Einsatz	20
4.6	Komplementarität des Betriebs mit Erneuerbaren	21
4.7	KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG	21
4.8	Brennstoffkreislauf	22
4.9	Sicherheit	22
4.10	Standortanforderungen	23
4.11	Radioaktiver Abfall	23
4.12	Rechtliche Fragen	24
4.13	Wirtschaftliche parameter	24
4.14	Security	25
5	EINSATZAUSSICHTEN	27
6	WIRTSCHAFTLICHKEIT VON SMR	30
7	KOMPLEMENTÄRBETRIEB MIT ERNEUERBAREN ENERGIEN, ANDERE ANWENDUNGEN	32
8	SCHLUSSFOLGERUNGEN	34
9	REFERENZEN	37
	ANNEX 1: FACTSHEETS DER 6 AUSGEWÄHLTEN SMR	41
	NUSCALE	41
	BWRX-300	45
	NUWARD	48
	ROLLS ROYCE	51
	HOLTEC SMR-160	53
	ACP100	56
	ANNEX 2: VERGLEICH DER 6 SMRS ENTLANG VERSCHIEDENER PARAMETER	59

ABBILDUNGEN

Figure 1: : Hypothetischer Fall des Betriebs eines NuScale Moduls mit einem Windpark (Quelle: Ref. [35], "Can Nuclear Power and Renewables be Friends")	32
---	----

ABKÜRZUNGEN

ABWR	Fortgeschrittener Siedewasserreaktor
AC	Wechselstrom
ADS	Automatisches Druckentlastungssystem
AGR	Fortschrittlicher Gasreaktor
APR	Fortschrittlicher Druckwasserreaktor
ASN	Französische Aufsichtsbehörde
BMK	Bundesministerium für Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BWR	Siedewasserreaktor
CAD	Kanadische Dollar
CCF	Fehler mit gemeinsamer Ursache
CCS	Kohlenstoffabscheidung und -speicherung
CDF	Kernschadenshäufigkeit
CEZ	České Energetické Závody
CFPP	Carbon Free Power Project
CNNC	China National Nuclear Corporation
CNSC	Kanadische Aufsichtsbehörde
CNV	Zylindrischer Sicherheitsbehälter
COL	Kombinierter Lizenzantrag (US NRC)
CRD	Steuerstabantrieb
CRDM	Steuerstabantriebsmechanismus
DBA	Auslegungsstörfall
DBC	Auslegungszustand
DC	Gleichstrom
DCA	Antrag auf Designzertifizierung (US NRC)
DCS	Geteiltes Kontrollsystem
DEC	Auslegungsüberschreitender Zustand
DHR	Nachzerfallswärmeabfuhr
DSRP	Design-spezifischer Prüfungsplan
DOE	US Department of Energy
DSRS	Design-spezifisch Prüfungsrichtlinie
ECCS	Reaktor Notkühlsystem
EDF	Électricité de France
ENSTO-e	European association for the cooperation of transmission system operators
EPR	Europäische Druckwasserreaktor
EPRI	Electric Power Research Institute
EPZ	Notfallplanungszone
ESBWR	Wirtschaftlicher Vereinfachter Siedewasserreaktor
EU	Europäische Union
FOAK	Erstes einer Art
FSAR	Finaler Sicherheitsanalysebericht
GDA	Generisches Bauartgenehmigung
GenII	Zweite Generation von Reaktoren
Generation III/GenIII	Dritte Generation von Reaktoren
GW	Gigawatt
GWTS	Abfallgasbehandlungssystem
HTGR	Gasgekühlter Hochtemperaturreaktor
HTR-PM	Gasgekühlter Hochtemperaturreaktor - Kugelhaufenreaktor
IAEA	Internationale Atomenergiebehörde
ICS	Isolationskondensator System
I&C	Leittechnik (Mess- und Regelsystem)
IMSR	Integrierter Salzschnmelzereaktor
kW	Kilowatt
LCOE	Durchschnittlichen Stromgestehungskosten
LCOE*	Durchschnittlichen Stromgestehungskosten mit Systemaufwand
LERF	Häufigkeit einer grossen frühzeitigen Freisetzung

LOCA	Kühlmittelverluststörfall
LWTS	Flüssigkeitabfallbehandlungssystem
LWR	Leichtwasserreaktor
MCR	Hauptkontrollraum
MoU	Absichtserklärung
MOX	Mischoxid Kernbrennstoff
MS	Mitgliedstaat
MW	Megawatt
MWe	Megawatt elektrisch
MWh	Megawattstunde
NEA	Nuclear Energy Agency
NHSI	Nuclear Harmonization and Standardization Initiative
NRHR	Normalbetriebsnachwärmeabfuhr
NNSA	National Nuclear Safety Administration
NOAK	x-tes einer Art
NPM	Kernkraftmodul
NPP	Kernkraftwerk
NSSS	Nukleares Dampferzeugungssystem
O&M	Betrieb und Instandhaltung
ONR	Office of nuclear regulation UK
PAR	Passive autokatalytische Rekombinatoren
PDHR	Primärnachzerfallswärmeabfuhr
PCCS	Passive SicherheitsbehälterSskühlung
PCMWS	Passive Kernwassernachfüllsystem
PLC	Programmierbare Steuerung
PGA	Maximale Bodenbeschleunigung
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PSAR	Vorläufiger Sicherheitsanalysebericht
PBMR	Modularer Kugelhaufenreaktor
RCS	Reaktorkühlsystems
RR	Forschungsreaktor
PWR	Druckwasserreaktor
RAW	Radioaktiver Abfall
RCS	Reaktorkühlsystems
RPC	Reaktorschutzsystem
RPV	Reaktordruckbehälter
RVI	
RWB	Gebäude für radioaktive Abfälle
SAR	Sicherheitsanalysebericht
SDHR	Sekundäres Nachwärmeabfuhrsystem
SG	Dampferzeugers
SLIS	Kleines Leckinjektionssystem
SMR	Kleiner modularer Reaktor
SNF	Abgebrannter Kernbrennstoff
SRP	Standard-Überprüfungsplan
SSE	Sicherheitserdbeben
STUK	Finnische Aufsichtsbehörde
SUJB	Tschechische Aufsichtsbehörde
SWTS	System zur Behandlung fester Abfälle
UAMPS	Utah associated municipal power systems
UK	Vereinigtes Königreich
URD	Betreiber Anforderungsdokument
USD	United States Dollar
USNRC	US Nuclear Regulatory Commission
VDR	Überprüfung des Anbieterdesigns
WTS	Abfallbehandlungssysteme

Im Gegensatz zu früher liegt heute der Fokus bei der Entwicklung von Nuklearprogrammen nicht mehr ausschließlich auf großen Kernkraftwerken, sondern vermehrt auch auf Small Modular Reactors (SMR). Bei diesen handelt es sich, wie der Name schon sagt, um deutlich kleinere („SMR“ sind nach der Terminologie der IAEO, Reaktoren mit einer elektrischen Leistung von bis zu 300 MW) Reaktoren mit einem modularen Design, wodurch eine „fabrikmäßige“ Fertigung und eine begrenzte Montage vor Ort ermöglicht werden soll. Weiters versprechen Entwickler von SMR eine termingerechte Fertigstellung innerhalb des vereinbarten Budgetrahmens und bieten damit eine Lösung für zwei der großen Herausforderungen im Zusammenhang mit großen Kernkraftwerksprojekten. Der Einsatz von SMR würde einen Wechsel vom „projektbasierten“ Modell, bei dem jedes große Kernkraftwerk (KKW) als Gesamtprojekt gebaut wird, zu einem „produktbasierten“ Modell, bei dem SMR Komponenten fabrikmäßig hergestellt und am gewählten Standort (auch an den Standorten bestehender Kernkraftwerke oder Wärmekraftwerke) montiert werden. Während einige SMR neue und/oder verfeinerte Konzepte bieten, bauen andere auf Technologien auf, die bereits seit den Anfängen der Kernenergie eingesetzt werden. Dabei werden verbesserte bzw. modernisierte Konzepte von Leichtwasser-, Gas- und Flüssigmetall gekühlten Reaktoren entwickelt, aber auch Salzschnmelze-, sowie andere Reaktorkonzepte vorgeschlagen. Die SMR werden für eine Reihe unterschiedlicher Verwendungszwecke konzipiert, von solchen, die nur auf die Stromerzeugung ausgerichtet sind, über solche, die Strom und (industrielle Prozess-) Wärme kombinieren, bis hin zu speziellen Konzepten für die Wasserstoffherzeugung, Entsalzung und reine Wärme-SMR.

Im IAEO-Bericht „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments“ [3] aus dem Jahr 2022 werden 83 in Entwicklung befindliche SMR-Modelle aufgeführt, die von Mikro- und sehr kleinen Reaktoren - die für Heizzwecke oder für isolierte kleine Netze/Einrichtungen verwendet werden sollen - bis hin zu ziemlich großen Reaktoren reichen, wie z. B. die 470-MWe-Anlage des britischen Unternehmens Rolls Royce.

Die vermeintliche Erschwinglichkeit und die kurzen Bauzeiten sowie das Versprechen eines hohen Sicherheitsniveaus (viele SMR sollen „rein passiv“ sein, da ihre geringe Größe die Ableitung der Zerfallswärme ohne elektrische Energie ermöglichen soll) führen zu einem wachsenden Interesse an SMR. Zwar befindet sich nur ein SMR im Bau (der chinesische ACP-100) und nur wenige sind in Betrieb (KLT-40S in der Russischen Föderation und HTR-PM in China), doch gibt es zahlreiche Initiativen, einschließlich der Unterzeichnung von Vereinbarungen zur Zusammenarbeit bei der Entwicklung oder sogar dem Einsatz von SMR in vielen Ländern weltweit, darunter bis zu zehn Euratom-Mitgliedstaaten.

Obwohl die Begeisterung groß ist, gibt es berechtigte Bedenken, dass die SMR-Konzepte und ihre Entwickler zu viel versprechen könnten. Es bestehen Bedenken hinsichtlich zu optimistischer Kostenschätzungen, Einschränkungen im Zusammenhang mit dem industriellen Produktionskonzept (welches erhebliche vorgelagerte Investitionen erfordert, um mit der Produktion beginnen zu können), Schwierigkeiten bei den erforderlichen Genehmigungen und bei der Erzeugung radioaktiver Abfälle sowie dem möglichen Mangel an qualifiziertem Personal für den groß angelegten Einsatz. Solange nur ein (westliches) SMR-Konzept (NuScale) die endgültige Designgenehmigung von einer wichtigen westlichen Atomaufsichtsbehörde (USNRC) erhalten hat und bei keinem der westlichen Konzepte mit der Herstellung und dem Bau - selbst der Vorfertigung von Anlagen - begonnen wurde, müssen diese Herausforderungen noch als noch offen angesehen werden.

Da in absehbarer Zeit mit dem Bau von SMR in Euratom-Mitgliedstaaten zu rechnen ist und einige Nachbarländer Österreichs dies in Erwägung ziehen, liegt es im Interesse des BMK, den Wissens- und Informationsstand zu konsolidieren. In diesem Bericht werden die SMR-Konzepte mit höheren Einsatzchancen analysiert und eine kritische Analyse einer Reihe relevanter Fragen vorgenommen, einschließlich der Konstruktionsprinzipien (z. B. Sicherheit, Sicherung und Schutzmaßnahmen), der Genehmigungsfähigkeit, der wirtschaftlichen Parameter und der Kraft-Wärme-Kopplung mit

anderen Quellen sowie anderer Parameter, einschließlich der Erzeugung von radioaktivem Abfall.

Der Bericht gibt einen Überblick über den Stand Ende 2022 und die Aussichten für sechs ausgewählte SMR und geht auf 16 spezifische Themen ein, die für SMR

von besonderer Bedeutung sind. Die Sammlung von Informationen umfasst eine Vielzahl von öffentlichen Quellen, darunter auch die Entwickler von SMR. Die gesammelten Informationen wurden von den Autoren des Berichts einer kritischen Analyse unterzogen.

Der IAEO-Bericht „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments“ (Version 2022) [3] listet 83 verschiedene Modelle von SMR auf, die sich weltweit in Diskussion oder in Entwicklung befinden. Diese reichen von Mikro- und Kleinreaktoren bis hin zu SMR mit einer Nennleistung von fast 500 MWe (was bereits über der IAEO-Definition von SMR liegt: „weniger als 300 MWe“) und decken eine Vielzahl von Technologien ab, von denen einige auf traditionellen Reaktormodellen aufbauen und andere neue Konzepte darstellen. Auch der Entwicklungsstand ist unterschiedlich, von praktisch baufertigen Kernkraftwerken (oder dem im Bau befindlichen ACP100 in China) bis hin zu solchen, die sich in einem frühen Planungsstadium befinden.

Es ist offensichtlich, dass die Analyse im Rahmen dieses Projekts nicht alle bzw. viele der in [3] aufgeführten SMR abdecken kann, und daher eine Auswahl getroffen werden muss. Diese Auswahl könnte nach einer Vielzahl von Kriterien erfolgen, von der Reife des Designs bis zur Neuartigkeit der Technologie. Angesichts des Ziels dieses Projekts und des Interesses des BMK, informiert zu sein und mit Ländern interagieren zu können, die in naher bis mittlerer Zukunft SMR in Betracht ziehen könnten, ist das Hauptkriterium, welche der SMR technisch am weitesten entwickelt und für die Euratom-MS und insbesondere in den Nachbarländern Österreichs von Interesse sein könnten.

Unter Berücksichtigung der Ziele dieses Projekts, basiert die Auswahl an SMR zur Analyse auf folgenden Kriterien:

- Plausibilität der Technologie für einen kurz-/mittelfristigen Einsatz;
- Reife des Designs (vorläufiges Design vollendet);
- Plausibilität des Baus in den Euratom-MS und/oder von diesen bekundetes Interesse;
- Wahrscheinlichkeit des Erhalts einer Baugenehmigung in Euratom -MS mit spezifischen Euratom-MS Nuklearrichtlinien und Normen;

- SMR mit Fokus auf Elektrizität (d.h. SMR zur ausschließlichen Wärmeerzeugung werden ausgenommen).

Die Verfügbarkeit von Finanzmitteln steht nicht im Mittelpunkt dieses Berichts.

Berücksichtigt man die Kriterien einer kurz- oder mittelfristigen Einführung (z. B. die Entscheidung über den Bau bis etwa 2032 und den Betrieb bis 2035), so beschränkt sich die Auswahl der SMR auf wenige Modelle, die entweder Weiterentwicklungen eines Vorgängermodells (z. B. ein BWRX) oder eine seit einiger Zeit laufende Neuentwicklung sind. In diese Kategorie fallen vor allem die Leichtwasserreaktoren (LWR), aber auch einige der gasgekühlten Reaktoren, die eine Weiterentwicklung der in Deutschland erstmals in den 1970er Jahren eingeführten Technologie darstellen.

Die LWR- und insbesondere die Druckwasserreaktoren (DWR) sind die in der EU und international am weitesten verbreitete Nukleartechnologie. Diese Technologie wird für landgestützte KKW, aber auch für den Antrieb von nuklear betriebenen Schiffen (die in ihrer Größe eher SMR entsprechen) verwendet. Viele Elemente dieser Technologie (z. B. Kernausslegung, Brennstoff, Werkstoffe usw.) sind bereits entwickelt und sollen in SMR verwendet werden. Die am nächsten zur Marktreife entwickelten SMR sind LWR. Die LWR-SMR haben im Allgemeinen einen höheren Technologiereifegrad und stellen im Vergleich zu anderen Designs wahrscheinlich die geringsten Herausforderungen dar.

Während gasgekühlte Reaktoren und insbesondere die Hochtemperaturreaktoren für die Industrie von Interesse sind (da Hochtemperatur in industriellen Prozessen verwendet werden könnte, etwa zur effizienteren Herstellung von Wasserstoff), ist es derzeit äußerst unwahrscheinlich, dass diese mittelfristig lizenziert und eingesetzt werden können. Daher beschränkt sich die Liste auf die LWR.

Weltweit und in den Euratom-MS gibt es zahlreiche Aktivitäten zum Einsatz von SMR. Viele der SMR-Entwickler unterzeichneten bereits diverse Absichtserklärungen, Interessensbekundungen und ähnliches. So soll zum Beispiel ein einziger Kernkraftwerksbetreiber in einem Euratom-MS

Absichtserklärungen mit 7 verschiedenen SMR-Entwicklern unterzeichnet haben. Dennoch gibt es im Hinblick auf die Plausibilität der kurz-/mittelfristigen Konstruktion nur wenige SMR-Entwickler, an denen mehrere Euratom-MS interessiert sein dürften.

Angesichts der geopolitischen Erwägungen ist es derzeit und in absehbarer Zukunft sehr schwer vorstellbar, dass ein Reaktor russischer Bauart für den Einsatz in Euratom-MS in Erwägung gezogen wird. Dies gilt bis zu einem gewissen Grad auch für China, obwohl die Fortschritte im chinesischen Nuklearsektor den chinesischen ACP100 (den einzigen fortschrittlichen SMR, der derzeit gebaut wird) zu einer interessanten Alternative machen könnten. Der argentinische CAREM befindet sich zwar im Bau, hat aber nur geringe Leistung und dürfte für eine Stromquelle auf Netzebene kaum Interesse erwecken.

Die Sicherheits- und Genehmigungsanforderungen in Euratom-MS reduzieren die Liste weiter. Es ist davon auszugehen, dass SMR, die außerhalb der Euratom-MS entwickelt wurden, in den Euratom-MS einem sehr komplizierten Genehmigungsverfahren gegenüberstehen würden. Darüber hinaus sind wirtschaftliche, finanzielle und politische Herausforderungen wie technologische Autonomie, Sanktionsregelungen, Zertifikate, Garantien und internationale Nuklearhaftungsinstrumente (einschließlich verschiedener Nuklearhaftungsübereinkommen) zu berücksichtigen.

Sogar die SMR, die „traditionelle“ LWR-Technologien verwenden, setzen verschiedene Konstruktionsmerkmale ein, die in herkömmlichen KKW (Leistung 900–1600 MWe) nicht verwendet wurden. Dazu gehören eine größere Anzahl passiver Systeme und Funktionen, wie etwa Unterwasser-Containment usw., aber auch Konstruktionskonzepte, bei denen die meisten Arbeiten in der Werkshalle anstatt am Standort durchgeführt werden. All dies könnte eine Herausforderung im Genehmigungsverfahren darstellen, insbesondere in

den Euratom-MS, deren Regulierungsgrundsätze präskriptiv sind. Solche Kriterien könnten zu weiteren Schwierigkeiten und sogar zum Ausschluss von SMR-Modellen führen, die Nicht-LWR-Technologien verwenden.

Sehr kleine SMR werden für Anwendungen in abgelegenen Gebieten erwogen, entweder als Wärmequelle oder zur lokalen Stromerzeugung oder beides. Aufgrund der Bevölkerungsdichte und eines gut ausgebauten Netzes dürften diese in keinem der Nachbarländer Österreichs in Betracht gezogen werden.

Da es sich um den einzigen im Bau befindlichen größeren SMR handelt, ist es gerechtfertigt, den chinesischen ACP100 in die Liste aufzunehmen, obwohl die Wahrscheinlichkeit, dass der ACP100 kurz- bis mittelfristig in den Euratom-MS zugelassen und eingesetzt wird, nach Ansicht der Verfasser dieses Berichts äußerst gering ist.

Andere SMR wurden im Bericht nicht berücksichtigt, entweder, weil sie sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, oder weil sie für eine spezielle Anwendung konzipiert sind (z.B. Wärme und Strom in abgelegenen Gebieten), oder weil ihr Einsatz in der EU und ihren Nachbarländern in absehbarer Zeit nicht zu erwarten ist. Die geringen Aussichten für den Einsatz könnten auch auf politische Gründe zurückzuführen sein (z. B. bei russischen Reaktoren).

Von 18 SMR in der IAEO-Publikation [3], die die anfänglichen Kriterien (Technologie und Konstruktionsstand) erfüllen, umfasst die Auswahl der in diesem Projekt zu bewertenden SMR einen Entwurf eines von Frankreich geführten Konsortiums (NUWARD), ein britisches Design (Rolls Royce), zwei US-amerikanische Entwürfe (NuScale, Holtec) und einen aus einer US/japanischen Kooperation stammenden (BWRX-300). Der letzte auf der Liste ist der chinesische ACP100, der, wie oben erwähnt, der einzige größere SMR ist, der sich derzeit in Bau befindet.

Tabelle 1 – Liste der LWR SMR (Auszug aus [3])

Design	Output MW(e)	Typ	Designer	Land	
CAREM	30	Integral PWR	CNEA	Argentinien	
ACP100	125	Integral PWR	CNNC/NPIC	China	
CAP200	> 200	PWR	SPIC/SNERDI	China	des
DHR400	400 MW(t)	PWR (pool type)	CNNC	China	des
HAPPY200	200 MW(t)	PWR	SPIC	China	s Design
NHR200-II	200 MW(t)	Integral PWR	Tsinghua University and CGN	China	des
TEPLATOR™	< 150 MW(t)	HWR	UWB Pilsen & CIIRC CTU	Tschechien	elles
NUWARD™	2 × 170	Integral PWR	EDF	Frankreich	des
IMR	350	PWR	MHI	Japan	elles
i-SMR	170	Integral PWR	KHNP and KAERI	Republik Korea	elles
SMART	107	Integral PWR	KAERI and K.A.CARE	Republik Korea und Saudi Arabien	s Design
RITM-200N	55	Integral PWR	JSC Afrikantov. OKBM, Rosatom	Russische Föderation	tailliertes
VK-300	250	BWR	NIKIET	Russische Föderation	s Design
KARAT-45	45 – 50	BWR	NIKIET	Russische Föderation	Konzeptionelles Design
KARAT-100	100	BWR	NIKIET	Russische Föderation	Konzeptionelles Design
RUTA-70	70 MW(t)	PWR (pool type)	NIKIET	Russische Föderation	Konzeptionelles Design
STAR	10	LWR (pressure tube)	STAR ENERGY SA	Schweiz	Grundlegendes Design
Rolls-Royce SMR	470	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd.	UK	Detailliertes Design
NuScale VOYGR	4/6/12 × 77	Integral PWR	NuScale Power	USA	Teileproduktion gestartet
BWRX-300	270 - 290	BWR	GE-Hitachi	USA und Japan	Detailliertes Design
SMR-160	160	PWR	Holtec International	USA	Fertiges Vorläufiges Design
Westinghouse SMR	5	Integral PWR	Westinghouse Electric Company LLC	USA	Fertiges Konzeptionelles Design
mPower	95	Integral PWR	BWX Technologies, Inc	USA	Konzeptionelles Design
OPEN20		PWR	Last Energy Inc.	USA	Detailliertes Design

Als Ergebnis des Auswahlprozesses wurden 6 SMR zur weiteren Prüfung gewählt. Die Erfüllung der Auswahlkriterien ist in Tabelle 2 dargelegt.

Tabelle 2 – Liste ausgewählter SMR

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Kredibilität der Technologie	PWR	BWR	PWR	PWR	PWR	PWR
Reifegrad des Designs	Teileproduktion gestartet	Detailliertes Design	Grundlegendes Design	Detailliertes Design	Fertiges Vorläufiges Design	Im Bau befindlich
Plausibilität der Konstruktion in der EU	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Teilweise
Rated power (MWe)	77 pro Modul	300	2*170	470	160	125
Wahrscheinlichkeit einer Lizenzierung in der EU	Fortgeschritten	Hoch	Hoch	Hoch	Begründet	Fragwürdig
SMR produziert strom auf Netzebene	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

3

ALLGEMEINE HERAUSFORDERUNGEN FÜR SMR

Obwohl es Beispiele für SMR gibt, die in Betrieb sind (z.B. der auf einem Lastkahn-montierte russische KLT 40S), befindet sich die Mehrheit der SMR aus der IAEO-Liste auf der konzeptionellen Entwicklungsstufe oder in unterschiedlichen Entwurfsphasen. Mehrere SMR-Modelle nähern sich dem Ende der Designphase und einige befinden sich in oder kurz vor dem Eintritt in die Lizenzierungsphase. Während sich einige SMR weitgehend auf zuvor verwendete Technologien stützen, werden verschiedene neue Merkmale und Konzepte - insbesondere passive Systeme und Merkmale - breiter betrachtet. Da sich SMR in einigen Merkmalen von herkömmlichen Reaktoren unterscheiden (z. B. mehrere Module, ein gemeinsamer Kontrollraum für mehrere Einheiten, umfangreicherer Betrieb im Lastfolgemodus usw., aber auch neu entwickelte Komponenten und Herstellungsverfahren), müssen die Regulierungsbehörden weltweit diese Entwürfe vor der Erteilung der Bau- und Betriebsgenehmigungen eingehend prüfen.

In Bezug auf die Lizenzierung ist neben dem ACP100, welcher von der chinesischen Aufsichtsbehörde NNSA zum Bau zugelassen wurde, der einzige SMR, der eine Zulassung (von USNRC auf der Grundlage von US-Regulierungsanforderungen) erhalten hat, der NuScale VOYGR, dessen Design im Januar 2023 die endgültige behördliche Designgenehmigung erhalten hat.

Unter Berücksichtigung der 6 SMR-Typen, die für diesen Bericht ausgewählt wurden, gibt es Standorte, an denen aus heutiger Sicht solche SMR mittelfristig wahrscheinlich gebaut werden könnten. Zu den am weitesten fortgeschrittenen gehören das Carbon Free Power Project (CAPP) in Idaho in den USA (NuScale), Darlington NPP in Kanada (BRWX-300) und wahrscheinlich der Standort Doicești in Rumänien (NuScale). Letzteres soll am Standort eines stillgelegten Kohlekraftwerks errichtet werden und 6 NuScale-Module (462 MWe) beherbergen. Für diesen Standort hat die IAEO ihre allererste Sicherheitsüberprüfung eines für SMR vorgesehenen Standorts abgeschlossen. Darüber hinaus werden weltweit weitere SMR-Projekte in Betracht gezogen, aber das ist nicht Gegenstand dieses Berichts.

Für den Einsatz von SMR in den Euratom-MS und auf internationaler Ebene müssen noch zahlreiche Bedingungen erfüllt werden. Dazu gehören:

- **Technologische Innovation:** Selbst, wenn man sich auf die bekannten physikalischen Prozesse (Reaktordesign) stützt, kommen bei vielen SMR Innovationen in Bezug auf Konstruktion, Werkstoffe und Herstellung hinzu. Diese müssen gründlich analysiert, ihr Sicherheitsniveau überprüft und von den Aufsichtsbehörden akzeptiert werden. Die technologischen Probleme dürften zumindest für die LWR-SMR (6 davon in diesem Bericht bewertet) keine größeren Herausforderung darstellen. Dennoch können fehlende oder unfertige Detailplanung und -konstruktion bei (wahrscheinlich) allen SMR zu Problemen führen;
- **Lizenzierung:** Der Lizenzierungsprozess ist immer noch eine ziemlich große Herausforderung für SMR. Aufsichtsbehörden in Ländern, in denen die SMR eingesetzt werden könnten, werden diese wahrscheinlich einer genaueren Prüfung unterziehen und möglicherweise spezifische Sicherheits- oder andere Anforderungen hinzufügen. Unterschiedliche Sicherheits- oder Betriebsanforderungen in unterschiedlichen Ländern könnten das Konzept des „produktbasierten Modells“ von SMR ernsthaft in Frage stellen. Gegenwärtig sind international harmonisierte Typenzulassungsansätze in der Kernenergieindustrie nicht etabliert und die Aussichten auf eine vollständige Harmonisierung sind zehlich gering;
- **Sicherheitsmaßnahmen, radioaktive Abfälle und andere Themen:** Die SMR müssen, wie andere kerntechnische Anlagen, Sicherheitsanforderungen sowie andere kerntechnische Vorschriften und Bedingungen erfüllen. Einige Entwickler behaupteten, dass SMR weniger radioaktiven Abfall produzieren würden, was nicht korrekt zu sein scheint. Einige Forscher glauben, dass SMR sogar mehr

verbrauchten Kernbrennstoff (SNF) und möglicherweise mehr radioaktiven Abfall produzieren würden. Für SMR müssten Anlagen zur Behandlung radioaktiver Abfälle, Lager für abgebrannte Brennelemente und Stilllegungsmaßnahmen Teil des Geschäfts- und Sicherheitsmodells sein;

- Standardisierung: Der Schlüssel zum Erfolg von SMR liegt in einer großen Anzahl identischer Module, die produziert, gebaut und betrieben werden. Es gibt viele SMR-Designs (mindestens 10 brauchbare), die auf dem Markt konkurrieren werden. Dies würde zu einer höheren Anzahl von Einheitentypen führen und die Standardisierung effektiv beeinträchtigen;
- Lieferkette: Damit ein großflächiger SMR-Einsatz zustande kommt, muss eine robuste industrielle Lieferkette eingerichtet werden. Diese dient nicht nur der Herstellung der Module, sondern auch der Montage, der Brennstoffversorgung sowie spezialisierten Dienstleistungen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Lieferkette noch einige Zeit ein Hindernis für den großflächigen Einsatz bleiben wird, auch weil sie erhebliche vorgelagerte Investitionen erfordert, noch bevor mit dem Bau von SMR-Serienanlagen begonnen werden kann. Zudem müsste die Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal für den Bau und Betrieb der Kraftwerke sichergestellt werden;
- FOAK und NOAK: Viele Entwickler versprechen eine rasche Preissenkung von FOAK (first of a kind) auf NOAK (N-th of a kind). Während die modulare Bauweise und die Serienproduktion von Modulen sicherlich zu einer Preissenkung führen könnte, bleibt das Erreichen der Ziele eine (große) Herausforderung und erfordert eine hohe Gesamtinvestition. Gleiches gilt für die Produktions- und Bauzeiten, wo die in

NOAK erzielten Optimierungen der Schlüssel zum Erreichen dieser Ziele sind;

- Betrieb: SMR sind konzeptionell (angeblich) für einen Lastfolgebetrieb von 0–100 % ausgelegt (EPRI URD-Anforderungen für SMR ist der 24-Stunden-Lastzyklus: 100% → 20% → 100%), wobei niedrige Lasten durch einen Turbinenbypass oder durch Abschaltung einzelner Module (NuScale) schnell erreicht werden könnten. Kontinuierliche Lastschwankungen stellen eine Herausforderung für den Reaktorkern und andere Systeme dar, da thermische Zyklen den Brennstoff beeinträchtigen und thermische Spannungen in der Hauptausrüstung verursachen können;
- Betreiber: SMR könnten von ‚Nicht-Versorgungsunternehmen‘ gebaut und betrieben werden, wo die erforderliche Erfahrung im Nuklearbereich, qualifiziertes Personal usw. fehlen. Dies wird manchmal übersehen und stellt eine zusätzliche Herausforderung dar, da die Aufsichtsbehörden auf robusten Vorkehrungen bestehen werden, wie bei den derzeitigen KKW;
- Wirtschaftlichkeit: Die SMR müssen ihre Versprechungen bezüglich der Bauzeit und der Kosten erst beweisen. Wenn sie nur dazu verwendet werden, im Bedarfsfall Strom in das Netz einzuspeisen, hätten SMR im Falle eines Betriebs mit reduzierter Leistung wahrscheinlich eine ziemlich begrenzte Energieerzeugung, was zu hohen Stromgestehungskosten (LCOE) führen würde. Alternative Nutzungsmöglichkeiten wie Industrierwärme oder Entsalzung würden die Betriebsstunden erhöhen, wären aber nicht an jedem SMR-Standort sinnvoll. Um die versprochene Wirtschaftlichkeit zu erreichen, sind SMR auf eine große Anzahl von gebauten Reaktoren angewiesen.

4 KRITISCHE ANALYSE DER AUSGEWÄHLTEN SMR-MODELLE

Dieses Kapitel enthält eine Zusammenfassung der kritischen Analyse der ausgewählten SMR-Modelle für jedes der 14 verschiedenen Themen, die für die Darstellung des Stands der Entwicklung und der zukünftigen Erwartungen für SMR relevant sind. Diese kritische Analyse wird unterstützt durch Factsheets in

ANNEX 1 und durch eine vergleichende Analyse in ANNEX 2.

Die folgende Tabelle enthält eine kurze Beschreibung und die wichtigsten Schwierigkeiten, die für jedes der sechs untersuchten SMR Konzepte angegangen werden müssen:

NUSCALE		
	PRO	CONTRA
Technologie – PWR VOYGR -12 - 924 MWe (12 NPM) VOYGR-6 - 462 MWe (6 NPM) VOYGR-4 – 308 MWe (4 NPM) Naturumlauf Vorgesehene Lebensdauer 60 Jahre	Bewährte PWR/LWR Technologie	Niedrige sekundärseitige Parameter verringern den Wirkungsgrad
	Modulares Design und Größe/Nennleistung machen den Zusammenbau der Module vor Ort überflüssig	Jedes Stromerzeugungsmodul ist mit eigener Turbine und Systemen ausgestattet, was die Wartungsaktivitäten deutlich erhöht
	Konzept passiver Sicherheitssysteme eliminiert aktive Elemente und verbessert Verlässlichkeit	Neues integriertes Design und Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft
	Kleine Notfallplanungszone (EPZ) (Geländezaun) von USNRC angenommen	Kleine EPZ wird in EU-Staaten mit deutlich höherer Bevölkerungsdichte als an vielen US-Standorten wahrscheinlich nicht genehmigt
	Niedrige CDF- und LERF-Werte durch die Spezifika des Designs (d.h. untergetauchtes Containment und passive Sicherheitssysteme)	Die derzeit behaupteten niedrigen CDF- und LERF-Werte hängen nur mit internen Ereignissen zusammen und könnten daher aufgrund standortspezifischer externer Faktoren erheblich ansteigen
		Potenzial für einen Common Cause Failure (CCF) der Reaktorwarte (MCR), z.B.: durch ein Feuer
		Das Referenzdesign des US NuScale verfügt über sehr geringe Kapazitäten für Management von radioaktiven Abfällen vor Ort
		Im ursprünglichen Lizenzierungsprozess wurde Folgendes nicht behandelt: (1) die Gestaltung der Abschirmwände in bestimmten Bereichen der Anlage; (2) die Möglichkeit eines Containment-Lecks aus dem Überwachungssystem für brennbare Gase und (3) die Fähigkeit der Dampfgeneratorrohre, die Struktur- und Leckageintegrität während Dichtewellenoszillationen im Sekundärflüssigkeitssystem aufrechtzuerhalten

BWRX 300		
	PRO	CONTRA
Technologie – BWR Einzelmodul 300 MWe Naturumlauf Vorgesehene Lebensdauer 60 Jahre	Bewährte PWR/LWR Technologie	
	Natürliche Zirkulation des Kühlmittels eliminiert aktive Elemente und hat positiven Einfluss auf die Zuverlässigkeit	Moduldesign mit relativ hoher Nennleistung würde wahrscheinlich umfangreichere Modulmontagearbeiten vor Ort erfordern
	Inertisierung des Containments mit Stickstoff	Risiko einer Wasserstoffakkumulation bei Unfällen ist noch nicht nachgewiesen (vorbehaltlich einer spezifischen PSAR-Analyse)
	Erweiterte Anwendung passiver Systeme	Obwohl BWRX-300 passive Sicherheitssysteme ohne Notwendigkeit von Wechselstrom anpreist, benötigt der Betrieb des Isolationskondensator System (ICS) zur Reaktordruckbehälter (RPV)-Druckentlastung und Abfuhr der Nachzerfallswärme eine einmalige automatische Aktivierung mit bauseitiger batteriegestützter Gleichstromversorgung der Klasse 1E (vorbehaltlich einer zusätzlichen Prüfung während des Antragsverfahrens), PCCS Design ist noch nicht finalisiert (Licensing Topical Report 2022) Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft

NUWARD		
	PRO	CONTRA
Technologie - PWR Duales Modul - 2*170 MWe Zwangsumlauf (6 Pumpen) Vorgesehene Lebensdauer 60 Jahre	Bewährte PWR Technologie	Niedrige sekundärseitige Parameter verringern den Wirkungsgrad
	Innovatives integriertes Reaktordesign	Neues integriertes Design noch nicht betriebsgeprüft
	Bor- freies Design reduziert die Abwassermenge	Bor- freies Design noch nicht betriebsgeprüft
	Zwangszirkulation verbessert Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern	Zwangszirkulation erfordert aktive Elemente, was einen negativen Einfluss auf die Zuverlässigkeit hat
	Verwendung passiver Sicherheitssysteme	Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft

ROLLS ROYCE SMR		
	PRO	CONTRA
Technologie - PWR	Bewährte PWR Technologie	
Einzelmodul - 470 MWe	Zwangsumlauf verbessert Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern	Zwangsumlauf erfordert aktive Elemente, was einen negativen Einfluss auf die Zuverlässigkeit hat
Zwangsumlauf (3 Pumpen)	Verwendung passiver Sicherheitssysteme	Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft
Vorgesehene Lebensdauer 60 Jahre	Bor- freies Design reduziert die Abwassermenge	Bor- freies Design noch nicht betriebsgeprüft
	Leistungsfähiges Einzelmodul (470 MWe)	Moduldesign mit relativ hoher Nennleistung würde wahrscheinlich umfangreichere Modulmontagearbeiten vor Ort erfordern

HOLTEC SMR-160		
	PRO	CONTRA
Technologie – PWR	Bewährte PWR Technologie	Niedrige sekundärseitige Parameter verringern den Wirkungsgrad
Einzelmodul - 160 MWe	Passives Kühlkonzept mit unbegrenzter passiver Luftkühlung	Das Konzept der passiven Sicherheitssysteme und des “black-start” ist nicht durch den Betrieb nachgewiesen. Das Konzept der unbestimmten passiven Kühlung sollte durch Berechnungen und Tests nachgewiesen werden.
Naturumlauf	Durch die Größe des Druckbehälters sind keine Überdruckventile mehr erforderlich	Neues integriertes Design und Sicherheitsfeatures noch nicht betriebsgeprüft
Vorgesehene Lebensdauer 80 Jahre	Trockene SNF-Lagerung im Designkonzept vorgesehen	Lagerung des SNF im Trockenlager nach der zweiten Wiederbefüllung, wie von HOLTEC behauptet, muss noch weiter analysiert werden, da Nasslagerungszeit kürzer ist als in allen bekannten Designs
	Geplante Lebensdauer von 80 Jahren	Lebensdauer von 80 Jahren wäre erster Präzedenzfall einer so langen Lebensdauer in der Designphase, was Herausforderungen bei der Lizenzierung schaffen könnte

ACP100		
	PRO	CONTRA
Technologie – PWR Einzelmodul - 125 MWe Zwangsumlauf (4 Pumpen) Vorgesehene Lebensdauer 60 Jahre	Bewährte PWR Technologie	Niedrige sekundärseitige Parameter verringern den Wirkungsgrad
	Neues integriertes Design	Neues integriertes Design und Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft
	Konzept der passiven Kernkühlung, passiven Wärmeabfuhr, passiven Containment-Kühlung verbessert Sicherheit und Zuverlässigkeit	
	Intervention des Betreibers für 72 Stunden nach Unfall nicht notwendig	Resultate der Sicherheitsanalyse sind nicht verfügbar
		Keine Erfahrung bei der Lizenzierung chinesischer KKW/Nukleareinrichtungen in der EU Beinahe keine öffentlich zugänglichen technischen Informationen

4.1 GRUNDKONZEPT DER SMR

Alle für die Analyse ausgewählten SMR-Typen sind LWR, was die historischen Trends widerspiegelt, bei denen die LWR (und tatsächlich PWR) die Reaktortechnologie dominieren. Diese Technologie bietet wahrscheinlich das günstigste Verhältnis von Nutzung und Komplexität, insbesondere, wenn der Fokus auf der Stromerzeugung liegt (für andere Anwendungen wie Wärmeerzeugung könnten andere Modelle spezifische Vorteile haben). Alle 6 ausgewählten SMR sind Standard-LWR in Bezug auf die Reaktorphysik und das grundlegende Design des Reaktorkühlsystems.

In Wirklichkeit ist nur NuScale ein modulares Konzept, bei dem ein Kunde 4, 6 oder 12 Module wählen kann. NUWARD soll zwei Module in einer Anlage haben. Alle anderen sind einzelne (kleine) autarke Einheiten (obwohl es möglicherweise einige gemeinsame Systeme und Funktionen wie die Abfallverarbeitung gibt), die mehrmals am selben Standort gebaut werden könnten.

Der Hauptfokus aller überprüften SMR liegt auf der Stromerzeugung, wobei alle die volle Flexibilität für den Betrieb in einem Netz mit erneuerbaren Energien über den gesamten Leistungsbereich beanspruchen.

Während dies mit der Turbinen-Bypass-Funktion möglich sein könnte (die auch für NuScale und wahrscheinlich für andere vorgesehen ist), könnte der Betrieb im Lastfolgemodus an einem bestimmten Punkt aufgrund der Einschränkungen der Reaktorphysik, d.h. dem nuklearen Kraftstoff, schwierig, wenn nicht sogar unmöglich werden. Dasselbe gilt für die Anfahr- oder Herunterfahrgeschwindigkeiten. Einige SMR-Modelle erwähnen ausdrücklich EPRI-Lastfolgeanforderungen (100 % -> 20 % -> 100 % innerhalb eines Tages).

Alle SMR Modelle führen beabsichtigte zusätzliche Anwendungen (also zusätzlich zur Stromerzeugung) wie Wärmeerzeugung oder Stromproduktion für die Wasserstofferzeugung auf, und einige führen Meerwasserentsalzung an. Es ist jedoch nicht klar, ob es bestimmte Konstruktionsmerkmale gibt, die diese Typen für zusätzliche Anwendungen vorteilhaft machen würden.

4.2 SMR-ENTWICKLER UND IHRE ERFahrung, GESETZTE ZIELE

Die Entwickler und Konstrukteure von 3 der 6 analysierten SMR-Modelle sind Unternehmen mit Erfahrung bei der Entwicklung und/oder Konstruktion von Reaktoren (NUWARD umfasst französische PWR

Erfahrung; RR SMR hat als Rolls Royce (militärische) Schiffsreaktorerfahrung; GE und Hitachi stehen hinter BWRX, welches ein kleines Modell der BWR-Linie darstellt). NuScale, das sich ausschließlich den SMR widmet, hatte keine Erfahrung mit der Technologie von Kernkraftwerken und hat bisher noch nie einen funktionierenden Kernreaktor produziert. Es ist eine speziell gegründete Firma mit dem Ziel, neue Kernreaktoren zu bauen. Holtec ist ein Unternehmen mit langjähriger Erfahrung im Kernbrennstoffkreislauf, hauptsächlich in der Abfallbehandlung und Stilllegung. Alle haben ein realistisches Potenzial, einen SMR zu entwickeln, der ein brauchbares Produkt wäre, obwohl die Autoren dieses Berichts glauben, dass RR SMR und Holtecs SMR 160 vor größeren Herausforderungen stehen werden als die anderen 4, einschließlich einer weniger sicheren Finanzierung. Es ist zu erwarten, dass der RR SMR auf die Finanzierung der britischen Regierung zurückgreifen wird, aber dies könnte möglicherweise nicht ausreichen, wenn keine anderen Partner gefunden werden, die bereit wären, die Entwicklung zu finanzieren.

Ein neues Reaktordesign müsste das Engagement/die Unterstützung mehrerer Kunden erhalten, um mit der Schaffung der industriellen Basis fortfahren zu können. Dies wird wahrscheinlich auch ein erhebliches öffentliches Engagement erfordern, um Investitionsstabilität zu gewährleisten, oder sogar eine direkte Beteiligung, z.B. durch öffentliche (Ko-)finanzierung.

In Bezug auf den Entwicklungszeitplan befindet sich bisher nur ACP 100 in Bau. NuScale ist sehr wahrscheinlich in der Lage, innerhalb der nächsten paar Jahre ein detailliertes Design zu liefern, und ist auf dem Weg, Produktionsstätten zu identifizieren/errichten. Der Bau von NuScale in den USA könnte voraussichtlich innerhalb von 2-3 Jahren beginnen. Allerdings steht der Zeitplan auf dem Prüfstand und wurde bereits mehrfach verschoben.

Die anderen analysierten SMR-Modelle sind in der Entwicklung des Designs weniger fortgeschritten, wobei BWRX weiterentwickelt ist als andere. Es ist davon auszugehen, dass NUWARD das detaillierte Design vor 2030 abschließen kann. Für SMR160 und RR SMR schätzen die Autoren des Berichts, dass alles von der Höhe der Finanzierung und der Fähigkeit, Kunden zu gewinnen, abhängen wird.

4.3 DESIGN, TECHNOLOGIE UND REIFEGRAD

Alle analysierten SMR sind im Kern LWR, die bekannte Technologien für den Reaktor und das Kernkühlsystem (RCS) verwenden, sodass ihr Design eher als evolutionär denn als revolutionär angesehen werden kann.

Alle ausgewählten SMR wenden ein Konzept an, dass Restwärme durch passive Systeme entfernt, was zu der Behauptung führt, dass diese sicherer sind als herkömmliche KKW, die ein aktives System zur Wärmeabfuhr benötigen. Passive Systeme sind gleichzeitig ein Vorteil und ein potenzielles Problem, da passive Systeme ihre eigenen Herausforderungen haben, z.B. nur durch physikalische Kräfte angetrieben zu werden, potenzielle Schwachstellen, usw. (das Testen und die Genehmigung von passiven Systemkonzepten gehören zu den Herausforderungen beim Genehmigungsprozess). Obwohl die Designdetails für die meisten SMR nicht verfügbar sind, behaupten alle, fortschrittliche Technologien zu verwenden und sich auf passive Funktionen zu verlassen.

Hinsichtlich der Herausforderungen und unter Berücksichtigung der verfügbaren Informationen (die für eine gründliche Analyse nicht ausreichen) ist nicht zu erwarten, dass es zu viele Herausforderungen bei den verwendeten Materialien geben wird. Es können einige Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Design auftreten, hauptsächlich im Zusammenhang mit der Sicherstellung, dass das vorgeschlagene Design den Sicherheitsanforderungen entspricht.

Schwierigkeiten könnten bei der Herstellung der Komponenten sowie bei der Konstruktion/Inbetriebnahme aller First-Of-A-Kind-SMR im Rahmen der Überprüfung erwartet werden, insbesondere im Hinblick auf das Erreichen der angestrebten Qualität, des Zeitplans und der Kosten. ACP100 könnte diese Probleme gelöst haben, obwohl der Mangel an verfügbaren Informationen eine Bewertung ausschließt, ob es Probleme bei der Errichtung gibt.

Es muss betont werden, dass der Bau eines Prototyps oder eines FOAK immer noch nicht bedeutet, dass die Herstellungsschwierigkeiten, die mit einer Serie von SMR-Einheiten verbunden sind, nicht ausgeschlossen werden können.

4.4 LIZENZIERUNG

Der Genehmigungsprozess ist eine Herausforderung für den Bau traditioneller Kernkraftwerke und wird voraussichtlich ebenso eine bedeutende Herausforderung für SMR sein. Bisher wurde der ACP100 bewilligt und befindet sich im Bau, während der NuScale SMR die Designgenehmigung von der USNRC erhalten hat. BWRX und SMR 160 reichten den Vorantrag auf Lizenzierung beim USNRC ein. BWRX wird derzeit von der kanadischen Aufsichtsbehörde aktiv überprüft. RR SMR reichte den Antrag für die generische Designprüfung bei der britischen Regulierungsbehörde ein, und NUWARD hat einen vergleichbaren Antrag bei der französischen ASN eingereicht. Bemerkenswert ist eine Vereinbarung zwischen ASN, SUJB und STUK, eine gemeinsame behördliche Vorüberprüfung des NUWARD-Designs durchzuführen.

Die Standards und Kriterien, nach denen der ACP 100 lizenziert wurde, sind nicht öffentlich verfügbar, obwohl zu erwarten ist, dass diese mit denen großer KKW vergleichbar sind, die sich in China im Bau befinden. Für NuScale erkannte die USNRC, dass spezifische Designlösungen nicht unter die Anforderungen des „Standard Review Plan“ für große KKW fallen würden, und entwickelte daher den „Design Specific Review Standard“ (DSRS), der die Anforderungen in einigen Bereichen neu definiert. Es ist zu erwarten, dass auch für die meisten anderen SMR geänderte Genehmigungsanforderungen erforderlich wären.

Auf internationaler Ebene hat die EU SMR pre-Partnership einen Workstream zur Lizenzierung eingerichtet, der einige der Herausforderungen diskutiert. Die IAEA hat über ihre Nuclear Harmonization and Standardization Initiative (NHSI) das Forum der SMR-Regulierungsbehörden eingerichtet, um die Lizenzierung auf internationaler Ebene zu diskutieren.

Es ist davon auszugehen, dass die Lizenzierung für SMR in den Euratom-MS weiterhin eine Herausforderung bleiben wird, da einige neuartige Konstruktionslösungen, Materialien und Herstellungsverfahren möglicherweise Änderungen bei den Akzeptanzkriterien erfordern. Während derzeit einige vorläufige Genehmigungsprüfungen durchgeführt werden (während das detaillierte Design entwickelt wird), wird die eigentliche Herausforderung entstehen, wenn das eine oder

andere SMR-Modell eine Baugenehmigung beantragt. Zu den wahrscheinlichen Herausforderungen gehören das passive System, unterschiedliche Konstruktionskonzepte des Containments, gemeinsame Systeme und/oder der MCR zwischen den Modulen/Blöcken, einige spezifische Konstruktionsmerkmale (z.B. fehlende Borinjektion) sowie die Herstellungs- und Konstruktionsprozesse, Qualitätskontrolle während der Herstellung, usw. Die zu erwartenden genehmigungsrechtlichen Herausforderungen bestehen auch im Zusammenhang mit der Qualifikation der Betreiber und der Betriebsorganisation.

Es wird viel über die Harmonisierung der Anforderungen und insbesondere die gegenseitige Anerkennung der regulatorischen Überprüfungen diskutiert. Dies ist wahrscheinlich eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass die SMR international in großer Zahl eingeführt werden, aber nach Ansicht der Autoren dieses Berichts bleibt dies ein relativ langfristiges Ziel, das nicht leicht zu erreichen sein wird. Es wird eher erwartet, dass die Erstzulassung der SMR von den nationalen Regulierungsbehörden und aufgrund der nationalen Vorschriften in jedem Land erteilt wird.

4.5 KONSTRUKTION UND EINSATZ

Das Konzept von SMR ist, dass diese modular aufgebaut sind und eine große Anzahl von Modulen gebaut wird, die (zu einem größeren Teil) industriell hergestellt und dann vor Ort zusammengebaut werden. Ein solches Konzept hat Vorteile, von der kürzeren Terminplanung bis hin zur Qualität, da die Qualität und der Zeitaufwand für die Produktion viel besser kontrolliert werden könnten, wenn mehrere ähnliche Module industriell hergestellt werden. Es ist jedoch nicht klar, inwieweit, insbesondere größere SMR, in ein solches Konzept passen würden. Es wird erwartet, dass NuScale-Module mehr oder weniger transportabel sind, aber der „Behälter“ von NUWARD, der das RCS enthält, muss vor Ort gebaut werden.

Alle SMR-Konzepte gehen davon aus, dass die Bauzeit am Standort auf einige Jahre verkürzt wird, deutlich kürzer als bei herkömmlichen Kernkraftwerken, hauptsächlich aufgrund der Tatsache, dass SMR im Werk gebaut und getestet und vor Ort nur zusammengebaut würden.

Aus Sicht der Autoren dieses Berichts bleibt die Herausforderung des Bauzeitplans bestehen,

insbesondere für die größeren SMR. Erst wenn Erfahrungen aus dem Bau mehrerer SMR-Einheiten gesammelt wurden, kann die tatsächlich benötigte Zeit für den Bau zuverlässig abgeschätzt werden.

Ein schrittweises Hinzufügen von „SMR-Modulen“ an einem Standort wäre für große SMR wie RR SMR oder BWRX wahrscheinlich nicht sinnvoll, da diese tatsächlich eigenständigen Einheiten und keine Module sind. Anders bei NuScale, wo Reaktormodule in einem Gehäuse untergebracht sind, sodass die Anzahl der Module vor Beginn des Baus festgelegt werden muss.

4.6 KOMPLEMENTARITÄT DES BETRIEBS MIT ERNEUERBAREN

Alle SMR-Entwickler bieten als eines der wichtigen Features den Betrieb im Tandem mit erneuerbaren Energien an. Dies basiert auf der Fähigkeit zum schnellen Hoch- und Herunterfahren der Leistung sowie auch zum (Dauer- oder verlängerten) Betrieb in einem breiten Bereich von Leistungsstufen. Einige SMR zitieren ihre Fähigkeit, (kontinuierlich) bei jeder Leistungsstufe von 20 % voller Leistung bis 100 % voller Leistung zu arbeiten. Darüber hinaus betont NuScale insbesondere seine Modularität (d. h. bis zu 12 Module mit jeweils 77 MWe) sowie die Verfügbarkeit eines Turbinen-Bypass, was die Behauptung unterstützt, dass es auf jedem Leistungsniveau (d.h. 0 bis 100 % Leistung) betrieben werden könnte.

Fähigkeit zum Betrieb auf sehr niedrigem Leistungsniveau, z.B. 20 % ist im Vergleich zu traditionellen Kraftwerken eine Verbesserung, die SMR zu einer besseren Ergänzung zu erneuerbaren Energien machen würde. Bei Designs mit vielen kleinen Modulen (z. B. NuScale) könnten diese einzeln betrieben oder abgeschaltet werden. Ein Turbinen-Bypass mit voller Kapazität macht eine breitbandige Lastfolge leichter erreichbar.

Während der kleinere Reaktorkern für variable Lasten von Vorteil ist, würden die physikalischen Einschränkungen eines LWR-Kerns nach Ansicht der Autoren dieses Berichts immer noch die Möglichkeit des Stop-and-Go-Betriebs sowie die Hoch- und Herunterfahrrate einschränken. Es ist auch wahrscheinlich, dass die Konstruktionsparameter und Materialeigenschaften einige Einschränkungen in Bezug auf die Anzahl der Transienten hinzufügen,

denen eine Anlage ausgesetzt sein könnte (obwohl diese wahrscheinlich viel höher wäre als bei großen Anlagen, die hauptsächlich für den Dauerbetrieb mit voller Leistung ausgelegt sind). Ein längerer Betrieb auf niedrigem Leistungsniveau könnte sich negativ auf den Kern und die Brennstoffnutzung auswirken, was sowohl die Kosten als auch den Bedarf für die Entsorgung von SNF und radioaktivem Abfall erhöht.

Der Betrieb an einem Turbinenbypass bringt Vorteile, insbesondere wenn die gesamte Leistungsumwandlungsanlage von vornherein darauf ausgelegt ist. Der Turbinen-Bypass bietet den Vorteil, dass er eine schnelle Erhöhung und Verringerung des Leistungspegels ermöglicht (d.h. die Netzstabilität unterstützen kann), während er die notwendige Leistungsoszillation des Reaktors begrenzt. Theoretisch könnte ein solcher Betrieb wahrscheinlich für lange Zeit bei jedem gewünschten Leistungsniveau aufrechterhalten werden. Wenn der Reaktor jedoch mit einer höheren Leistung als benötigt betrieben wird, gibt das Stromumwandlungssystem (durch das Kühlsystem) eine große Menge an Energie an die Umgebung ab, anstatt diese Energie produktiv zu nutzen. Ein derartiger Betrieb erhöht deutlich die Kosten des Betriebs eines SMR, was dazu führt, dass der erzeugte Strom teurer ist.

4.7 KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

Alle 6 in diesem Bericht behandelten SMR können im Kraft-Wärme-Kopplungsmodus arbeiten, entweder zur Erzeugung von Wärme, zur Unterstützung der Erzeugung von Wasserstoff, zur Entsalzung oder für andere Zwecke. Einige SMR-Entwickler betonen diese Fähigkeiten, wenn sie über die Vorteile der SMR sprechen. Während die Nutzung der Abwärme (d. h. der Wärme, die nach der Turbine verfügbar ist, wenn der Dampf zur Stromerzeugung verwendet wurde) oder der Wärme direkt von den Dampfgeneratoren den Gesamtwirkungsgrad einer Anlage erhöht, sind die LWR aufgrund ihrer relativ niedrigen Temperatur, nicht breit einsetzbar (Hochtemperaturwärme aus Gasreaktoren ist viel nützlicher für die Industrie). Nichtsdestotrotz könnte die Wärme weiterhin für die industrielle Beheizung verwendet werden, wie auch aus jedem thermischen Kraftwerk, obwohl sie im Vergleich zu anderen industriellen Beheizungsoptionen keinen wesentlichen Vorteil bietet und für die SMR wahrscheinlich keine bedeutende Einnahmequelle darstellt.

Abgesehen von der Erwähnung einer Möglichkeit zur Kraft-Wärme-Kopplung liefern die analysierten SMR-Konzepte nur wenige Details oder Besonderheiten. Der ACP100 liefert einige konkrete (Entwurfs-)Zahlen wie z.B.: 125 MWe Stromerzeugung; Dampf- und Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung (300 t/h Dampf bei 290 Grad C und 62,5 MWe); oder alternativ destilliertes Wasser und Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung (100.000 Tonnen Wasser pro Tag und 80 MWe).

In Bezug auf die Kraft-Wärme-Kopplungskapazitäten gibt es keinen spezifischen Vorteil von SMR gegenüber großen Reaktoren oder thermischen Anlagen. Es kommt ganz auf die Auslegung des Energieumwandlungssystems an.

In Hinblick auf die Erzeugung von Wasserstoff wären Hochtemperaturgasreaktoren (HTGR) mit ihrer höheren Temperatur im Vorteil, da sich die Wirksamkeit der Hochtemperaturelektrolyse bei den hohen Temperaturen, die diese Reaktoren erzeugen könnten, verbessert. In Bezug auf einen strombetriebenen Elektrolyseur gäbe es keinen entscheidenden Vorteil eines SMR im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsanlagen. Im Prinzip würde der überschüssige Strom, der nicht vom Netz benötigt wird, in einem Elektrolyseur verwendet. Die Effizienz des Prozesses ist direkt proportional zum verfügbaren Strom. Der Betrieb in einem intermittierenden Modus, in dem ein SMR das Netz unterstützen würde, wenn keine erneuerbaren Energien verfügbar sind, und den Elektrolyseur unterstützen würde, wenn anderer Strom verfügbar ist, würde wahrscheinlich zu relativ wenigen Betriebsstunden bei voller Kapazität des Elektrolyseurs führen. Obwohl eine solche Kopplung möglich ist, ist sie wahrscheinlich nicht sehr effizient, vor allem, weil der Elektrolyseur selten mit hoher Kapazität arbeitet.

4.8 BRENNSTOFFKREISLAUF

Alle sechs überprüften SMR-Konzepte verwenden einen standardmäßigen LWR-Brennstoff in einer typischen LWR-Konfiguration (z.B. Brennelemente in einer 17x17 Konfiguration) mit abbrennbaren Absorbern. Die Anreicherung von bis zu 5 % und der bis zu 24-monatige Brennstoffzyklus sind vergleichbar mit modernen Kernkraftwerken in Standardgröße. Aufgrund der geringeren Leistung des Kerns sind SMR-Brennelemente typischerweise deutlich kürzer dimensioniert. Über die Verwendung von

unfalltolerantem Brennstoff wurden keine Informationen veröffentlicht.

NUWARD und NuScale könnten teilweise mit MOX beladen werden, während sich keines der anderen SMR-Konzepte in dieser Hinsicht äußert. Angesichts einer ziemlich standardmäßigen Konstruktion und Geometrie des Kerns kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Brennstoffe verwendet werden könnten (allerdings muss das Reaktorkontrollsystem bei MOX-Brennstoff auf den Umgang mit der überschüssigen Reaktivität ausgelegt sein).

Im Gegensatz zu modernen großen KKW weisen einige der untersuchten SMR (z. B. NuScale, HOLTEC-160) einen etwas geringeren Abbrand auf, was bedeutet, dass die Erzeugung von SNF höher ist als bei einem Reaktor mit höherem Abbrand. Abgesehen davon unterscheiden sich die mit dem Brennstoff und dem Brennstoffkreislauf zusammenhängenden Probleme für SMR nicht wesentlich von denen für herkömmlichen KKW (mit hoher Nennleistung – 900-1600 MWe).

4.9 SICHERHEIT

Eine der Hauptversprechen der SMR-Entwickler ist, dass das Sicherheitsniveau höher ist als bei herkömmlichen Reaktoren, sogar als bei GEN III-Anlagen. Die geringere Größe des Kerns bedeutet, dass weniger Wärme abgeführt und an die Umgebung abgegeben werden muss (ultimative Wärmesenke). Dies führt dazu, dass alle untersuchten SMR-Modelle die Möglichkeit einer vollständigen Restwärmeabfuhr durch passive Systeme versprechen. Obwohl passive Systeme im Allgemeinen als zuverlässiger angesehen werden können als aktive Systeme (z.B. weil kein Strom benötigt wird), müssen diese in jeder Betriebsart gründlich analysiert werden, um festzustellen, ob dies wirklich der Fall ist.

Nach den vorliegenden Informationen werden die Defence-in-Depth Ebenen in allen analysierten SMR beibehalten, obwohl zumindest einige der SMR nicht über ein Containment von der gleichen Stärke wie die GEN-III-Anlagen verfügen würden. So hat beispielsweise das USNRC bei der Prüfung der Genehmigung von NuScale SMR eine Ausnahme von der ansonsten für alle Kernkraftwerke in den USA geltenden Regelung zum Beton-Containment gemacht.

Abgesehen von NuScale und ACP100 ist die Liste der Auslegungstörfälle und -gefahren nicht verfügbar. Alle SMR Modellen behaupten eine seismische Auslegung für mindestens 0,3 g PGA und für einige sogar 0,5 g. Es wird dennoch angenommen, dass ein vollständiges Spektrum interner und externer Ereignisse (mit möglicher Ausnahme eines Flugzeugabsturzes) im detaillierten Design erfasst wird.

Der Sicherheitsanalysebericht (SAR) ist für NuScale und ACP100 verfügbar und wurde im Rahmen des Genehmigungsverfahrens überprüft, nicht jedoch für die anderen SMR. PSA-Studien sind nicht öffentlich zugänglich, obwohl die probabilistischen Ziele in Bezug auf CDF und LERF veröffentlicht wurden. ACP100 behauptet, eine PSA-Studie für volle Leistung und interne Ereignisse durchgeführt zu haben, die „verifiziert“ wurde.

Nur für NuScale wurde der Quellterm für schwere Unfälle von der USNRC (und vermutlich für ACP100 von der chinesischen Regulierungsbehörde) berücksichtigt. Für andere SMR ist der Quellterm (noch) nicht verfügbar. Das Kerninventar liefert die Obergrenze für den Quellterm, aber ohne die Analyse des Unfallverlaufs ist nicht wirklich bekannt, was letztendlich außerhalb des Standorts freigesetzt würde. Dennoch hat die USNRC in ihrem Genehmigungsverfahren eine deutlich kleinere EPZ für die NuScale akzeptiert, die für die USA auf das Anlagenareal beschränkt ist. Nach Ansicht der Verfasser dieses Berichts würde dieser Ansatz in den Euratom-MS nicht akzeptiert werden, da die derzeitigen Vorschriften und Normen für die nukleare Sicherheit der Euratom-MS keine Ausnahmen oder spezifische Bestimmungen zur Verringerung der EPZ für SMR vorsehen.

4.10 STANDORTANFORDERUNGEN

Die Standortanforderungen für SMR sind, zumindest in der EU, sehr wahrscheinlich ähnlich wie für herkömmliche Anlagen, mit den üblichen Ausschlusskriterien, Planungszonen usw. Daher ist es praktisch sicher, dass die ersten SMR in der EU an bestehenden Kernkraftwerksstandorten gebaut werden (obwohl das NuScale-Kraftwerk, das sich in Rumänien in einem fortgeschrittenen Planungsstadium befindet, an einem stillgelegten Standort für ein Wärmekraftwerk errichtet werden soll).

Zumindest einige SMR-Entwickler behaupten, und es wurden mehrere Konzepte veröffentlicht, dass die SMR zum „Repowering“ alter thermischer Kraftwerke verwendet werden könnten, wobei ein Teil der bestehenden Infrastruktur genutzt würde. Eine solche Möglichkeit, die viel mehr potenzielle Standorte für SMR eröffnen würde, wird durch die Zustimmung des USNRC unterstützt, dass die Notfallplanungszone dem Anlagenstandort (d.h. dem Zaun der Anlage) entspricht. In den meisten Euratom-MS ist es aber schwer vorstellbar, dass ein solches Konzept akzeptiert wird.

Was den Zugang zum Standort anbelangt, so sind auch hier die Anforderungen aufgrund der geringeren Größe der SMR und ihrer Module einfacher, da es keine (sehr) großen Komponenten gibt, die transportiert und aufgestellt werden müssen. Für den ACP100, dessen Stahlsicherheitsbehälter aus zwei Hälften besteht, ist jedoch ein sehr großer Kran für die Errichtung erforderlich. Die Verwendung von vormontierten Modulen verringert den Arbeitsaufwand auf der Baustelle und vereinfacht die Organisation der Baustelle erheblich.

Was die Größe eines Standorts für einen oder mehrere SMR angeht, so gibt es, abgesehen von Rendering und Infografiken, nur wenige Informationen über die benötigte Fläche. Einige Informationen sind in Anhang 1 für jeden untersuchten SMR enthalten. Angesichts ihres modularen Aufbaus, mehrerer Reaktoren und Turbinen, ist davon auszugehen, dass die benötigte Standortfläche pro installierter Leistungseinheit (in MW) etwas größer sein wird als für ein herkömmliches KKW (mit hoher Nennleistung – 900-1600 MWe).

4.11 RADIOAKTIVER ABFALL

In Fachkreisen entwickelte sich eine Kontroverse bezüglich der Erzeugung radioaktiver Abfälle durch SMR. Einige sind der Meinung, dass SMR mehr radioaktiven Abfall (pro erzeugter Stromeinheit) erzeugen würden als die traditionellen KKW, während die SMR-Entwickler etwas Anderes behaupten. Die Fakten sind „zwiespältig“, und es ist noch nicht offensichtlich, welche Seite Recht hat. Es ist unstrittig, dass die SMR mehr SNF erzeugen werden, hauptsächlich wegen des geringeren Abbrands des Brennstoffs. Außerdem würde der intermittierende (Lastfolge-)Betrieb eines SMR den Abbrand sogar noch verringern und den SNF erhöhen.

Mehrere SMR-Module, die erforderlich sind, um die gleiche Energiemenge wie ein großes Kernkraftwerk zu erzeugen, würden wahrscheinlich zu einem höheren Aufkommen an radioaktivem Abfall führen. Die Zusammensetzung des erzeugten Abfalls dürfte sich nicht wesentlich von der eines großen LWR unterscheiden und feste, flüssige und gasförmige Anteile enthalten.

Die SMR-Entwickler weisen auf das optimierte Design und die verwendeten Materialien hin, die zu einem geringeren Abfallaufkommen führen würden. Einige der SMR verwenden eine Bor-freie Technologie, die zu einer Verringerung des Betriebsabfalls führen kann, da keine borhaltigen Flüssigkeiten verarbeitet werden müssen. Außerdem verringert ein längerer Brennstoffzyklus im Allgemeinen die Menge der anfallenden Betriebsabfälle im Vergleich zu einem kürzeren Zyklus, da ein Großteil der Betriebsabfälle während der Stillstandszeiten anfällt.

Nach Ansicht der Autoren dieses Berichts ist ein höherer Anfall von SNF im Vergleich zu den großen GEN-II- (und GEN-III-) Reaktoren wahrscheinlich. Dies wird sich auch auf die Lagerung vor Ort und letztendlich auf die Entsorgungskosten von SNF auswirken. Hinsichtlich der radioaktiven Betriebsabfälle könnte erwartet werden, dass eine größere Anzahl kleinerer Module (bis zu 12 Reaktormodule, von denen jedes für den Brennelementwechsel geöffnet werden müsste) mehr Abfall erzeugt als ein einzelner Brennelementwechsel an einem großen Reaktor. Die versprochene Optimierung von Betrieb und Wartung sowie der Einsatz neuer Materialien könnten jedoch einen gegenteiligen Effekt haben.

Keine der derzeit verfügbaren Informationen und Daten liefern harte Parameter in Bezug auf die Erzeugung radioaktiver Abfälle bei SMR. Daher können gegenwärtig keine genauen Schätzungen vorgenommen werden.

Was die Einrichtungen für die Verarbeitung und Lagerung radioaktiver Abfälle an den Standorten betrifft, so dürften diese ebenfalls mit denen großer Reaktoren vergleichbar sein. Es wird davon ausgegangen, dass alle Systeme und Strukturen, die für die Sammlung, Lagerung, Verarbeitung und Verpackung (einschließlich Volumenminimierung) radioaktiver Abfälle in einer großen Anlage erforderlich sind, auch an jedem SMR-Standort benötigt werden. Dies könnte als (großer) Nachteil in Fällen gesehen werden, in denen z.B. eine oder eine kleine Anzahl von SMR an einem Standort gebaut wird.

Bei einer großen Zahl von Standorten wird dieser Nachteil geringer, verschwindet aber möglicherweise nicht.

Die Lagerung von SNF ist ein weiteres Problem, bei dem mehr verbrauchte SNF-Elemente natürlich mehr Platz/größere Anlagen erfordern würden. Kürzere Brennelemente (Länge) helfen etwas, aber letztlich ist die Menge an SNF entscheidend.

4.12 RECHTLICHE FRAGEN

Einige SMR-Entwickler und Befürworter haben die SMR als proliferationssicher angepriesen, da die SNF nicht abgezweigt und für böswillige Zwecke verwendet werden können. Dies mag bis zu einem gewissen Grad für SMR gelten, die Kernbrennstoff, z.B. in Form von Graphitkugeln, verwenden. Für LWR besteht dieser Vorteil nicht, und alle hier untersuchten SMR unterliegen voraussichtlich den gleichen Sicherheitsanforderungen und -vorkehrungen wie alle anderen Kernkraftwerke.

Bei den 6 untersuchten SMR dürften die Probleme des geistigen Eigentums oder die Technologieversorgung keinen begrenzenden Faktor darstellen. Obwohl nicht alle Details bekannt sind und auch nicht verfügbar sein werden, bevor das detaillierte Design abgeschlossen ist, ist es ziemlich wahrscheinlich, dass jeder der 6 Anbieter über seine eigene Technologie verfügen wird, um in der Lage zu sein, einen SMR herstellen und bauen zu können. Es ist auch zu erwarten, dass die Entwickler verschiedene unterstützende Ausrüstungen und Systeme erwerben werden, einschließlich, falls erforderlich, ihrer Technologie.

4.13 WIRTSCHAFTLICHE PARAMETER

Zuverlässige Prognosen zu den Kosten von SMR sind derzeit nicht öffentlich verfügbar. Es gibt einige allgemeine Schätzungen (weitere Einzelheiten dazu in einem separaten Kapitel), aber keiner der SMR-Konstrukteure hat eine solide und fundierte Kostenschätzung vorgelegt. Alle SMR-Anbieter behaupten, in Bezug auf die LCOE-Kosten mit den erneuerbaren Energien konkurrenzfähig zu sein.

Dennoch muss betont werden, dass der größte zu erwartende Beitrag zur Kostensenkung für SMR die industrielle (Serien-)Produktion von SMR-Komponenten und -Modulen wäre, was einen

erwarteten wettbewerbsfähigen Preis und relativ kurze Bauzeiten und daraus resultierende niedrige Kapitalkosten bedeuten würde. Beides ist jedoch in der Prototypen- oder Frühphase der Einführung eines SMR-Modells eher unwahrscheinlich als in späteren Phasen, wenn mehrere (ähnliche) Exemplare bestellt, hergestellt und gebaut werden. Dies bedeutet, dass bis zur Fertigstellung mehrerer NOAKs die tatsächlichen Kosten sowohl für den Bau/die Errichtung als auch später für den Betrieb nicht bekannt sind.

Für die kritische Analyse ist es dennoch aufschlussreich, sich die Genese der Entwicklung von NuScale SMR anzusehen. Ursprünglich als 50-MWe-Module geplant, wurde die Modulleistung zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit auf 77 MWe erhöht – das ist wahrscheinlich das Maximum, das ohne wesentliche Änderung der Modulparameter erreicht werden konnte. Da das Genehmigungsverfahren mit der USNRC abgeschlossen wurde und die Vorbereitungen für den Bau am Standort Idaho voranschreiten, kündigte NuScale eine „Überarbeitung der wirtschaftlichen Parameter“ an, ohne jedoch Einzelheiten zu nennen. Der Nutzer des Idaho-Projekts, UAMPS (Utah Associated Municipal Power Systems), sagte Berichten zufolge, dass man „davon ausgeht, dass das Projekt Strom zu einem Preis von 89 USD/MWh erzeugen wird“, was einem Anstieg von 53% im Vergleich zur Preisschätzung von NuScale im Jahr 2020 entsprechen würde.

Wie aus Anhang 2 ersichtlich ist, werden für die SMR-Module nur allgemeine Preisspannen angegeben. Es gibt keine klaren Informationen über eventuelle Preisnachlässe für mehrere Module (oder im Falle größerer SMR für mehrere Einheiten am selben Standort). Nach Ansicht der Autoren dieses Berichts liegt dies hauptsächlich daran, dass diese weder wirklich bekannt sind, noch bekannt sein werden, bis die Detailplanung und wahrscheinlich sogar die erste Fertigung beginnt. Es ist zu erwarten, dass der Preis für mehrere Module niedriger sein wird als ein einzelnes (aufgrund von Standortanordnungen, gemeinsam genutzten Systemen, usw.), aber diese Einsparungen dürften nicht sehr groß sein.

Über das Betriebskonzept für SMR liegen nur wenige Informationen vor. Es wird erwartet, dass diese den bewährten Praktiken neuer großer Kernkraftwerke folgen würden, was (risiko-)optimierten Betrieb, Wartung und Überwachung betrifft. NuScale erwartet einen Kostenvorteil durch eine gemeinsame

Reaktorwarte für alle Module. Nach Ansicht der Autoren dieses Berichts wird die Zahl der Operatoren (aber auch des Wartungspersonals) pro installiertem MW bzw. pro erzeugter Energieeinheit höher sein als bei den großen Gen-III-Anlagen. Es ist schwer zu erkennen, wie mehrere kleinere Einheiten die Kosten senken könnten. Der Betrieb von SMR wird sehr wahrscheinlich mehr qualifiziertes Personal pro installiertem MWe erfordern als bei herkömmlichen Kernkraftwerken.

Es gibt weder öffentlich zugänglichen Studien zu den Kosten noch unabhängige Überprüfungen der Kostenschätzungen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass mehrere Machbarkeitsstudien (z.B. für das bereits erwähnte Projekt in Idaho/USA, das rumänische SMR-Projekt oder BWRX in Darlington) die Kosten genauer untersucht haben, aber diese sind nicht öffentlich verfügbar. Es wird angenommen, dass die Investitionspläne für diese Projekte bereits existieren. Es wurde berichtet, dass die kanadische Infrastrukturbank eine Unterstützung in Höhe von 970 Mio. CAD für das SMR-Projekt in Darlington bereitstellen würde, die - so wurde es zumindest veröffentlicht - (nur) die Vorbereitung des Projekts unterstützen würde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die Baukosten als auch die Betriebskosten von SMR mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet sind. Es ist zu erwarten, dass selbst bei Bau und Betrieb zahlreicher SMR-Blöcke die Kosten denen eines großen KKW entsprechen könnten. Der Kostenvergleich mit anderen Stromerzeugern, insbesondere erneuerbaren Energien, wird auch von den tatsächlichen Betriebskosten von SMR abhängen, die, abgesehen von der obigen Diskussion (dass mehr kleinere Einheiten tendenziell mehr kosten würden, die Betriebskosten großer KKW sind weithin bekannt), nicht vorhergesagt werden können.

4.14 SECURITY

In Bezug auf die Sicherheitsprobleme bieten die SMR keine Vorteile gegenüber den herkömmlichen Kernkraftwerken. Die größere Anzahl kleinerer Einheiten könnte ein möglicher Nachteil sein. Für die Standortsicherheit, die Materialsicherheit usw. werden dieselben Konzepte wie für große Kernkraftwerke benötigt. Dies wird per se die Kosten von SMR erhöhen, da diese im Allgemeinen weniger Energie erzeugen als große KKW.

Es ist jedoch wahrscheinlich, dass das SMR-Design von Anfang an einen viel strengeren Ansatz für die Cybersicherheit verfolgen wird, die in großen KKW eher nachgerüstet wurde. Wahrscheinlich werden die Systeme der Anlage vollständig isoliert sein, was jeden

Cyberangriff verhindert (das ist jedoch auch ein Nachteil, da keine Möglichkeit zur Fernsteuerung und Wartung der Ausrüstung besteht).

Gemessen an den Ankündigungen und den verschiedenen unterzeichneten Vereinbarungen würde man erwarten, dass weltweit bereits Dutzende von SMR-Projekten im Anfangsstadium stehen. In Wirklichkeit ist dies nicht der Fall, und es ist sehr wahrscheinlich, dass eine breite Einführung von SMR mittelfristig nicht stattfinden wird. Dies ist zum Teil auf Genehmigungsprobleme zurückzuführen. Das gesamte Genehmigungsverfahren sowohl für das Design als auch für den Standort könnte länger dauern als erwartet, auch aufgrund der Zeit und der Ressourcen, die für die detaillierte Konstruktion und das Engineering sowie die Vorbereitung für die Herstellung der Ausrüstung, den Bau und den Betrieb von SMR erforderlich sind. Viele Versorgungsunternehmen oder andere Organisationen, die Interesse an SMR als Stromquelle haben könnten, werden es vorziehen, abzuwarten, wie sich die ersten Projekte entwickeln. Das Schlüsselement der Entscheidung wird sein, ob die Konstrukteure der SMR in der Lage sind, pünktlich und budgetgerecht zu liefern, und ob die NOAK-Einheiten wirklich so wettbewerbsfähig sind, wie sie jetzt angepriesen werden.

Das NuScale-Projekt in Idaho wurde bereits vor einigen Jahren angekündigt. Das Projekt durchlief mehrere Änderungsrunden und wurde von zwölf auf sechs Module verkleinert. Angesichts der von der USNRC erteilten Bauartzulassung und der beantragten kombinierten Bau- und Betriebsgenehmigung war mit einer relativ schnellen Genehmigung zu rechnen, insbesondere, weil das Gelände des Idaho National Laboratory in einem bevölkerungsarmen Gebiet liegt und derzeit alle Arten von kerntechnischen Anlagen beherbergt. Auch die Finanzierung des Baus scheint (wie veröffentlicht) gesichert zu sein.

In der EU schreiten Machbarkeitsstudien für SMR in Estland und Rumänien voran, wobei auch Polen starkes Interesse an NuScale's SMR zeigt. Am schnellsten scheint Rumänien vorangekommen zu sein, sowohl bei der Standortauswahl, die 2022 von der IAEO überprüft wurde [84], wie auch bei der Definition des Projekts selbst, einschließlich – wie aus den letzten Nachrichten hervorgeht [110] – der Finanzierung. Die estnische Regulierungsbehörde und der Projektträger (Fermi Energy) führen derzeit eine

umfassende Bewertung potenzieller Standorte durch (4 Standorte wurden vorläufig ausgewählt). Nach Abschluss der Standortauswahl ist eine nationale Volksabstimmung als Voraussetzung für die Initiierung des Projekts vorgesehen. Für manche Länder, wie Estland, das auf seinem Hoheitsgebiet keine Kernanlagen in Betrieb hat, oder Polen, das mit der Genehmigung der gerade angekündigten 3 Einheiten des Westinghouse AP 1000 und der 3 Einheiten des koreanischen APR 1400 Gen III-Reaktoren beschäftigt ist, wird die Genehmigung eine Herausforderung sein. Abgesehen von Machbarkeitsstudien gibt es keine Hinweise darauf, dass Finanzierungspakete gesichert sind. Die US Exim Bank hat sich bereit erklärt, einige der SMR im Ausland zu finanzieren, aber das könnte einige Zeit dauern, bis dies zustande kommt, da Banken und auch potenzielle Kunden anderer Länder einfach warten werden, bis das erste NOAK SMR den Betrieb aufgenommen hat. In Estland und Polen müssen unter anderem ein erfahrener Kernkraftwerksbetreiber sowie eine lokale Bau- und Lieferkette gefunden werden. In Rumänien, wo Nuclearelectrica das Projekt leitet, ist dies weniger der Fall, aber das Unternehmen plant auch die Fertigstellung und Inbetriebnahme der Blöcke 3-4 von Cernavoda etwa zur gleichen Zeit, was den Druck auf seine eigenen Ressourcen erhöht.

Auch für den BWRX-300 am Standort Darlington in Kanada scheint eine relativ schnelle Inbetriebnahme möglich zu sein. Ontario Power Generation (OPG) prüfte zahlreiche SMR-Designs und entschied sich für BWRX-300, weil das Konzept ausgereift, im Vergleich zu anderen relativ groß und die Voraussetzungen für die Genehmigung relativ klar sind (da es sich um einen verkleinerten ESBWR handelt, der die US-Konstruktionszertifizierung besitzt). Darlington ist auch der Standort von 8 CANDU-Reaktoren, was die Verfügbarkeit von Personalressourcen erhöht, die für die Implementierung benötigt werden. Die Finanzierung des Standorts wird durch ein Darlehen in Höhe von 970 Mio. CAD von der Canada Infrastructure Bank unterstützt und wird wahrscheinlich durch Zuschüsse für CO₂-emissionsarme Energie gefördert. Es wurde angekündigt, dass der Betrieb des BWRX-300 SMR in Darlington im Jahr 2028 aufgenommen werden soll, was nach Ansicht der Verfasser des Berichts ein ehrgeiziger Plan ist, obwohl OPG bereits einen Antrag

auf Baugenehmigung bei der CNSC eingereicht hat und Phase 1 und 2 der Vorprüfung des Entwurfs durch den Hersteller im März 2023 abgeschlossen wurde. Darüber hinaus befindet sich BWRX-300 auch in den USA in der Anfangsphase des Genehmigungsverfahrens (bisher wurden nur 5 Topical Reports bei der Regulierungsbehörde eingereicht).

Um die Einführung zu erleichtern, hat das NUWARD-Konsortium das International NUWARD Advisory Board (INAB) eingerichtet, welchem EDF UK, Fortum (Finnland), OPG (Kanada), TVO (Finnland), ÚJV Řež (ein Unternehmen der CEZ-Gruppe, Tschechische Republik), Bhabha Atomic Research Center - BARC (Indien), MIT (USA) und das Politecnico di Milano (Italien) angehören. Es wird erwartet, dass sich das INAB während der verschiedenen Phasen der NUWARD-Entwicklung regelmäßig trifft und wahrscheinlich ein Schlüsselfaktor für den erfolgreichen NUWARD-Einsatz sein wird. Da sich NUWARD jedoch gerade erst in der Konzeptphase befindet, wird dies noch viel Zeit in Anspruch nehmen. Selbst der angekündigte Termin für die erste konkrete Inbetriebnahme im Jahr 2030 ist eine Herausforderung, da EDF zur selben Zeit mit dem Bau von sechs (und möglicherweise 10 weiteren) EPR2-Einheiten beginnen will. Die Überlegung, NUWARD außerhalb Frankreichs einzusetzen, ist derzeit nicht klar erkennbar, obwohl in Polen erst kürzlich ein MoU unterzeichnet wurde. Die Teilnahme der finnischen (STUK) und tschechischen (SUJB) Nuklearaufsichtsbehörde an der gemeinsamen Entwurfsprüfung unterstützt den möglichen Einsatz in diesen beiden Ländern, aber es ist sehr wahrscheinlich, dass alle auf die Fertigstellung der ersten NUWARD-Einheit in Frankreich warten werden.

Das Selbe gilt für den SMR von Rolls Royce, der ebenfalls starke Unterstützung durch die britische Regierung, die Verfügbarkeit von KKW-Standorten (alte Magnox-Reaktoren und fortgeschrittene Gasreaktoren - AGR) sowie Aussichten auf eine staatlich garantierte Finanzierung hat. Dennoch ist zu erwarten, dass die grundlegende und detaillierte Planung Zeit in Anspruch nehmen wird, so dass ein vollständiges Genehmigungsverfahren mindestens zwei oder mehr Jahre dauern könnte. Rolls Royce soll einen Vorteil in der bestehenden Lieferkette und den Managementkapazitäten für die Schiffsantriebsreaktoren haben, aber es ist fraglich, wie viel davon für einen ganz anderen Reaktor wie den RR SMR verwendet werden könnte. Die Autoren

dieses Berichts sieht die Aussicht auf erste konkrete Ergebnisse für den RR SMR nicht früher als gegen Ende dieses Jahrzehnts.

Auch für den SMR 160 gibt es verschiedene Aktivitäten. Während der SMR 160 vor einigen Jahren zunächst mit der Ukraine diskutiert wurde, mit dem Plan, dort das Genehmigungsverfahren abzuschließen und mit dem Bau zu beginnen, wurden bisher keine praktischen Schritte unternommen, auch wenn es Gespräche über eine gewisse Lokalisierung der SMR 160-Fertigung in der Ukraine gab.

Holtec hat mit seinen Energieversorgerkunden über einen möglichen Einsatz gesprochen, und 2019 wurde ein MoU mit CEZ unterzeichnet, dem in jüngerer Zeit ein Industrieabkommen mit Skoda und Doosan aus Südkorea folgte. In den USA besteht das MoU mit dem großen Nuklearbetreiber Entergy. Holtec beantragt ein Darlehen des US-Energieministeriums (DOE) für den Bau einer Fabrik zur Herstellung von Komponenten für SMR 160. Es ist wahrscheinlich, dass mindestens ein SMR 160 am selben Standort wie die Produktionsstätte errichtet wird. Die Genehmigung für den SMR 160 könnte eine Herausforderung darstellen. Im Gegensatz zum BWRX-300, der auf einer zertifizierten Konstruktion aufbaut, handelt es sich beim SMR 160 um eine neue Konstruktion (die allerdings viele Merkmale der aktuellen LWR-Konstruktionen verwendet). Daher wird das Genehmigungsverfahren einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen.

Der chinesische PWR ACP100 mit 125 MWe befindet sich im Bau und soll 2026 in den kommerziellen Betrieb gehen. Das ursprüngliche Design wurde 2014 fertiggestellt; Parallel zum Design lief das Genehmigungsverfahren der NNSA. Es wird behauptet, dass die Sicherheit des Designs von unabhängiger Seite unter Verwendung westlicher Sicherheitscodes, einschließlich RELAP und MELCOR, überprüft wurde. Darüber hinaus wurde der ACP100 als erster SMR im Jahr 2016 von der IAEO einer allgemeinen Überprüfung unterzogen. Der Bau wurde 2021 vom chinesischen Staatsrat genehmigt und der Gundstein im Juli 2021 gelegt. Die Bauzeit wird auf 58 Monate geschätzt (was für ein SMR per se etwas lang ist; aber nicht unbedingt für ein FOAK). Der Bau schreitet voran, es ist jedoch nicht bekannt, ob er im Zeitplan liegt.

Ein weiteres wichtiges Element des Einsatzes ist, dass viele derjenigen, die Interesse an SMR bekunden, keine traditionellen Nuklearbetreiber sind. Wenn diese sich eingehender mit der Vorbereitung

beschäftigen, stellen sie möglicherweise fest, dass die Anforderungen an Nuklearbetreiber komplex und nicht einfach zu erfüllen sind. Dies würde während der Genehmigung deutlich werden, wenn sich die Regulierungsbehörden nach technischen Fähigkeiten, Kenntnissen, Ressourcen usw. erkundigen würden. Es ist wahrscheinlich, dass der Einsatz von SMR für Unternehmen, die keine Kernkraftwerksbetreiber/Energieversorger sind, nicht in der ersten Welle erfolgen wird, sondern auf Erfahrungsaufbau warten wird (möglicherweise durch den Auftritt von Vertragsbetreibern, die dann gegen Entgelt mehrere Anlagen betreiben) oder eine andere Regelung auf den Markt kommt. Solche Vereinbarungen werden offenbar von RR SMR angeboten, das sich mit Entergy aus den USA zusammengeschlossen hat, welche mehrere Nuklearblöcke an 4 US-Standorten

betreiben, um die Betreiber (und offenbar auch eine umfassendere betriebliche Unterstützung) zu stellen; die Einzelheiten der Vereinbarung sind nicht bekannt.

Nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts sind die Aussichten für den Einsatz von SMR zumindest in der EU in diesem Jahrzehnt begrenzt. Anders als von Fortum prognostiziert, dass „bis 2035 in der EU Dutzende und bis 2050 Tausende von SMRs in Betrieb sein werden“, glauben wir, dass bis 2030 nur einige SMR im Bau und möglicherweise nur wenige weltweit in Betrieb sein werden. Noch unwahrscheinlicher ist es, dass sich diese in der EU befinden werden. Eine sinnvolle Entscheidung über den massiven Einsatz von SMR, insbesondere in der EU, könnte erst getroffen werden, nachdem „Pilot-Projekte“ durchgeführt wurden und sich als erfolgreich erwiesen haben.

Einige der von den Entwicklern veröffentlichten Informationen werden in den spezifischen Tabellen weiter unten in diesem Bericht bereitgestellt. Die Schätzungen für die Stromgestehungskosten liegen zwischen 40 und 60 Euro pro MWh und im Bereich von 3000-4000 Euro pro installiertem kW. Dabei handelt es sich eher um Zielvorgaben als um Werte, die auf verlässlichen Quellen beruhen und wahrscheinlich von verschiedenen Annahmen abhängen, z. B. den Betriebsstunden pro Jahr, dem Finanzierungskonzept und den Kosten, dem Zeitplan für den Bau der Anlage usw. Die Entwickler und Anbieter veröffentlichen keine detaillierten Prognosen für die Bau- und Betriebskosten, wahrscheinlich, weil diese angesichts des frühen Stadiums der Entwicklung eher ungewiss sind (dies ist ein Teil der jüngsten Schätzung von NuScale, die weiter oben in diesem Bericht zitiert wird).

Bei den SMR sind der Einsatz passiver Sicherheitssysteme sowie die Kostenreduzierung sowohl durch weniger Bauteile als auch durch optimierte Errichtung und Konstruktion Hauptpfeiler des Konzepts. Dabei würden passive Systeme zu einer (generell) geringeren Anzahl von Komponenten führen. Die modulare Bauweise durch den Zusammenbau vorgefertigter und geprüfter Elemente würde zu optimierten Kosten führen, da die Bau- und Konstruktionstätigkeiten vor Ort reduziert werden. Es ist jedoch anzumerken, dass dies erhebliche Anfangsinvestitionen in die SMR-Fertigung und die Lieferkette erfordern wird.

Das SMR-Konzept setzt auf Vereinfachung, Modularisierung und industrielle Fertigung, wobei unter anderem bewährte Sicherheitskonzepte verwendet werden. Der GE-Hitachi BWRX-300 ist gewissermaßen ein abgespeckter ESBWR. Der Entwickler behauptet, gegenüber einem ESBWR eine Kostenreduzierung von 60 % auf Basis der installierten kW erreichen zu können. Der Rolls Royce 470 MWE SMR verspricht eine Kostenreduktion von mindestens 40 % pro installiertem kW. Es muss angemerkt werden, dass nur ein (nach Ansicht der Autoren dieses Berichts, geringer) Bruchteil dieser Einsparungen auf passive Systeme und andere Optimierungen zurückzuführen sein dürften. Der Hauptgrund für die Kostensenkung liegt im Konzept eines modularen

Designs, einer industriellen Produktion von Modulen und begrenzten Aktivitäten vor Ort. Diese tragen sicherlich zu Einsparungen bei, aber im Vergleich zu herkömmlichen Kernkraftwerken würden die größten Einsparungen bei der Finanzierung liegen, da es einen großen Unterschied macht, ob die Bauzeit 2-3 Jahre oder 5-10 Jahre beträgt, während der die Zinsen auf das eingesetzte Kapital anfallen.

Es kann angenommen werden, dass all diese Faktoren den Preis für die installierten kW von SMR beeinflussen könnten und dass der Preis letztendlich niedriger sein könnte als bei den großen KKW, die heute im Bau sind. Wie viel das sein würde, ist sehr schwer abzuschätzen. Insbesondere würde die erwartete Reduzierung für die NOAK-Anlagen gelten, für die sie zu einer Preissenkung von 30 % oder mehr im Vergleich zu FOAK führt. Das bedeutet, dass der Preis pro kW erst dann konkurrenzfähig werden könnte, wenn mehrere Dutzend SMR gebaut würden.

Der Baupreis ist nur ein Faktor der Stromgestehungskosten. Alle Kernkraftwerke haben Betriebs- und Wartungskosten (O&M), die zwar niedriger sind als bei thermischen Kraftwerken, aber immer noch (viel) höher als die von erneuerbaren Energien. Für die große Kernkraftanlage liegen die gesamten O&M im Bereich von 5 – 20 Euro pro MWh (sie hängen stark davon ab, wie die Modifikationen berechnet werden, als Investition oder als Teil von O&M).

Es sind nicht viele Informationen zu den prognostizierten Betriebs- und Wartungskosten für SMR verfügbar. Es sollte hervorgehoben werden, dass alle hier untersuchten SMR für eine lange Betriebsdauer (24 Monate) ausgelegt sind, um die Wartung der Ausrüstung, die Positionierung der Komponenten für einen einfachen Zugang, usw. zu reduzieren. Dennoch ist zu erwarten, dass die Beladung von 12 Modulen (jedes mit einem Reaktor) im Vergleich zu einem Modul bei einem großen Reaktor, die Betriebskosten erhöht. Die Sekundärkreislaufkomponenten wie Turbinen, Generatoren, Sekundärkreislaufpumpen usw. sind alle mehr oder weniger traditionell und benötigen Energie für Betrieb, Prüfung und Wartung, etc. Mehrere Module würden die Anzahl der aktiven Komponenten des Sekundärkreislaufs erhöhen, die gewartet werden

müssen. Wenn man all dies berücksichtigt, könnte man zu dem Schluss kommen, dass die Betriebs- und Wartungskosten von SMR wahrscheinlich höher sind (pro erzeugter MWh) als die der großen KKW.

Ein weiteres Problem bei den SMR ist ihre Betriebszeit. Große Kernkraftwerke und SMR sind gleichermaßen wirtschaftlich am besten für den Grundlastbetrieb geeignet, bei dem die Baukosten auf die maximalen Produktionsstunden verteilt werden. Beim Betrieb im Lastfolgebetrieb und der Stromerzeugung über einen kürzeren Zeitraum verteilen sich die Baukosten jedoch auf eine geringere Gesamtenergieerzeugung. Die O&M-Kosten bleiben bei geringerer Erzeugung nur unwesentlich niedriger, da die Einsparungen durch die geringere Brennstoffausnutzung einen kleinen Bruchteil der O&M-Kosten darstellen (Personalkosten, Wartung, Verbrauchsmaterial usw. bleiben mehr oder weniger gleich).

Der Auslastungsfaktor von SMR soll im Bereich von 90–95 % liegen, dies hängt jedoch stark davon ab, wie oft und wie stark die Last im Lastfolgebetrieb reduziert wird.

Damit die SMR kostenmäßig konkurrenzfähig sind, müssen daher andere Wege der Energienutzung gefunden werden. Die SMR-Entwickler sehen alle verschiedene Nutzungsmodi für SMR vor, einschließlich Fernwärme/Industrieheizung, Entsalzung usw. LWR-SMR sind nicht für die industrielle Hochtemperaturwärme geeignet (gasgekühlte Reaktoren schon). LWR könnten für Heizzwecke und spezielle industrielle Zwecke verwendet werden. Die Erzeugung von Wasserstoff aus Strom, wenn das Netz ihn nicht benötigt, und die anschließende Verwendung von Wasserstoff, wenn zusätzlicher Strom erzeugt werden muss (so genannte "power2storage2power"), ist eine häufig genannte

Möglichkeit zur Verbesserung der Nutzung der Kernenergie. Bei den aktuellen Technologien des Elektrolysators und der Turbine sind jedoch beide sehr teuer und haben einen geringen Wirkungsgrad, wobei fast 50 % der Elektrizität verloren gehen.

Angesichts der obigen Überlegungen werden die SMR in Bezug auf die Preisgestaltung Schwierigkeiten haben, in einem von erneuerbaren Energien dominierten Netz wettbewerbsfähige Preise zu erzielen.

Ein weiteres Problem bei den SMR ist, dass sowohl die Bau- als auch die Betriebskosten derzeit nur geschätzt werden können. Die ersten Erfahrungen mit den FOAK und den Betriebskosten der ersten SMR werden die tatsächliche Wahrheit darüber enthüllen. Klar ist, dass die SMR aufgrund der erheblichen Einsparungen bei den Finanzierungskosten, die sich sowohl aus der kürzeren Zeitspanne bis zur Inbetriebnahme eines SMR als auch aus dem niedrigeren Stückpreis (der zu einer geringeren „Risikoprämie“ führt) ergeben, einen beträchtlichen Investitionskostenvorteil gegenüber den großen Kernkraftwerken haben könnten. Die fabrikgestützte Produktion, mehrere identische Module und ein vergleichsweise geringer Arbeitsaufwand vor Ort dürften ebenfalls zur Kostenwettbewerbsfähigkeit beitragen. Selbst wenn man die „Strafe“ für die wahrscheinlich höheren Baukosten pro installiertem kW und die möglicherweise höheren Betriebs- und Wartungskosten in Betracht zieht, sind die SMR sehr wahrscheinlich besser finanzierbar als große KKW. Dennoch ist anzumerken, dass sich zumindest einige Kostenprojektionen der SMR-Projekttäger und -Entwickler als zu optimistisch erweisen dürften.

7

KOMPLEMENTÄRBETRIEB MIT ERNEUERBAREN ENERGIEN,

Viele SMR-Entwickler geben als eines ihrer Konstruktionsziele an, effizient und wirtschaftlich mit erneuerbaren Energien arbeiten zu können. Um dies zu erreichen, sehen die SMR-Entwickler die Möglichkeit eines schnellen Hoch- und Herunterfahrens zwischen einer Last von 20 und 100 % vor. Für die tatsächlich „modularen“ SMR (z. B. NuScale SMR mit bis zu zwölf 77-MWe-Reaktoren, aber nicht wirklich der RR MR, der eine einzelne 470-MWe-Einheit ist) gibt es Möglichkeiten, einige der Module abzuschalten, wenn gerade kein Energiebedarf besteht. Bei richtiger Auslegung könnten alle SMR (ebenso wie andere Anlagen) den Turbinen-Bypass nutzen und auf diese Weise noch mehr Flexibilität ermöglichen.

Es gibt zwar nicht viele öffentlich verfügbare Studien zum Betrieb von SMR in Kombination mit erneuerbaren Energien, aber eine bemerkenswerte Studie, die Aufschluss über die Möglichkeiten und Grenzen gibt, ist die NuScale-Studie [35], in der der Entwickler den Betrieb eines NuScale-Moduls an einem isolierten Netz mit erneuerbaren Energien modelliert. Als Teil seines Konzepts bietet NuScale eine Leistungsmanagement-Option (vermarktet als „NuFollow“) an, die Folgendes umfasst:

- Manövrieren der Reaktorleistung eines oder mehrerer Module während der Zwischenzeiten, um stündliche Änderungen der Nachfrage oder der Wind-/Solarstromerzeugung auszugleichen;
- Umleitung der Dampfturbine des Moduls direkt zum Kondensator, um schnell auf Lastschwankungen reagieren zu können;
- Abschaltung eines oder mehrerer Module für längere Zeiträume mit geringer Netznachfrage oder anhaltender Windleistung.
- Zur Veranschaulichung dieser Fähigkeit verwendet NuScale ein hypothetisches Szenario eines einzelnen Moduls (50 MWe) in Verbindung mit einem kleinen Windpark in einem isolierten Netz. In einem solchen Fall könnte ein NuScale-Modul, wie in Abbildung 1 gezeigt, die Schwankungen der Windleistung durch den Einsatz der Leistungsanpassung und des Turbinen-Bypasses angemessen ausgleichen.

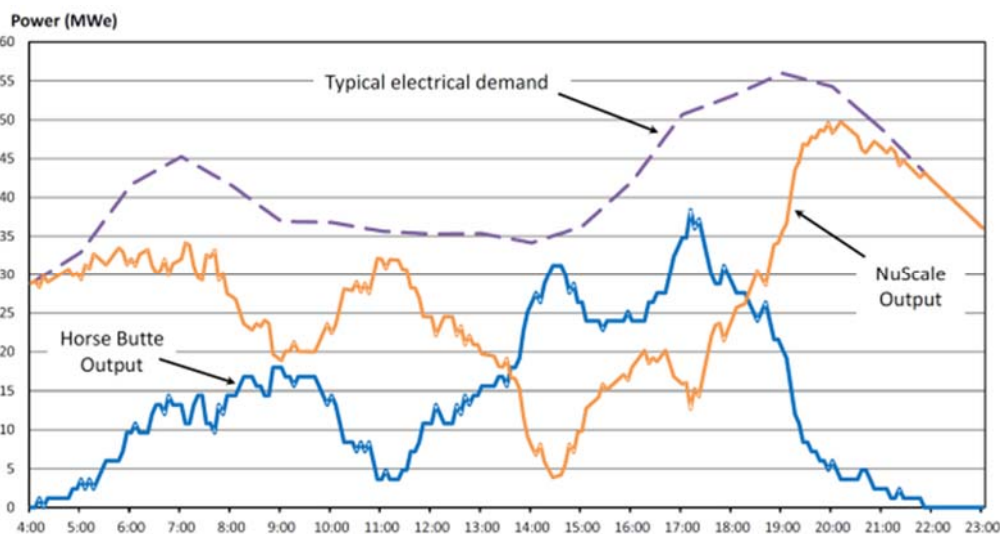


Figure 1: Hypothetischer Fall des Betriebs eines NuScale Moduls mit einem Windpark (Quelle: Ref. [35], “Can Nuclear Power and Renewables be Friends”)

Diese Fallstudie zeigt zwar die Möglichkeit eines gemeinsamen (d.h. komplementären) Betriebs von SMR und erneuerbaren Energien, aber sie verdeutlicht auch die extremen Herausforderungen eines solchen Betriebs. In diesem Fall (zumindest scheint es so) gibt es genug installierte Kapazität von sowohl Wind als auch SMR, um den vollen Verbrauch zu jeder Zeit zu decken. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass dieses isolierte System eine Kapazität von 200 % hat, um einen Bedarf von maximal 100 % zu decken.

Die obige Modellierung der NuScale-Studie zeigt, dass SMR die Schwankungen der Leistung erneuerbarer Energien kompensieren könnten. Ein solcher Betrieb ist technisch machbar, obwohl einige Einschränkungen zu berücksichtigen sind. Beim Betrieb mit reduzierter Leistung wird der Neutronenfluss im Kern beeinträchtigt, was zu einer ineffizienten Nutzung des Kernbrennstoffs führt. Einem solchen Betrieb sind Grenzen gesetzt, insbesondere wenn der Kern sich dem Ende des Brennstoffzyklus nähert, da nur eine geringe überschussreaktivität zur Verfügung steht. Der Betrieb des Reaktors mit einer bestimmten Leistung und das direkte Ablassen von Dampf in den Kondensator über den Bypass ist eine Verschwendung von erzeugter Energie. Schließlich wäre der Betriebsmodus, in dem einige Module abgeschaltet werden und dann neu starten würden, für einige Zeit durch den Effekt der „Xenonvergiftung“ in einem Reaktor begrenzt, der eine hohe positive Reaktivität erfordert, um ihn zu überwinden. Dies könnte zu gewissen Betriebseinschränkungen führen, wenn ein relativ schnelles Wiederauffahren nach dem Abschalten erforderlich ist, um der Last zu folgen.

Das größte Hindernis für einen solchen Betrieb sind jedoch wahrscheinlich die Kosten. Beim Betrieb in einem Netz, das von erneuerbaren Energien dominiert wird, haben SMR möglicherweise relativ wenige aktive Betriebsstunden. Da die O&M-Kosten mehr oder weniger gleich sind, unabhängig davon, ob ein SMR Strom erzeugt oder nicht, bedeutet dies, dass die Stromgestehungskosten für einen SMR hoch sein werden.

Um wirtschaftlich zu sein und die von ihnen erzeugte Energie tatsächlich optimal zu nutzen, müssen die SMR daher wahrscheinlich neben der Stromerzeugung noch andere Verwendungsmöglichkeiten finden. Dabei könnte es sich um die Nutzung von Restwärme (die sich nicht wesentlich von der Nutzung von Fernwärme, Gewächshäusern usw. in thermischen oder nuklearen Kraftwerken unterscheidet) oder industrieller Wärme handeln. Anwendungen wie die Entsalzung werden häufig für Kernreaktoren genannt, insbesondere für den ACP100, bei dem dies ein Teil des Auslegungskonzepts war. Die Erzeugung von Wasserstoff ist eine weitere potenzielle Möglichkeit zur Nutzung der von SMR erzeugten Elektrizität.

Es muss gesagt werden, dass diese alternativen Anwendungen zwar vorgeschlagen oder in Betracht gezogen, aber bisher nicht implementiert und getestet wurden. Die Entwicklung in den nächsten Jahren, verbunden mit dem Bau erster SMR, wird wahrscheinlich zeigen, welche Herausforderungen vor dem weiteren Einsatz von SMR und der alternativen Nutzung der von ihnen erzeugten Energie bewältigt werden müssen.

Einige Länder, darunter mehrere EU-Mitgliedstaaten, nutzen derzeit die Kernenergie in ihrem Energiemix oder erwägen deren Einsatz. Die traditionellen großen Kernkraftwerke mit ihrer hohen Komplexität und immer längeren Bauzeiten werden von vielen als (viel) zu teuer (und unsicher) angesehen. Dies weckt das Interesse an anderen Reaktortypen, die (weitgehend) fabrikgefertigt sein könnten, mit kürzeren Bauzeiten und überschaubarer Finanzierung. Dies führte zu dem Konzept der kleinen modularen Reaktoren (SMR), die aus (zahlreichen) vorgefertigten Modulen bestehen, die an einem Standort zusammengebaut werden, um eine mit einem großen Kernkraftwerk vergleichbare Leistung zu erbringen. Es wird behauptet, dass die SMR die besten Eigenschaften von Kernkraftwerken nutzen und gleichzeitig zwei der größten Nachteile von großen Gen-III-Kraftwerken beseitigen: Komplexität und Dauer des Baus sowie die damit verbundenen Kosten.

Vor diesem Hintergrund begannen Designer weltweit mit der Entwicklung einer Vielzahl von SMR und untersuchten alle möglichen Reaktorkonzepte. Der IAEO-Bericht über SMR listet mehr als 80 verschiedene Typen in verschiedenen Entwicklungsstadien auf. Diese SMR verwenden auch eine Vielzahl von Technologien, von traditionellen Leichtwasserreaktoren über gas-, flüssigmetall- und salzgekühlten Reaktoren bis hin zu schnellen Reaktoren. Darüber hinaus sind verschiedene SMR für unterschiedliche Anwendungen ausgelegt. Die meisten SMR sind für die Stromerzeugung konzipiert, einige sind hauptsächlich oder ausschließlich auf die Erzeugung von Wärme ausgerichtet, die entweder industriell oder für andere Zwecke genutzt werden soll. Von dieser Vielzahl von SMR-Modellen ist die Leichtwassertechnologie (sowohl Druckwasserreaktoren (DWR) als auch Siedewasserreaktoren (SWR)) in der Entwicklung am weitesten fortgeschritten und wird höchstwahrscheinlich in der Zukunft genehmigt, in Auftrag gegeben und gebaut werden. Es ist davon auszugehen, dass alle anderen SMR-Modelle (von denen gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren wahrscheinlich fortschrittlicher sind als z.B. Flüssigsalzreaktoren) mindestens 5 oder mehr Jahre hinter den LWR zurückliegen. Dies ist der spezielle Grund, warum sich diese Studie auf die LWR konzentriert hat, da die Wahrscheinlichkeit am

größten ist, dass diese für den Bau ausgewählt und möglicherweise auch in den Nachbarländern oder anderen EU-MS innerhalb des nächsten Jahrzehnts gebaut werden.

Gemessen an den Ankündigungen und all den verschiedenen unterzeichneten Vereinbarungen würde man erwarten, dass weltweit bereits Dutzende von SMR-Projekten angelaufen sind. In Wirklichkeit ist dies nicht der Fall, und es ist sehr wahrscheinlich, dass eine breite Einführung von SMR in den nächsten 10 Jahren nicht stattfinden wird.

Obwohl die sechs in diesem Bericht behandelten Designs – NuScale VOYGR, BWRX-300, NUWARD, Rolls-Royce UK SMR, HOLTEC SMR-160 und ACP100 – die wahrscheinlich bekanntesten und am weitesten entwickelten sind, haben sie noch zahlreiche Schwierigkeiten zu bewältigen. Einige dieser Schwierigkeiten für die sechs untersuchten SMR sind technischer Natur, andere beziehen sich auf die Lizenzierung, und große Herausforderungen bestehen weiterhin bei der Herstellung und dem tatsächlichen Einsatz von SMR. Der Beweis, dass die SMR-Modelle das halten, was ihre Entwickler oder Förderer versprechen, wäre erst dann erbracht, wenn nicht nur ein FOAK, sondern auch eine Reihe von NOAKs gebaut und erfolgreich betrieben würden. Bis dahin sind alle Vorhersagen, Versprechungen und Prognosen als spekulativ anzusehen.

Es ist zu erwarten, dass die Lizenzierung für SMR in der EU eine Herausforderung bleiben wird, da einige neuartige Konstruktionslösungen, Materialien und Herstellungsmethoden eine detaillierte Bewertung durch die Aufsichtsbehörden erfordern könnten/würden. In einigen Fällen müssten die etablierten Akzeptanzkriterien modifiziert werden. Zu den Herausforderungen während der Genehmigung gehören der breite Einsatz passiver Systeme, das Designkonzept der Containments, die gemeinsame Nutzung von Systemen und/oder Hauptkontrollraum durch Module/Blöcke, besondere Konstruktionsmerkmale (z. B. fehlende Boreinspeisung) sowie die Auswirkungen externer Gefahren. Weitere Herausforderungen bei der Genehmigung könnten im Zusammenhang mit der Qualifikation der Betreiber sowie der Betriebsorganisation erwartet werden, insbesondere wenn ein Betreiber neu im Nuklearbetrieb ist.

Eines der Argumente der SMR-Entwickler ist, dass das Sicherheitsniveau höher ist als bei herkömmlichen Reaktoren, sogar bei Gen-III-Anlagen. Die kleinere Größe des Kerns bedeutet, dass weniger Wärme abgeführt und an die Umgebung abgegeben werden muss (ultimative Wärmesenke). Mehrere passive Systeme und Funktionen würden die Sicherheit in Fällen wie dem Ausfall der externen Stromversorgung oder dem Blackout des Kraftwerks gewährleisten. Zwar gelten passive Systeme im Allgemeinen als zuverlässiger als aktive Systeme, doch müssen diese in jeder Betriebsart gründlich analysiert werden, um sicherzustellen, dass dies auch wirklich der Fall ist.

Während SMR-Konzepte im Allgemeinen die Möglichkeit eines nahtlosen Betriebs in einem Netz vorsehen, das von erneuerbaren Energien dominiert wird, wird eine solche Erzeugung, selbst wenn die technischen Möglichkeiten vorhanden sind, die Betriebskosten erhöhen, was dazu führt, dass der erzeugte Strom teurer ist als er es sonst wäre. Ein längerer Betrieb auf niedrigem Leistungsniveau könnte sich negativ auf den Kern und die Brennstoffausnutzung auswirken, wodurch die Kosten und der Bedarf für die Entsorgung von abgebrannten Brennelementen (SNF) und radioaktivem Abfall steigen.

Im Gegensatz zu modernen großen KKW weisen einige der untersuchten SMR einen niedrigeren Abbrand auf, was bedeutet, dass die Erzeugung von SNF höher sein wird als in einem Reaktor mit höherem Abbrand. Abgesehen davon unterscheiden sich die mit dem Brennstoff und dem Brennstoffkreislauf zusammenhängenden Fragen bei SMR nicht wesentlich von denen herkömmlicher Kernkraftwerke.

Mehrere SMR-Module, die die gleiche Energiemenge wie ein großes Kernkraftwerk erzeugen müssen, würden wahrscheinlich ein höheres Aufkommen an radioaktivem Abfall bedeuten. Die Zusammensetzung der erzeugten Abfälle dürfte sich nicht wesentlich von der eines großen Leichtwasserreaktors (LWR) unterscheiden, da feste, flüssige und gasförmige radioaktive Abfälle anfallen. Hinsichtlich der Einrichtungen zur Verarbeitung und Lagerung radioaktiver Abfälle an den Standorten sollten diese mit Großreaktoren vergleichbar sein. Alle Systeme und Strukturen, die zum Sammeln, Lagern, Verarbeiten und Verpacken (einschließlich Volumenminimierung) radioaktiver Abfälle in einer großen Anlage erforderlich sind, werden voraussichtlich an jedem SMR-Standort benötigt. Das ist dann von Nachteil,

wenn z.B. an einem Standort nur ein oder eine kleine Anzahl von SMR gebaut werden. Die Lagerung von SNF ist ein weiteres Problem, das mehr Platz/größere Einrichtungen erfordert, da mehr Brennelemente gelagert werden müssen.

Im Hinblick auf die Unterstützung der Wasserstoffherzeugung mit einem Elektrolyseur gäbe es keinen entscheidenden Vorteil eines SMR im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsanlagen. Der Betrieb bei dem der Elektrolyseur in Betrieb genommen wird, wenn ein Stromüberschuss vorhanden ist, würde zu einem intermittierenden Betrieb führen und wahrscheinlich die Betriebsstunden bei voller Kapazität des Elektrolyseurs begrenzen. In dieser Hinsicht sind Hochtemperaturreaktoren mit ihren höheren Betriebstemperaturen eine vielversprechendere Technologie für die Wasserstoffherzeugung, da sich die Wirksamkeit der Hochtemperatur-Elektrolyse bei hohen Temperaturen verbessert.

Bei den 6 untersuchten SMR dürften die Probleme des geistigen Eigentums oder die Technologiebereitstellung kein einschränkender Faktor sein. Obwohl nicht alle Einzelheiten bekannt sind und auch nicht vor Fertigstellung des detaillierten Entwurfs zur Verfügung stehen würden, ist es recht wahrscheinlich, dass jede der sechs Anlagentypen über eine eigene Technologie zur Herstellung und zum Bau eines SMR verfügen wird.

Verlässliche Kostenvorhersagen für SMR sind in diesem Stadium der Entwicklung seriös nicht möglich. Einige der Entwickler veröffentlichten Kostenschätzungen, aber erst wenn das detaillierte Design abgeschlossen, die Fertigung einschließlich der Lieferkette eingerichtet ist und nicht nur das erste seiner Art (FOAK), sondern auch die x-ten der Art (NOAK) gebaut sind, werden die tatsächlichen Kosten zuverlässig verfügbar sein. Dennoch ist es durchaus denkbar, dass der modulare Aufbau und die fabrikbasierte Fertigung zu einer erheblichen Reduzierung der Vor-Ort-Aktivitäten und damit verbunden zu einer geringeren Komplexität und erheblichen Verkürzung des Zeitplans im Vergleich zu großen Kernkraftwerken führen werden. All dies könnte direkt dazu beitragen, die Kapitalkosten zu senken und den Kostenvorteil von SMR im Vergleich zu großen Anlagen zu etablieren, aber dies müsste durch den Bau und den sicheren Betrieb der SMR-basierten Anlagen nachgewiesen werden.

SMR werden als Lösung für die kritischsten Probleme im Zusammenhang mit herkömmlichen

Kernkraftwerken angepriesen, da sie eine höhere Sicherheit, eine größere Flexibilität beim Betrieb und eine Verkürzung der Bauzeit/Komplexität bei gleichzeitiger Kostensenkung versprechen. Einige davon könnten Realität werden (z.B. niedrigere Finanzierungskosten aufgrund kürzerer Bauzeiten). aber andere Schwierigkeiten müssen noch gelöst werden, z.B. in Bezug auf Konstruktion und Werkstoffe, Herstellung und Lieferkette sowie Genehmigungsfragen. Es ist nicht auszuschließen, dass heute schwer vorhersehbare Probleme bei der Realisierung von SMR auftreten, von zu optimistischen Prognosen über Lizenzierungsprobleme, bis hin zu begrenzten Marktgrößen usw.

In Anbetracht der zahlreichen Herausforderungen und Unsicherheiten, die in diesem Bericht hervorgehoben werden, ist es fraglich, ob und in welchem Zeitrahmen die derzeit angekündigten Vorhersagen zum Einsatz von SMR tatsächlich eintreten werden.

Daher kann zum jetzigen Zeitpunkt keine verlässliche Schlussfolgerung gezogen werden, ob davon ausgegangen werden kann, dass die SMR Teil des zukünftigen Energiemixes werden könnten. Erst wenn die ersten SMR gebaut und in Betrieb sind, und mehr Erfahrungen in allen Phasen des Lebenszyklus von SMR gesammelt wurden, wäre es möglich, ihren Wert in allen relevanten Punkten umfassend zu bewerten.

1. European Utility Requirements for LWR nuclear power plants, Volume 1, Main Policies and Objectives, Chapter 5, EUR key positions on SMLWR, High-Level Requirements on Small Modular Light Water Reactors, Revision E2, May 2021
2. Possible role of nuclear in the Dutch energy mix in the future, ENCO-FR-(20)-13, Sept. 2020
3. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022 Edition
4. Advanced Nuclear Reactor Systems and Future Energy Market Needs, OECD/NEA, 2021
5. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition
6. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, OECD/NEA, 2021
7. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment, OECD/NEA, 2016
8. Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest, Mark R. Weimar, Ali Zbib, Don Todd, PNNL; Jacopo Buongiorno, Koroush Shirvan, MIT, April 2021
9. Economics of nuclear power plants: bottom-up cost estimation model for Small Modular Reactors, Politecnico di Milano, 2021
10. Determination of Emergency Planning Zones and Scaling Acceptance Criteria for Downsized Nuclear Power Plants, Ares (2021)4608087 - 16/07/2021
11. Emergency Planning Zones for Small Modular Reactors, Marti Jeltsov KBFI Nuclear Science and Engineering, 03.12.2020
12. Emergency Planning. Emergency Planning Zone Sizing for Small Modular Reactors – Regulatory History & Policy Considerations, B. Musico, NSIR/DPR, 2018
13. Challenges of SMR licensing practices, K. Söderholm, Fortum Power, January 2013
14. A Strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors, Governments of Ontario, New Brunswick, Saskatchewan and Alberta, 2022
15. How do we see the future of Small Modular Reactors (SMRs) at Fortum?, Fortum’s Nordic Nuclear Forum 2022 pre-webinar
16. Potential of Advanced Reactors/SMRs for Decarbonization – beyond Electricity in Canadian Context, NEA Workshop, September 2019
17. SMR Cost Assessment for Input-Output Modelling, OECD/NEA Workshop, February, 2014
18. Unlocking the potential of Small Modular Reactors in the EU, Eurelectric, November 2020
19. Small Modular Reactors. SMRs are reinventing nuclear energy, OECD/NEA, 2021
20. SMR Regulators’ Forum. Phase 2 Summary Report, June 2021
21. SMR Regulators’ Forum. Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors, January 2018
22. NuScale Standard Plant Design Certification Application, Revision 5, 2020
23. NuScale Final Safety Evaluation Report, Phase 6, August, 2020
24. Powering a UK-U.S. Energy Partnership, leaflet, NuScale, 2021
25. NuScale Power UK SMR Action Plan, 2021
26. Economic Impact Report Construction and Operation of a Small Modular Reactor

27. Electric Power Generation Facility at the Idaho National Laboratory Site, Butte County, Boise State University/ University of Idaho, January 2019
28. NuScale SMR Technology: An Innovative and Economical Solution, 2021
29. Nuclear Regulatory Commission 10 CFR Part 52, [NRC–2017–0029] RIN 3150–AJ98 NuScale Small Modular Reactor Design Certification (proposed rule), 2021
30. Generic Technical Specifications NuScale Nuclear Power Plants, Volume 2: Bases, 2016
31. Nuclear waste from small modular reactors, Lindsay M. Krall, Allison M. Macfarlane and Rodney C. Ewing, Edited by Eric J. Schelter, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA; June 26, 2021
32. Postulated degradation mechanisms of steam generator tubing in water-cooled small modular reactors P. Feenstra, R. Tapping , C. Turner , D. Horn , M. J. Pettigrew and M. Yetisir, 40th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society and 45th Annual CNS/CNA Student Conference Virtual Conference, June 6 – June 9, 2021
33. Commercial NuScale SMR in sight as UAMPS Secures \$1.4B for plant, POWERMAG, Sonal Patel, October, 2020
34. Highly reliable nuclear power for mission-critical applications, J. Doyle, B. Haley, C. Fachiol, B. Galyean, D. T. Ingersoll; NuScale Power, LLC, Proceedings of ICAPP 2016 April 17-20, 2016 – San Francisco, CA
35. Can Nuclear Power and Renewables be Friends? D. T. Ingersoll, C. Colbert, Z. Houghton, R. Snuggerud, J. W. Gaston and M. Empey; NuScale Power, LLC, Proceedings of ICAPP 2015 May 03-06, 2015 – Nice (France)
36. Emergency planning zones for small modular reactors, National Institute of Chemical Physics and Biophysics Nuclear Science and Engineering, Tallin , 2020
37. NuScale plant safety in response to extreme events, José N. Reyes, Jr.; NuScale Power Inc, NT 5-11-56, October 2011
38. Status Report – NuScale SMR (NuScale Power, LLC), IAEA ARIS,2020
39. NuScale Module Developed in the Modelica Framework, Idaho National Laboratory, INL/EXT-19-55520, August 2019
40. NRC to certify NuScale small modular reactor design for use in the US, Larry Pearl, UTILITYDIVE, August 2022
41. NRC Moves to Issue Final Design Certification for NuScale Nuclear Module, POWERMAG, Sonal Patel, July, 2022
42. US regulators will certify first small nuclear reactor design, Ars Technica, John Timmer, July 2022
43. Status Report – BWRX-300 (GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy), IAEA ARIS, 2019
44. BWRX-300 One of the most economical SMR designs available, GE Hitachi Nuclear Energy, 2021
45. BWRX-300 Small Modular Reactor Innovation drives simplification, GE Hitachi Nuclear Energy, 2021
46. Small Modular Nuclear Reactors: The Future of Carbon-Free Energy, GE Hitachi Nuclear Energy, 2022
47. BWRX-300 “Advanced Civil Construction and Design Approach”, NEDO-33914-A, Revision 2, June 2022
48. BWRX-300, “Advanced Civil Construction and Design Approach Licensing Topical Report”, NEDO-33914-A, Revision 2, 2021
49. BWRX–300, "Containment Evaluation Method ", NEDC–33922P-A, Revision 3, 2020
50. BWRX–300, "Containment Performance", NEDO-33911P-A, Revision 3, 2020
51. BWRX–300, "Reactivity Control", NEDO-33912P-A Revision 1, 2020
52. BWRX–300, "Reactor Pressure Vessel Isolation and Overpressure Protection", NEDO–33910P-A, Revision 2, 2019
53. Clinch River Nuclear Site Early Site Permit Application, Emergency Plan (2-Mile EPZ) September 2015

54. GE Hitachi: Nuclear Costs, Innovation Must Be a Pivotal Focus for Carbon-Free Future, Sonal Patel, June, 2021
55. GNF2: High Performance Fuel Assembly, GEA-15006, 01/2015
56. GNF2 Advantage Generic Compliance with NEDE-24011-P-A (GESTAR II), NEDO-33270 Revision 6, March 2016
57. Status Report – NUWARD, IAEA ARIS, 2019
58. EDF announces that its Small Modular Reactor NUWARD™ will be the case study for a European early joint regulatory review led by the French nuclear Safety Authority with the participation of the Czech and Finnish safety authorities June 2022
59. France’s NUWARD SMR Will Be Test Case for European Early Joint Nuclear Regulatory Review, Sonal Patel, June, 2022
60. The NUWARD™ SMR Development roadmap EDF Group, 2022
61. Status Report – UK SMR (Rolls-Royce and Partners), IAEA ARIS, 2019
62. Rolls Royce wants innovative financing for its first-of-a-kind nuclear SMRs, ENERGYPOST, Dan Yurman, November 2019
63. Rolls-Royce submits SMR design for UK assessment, World Nuclear News, November 2021
64. Two sites added to Rolls-Royce SMR's UK factory shortlist, World Nuclear News, October 2022
65. Licensing nuclear installations, ONR, 2021
66. Memorandum of cooperation on advanced reactor and small modular reactor technologies between the United Kingdom Office for Nuclear Regulation and the Canadian Nuclear Safety Commission, October 2020
67. UK to approve Rolls-Royce SMR, REUTERS, April 2022
68. Rolls-Royce hopes for UK SMR online by 2029, WNN, April 2022
69. Study identifies potential Rolls-Royce SMR sites - WNN, November 2022
70. A guide to the Regulatory Process, ONR, 2013
71. Small Modular Nuclear Reactors, The Parliamentary Office of Science and Technology, POSTNOTE 580, July 2018
72. HOLTEC Short Construction Lifecycle, HOLTEC, 2022
73. SMR-160: Clean Energy to Support the World’s Energy Needs, SMT LLC., 2022
74. SMR -160: Unconditionally Safe & Economical Green Energy, Technology for the 21 st Century, SMT LLC., 2012
75. Nuclear Advisory Council Deems Commissioning of Holtec SMR-160 by 2030 a ‘Credible Target’, , POWERMAG, Sonal Patel, September, 2021
76. MOU sees Holtec SMR-160 for Ukraine - World Nuclear News, March 2018
77. Holtec SMR to use commercially-available Framatome fuel : Uranium & Fuel - World Nuclear News, April 2020
78. Holtec ramps up SMR programme, eyes 2029 startup : New Nuclear - World Nuclear News, August 2022
79. Holtec and Hyundai to co-operate on development of SMR-160, NEIMAGAZINE, November 2021
80. Potential of SMRs as part of future energy mix, Olli Kymäläinen, Fortum, May 2022
81. Early site work to begin for Canadian SMR, World Nuclear News, 11-Mar-22
82. Small Nuclear Power Reactors, World Nuclear Association, 1-May-22
83. Towards European Licensing of Small Modular Reactors- Periodic Reporting for period 2 - ELSMOR,CORDIS, 22-Jul-22
84. IAEA Team in Romania Concludes First Ever Site and External Events Design (SEED) Review for a Small Modular Reactor, IAEA, 15-Sep-2022
85. The role of nuclear energy in clean hydrogen production, OECD/NEA, 20-Sep-22

86. Huge demand for SMRs' - so what are the key challenges?, World Nuclear News, 21-Sep-22
87. SaskPower selects two potential sites for SMR deployment, World Nuclear News, 21-Sep-22
88. RoPower to repower coal plant with small reactors, World Nuclear News, 28-Sep-22
89. MoltexFLEX launches flexibly-operated molten salt reactor, World Nuclear News, 29-Sep-22
90. US, Canadian regulators further SMR collaboration, World Nuclear News, 7-Oct-22
91. NSERC-CNSC Small Modular Reactors Research Grant Initiative, 11-Oct-22
92. Ontario Power Generation and ČEZ to collaborate on SMRs, World Nuclear News, 12-Oct-22
93. Services agreement paves way for Canadian-Polish SMR collaboration, World Nuclear News, 14-Oct-22
94. New Swedish government seeks expansion of nuclear energy, World Nuclear News, 17-Oct-22
95. Holtec, Hyundai to accelerate SMR development, World Nuclear News, 20-Oct-22
96. Speech: Five steps to change the paradigm on SMRs, World Nuclear News, 25-Oct-22
97. Federal loan provides certainty for Canadian SMR build, World Nuclear News, 25-Oct-22
98. Holtec's team for Czech Republic grows, World Nuclear News, 26-Oct-22
99. NuScale and Prodigy conceptual design for marine-based SMR plant, World Nuclear News, 27-Oct-22
100. US regulator approves methodology for SMR emergency planning, World Nuclear News, 28-Oct-22
101. OPG applies for construction licence for Darlington SMR, World Nuclear News, 2-Nov-22
102. Study identifies potential Rolls-Royce SMR sites, World Nuclear News, 09-Nov-2022
103. Terrestrial joins TerraPraxis coal-to-nuclear initiative, World Nuclear News, 09-Nov-2022
104. Cumbrian development company chooses Rolls-Royce SMR, World Nuclear News, 11-Nov-2022
105. USA-Ukraine announces cooperation on clean fuels from SMRs, World Nuclear News, 14-Nov-2022
106. China starts construction of demonstration SMR, WNN, 13-Jul-2021
107. Designing and building the first land-based SMR, World Nuclear Association, 2022
108. SaskPower Selects the GE-Hitachi BWRX-300 Small Modular Reactor Technology for Potential Deployment in Saskatchewan, June 2022
109. NuScale Announces MOX Capability, January 2016
110. Romania secures \$3 billion US funding for two nuclear reactors, www.euractiv.com, 10-Nov-2022

ANNEX 1: FACTSHEETS DER 6 AUSGEWÄHLTEN SMR

NUSCALE

Das Design des NuScale SMR beinhaltet folgende neuen Charakteristika:

- Integriertes Reaktordesign (Nuclear Steam Supply System (NSSS) und Primary Containment ist ein einziges Modul);
- Extensive Anwendung passiver Systeme;
- Alle Nuclear Power Modules (NPM) sind teilweise im Sicherheitsbecken eingebettet, das als ultimative Wärmesenke dient, sich am tiefsten Punkt der Anlage und unter der Erde befindet;
- Sicherheitsbehälter während des Normalbetriebs in Unterdruck gehalten.

NUSCALE EIGENSCHAFTEN

Der NuScale VOYGR [3, 5, 6, 7] ist ein SMR mit einem Design basierend auf PWR Technologie. Je nach Anforderung/Bedürfnis kann das Design vier, sechs oder zwölf Nuclear Power Modules (NPM) mit 250 MW thermischer Leistung/77 MW elektrischer Leistung umfassen.

Jedes NPM beinhaltet: Reaktorkühlsystem (RCS), Reaktordruckbehälter (RPV), Druckhalter, zwei Dampferzeuger (SG), Reaktoreinbauten (RVI) und zugehörige Rohre und Ventile und alle davon sind in einem Sicherheitsbehälter (Containment) unter Unterdruck untergebracht, welcher wiederum im Reaktorbecken eingebettet ist.

Der Reaktorkern besteht aus 37 Brennelementen in einer Standard 17 x 17 LWR Konfiguration und verwendet UO_2 Brennstoff mit Gd_2O_3 als brennbarem Absorber.

Parameter	Beschreibung ^[3, 5, 6, 7]
Reaktortyp	PWR
Nennleistung	250 MWth / 77 MWe pro Modul (bis zu 12 Module am Standort)
Referenzstandort	Ein nuklearer Standort oder der Standort eines thermischen Kraftwerks
Auslegungs Lebensdauer	60 Jahre
Seismisches Auslegung (SSE)	0.5 g
Geplante Anwendung	Kommerzielle Stromerzeugung, Wärmeerzeugung
Nutzungskonzept	Grundlast, Kraft-Wärme-Kopplung, Lastfolge
Lastfolgemodus	20% to 100% Power (~1% pro Minute), (in Übereinstimmung mit EPRI URD)
Kühlmittel/Moderator	H ₂ O/ H ₂ O
Neutronenspektrum	Thermisch
Primärkreislauf	Naturumlauf
NSSS Betriebsdruck (primär/ sekundär), mPa	13.8 / 4.3
Kerneintritts-/Kernaustrittstemperatur (°C)	249 / 316
Brennstofftyp	UO ₂

Parameter	Beschreibung ^[3, 5, 6, 7]
Brennstoffanreicherung (%)	≤ 4.95
Abbrennbares Reaktorgift	Gd ₂ O ₃
Anzahl der Brennelemente	37
Kernentladungsabbrand (GWd/ton)	≥ 45
Brennstoff Zyklus (Monate)	24
Reaktivitätskontrolle	Steuerstäbe, Gd ₂ O ₃ , Bor
Sicherheitseinrichtungen	NSSS und CNV eingetaucht im Reactor Pool (passive Langzeitkühlung und Erhalt des Spaltprodukts) Kein Eingriff der Betriebsmannschaft für die Sicherheit notwendig Wärmeabfuhrsystem— 2@100% Notfall-Kernkühlsystem Kühlung abgebrannter Brennelemente — 150 Tage passive Kühlung
Wärmesenke	30 Tage Wärmeabfuhrkapazität für 12 Module ohne AC/DC, gefolgt von Luftkühlung für einen unbegrenzten Zeitraum
Frequenz Kernbeschädigung	3*10 ⁻¹⁰ pro Modul pro Jahr (internal events)
LERF	2*10 ⁻¹¹ pro Modul pro Jahr (internal events)
Primärer Kontrollraum	Einzelner Raum für 12 Modul Kraftwerk
Lebensdauer (Jahre)	60
Platzbedarf (m ²)	140 000 (VOYGR -12 modules)
Bauzeit	36 Monate ab Baustart [24, 38]
Ziel für FOAK Betriebsstart	2029 [3, 33, 40]

NUSCALE PRO AND CONTRA

PRO	CONTRA
Design features	
Bewährte PWR/LWR Technologie	Niedrige sekundärseitige Parameter verringern den Wirkungsgrad
Modularer Aufbau und Größe/Nennleistung machen den Zusammenbau der Module vor Ort überflüssig	Jedes Stromerzeugungsmodul ist mit eigener Turbine und Systemen ausgestattet, was die Wartungsaktivitäten deutlich erhöht
Der Naturumlauf des Kühlmittels eliminiert aktive Elemente und wirkt sich positiv auf die Zuverlässigkeit aus	Naturumlauf erhöht die thermische Belastung der NSSS-Komponenten, da das Kern-Delta-T im Vergleich zu Zwangsumlaufreaktoren höher ist
Konzept passiver Sicherheitssysteme eliminiert aktive Elemente und wirkt sich positiv auf die Zuverlässigkeit aus	Neues integriertes Design und Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft
	Die Wasserstoff-Cogeneration wird die Kapitalkosten der Anlage erhöhen. Wenn die Funktion nicht auf kontinuierlicher Basis genutzt wird und nur „Ersatzstrom“ zur Erzeugung von Wasserstoff verwendet wird, verringert sich der Mehrwert vollständig, da die „Stabilität“ der Erzeugung nicht gewährleistet ist.

PRO	CONTRA
<p>Kleine Notfallplanungszone(Geländezaun) von USNRC angenommen</p> <p>Niedrige Kernschadenshäufigkeit und niedrige grosse vorzeitige Freisetzungswerte durch die Spezifika des Designs (d.h. Wasser gefüllte Containments und passive Sicherheitssysteme)</p>	<p>Kleine Notfallplanungszone wird in EU-Staaten mit deutlich höherer Bevölkerungsdichte als an vielen US-Standorten wahrscheinlich nicht genehmigt.</p> <p>Die derzeit behaupteten niedrigen Kernschadenshäufigkeit und niedrige Grosse vorzeitige Freisetzungswerte hängen nur mit internen Ereignissen zusammen und könnten daher aufgrund standortspezifischer externer Faktoren erheblich ansteigen.</p> <p>Während der Einsatz eines einzigen Hauptkontrollraums die Kosten bis zu einem gewissen Grad reduziert, ist diese Lösung etwas fragwürdig, da sie die Wahrscheinlichkeit eines Common Cause Failure (CCF) des MCR, etwa durch Feuer, erhöht. Ein einzelner MCR hat zudem einige betriebliche Defizite, da das Betriebspersonal durch start-up, shut-down oder Alarmlenken abgelenkt sein kann, wenn alle in einem einzelnen MCR stattfinden.</p> <p>Das US NuScale Referenzdesign verfügt nur über limitierte Kapazität für das Management des radioaktiven Abfalls vor Ort und das könnte beim Einsatz einer Vielzahl von SMR einen Engpass darstellen, der regulären Transport von RAW zu den Lager-/Verarbeitungsanlagen über öffentliche Straßen notwendig macht.</p>
Status der Genehmigung	
<p>Designzertifizierungsantrag im Aug. 2020 abgeschlossen. Endgültige Zustimmung für das NuScale Design wurde im Januar 2023 veröffentlicht</p> <p>USA: Gemeinsamer Lizenzierungsantrag (COL) für SMR UAMPS Kraftwerk im Januar 2024 zur Einreichung geplant</p> <p>CANADA: Prälizenzierungs- Vendor Design Review (VDR) begonnen im Januar 2020</p> <p>2019 Absichtserklärung zwischen U.S. NRC und CNSC zur Beschleunigung der Prüfung und Genehmigung der NuScale SMR Technologie in Canada</p>	<p>Bisher noch keine Lizenzierungsaktivitäten in der EU</p> <p>Zahlreiche Ausnahmen vom Standardisierten Überprüfungsplan in den USA, welche die Genauigkeit der Prüfung in der EU wohl erhöhen wird</p> <p>Der ursprüngliche Lizenzierungsprozess ließ folgende Themen beiseite:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Die Abschirmwand in einigen Regionen des Reaktors; (2) das Potenzial von Containment-Leckage, und (3) die Fähigkeit der Dampferzeugerrohre, die Strukturintegrität während Dichtewellenoszillationen im sekundären Flüssigkeitssystem aufrechtzuerhalten <p>All diese Fragen werden in der COL Phase angegangen werden</p>
Verbreitungsstatus und Aussichten	
<p>USA: Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS); mit 6 Modulen und Nennleistung von 462 MWe 2023 Start Herstellung/Konstruktion des ersten vollständigen NuScale SMR COL Start geplant für Januar 2024 und Beendigung für 2025 2029-30 Kommerzieller Betrieb des ersten NuScale Kraftwerks in Idaho Falls, Idaho im Rahmen des Carbon Free Power Project (CFPP)</p> <p>Rumänien: MOU für NuScale 6-module, 462 MWe, unterzeichnet mit Nuclearelectrica im Mai 2022 für den Standort Doicești. Nuclearelectrica und Nova Power & Gas lancierten im September 2022 ein Joint Venture, RoPower Nuclear, zur Entwicklung von NuScale SMR Technologie.</p>	<p>Obwohl der bevorzugte Standort Doicești bereits vorausgewählt wurde, ist nicht ganz klar, welchen Umfang die Lizenzierung haben wird und ob und in welchem Umfang die CNCAN eine Lizenzierung in den USA in Betracht ziehen wird.</p>

PRO	CONTRA
<p>Der Standort Doicești wurde von der IAEA im Zuge eines Peer Review für angemessen befunden Estland: Ein MoU wurde im August 2022 zwischen NuScale Power und Fermi Energia unterzeichnet zur Prüfung des Einsatzes eines NuScale SMR in Estland bis 2031.</p>	

BWRX-300

Das Design des BWRX-300 SMR beinhaltet folgende neuen Charakteristika:

- Der Sicherheitsbehälter mit dem NSSS ist größtenteils unter der Erde gelegen
- Passives Containment- Kühlsystem
- Passive Wärmeabfuhr
- Teil des Sicherheitsbehälters unter Wasser

BWRX-300 EIGENSCHAFTEN

Der BWRX-300 [3, 5, 6, 7] ist ein Small Modular Reactor, dessen Design auf dem BWR Konzept basiert. Der Reaktor stellt ein einzelnes Modul mit 870 MW_{th} thermischer Leistung und 300 MW_e elektrischer Leistung dar. Die Verwendung passiver Systeme im BWRX-300, wie Isolations-Kondensator System, passives Sicherheitsbehälter Kühlsystem und Reaktordruckbehälter-Isolationsventile. Alle drei Systeme sind auf die Isolierung des Reaktordruckbehälters und Wärmeabfuhr für Reaktor und Sicherheitsbehälter ausgerichtet.

Der Reaktorkern besteht aus 240 GNF2 Brennelementen und verwendet brennbare Hf und Gd₂O₃ Absorber.

Parameter	Beschreibung ^{3, 5, 6, 7]}
Reaktortyp	BWR
Nennleistung	870 MW _{th} / 300 MW _e
Referenzstandort	Einzelmodul
Design Lebensdauer	60 Jahre
Seismisches Design (SSE)	0.3 g
Geplante Anwendung	Kommerzielle Stromerzeugung, Fernwärme
Nutzungskonzept	Grundlast, Lastfolge
Lastfolgemodus	Lastfolge in einer Variationsbreite von 50 bis 100% (0.5% pro Minute)
Kühlmittel/Moderator	H ₂ O/ H ₂ O
Neutronenspektrum	Thermisch
Primärkreislauf	Naturumlauf
NSSS Reaktorbetriebsdruck (primär/ sekundär), mPa	NSSS Reaktorbetriebsdruck (primär/ sekundär), 7.2 / n/a
Kerneintritts-/Kernaustrittstemperatur (°C)	Kerneintritts-/Kernaustrittstemperatur 270 / 287 (°C)
Brennstofftyp	UO ₂
Brennstoffanreicherung (%)	3.40/4.95% (avg./max.)
Abbrennbares Reaktorgift	Hf, Gd ₂ O ₃
Anzahl der Brennelemente	240 GNF2 Brennelemente
Kernentladungsabbrand (GWd/ton)	49,5 GWd/t
Brennstoffzyklus (Monate)	12-24 Monate

Parameter	Beschreibung ^{3, 5, 6, 7]}
Reaktivitätskontrolle	Steuerstäbe, Hf, Gd ₂ O ₃
Sicherheitsfeatures	Isolations-Kondensator System- ICS (vier 33 MWth trains) Passives Sicherheitsbehälter Kühlsystem (PCCS) Druckbehälter-Isolationsventiel
Ultimative Wärmesenke	ICS 7 Tage Reaktornachzerfallswärmeabfuhr ohne Strom oder Eingriffs der Betriebspersonals während außergewöhnlicher Vorkommnisse. Dauer könnte durch Nachfüllen des ICS Beckens verlängert werden PCCS verfügt über keine aktiven Elemente und ist durchgehend im Stand-By Modus
CDF	<10 ⁻⁷
LERF	<10 ⁻⁸
Kontrollraum	Einer pro Einheit
Standort Fläche (m ²)	26300
Bauzeit	30-36 Monate ab Baubeginn [43, 44, 54]
Ziel für FOAK Betriebsstart	2028 Kommerzieller Betrieb in den USA und Kanada [43, 45, 54]

BWRX-300 PRO AND CONTRA

PRO	CONTRA
Design Eigenschaften	
<p>Bewährte BWR Technologie</p> <p>Naturumlauf des Kühlmittels eliminiert aktive Elemente und hat positiven Einfluss auf die Zuverlässigkeit</p> <p>Niedrigerer Primärkreislaufdruck durch BWR Designspezifika</p> <p>Stickstoff inerter Sicherheitsbehälter</p> <p>Nachzerfallswärmeabfuhr ohne Strom oder operative Eingriffe könnte durch Nachfüllen des ICS Pool verlängert werden</p> <p>Passives Sicherheitsbehälter- Kühlsystem verfügt über keine aktiven Elemente und ist durchgehend im Stand-By Modus</p> <p>Sicherheitsventile, der wahrscheinlichste Ursprung eines Kühlmittelverluststörfalls (LOCA), wurden im Design eliminiert</p>	<p>Moduldesign mit relativ hoher Nennleistung erfordert möglicherweise einige Modulmontagearbeiten vor Ort</p> <p>Das Risiko einer Wasserstoffakkumulation bei Unfällen im BWRX – 300 ist noch nicht nachgewiesen (vorbehaltlich einer spezifischen PSAR-Analyse)</p> <p>Während BWRX-300 behauptet, passive Sicherheitssysteme zu verwenden ohne Notwendigkeit von Wechselstromversorgung, erfordert der Betrieb des ICS zur Druckentlastung des Reaktordruckbehälters und zur Abfuhr der Zerfallswärme eine einmalige automatische Aktivierung durch Gleichstromversorgung mit einer Batterie der Klasse 1E vor Ort (vorbehaltlich einer weiteren Überprüfung während des Genehmigungsverfahrens). Das PCCS-Design ist noch nicht abgeschlossen (Licensing Topical Report 2022)</p> <p>Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft</p>

PRO	CONTRA
Verwendung von bewährtem GNF 2 Brennstoff	
Status der Genehmigung	
<p>USA: GEH hat beim NRC insgesamt fünf Topical Reports für das GEH BWRX-300 SMR Design eingereicht</p> <p>CANADA: Überprüfung des vorläufigen Entwurfes begann im Januar 2020</p> <p>UK: Überprüfung des vorläufigen Entwurfes begann im Januar 2020.</p>	<p>Die Lizenzierung des BWRX-300 befindet sich in den Ländern mit den klarsten Aussichten für den SMR-Einsatz noch in der Anfangsphase.</p> <p>Der Lizenzierungsprozess in den USA, Kanada und Großbritannien könnte zur Untersuchung/Studie potenzieller offener Probleme genutzt werden</p>
Verbreitungsstatus und Aussichten	
<p>USA: Im August 2022 ging die Tennessee Valley Authority (TVA) eine Übereinkunft mit GEH über den Einsatz eines BWRX-300 am Standort Clinch River nahe Oak Ridge ein</p> <p>Canada: Dezember 2021 – Einsatz von BWRX-300 am Kernkraftwerk Darlington in Ontario bis 2028</p> <p>Juni 2022 – Der BWRX-300 (SMR) wurde von SaskPower für einen möglichen Einsatz Mitte 2030 ausgewählt</p> <p>Estland: September 2022— Fermi Energia AS hat eine Ausschreibung für drei SMR Entwicklungsfirmen der neuen Generation veröffentlicht: General Electric/Hitachi BWRX-300, NuScale VOYGR und Rolls Royce UK SMR.</p>	

NUWARD

Das Design des NUWARD SMR beinhaltet die folgenden neuen Charakteristika:

- Integriertes Reaktordesign
- Passive Sicherheitssysteme
- Passive Wärmeabfuhr
- Sicherheitsbehälter mit passiver Kühlung, der die Wärmeabfuhr über mehrere Tage ermöglicht
- Kleiner Kern in einem großen Reaktor stützt die Strategie zur Rückhaltung der Kernschmelz innerhalb des Reaktordruckbehälters
- Passive Flutung der Reaktorgrube
- Bor- freies Design zur Reduzierung von flüssigen Abfällen

NUWARD EIGENSCHAFTEN

Der NUWARD [3, 5, 6, 7] ist ein Small Modular Reactor, dessen Design auf dem PWR Konzept basiert. Der SMR ist ein Dual-Unit Konzept mit 2x540 MWth thermischer Leistung und 2x170 MWe elektrischer Leistung.

Das NUWARD Sicherheitskonzept ist, dass unter Auslegungsbedingungen für mehr als 3 Tage kein Eingriff des Betriebspersonals erforderlich, für mehr als 3 Tage keine zusätzliche externe Wärmesenke erforderlich, für mehr als 3 Tage keine externe Stromversorgung (regulär und Notfall) erforderlich, und kein primäres Druckentlastungssystem erforderlich ist. Die Reaktivitätskontrolle verwendet keine gelöste Borsäure und verringert dadurch die Menge der während des Betriebs anfallenden radioaktiven Abwässer.

Der Reaktorkern besteht aus 76 Brennelementen in 17 x 17 Konfiguration und verwendet Gd_2O_3 . Die Eigenschaften werden in der detaillierten Designphase festgestellt werden.

Parameter	Beschreibung ^[3, 5, 6, 7]
Reaktortyp	PWR
Nennleistung	2*540 MWth / 2*170 MWe
Referenzstandort	Doppeleinheit
Design Lebensdauer	60 Jahre
Seismische Auslegung (SSE)	0.3 g
Geplante Anwendung	Kommerzielle Stromerzeugung und Entsalzung
Einsatz	Grundlast und Lastfolge
Lastfolgemodus	Lastfolge in einer Variationsbreite von 20 bis 100% (5% pro Minute)
Kühlmittel/Moderator	H ₂ O/ H ₂ O
Neutronenspektrum	Thermisch
Primärkreislauf	Zwangsumlauf (6 Pumpen)
NSSS Betriebsdruck (primär/ sekundär), mPa	NSSS Betriebsdruck (primär/sekundär) 15/4.5
Kerneintritt-, austrittstemperatur (°C)	Kerneintritt-, austrittstemperatur 280/307 (°C)
Brennstofftyp	UO ₂

Parameter	Beschreibung ^[3, 5, 6, 7]
Brennstoffanreicherung (%)	<5%
Abbrennbares Reaktorgift	Gd ₂ O ₃
Anzahl der Brennelemente	76 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration
Kernentladungsabbrand (GWd/ton)	Die Abbrandeigenschaften werden in der detaillierten Entwurfsphase bestimmt
Brennstoffzyklus (Monate)	24 Monate
Reaktivitätskontrolle	Kontrollstäbe und Gd ₂ O ₃ (Bor-freies Design)
Sicherheitssysteme	Reaktorabschaltung-- 2 Redundanzen Kerninjektion-- 2 Redundanzen Zerfallswärmeabfuhr-- Redundanzen Containment N2 Einspeisung Containment im unterirdischen Pool
Ultimative Wärmesenke	Es ist keine Wärmesenke außerhalb des Nuclear Island (NI) erforderlich, um den sicheren Zustand für mindestens 3 Tage zu gewährleisten
CDF	< 1x10 ⁻⁵
LERF	Praktisch ausgeschlossen
Kontrollraum	2 Einheiten teilen sich einen Kontrollraum
Standortfläche (m ²)	3500 (Standortfläche ist noch nicht definiert)
Bauzeit	36 Monate ab Baubeginn [57]
Ziel für FOAK Betriebsstart	2030 (Baubeginn) [57, 59, 60]

NUWARD PRO AND CONTRA

PRO	CONTRA
Design features	
<p>Bewährte PWR Technologie</p> <p>Integriertes Reaktordesign</p> <p>Bor-freies Design reduziert die Menge anfallender flüssiger radioaktiver Abfälle</p> <p>Das Design umfasst passive Reaktorabschaltssysteme über zweifach redundante passive Kerneinsprühsysteme zweifach redundante Nachzerfallswärmeabfuhr sowie Isolierung und Kühlung des Sicherheitsbehälters mit zwei Redundanzen</p>	<p>Niedrige sekundärseitige Parameter verringern die Effizienz der Anlage</p> <p>Neues integriertes und bor-freies Design ist noch nicht betriebsgeprüft</p> <p>Zwangsumlauf des Kühlmittels erfordert den Einsatz aktiver Elemente und wirkt sich negativ auf die Zuverlässigkeit der Anlage aus</p> <p>Konzept passiver Sicherheitssysteme ist noch nicht betriebsgeprüft</p> <p>CDF- und LERF-Werte sind vorläufiger Natur. LERF wird auf qualitativer Basis ermittelt</p>
Licensing status	
NUWARD befindet sich in der Konzeptionsphase, daher werden noch keine Lizenzierungsaktivitäten durchgeführt	
Deployment status and prospects	
<p>Starke staatliche Unterstützung – Intervention des Staates bis zu 500 Millionen Euro für die NUWARD</p> <p>Bis 2030 sollen staatliche Investitionen in kleine, innovative Kernreaktoren mit besserem Abfallmanagement bis zu 1 Milliarde Euro betragen.</p> <p>EDF plant einen Baubeginn bis 2030 zu erreichen.</p>	<p>Starke staatliche Unterstützung dient nicht immer der Verbesserung der Sicherheit, sondern könnte sich auch auf die verbesserte Effizienz der Investitionen konzentrieren.</p> <p>Aufgrund der Konzeptionsphase sind potenzielle Standorte noch nicht identifiziert</p>

ROLLS ROYCE

Das Design des Rolls Royce SMR beinhaltet die folgenden neuen Charakteristika:

- Passives Sicherheitsbehälter- Kühlsystem
- Passives Wärmeabfuhrsystem
- Passives Notkühlsystem
- Bor- freies Design

ROLLS ROYCE EIGENSCHAFTEN

Der ROLLS ROYCE [3, 5, 6, 7] ist ein Small Modular Reactor, dessen Design auf dem PWR Konzept des Light Water Reactors basiert. Der ROLLS ROYCE SMR ist ein Einzelmodulkonzept mit 1358 MWth thermischer Leistung und 470 MWe elektrischer Leistung.

Das ROLLS ROYCE SMR Design beinhaltet zahlreiche passive Systeme zur Unterstützung der Reaktorsicherheit, unter anderem: passive Reaktorabschaltssysteme, passive Kernsprühsysteme, Wärmeabfuhr, Sicherheitsbehälter- Isolierung und Kühlung gestützt durch zwei Notstrom- Dieselgeneratoren, welche die aktiven Ausrüstungen und Komponenten betreiben.

Der Reaktorkern besteht aus 121 Brennelementen in 17 x 17 Konfiguration und verwendet Gd_2O_3 . Der Zielabbrand wird mit 55-60 GWd/t angegeben und ist mit den Werten von großen Kernkraftwerken vergleichbar.

Parameter	Description ^[3, 5, 6, 7]
Reaktortyp	PWR
Nennleistung	1358 MWth / 470 MWe
Referenzstandort	Einzeleinheit
Auslegungslebensdauer	60 Jahre
Seismische Auslegung (SSE)	>0.3 g
Geplante Anwendung	Kommerzielle Stromerzeugung
Nutzungskonzept	Grundlast, Lastfolge
Lastfolgemodus	Lastfolge in einer Variationsbreite von 50 bis 100% (3-5% pro Minute)
Kühlmittel/Moderator	H ₂ O/ H ₂ O
Neutronenspektrum	Thermisch
Primärkreislauf	Zwangsumlauf (3 Pumpen)
NSSS Betriebsdruck (primär/ sekundär), mPa	NSSS Betriebsdruck (primär/ sekundär) 15.5 / 7.8
Kerneintritt-/ Kernaustrittstemperatur (°C)	Kerneintritt-/ Kernaustrittstemperatur 295 / 325 (°C)
Brennstofftyp	UO ₂
Brennstoffanreicherung (%)	4.95%
Anbrennbares Reaktorgift	Gd ₂ O ₃
Anzahl der Brennelemente	121 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration

Parameter	Description ^[3, 5, 6, 7]
Kernentladungsabbrand (GWd/ton)	55-60 GWd/t
Brennstoffzyklus (Monate)	18-24 Monate
Reaktivitätskontrolle	Kontrollstäbe und Gd ₂ O ₃ (Bor-freies Design)
Sicherheitseinrichtungen	Notfall-Bor-Injektion Passives Sicherheitsbehälterkühlsystem Passive Nachzerfallswärmeabfuhr Notkühlsystem Nachzerfallswärmeabfuhr inkl. Kondensatorsystem, Restwärmeabfuhr Flutung der Reaktorgrube PARs, gefilterte Entlüftung
Ultimative Wärmesenke	72 Stunden Kulanzzeit nach einem DBA, ist kein Eingriff des Betriebspersonals erforderlich
CDF	<10 ⁻⁷
LERF	<10 ⁻⁷
Kontrollraum	Einzelner Kontrollraum
Standortfläche (m ²)	40000 m ²
Bauzeit	24 Monate ab Baubeginn (NOAK) 48 Monate Gesamtzeitplan, inklusive Standortvorbereitung, Bau und Kommissionierung [61]
Ziel für FOAK Betriebsstart	2029-2030 kommerzieller Betrieb des FOAK geplant [67, 68]

ROLLS ROYCE PRO AND CONTRA

PRO	CONTRA
Design features	
Bewährte PWR Technologie	
Innerhalb von 72 Stunden nach der DBA ist keine Operatoreingriff erforderlich	Zwangsumlauf des Kühlmittels erfordert den Einsatz aktiver Elemente und wirkt sich negativ auf die Zuverlässigkeit der Anlage aus
Das Design umfasst passive Reaktorabschaltsysteme von doppelter Redundanz, passive Kernsprühsysteme von zwei Redundanzen, Nachzerfallswärmeabfuhr von dreifacher Redundanz, Eindämmungsisolierung und Kühlung in dreifacher Redundanz, unterstützt durch zwei Notstromdieselgeneratoren	Konzept passiver Sicherheitssysteme noch nicht betriebsgeprüft Der behauptete Wert des SSE >0,3 g ist zu ungenau, da er ihn tatsächlich nicht einschränkt. Eine Klärung wird in einer späteren Lizenzierungsphase erforderlich sein
Bor-freies Design reduziert die Abwassermenge	Bor-freies Design noch nicht betriebsgeprüft Moduldesign mit relativ hoher Nennleistung erfordert möglicherweise einige Modulmontagearbeiten vor Ort
Licencing status	

UK: Im April 2022 kündigte ONR Schritt 1 der allgemeinen Designbewertung an Der GDA-Prozess konzentriert sich auf den Entwurf eines generischen Kernkraftwerks und ist nicht standortspezifisch.	Das Ergebnis des GDA wird aufgrund seiner Nicht-Standort-Spezifität nur begrenzt nutzbar sein, es wird jedoch die Betrachtung potenzieller kritischer Probleme ermöglichen
Deployment status and prospects	
Rolls Royce identifizierte im November 2022 eine Reihe bestehender Kernkraftwerksstandorte im Vereinigten Königreich, die möglicherweise SMRs beherbergen könnten: Trawsfynydd, Sellafield, Wylfa, Oldbury, Berkeley, Hartlepool, Heysham, Bradwell. 2029-2030 kommerzieller Betrieb des FOAK geplant	Während die potenziellen Standorte bereits im Vorfeld ausgewählt wurden, müssen detaillierte Standortbewertungen noch durchgeführt werden.

HOLTEC SMR-160

Das Design des HOLTEC SMR-160 SMR beinhaltet die folgenden neuen Charakteristika:

- Integriertes Design
- NSSS unterirdisch
- Passives Kern- Kühlsystem
- Sekundäres Wärmeabfuhrsystem
- Passives Sicherheitsbehälter- Kühlsystem
- Inbetriebnahme ohne externe Stromversorgung (“Black Start”)
- Unterirdische SNF- Lagerung vor Ort
- 80-Jahre Lebensdauer

HOLTEC SMR-160 EIGENSCHAFTEN

Der HOLTEC [3, 5, 6, 7] ist ein Small Modular Reactor, dessen Design auf dem PWR Konzept des Leichtwasserreaktors basiert. Der HOLTEC SMR ist ein Einzelmodulkonzept mit 525 MWth thermischer Leistung und 160 MWe elektrischer Leistung.

Das HOLTEC SMR Design stützt sich auf die Verwendung passiver Sicherheitssysteme mit einem Gesamtkonzept einer unbegrenzten Passivluftkühlung unter Anwendung vorhandener Wasserreserven.

Der Reaktorkern besteht aus 57 Brennelementen in 17 x 17 Konfiguration. Der Kernabbrand beträgt 45 GWd/t, geringer als in großen Kernkraftwerken.

Parameter	Description ^[3, 5, 6, 7]
Reaktortyp	PWR
Nennleistung	525 MWth / 160 MWe
Referenzstandort	Einzeleinheit
Auslegungslebensdauer	80 Jahre
Seismisches Auslegung (SSE)	0.5 g
Geplante Anwendung	Kommerzielle Stromerzeugung, Fernwärme

Parameter	Description ^[3, 5, 6, 7]
Nutzungskonzept	Grundlast, Lastfolge, Cogeneration, Inselbetrieb
Lastfolgemodus	Lastfolge im Design vorgesehen (Hochfahrraten werden in der späteren Entwurfsphase bekannt sein)
Kühlmittel/Moderator	H ₂ O/ H ₂ O
Neutronenspektrum	Thermisch
Primärkreislauf	Naturumlauf
NSSS Betriebsdruck (primär/ sekundär), mPa	NSSS Betriebsdruck (primär/sekundär) 15.5 / 3.4
Kerneintritt-/Kernaustrittstemperatur (°C)	Kerneintritt-/Kernaustrittstemperatur 243 / 321 (°C)
Brennstofftyp	UO ₂
Brennstoffanreicherung (%)	4.95% (4.0 average)
Anbrennbares Reaktorgift	Vorgesehen, aber nicht identifiziert (abhängig von der Designentwicklung)
Anzahl der Brennelemente	57 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration
Kernentladungsabbrand (GWd/ton)	45 GWd/t
Brennstoffzyklus (Monate)	24 Monate
Reaktivitätskontrolle	Kontrollstäbe und lösliches Bor
Sicherheitssysteme	Passives Kernkühlsystem Primäre Nachzerfallswäreme Abfuhr (PDHR) Sekundäre Nachzerfallswäreme Abfuhr (SDHR) Automatisches Druckentlastungssystem (ADS) Passives Kühlmittel-Reinigungssystem (PCMWS) Passives Sicherheitsbehälter-Wärmeabfuhrsystem (PCHR) Netzunabhängiger Anfahrbetrieb oder "black-start"
Wärmesenke	Erste 72 Stunden Kühlung durch PCCS und PCHR < 90 Tage, passive Kühlung durch PCHR > 90 Tage, unbegrenzte Kühlung durch passive Luftkühlung
CDF	<10 ⁻⁷
LERF	Keine Daten
Kontrollraum	Einzelner Kontrollraum
Standortfläche (m ²)	28,000
Bauzeit	36 Monate für den ersten SMR-160, mit verkürzten Bauzeiten von 30 Monaten oder weniger für folgende Einheiten (24 Monate für NOAK) [72]
Ziel für FOAK Betriebsstart	2029-2030— Inbetriebnahme der ersten Reihe von SMR-160-Anlagen in den USA [75, 78]

HOLTEC PRO AND CONTRA

PRO	CONTRA
Design features	
<p>Bewährte PWR Technologie</p> <p>Konzept der passiven Kühlung mit unbegrenzter passiver Luftkühlung</p> <p>Aufgrund der Größe des Druckhalters sind keine Überdruckventile mehr erforderlich</p> <p>Herstellung und Montage der größten transportfähigen Komponenten vor der Lieferung an einen Standort</p>	<p>Niedrige sekundärseitige Parameter verringern die Effizienz der Anlage</p> <p>Das Konzept passiver Sicherheitssysteme ist nicht erwiesen Unbegrenztes passives Kühlkonzept sollte durch Berechnungen und Tests nachgewiesen werden</p> <p>Neues integriertes Design noch nicht betriebsgeprüft</p> <p>Das von HOLTEC behauptete Entladen des SNF in die Trockenlageranlage nach der zweiten Befüllung muss weiter analysiert werden, da die Nasslagerzeit kürzer ist als bei allen bekannten Designs</p>
Licensing status	
<p>Die Vorlizenzierungsaktivitäten begannen in den USA im Jahr 2014, Lizenzierungsaktivitäten in anderen Ländern begannen bisher noch keine</p>	<p>Der Stand der Lizenzierungsaktivitäten und weitere Verzögerungen könnten den geplanten Baubeginn sogar in den USA gefährden</p>
Deployment status and prospects	
<p>2030 – Inbetriebnahme der ersten Reihe von SMR-160-Anlagen in den USA</p>	<p>Die Verfügbarkeit des SMR-160 für den Einsatz in der EU und anderen europäischen Ländern könnte etwa fünf bis sieben Jahre hinter dem geplanten Einsatz in den USA zurückbleiben</p>

Das Design des ACP100 SMR beinhaltet die folgenden neuen Charakteristika:

- Integriertes Design
- NSSS unterirdisch
- Passive Kernkühlung
- Passives Wärmeabfuhrsystem
- Passive Sicherheitsbehälter- Kühlung
- Automatisches Druckentlastungssystem
- Passives Kernflutsystem

ACP100 EIGENSCHAFTEN

Der ACP100 [3, 5, 6, 7] ist ein Small Modular Reactor, dessen Design auf dem PWR Konzept basiert. Der ACP100 SMR ist ein Einzelmodulkonzept mit 385 MWth thermischer Leistung und 125 MWe elektrischer Leistung.

Das integrierte Design des ACP100 Reactor Coolant System (RCS) sieht die Installation der Hauptkomponenten des Primärkreises innerhalb des Reaktor Druckbehälters vor. Das ACP100 Sicherheitskonzept basiert auf passiven Sicherheitssystemen und der Anwendung natürlicher Konvektion zur Reaktorkühlung.

Der Reaktorkern besteht aus 57 Brennelementen in 17 x 17 Konfiguration und verwendet Gd_2O_3 . Der Kernabbrand beträgt <52 GWd/t und ist somit etwas niedriger als bei großen Kernkraftwerken.

Parameter	Description ^[3, 5, 6, 7]
Reaktortyp	PWR
Nennleistung	385 MWth / 125 MWe
Referenzstandort	Einzeleinheit
Auslegungslebensdauer	60 Jahre
Seismische Auslegung (SSE)	0.3 g
Geplante Anwendung	Kommerzielle Stromerzeugung, Fernwärme, Industrierwärme, Meerwasserentsalzung
Nutzungskonzept	Grundlast
Lastfolgemodus	Lastfolge ist unter den ACP100 features nicht hervorgehoben
Kühlmittel/Moderator	H ₂ O/ H ₂ O
Neutronenspektrum	Thermisch
Primärkreislauf	Zwangsumlauf (4 Pumpen)
NSSS Betriebsdruck (primär/ sekundär), mPa	NSSS Betriebsdruck (primär/ sekundär) 15.0 / 4.6
Kerneintritt-/ Kernaustrittstemperatur (°C)	Kerneintritt-/ Kernaustrittstemperatur. 286.5 /319.5 (°C)
Brennstofftyp	UO ₂
Brennstoffanreicherung (%)	<4.95%
Anbrennbares Reaktorgift	Gd ₂ O ₃

Parameter	Description ^[3, 5, 6, 7]
Anzahl der Brennelemente	57 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration
Kernentladungsabbrand (GWd/ton)	<52 GWd/t
Brennstoffzyklus (Monate)	24 Monate
Reaktivitätskontrolle	Kontrollstäbe, Gd ₂ O ₃ und lösliches Bor
Sicherheitssysteme	Passive Reaktorkühlung Passive Nachzerfallswärmeabfuhr Passive Sicherheitsbehälter Kühlung Passives Kernflutssystem Passive Wasserstoff Rekombinatoren Mehrstufiges automatisches Druckenlastungssystem Nach einem Unfall ist 72 Stunden lang kein Eingriff der Betriebsmannschaft erforderlich (DC) Stromquelle zur Unfallminderung bis zu 72 Stunden, unterstützt durch das System zum Aufladen der Batterie für bis zu sieben (7) Tage ACP Sicherheitshülle, Schutz vor externen Ereignissen Tief unterirdisches Nukleares Dampferzeugungssystem
Wärmesenke	Kein aktives Kühlsystem
CDF	<10 ⁻⁶
LERF	<10 ⁻⁷
Main Kontrollraum	Einzelner Kontrollraum
Standortflächenbedarf (m ²)	200,000
Bauzeit	55-38 Monate (FOAK) [3, 106]
Ziel für FOAK Betriebsstart	Geplanter kommerzieller Betrieb bis 2026 [3, 106]

ACP100 PRO AND CONTRA

PRO	CONTRA
Design features	
Bewährte PWR Technologie	Niedrige sekundärseitige Parameter verringern die Effizienz der Anlage
Neues integriertes Design Konzept der passiven Kernkühlung, der passiven Nachzerfallswärmeabfuhr und der passiven Sicherheitsbehälter-Kühlung verbessert die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Anlage	Neues integriertes Design noch nicht betriebsgeprüft Konzept passiver Sicherheitssysteme noch nicht erwiesen
Nach einem Unfall ist 72 Stunden lang kein Eingriff des Betriebspersonals erforderlich	Ergebnisse der Sicherheitsanalyse liegen nicht vor
Licensing status	
Die IAEA führte 2016 eine allgemeine Reaktorsicherheitsüberprüfung für den ACP100 durch	Keine Erfahrung mit der Lizenzierung chinesischer Kernkraftwerke/Nuklearanlagen in der EU

PRO	CONTRA
<p>CNNC verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung in der Entwicklung und Lizenzierung von Leistungsreaktoren und Nuklearanlagen in China</p> <p>Der vorläufige Sicherheitsbericht (PSAR) des ACP100 wurde von der NNSA genehmigt und der detaillierte technische Entwurf ist im Gange</p>	
Deployment status and prospects	
<p>Kommerzieller Betrieb der Linglong One Demonstrations-SMR-Einheit im Jahr 2026</p>	

ANNEX 2: VERGLEICH DER 6 SMRS ENTLANG VERSCHIEDENER PARAMETER

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
1) Grundkonzept des SMR						
Reaktortyp	Integral PWR	BWR	PWR	PWR	PWR	Integral PWR
<i>Bei allen sechs SMRs handelt es sich um LWR-Designs, bei denen langjährige Betriebserfahrungen und der Trend zur umfassenden Nutzung verschiedener passiver Sicherheitssysteme berücksichtigt wurden.</i>						
Leistungspegel	250 MWth / 77 MWe	870 MWth / 300 MWe	2*540 MWth / 2*170 MWe	1358 MWth / 470 MWe	525 MWth / 160 MWe	385 MWth / 125 MWe
<i>Alle sechs SMRs sind modular aufgebaut, was den Bau der Anlagen erleichtert, allerdings nutzen nur zwei von sechs – NuScale VOYGR und NUWARD – ein Mehrfacherzeugungs-Modulkonzept – 2 für NUWARD und 4, 6 oder 12 Module für NuScale VOYGR.</i>						
Design Laufzeit	60 Jahre	60 Jahre	60 Jahre	60 Jahre	80 Jahre	60 Jahre
<i>Fünf von sechs SMRs haben eine Lebensdauer von 60 Jahren. Die geplanten 80 Jahre bei HOLTEC SMR-160 werden in der EU möglicherweise nicht akzeptiert, da dies der erste Präzedenzfall wäre, der in der Entwurfsphase eine Lebensdauer von 80 Jahren vorsieht</i>						
Kühlmittel	H2O	H2O	H2O	H2O	H2O	H2O
Neutronenspektrum	Thermisch	Thermisch	Thermisch	Thermisch	Thermisch	Thermisch
<i>Alle sechs SMRs arbeiten im thermischen Neutronenspektrum, und verwenden Wasser als Kühlmittel und Moderator</i>						
Core Damage Frequency (CDF)	3*10 ⁻¹⁰ /module (interne Ereignisse)	<10 ⁻⁷	< 1x10 ⁻⁵	<10 ⁻⁷	<10 ⁻⁷	<10 ⁻⁶
Large Release Frequency (LERF)	2*10 ⁻¹¹ /module (interne Ereignisse)	<10 ⁻⁸	Praktisch ausgeschlossen	<10 ⁻⁷	Keine Daten	<10 ⁻⁷
<i>CDF und LERF unterscheiden sich erheblich von einem SMR-Modell zum anderen, jedoch verfügt derzeit nur NuScale VOYGR über einen SAR, der die behaupteten Werte durch Berechnungen bestätigen könnte. SARs/Nachweise für CDF/LERF sind, mit Ausnahme von NuScale, einschließlich jenes von ACP100, das angeblich einen PSA der Stufe 1 für interne Ereignisse aufweist und unabhängig überprüft wurde, nicht öffentlich verfügbar.</i>						
Seismic Design (SSE)	0.5 g	0.3 g	0.3 g	>0.3g	0.5 g	0.3 g

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
<p>Der Wert des SSE für 4 von sechs Designs beträgt 0,5 g, was für ein robustes Design spricht, das an fast jedem Ort weltweit installiert werden könnte. Es ist jedoch zu beachten, dass nur NuScale VOYGR über ein detailliertes Design und einen SAR verfügt, die den Wert durch Berechnungen bestätigen könnten. SSE-Werte müssen ohnehin auch durch Tests für einige spezifische Anlagen-SSCs bestätigt werden und müssen die Seismizität bestimmter Standorte berücksichtigen.</p>						
Basic design data	Naturumlauf NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa 13.8 / 4.3 Core Inlet/Outlet Coolant Temperature 249 / 316 (°C)	Naturumlauf NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 7.2 / n/a Core Inlet / Outlet Coolant Temperature 270 / 287 (°C)	Zwangsumlauf (6 Pumpen) Integral NSSS NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15/4.5 Core Inlet / Outlet Coolant Temperature 280/307 (°C)	Zwangsumlauf (3 Pumpen) NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15.5 / 7.8 Core Inlet / Outlet Coolant Temperature 295 / 325 (°C)	Naturumlauf NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15.5 / 3.4 Core Inlet / Outlet Coolant Temperature 243 / 321 (°C)	Zwangsumlauf (4 Pumpen) NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15.0 / 4.6 Core Inlet / Outlet Coolant Temp. 286.5 / 319.5(°C)
<p>Drei von sechs SMRs nutzen die natürliche Kühlmittelzirkulation. Die Verwendung des Naturumlaufs wirkt sich positiv auf die Anlagenzuverlässigkeit aus, erhöht jedoch gleichzeitig die thermische Belastung der NSSS-Komponenten, da das Kern-Delta-T im Vergleich zu Zwangsumlaufreaktoren höher ist (insbesondere im Fall von NuScale).</p>						
Geplante Anwendung	Kommerzielle Stromerzeugung Wärme	Kommerzielle Stromerzeugung, Fernwärme	Kommerzielle Stromerzeugung Wärme Entsalzung	Kommerzielle Stromerzeugung, Wärme	Kommerzielle Stromerzeugung, Wärme	Kommerzielle Stromerzeugung, Wärme Entsalzung
<p>Der Verwendungszweck ist bei allen sechs SMRs weitgehend gleich. Tatsächlich werden alle nichtelektrischen Anwendungen auf Kundenwunsch in die SMR-Designs eingeführt, und in dieser Hinsicht gibt es keine großen Unterschiede zwischen allen sechs SMRs.</p>						
Nutzungskonzept	Grundlast, Kraft-Wärme-Koppelung, Lastfolge	Grundlast, Lastfolge im Bereich von 50 bis 100 % Strom und Fernwärme.	Grundlast, Lastfolge	Grundlast, Lastfolge im Bereich von 50 bis 100 %	Grundlast, Lastfolge, Kraft-Wärme-Koppelung,, Fernwärme, Inselbetrieb	Grundlast, Fernwärme, Industriewärme, Meerwasserentsalzung
<p>Alle sechs SMRs sind für die kommerzielle Stromerzeugung im Grundlast- und Kraft-Wärme-Koppelung Modus vorgesehen. Mit Ausnahme des ACP100 versprechen die anderen SMR einen Betrieb im Lastfolgebetrieb.,</p>						
Integrationsmöglichkeiten in das bestehende Stromsystem	NuScale VOYGR-12 power plant Power Module™ umfasst zwölf 77-MWe-Module mit einer Bruttoleistung von 924	BWRX-300 erfordert eine Netzanbindung, die in der Lage sein muss, die Anlagenleistung von 300 MWe/355 MVA zu	Grundlegende Netzschnittstelle, die den ENSTO-e- und EUR-Anforderungen entspricht.	Der RR SMR erzeugt 443 MWe und ist lastfolgefähig. Wenn die Anlage vom Netz getrennt ist, ist sie zum	Könnte in bestehende Netze integriert werden, einschließlich jener an abgelegenen Standorten. Um die Effizienz beim	Eine Integration in Netze mit hohen variablen erneuerbaren Kapazitäten ist nicht spezifiziert

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	MWe. Auch gibt es Varianten mit vier (VOYGR-4 (308 MWe)) und mit sechs Modulen (VOYGR-6 (462 MWe))	bewältigen. Für Sicherheitsfunktionen besteht keine Abhängigkeit vom Netzstrom.	Das Dual-Unit-Konzept bietet dem Betreiber die Möglichkeit, den Wartungsplan so anzupassen, dass mindestens ein Reaktor der Anlage in Betrieb ist und das Netz versorgt, während ein anderer möglicherweise ausfällt.	Eigenbedarfsbetrieb in der Lage, und ist aufgrund der passiven Natur der RR-SMR-Sicherheitsysteme für sicherheitsrelevante Funktionen nicht auf Netzstrom angewiesen	Brennstoffverbrauch zu maximieren und die Wartungskosten zu minimieren, ist es vorzuziehen, den Reaktor als Grundlastanlage und nicht als „Peaking“-Einheit zu betreiben.	
<i>Aufgrund des Modulkonzepts und der relativ geringen Leistung lassen sich alle sechs SMRs problemlos in das bestehende Stromnetz integrieren, selbst in isolierten Netzen mit begrenzter installierter Leistung des Stromnetzes</i>						
Lastfolgemodi EPRI URD Anforderungen für SMR: 24 h Lastzyklus: 100% → 20% → 100% Hochfahrrate von 40% pro Stunde Automatischer Frequenzgang möglich Schrittweite Änderung von 20% in 10 Minuten Toleranz gegenüber Frequenz- schwankungen	NuFollow™ Lastfolgekazität, Funktion zur Steigerung der Leistung von 20 % auf 100 % (~1% pro Minute) (konform mit EPRI URD)	Lastfolge im Bereich von 50 bis 100 % (0,5 % pro Minute)	Lastfolge im Bereich von 20 bis 100 % (5 % pro Minute) (konform mit EPRI URD)	Lastfolge innerhalb eines Bereichs von 50 bis 100 % (3–5 % pro Minute) gemäß dem britischen Grid Code	Lastfolge im Design vorgesehen (Bereich und Rampenraten werden in der späteren Designphase bekannt sein)	Die Lastfolgefähigkeit ist nicht angegeben

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
<p><i>Nur 2 SMRs – NuScale VOYGR und NUWARD erfüllen die EPRI URD-Lastfolgeanforderungen für die SMRs in Bezug auf Leistungsänderungsbereich und -rate: 24-Stunden-Lastzyklus: 100 % → 20 % → 100 % / Anstiegsrate von 40 % pro Stunde / Fähigkeit zur automatischen Frequenzreaktion / Schrittänderung von 20 % in 10 Minuten / Toleranz gegenüber Frequenzschwankungen Zwei andere Designs (BWRX-300 und RR SMR) haben eine Reichweite von 50 bis 100 % angekündigt, Holtec SMR hat die Möglichkeit angekündigt, aber keine Reichweitendaten (angesichts der US-Herkunft wird es wahrscheinlich den EPRI URD-Anforderungen entsprechen) und ACP100 hat keine bereitgestellt Informationen zur Nutzung des Lastfolgemodus.</i></p>						
Betrieb im Stromnetz mit erneuerbaren Energien	<p>Modulverfügbarkeit: Ein oder mehrere Module kann bzw. können für längere Zeiträume mit geringer Netznachfrage oder anhaltender Erzeugung erneuerbarer Energien vom Netz genommen werden, Manövrierbarkeit: Manövrieren der Reaktorleistung für ein oder mehrere Module in den Zwischenzeiten, um stündliche Änderungen der Nachfrage oder der Erzeugung erneuerbarer Energien auszugleichen, oder Turbinenbypass: Umgehung der Dampfturbine des Moduls direkt zum Kondensator für eine schnelle Reaktionen auf Laständerung.</p>	<p>Der BWRX-300 soll in der Lage sein, die tägliche Last zu regulieren, um die Schwankungen erneuerbarer Energien zu kompensieren. Laut GEH ist die Lastverfolgung jedoch nicht die bevorzugte Methode zur Frequenzregelung</p>	<p>Der NUWARD verfügt über eine Lastfolgefunktion, die den Betrieb im Netz mit installierten erneuerbaren Energiequellen ermöglichen soll.</p>	<p>Die Anlage produziert 470 MWe und soll bei Bedarf lastabhängig und zum Eigenbedarf betrieben werden.</p>	<p>SMR 160 soll ereit für die Integration in Netze mit hoher erneuerbarer Kapazität sein. HOLTEC plant, eine SMR-160-Anlage mit seinem Green Boiler CESG-System zu kombinieren, um überschüssige Energie aus dem Kraftwerk selbst und aus dem allgemeinen Netz zu speichern, die dann in Zeiten von Erzeugungsdefiziten genutzt werden kann. Eine Variation des CESG-Systems namens HI-HEAT wurde für die Bereitstellung von Fernwärmesystemen entwickelt.</p>	<p>Der Betrieb in Netzen mit hohem Anteil erneuerbarer Energien ist nicht spezifiziert.</p>

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
<i>Fünf von sechs SMRs sehen die Möglichkeit vor, in einem Stromnetz mit überwiegend erneuerbaren Energien betrieben zu werden. Bisher ist für keinen der untersuchten SMRs die Verwendung des Frequenzsteuerungsbetriebsmodus angekündigt. Keine Informationen zur Lastfolge für ACP100.</i>						
Mehrfachnutzung - Elektrizität und Wasserstoffherzeugung	Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse	Wasserstoffherzeugung im BWRX-300 Design nicht vorgesehen	Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse	Wasserstoffherzeugung im RR UK SMR Design nicht vorgesehen.	Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse	Wasserstoffherzeugung ist für den ACP100 nicht spezifiziert
<i>Kapazität zur Wasserstoffherzeugung ist für 3 von 6 SMRs angegeben, allerdings sind prinzipiell alle 6 hypothetisch dazu in der Lage</i>						
2) SMR-Entwickler und Erfahrungen, gesetzte Ziele						
Geschichte, Erfahrung, derzeitige und geplante Verpflichtungen der Entwickler	NuScale Power, LLC, USA www.nuscalepower.com	GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy, USA https://nuclear.gewater.com/	CEA, EDF, Naval Group and TechnicAtome	Rolls-Royce and Partners, UK https://www.rolls-royce.com/innovation/sm-all-modular-reactors.aspx#/	SMR LLC, owned by Holtec International	CNNC https://www.cnn.com.cn
<i>Vier von sechs analysierten SMR-Anbietern verfügen über Erfahrung in der Planung von Kernkraftwerken. In-House Erfahrungen und der Einsatz der LWR-Technologie könnten technische und lizenzrechtliche Überprüfungen erleichtern, erfordern aber dennoch einen hohen Aufwand für die Entwicklung von Sicherheitsanalysen und Begründungen für neu entwickelte Funktionen, wie passive Sicherheitssysteme, Unterwasser-Containment, etc.</i>						
Entwicklungsplan	2003 Vorläuferkonzept entwickelt (Multi-Application Small LWR – MASLWR-Programm) 2007 wurde NuScale Power, Inc. gegründet, um neues Design zu kommerzialisieren 2011 wurde Fluor Corporation wichtiger NuScale-Investor und strategischer Partner	2014 ESBWR Design Control Document vergeben 2017 BWRX-300 Evolution von ESBWR initiiert 2018 Pre-licensing Engagement mit dem britischen ONR 2019 Start des US NRC Pre-licensing Engagement inklusive Eingabe des	2012-2016 Vorstudien und technologische Innovation (unter Verwendung zuvor entwickelter Patente). 2017-2019 Vorkonzeptionelle Designphase und Technologievalidierung Konzeptionelles Design + Vorbereitung zur Vorlizenzierung 2019-	2015 Entwicklung des ersten Referenzdesigns 2016 Bildung eines Konsortiums zur Gestaltung des gesamten Kraftwerkskonzepts 2017 Konzeptentwurf entwickelt 2021 Generic Design Der Regulierungsprozess für die Bewertung (GDA) wurde im Vereinigten	2012 Conceptual design of SMR-160 commencement 2015 Conceptual design abgeschlossen 2020 Preliminary design abgeschlossen 2020 Phase 1 des CNSC "Pre-Licensing Review of a Vendor's Reactor Design" abgeschlossen 2022 begann die	2011 Konzeptionelles Design 2012 Vorläufiges Design 2014 PSAR 2016: Allgemeine Reaktorsicherheitsüberprüfung für ACP100 durch die IAEA abgeschlossen. 2017 CNNC unterzeichnete eine Vereinbarung mit der

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	<p>2013 gewann NuScale seine erste wettbewerbsfähige Finanzierungsmöglichkeit des US-Energieministeriums</p> <p>2017 Design certification application (DCA) bei U.S. NRC eingereicht</p> <p>2018- 2020 Phase 1 bis 6 des DCA Review abgeschlossen</p> <p>2020 Start des US NRC pre-licensing Vendor Design Review combined Phase 1&2</p> <p>2023 Start der Fertigung/des Baus des ersten NuScale-KKW in Originalgröße in den USA</p> <p>2029–30 Kommerzieller Betrieb der ersten NuScale-Anlage in den USA in Idaho Falls, Idaho im Rahmen des Carbon Free Power Project (CFPP)</p>	<p>Licensing Topical Report</p> <p>2020 Start des CNSC Pre-licensing Vendor Design Review (VDR) combined Phase 1 & 2 (acht Eingaben der 19 VDR Focus Areas zu Beginn 2020)</p> <p>2024 Einreichung des Lizenzantrags in den USA und Canada</p> <p>2024/5 Baubeginn in den USA und Canada</p> <p>2028 Kommerzieller Betrieb in den USA und Canada</p>	<p>2022 Basisdesign + Vorlizenzierung 2022-2025</p> <p>Kommerzialisierung bereits 2025</p> <p>Detailliertes Design + Lizenzierung 2025-2030</p> <p>Validierte Sicherheitsoptionen + Baubeginn in Frankreich bis 2030</p>	<p>Königreich gestartet</p> <p>2025 Voraussichtlicher frühester Baubeginn</p> <p>2029–2030 Geplanter kommerzieller Betrieb des FOAK</p>	<p>Vorlizenzierungsinteraktion mit dem NRC. HOLTEC hat dem NRC zwei aktuelle Berichte für das SMR-160 PSAR für ein kommerzielles Projekt bis 2023 vorgelegt, wobei der detaillierte Entwurf bis 2025 abgeschlossen sein soll</p> <p>2030 – Inbetriebnahme der ersten SMR-160-Anlagen in den USA</p>	<p>Stadtregierung von Changjiang über die Einrichtung der FOAK ACP100-Demonstrationseinheit.</p> <p>2018 Preliminary safety assessment report (PSAR) abgeschlossen.</p> <p>2019 PSAR bei der Nationalen Behörde für nukleare Sicherheit eingereicht, Standortvorbereitung begonnen.</p> <p>2020 Beantragung der Genehmigung für den Standort Changjiang</p> <p>2021 Baubeginn</p> <p>2026 Zieltermin für kommerziellen Betrieb</p>

Die meisten Designer haben im Zeitraum 2013–2015 mit der Entwicklung von SMRs begonnen (NuScale bereits einige Jahre früher) und planen den Betrieb im Jahr 2030. Mit Ausnahme des CNNC, das tatsächlich im Jahr 2021 mit dem Bau des ACP100 begonnen hat und bisher im Rahmen des Arbeitsplans liegt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass ACP100 das erste von sechs überprüften SMRs sein wird, das in Betrieb gehen wird (geplant für 2026).

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Finanzierungsquellen und ihre Zuverlässigkeit	NuScale Power meldet das zweite Quartal 2022: 381 Millionen US-Dollar durch die erfolgreiche Fusion von Spring Valley Acquisition Corp. und das damit verbundene PIPE-Angebot aufgestellt Bekräftigt den Finanzausblick; meldet eine starke Bilanz mit Bargeld und Äquivalenten in Höhe von 350,8 Millionen US-Dollar und keinen Schulden NuScale Power bekräftigt seinen Finanzausblick, einschließlich eines Barumsatzes von 16 Millionen US-Dollar für das Gesamtjahr 2022.	GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) ist eine von GE und Hitachi gegründete Allianz. Der GE-Umsatz im Jahr 2021 beträgt ca. 71 Mrd. USD Der Umsatz der Hitachi-Gruppe im Jahr 2021 beträgt ca. 8730 Mrd. Yen, was ca. 59 Mrd. USD entspricht	CEA – 2020 Einkünfte von 5,7 Mrd. EUR EDF – 2021 Umsatz von 84,5 Mrd. EUR Naval Group – Umsatz 2020 – 3,3 Mrd. EUR TechnicAtome – durchschnittlicher Jahresumsatz – 400-450 Mio. EUR	Rolls-Royce – Umsatz 2021 11,2 B€ Constellation – Umsatz 2021: 19,6 Mrd. USD Qatar Investment Authority – Gesamtfinanzierungsbetrag – 98 Mrd. USD UKRI Innovate UK – milliardenschweres Investmentportfolio BNF Resources Limited Die 546-Millionen-Dollar-Finanzierungsrunde von Rolls-Royce zur Entwicklung des ersten SMR des Landes wurde durch eine Investition der Regierung in Höhe von 210 Millionen Pfund (273 Millionen US-Dollar) sowie 193 Millionen Pfund von Rolls-Royce, BNF Resources UK und Exelon Generation unterstützt.	Holtec International – Umsatz 2021 – 240 Millionen US-Dollar	Informationen zu den CNNC-Einnahmen sind nicht verfügbar, aber das Unternehmen verfügt derzeit über 24 Kernkraftwerke in Betrieb und 6 Blöcke im Bau, was indirekt seine finanzielle Leistungsfähigkeit bestätigt.
<i>Alle SMR-Entwickler, möglicherweise mit Ausnahme von Holtec, verfügen über beträchtliche eigene Finanzmittel oder Zusagen aus anderen Quellen, um den Entwurf und schließlich auch den Bau des FOAK abzuschließen.</i>						
Eingegangene Zusagen und Zukunftsaussichten	USA: Oktober 2020 ein 720-MWe-NuScale für Utah Associated Municipal Power Systems	USA: August 2022 Tennessee Valley Authority (TVA) hat mit GEH eine Vereinbarung	NUWARD befindet sich in der Konzeptionsphase, daher gibt es keine Verpflichtungen seitens	UK SMR befindet sich in der detaillierten Entwurfsphase, es gibt jedoch keine Zusagen von	Im Nov. 2022 Holtec hat mit Škoda Praha und Hyundai Engineering and	CNNC hat außer der Demonstrationseinheit ACP100 Linglong One

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	<p>(UAMPS); Im Juli 2021 wurde das Projekt auf 6 Module verkleinert Polen: September 2022 NuScale Power und KGHM unterzeichnen Auftrag zur Einleitung der Errichtung des ersten kleinen modularen Reaktors in Polen Rumänien: Absichtserklärung für das erste NuScale-6-Modul-462-MWe-Kraftwerk in Rumänien mit dem staatlichen Kernenergiekonzern S.N. Nuclearelectrica im Mai 2022 für SMR am Standort Doicești unterzeichnet. Ukraine: Absichtserklärung unterzeichnet mit: Ukraine Energoatom 09.2021 Tschechische Republik CEZ Group – 09.2019 Bulgarien KNPP-NB PLC – 02.2021 United Kingdom Shearwater Energy, Ltd – 01.2021 Im August 2022 wurde zwischen NuScale Power und Fermi Energia eine</p>	<p>über den Einsatz eines BWRX-300 am Standort Clinch River in der Nähe von Oak Ridge getroffen Großbritannien: September 2022 GEH und das in Großbritannien ansässige Unternehmen Sheffield Forgemasters haben vereinbart, bei der Unterstützung des möglichen Einsatzes des BWRX-300 im Vereinigten Königreich zusammenzuarbeiten. Kanada: Dezember 2021 – Bereitstellung von BWRX-300 am Standort Darlington bis 2028 Juni 2022 – BWRX wurde von SaskPower für einen möglichen Einsatz Mitte der 2030er Jahre ausgewählt Polen: Oktober 2022: Ein von Laurentis Energy Partners und Synthos Green Energy unterzeichneter Rahmendiensteleistungsvertrag wird die Entwicklung und den Einsatz kleiner modularer</p>	<p>potenzieller Nutzer. Aufgrund seiner Erfahrung und langjährigen erfolgreichen Arbeit im Nuklearsektor verfügt das Konsortium jedoch über ein sehr gutes Potenzial auf dem SMR-Markt</p>	<p>potenziellen Nutzern, RR hat jedoch zahlreiche Vereinbarungen mit Partnern getroffen, die die Entwicklung und Umsetzung des SMR-Projekts unterstützen werden: Atkins, Assystem, Jacobs, Nuclear AMRC, Laing O'Rourke, Bam Nuttal , National Nuclear Laboratory, TWI, Keppel Fells sowie mit dem Department for Business, Energy & Industrial Strategy September 2022 Rolls-Royce SMR hat eine Absichtserklärung mit dem tschechischen Nukleartechnik- und Fertigungsunternehmen Škoda JS unterzeichnet. Das MoU bietet die Gelegenheit, Bereiche der Zusammenarbeit für den Rolls-Royce-SMR für den Einsatz sowohl in der Tschechischen Republik als auch in weiteren mitteleuropäischen Regionen zu erkunden.</p>	<p>Construction ein MOA abgeschlossen, um die Planung für den Bau von SMR-160 in der Tschechischen Republik voranzutreiben. 09.2022: Die Absichtserklärung mit ČEZ wurde unterzeichnet, um einen kontinuierlichen Austausch zwischen den Parteien zur Bewertung des SMR-160-Einsatzes in Temelin zu ermöglichen, wo ČEZ bereits im Jahr 2032 den Einsatz eines Pilot-SMR plant. 03.2022: Holtec hat mit der Mitsubishi Electric Corporation in den USA eine Vereinbarung über die Entwicklung und Konstruktion der digitalen Instrumentierungs- und Steuerungssysteme (I&C) für seinen kleinen modularen Reaktor SMR-160 getroffen. 11.2021: Holtec hat mit Hyundai Engineering & Construction aus</p>	<p>keine Informationen veröffentlicht</p>

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Absichtserklärung zur Bewertung der Errichtung einer NuScale-SMR-Anlage in Estland bis 2031 unterzeichnet.	<p>Reaktoren (SMRs) in Polen unterstützen. Die Vereinbarung ermöglicht eine internationale Zusammenarbeit zwischen den beiden Unternehmen, beginnend mit der frühen Projektplanung.</p> <p>Dezember -2021 – GEH, BWXT Canada Ltd. und Synthos Green Energy gaben ihre Absicht bekannt, beim Einsatz von BWRX-300 in Polen zusammenzuarbeiten</p> <p>Estland: September 2022 – Fermi Energia AS hat eine Ausschreibung für drei kleine modulare Reaktorentwickler der neuen Generation veröffentlicht: General Electric / Hitachi BWRX-300, NuScale VOYGR und Rolls Royce UK SMR</p> <p>Oktober 2019 – GEH und Fermi Energia haben vereinbart, bei möglichen Einsatzanwendungen für den BWRX-300 Estland von GEH zusammenzuarbeiten</p>			<p>Südkorea eine Vereinbarung über die schlüsselfertige Lieferung der kleinen modularen Reaktoranlage SMR-160 von Holtec weltweit abgeschlossen.</p> <p>04.2020: Holtec hat Framatome mit der Lieferung von Kernbrennstoff für seinen SMR-160 beauftragt, einschließlich der Fertigstellung aller notwendigen technischen Arbeiten, um den SMR-160 mit GAIA-Brennelementen zu befeuern.</p> <p>Ukraine :03.2018 Eine von Holtec und Energoatom unterzeichnete Absichtserklärung sieht die Einführung von SMR durch die Ukraine vor, wobei das Land zu einem Produktionszentrum für SMR-160-Reaktorkomponenten werden soll</p> <p>07.2017: Holtec hat eine Kooperationsvereinbarung</p>	

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
		Fermi Energia hat Vorverträge mit estnischen Geschäftskunden abgeschlossen. Die Verträge sind die Grundlage für den Abschluss weiterer Verträge über den Kauf und Verkauf von Strom. Der Zielpreis pro MWh in diesen Verträgen beträgt 55 Euro. Das Unternehmen schloss Verträge über 500 GWh ab, was etwa einem Zehntel der Jahresproduktion des ersten Reaktors entspricht.			g mit dem kanadischen Unternehmen SNC-Lavalin unterzeichnet, um bei der Entwicklung von Holtecs SMR-160 zusammenzuarbeiten	
<i>Der bestätigte Standort für NuScale ist das Carbon Free Power Project (CFPP) im Idaho National Laboratory und in Doicești, Rumänien. Der andere angekündigte Standort ist OTG BWRX-300 am Kernkraftwerk Darlington in Ontario, dessen Fertigstellung für 2028 geplant ist</i>						
3) Design und Technologie und deren Ausgereiftheit						
Entwicklungsstand des Designs	Detailliertes Design, Equipmentherstellung im Gange	Detailliertes Design, Pre-Application Review der Licensing Topical Reports	Konzeptionelles Design	Fortgeschrittenes Design	Vorläufiges Design abgeschlossen, Pre-Application Review der Licensing Topical Reports	Detailliertes Design entwickelt Linglong One befindet sich Juli 2021 in Bau
<i>Für drei von sechs SMRs liegt ein detailliertes Design vor, eines davon befindet sich im Bau. Die Nichtverfügbarkeit des detaillierten Designs von NUWARD und SMR-160 könnte den Bau verzögern, wobei NUWARD größere Aussichten auf die Lizenzierung in der EU hat.</i>						

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Technologieentwicklungsbedarf	Die Technologie zur Herstellung von helixförmigen Rohren des Dampferzeuger sollte wieder entwickelt werden (im Vereinigten Königreich gab es Erfahrungen mit gasgekühlten Reaktoren, diese werden jedoch derzeit nicht hergestellt).	GEH verfügt über alle Technologien, die für den BWRX-300 benötigt werden	CEA, EDF, Naval Group und TechnicAtome verfügen über alle Technologien und Erfahrungen, die für die Entwicklung und den Einsatz der NUWARD SMRs erforderlich sind	Rolls-Royce SMR ist ein unabhängiges Unternehmen, das auf jahrzehntelange Rolls-Royce-Erfahrung in der Nuklearkonstruktion und -technik zurückgreift. Das Unternehmen plant außerdem die Einbeziehung von Partnern, die für die Gestaltung bestimmter Anlagensysteme/-teile verantwortlich sind.	Holtec gab bekannt, den Bau der weltweit ersten speziellen SMR-Produktionsanlage in Camden abgeschlossen zu haben. Die Fabrik verfügt über die Hebe-, Schneid-, Schweiß-, Plattier-, Bohr-, Bearbeitungs-, Inspektions- und Versandkapazitäten, die für alle Anforderungen an die Herstellung der Ausrüstung des SMR-160 erforderlich sind.	CNNC verfügt über das hauseigene Fachwissen, das für das Design und den Einsatz der ACP100-SMRs erforderlich ist
<i>Alle Anbieter verfügen angeblich über hauseigenes Fachwissen für das Design der SMRs, das bei Bedarf durch das Fachwissen von Partnern/Kollegen in designspezifischen Bereichen wie I&C, Kernbrennstoff usw. ergänzt werden kann.</i>						
Neuartig vs. evolutionär	Die SMR-Technologie von NuScale ist eine Weiterentwicklung, die auf bewährten und etablierten Grundlagen von PWR-Brennstoff und -Technologie aufbaut. Die Neuheiten von NuScale umfassen: Integriertes Reaktordesign (Containment und NSSS befinden sich in einem einzigen Modul) Umfangreicher Einsatz passiver Systeme. Alle	Der BWRX-300 ist der Siedewasserreaktor der 10. Generation, der Merkmale früherer Konstruktionen nutzt – Naturumlauf aus dem ESBWR; Schlüsselkomponenten der in Japan eingesetzten ABWR, GNF2 Brennelemente; GEH verfügt derzeit über mehr als 20 BWR-Anlagen mit umfassender Betriebserfahrung.	Das Design soll „von französischen Technologien profitieren, die auf mehr als 50 Jahren Erfahrung in der Konstruktion, Entwicklung und dem Bau von PWR und mehr als 2.000 Reaktorjahren Erfahrung im PWR-Betrieb basieren“. Die Neuheit des NUWARD-Designs umfasst: Innovatives	Rolls-Royce SMR soll auf Standard-Kernenergie-technologie zurückgreifen, die in 400 Reaktoren auf der ganzen Welt eingesetzt wird, gestützt auf 60 Jahre Erfahrung in der Herstellung kleiner Reaktoren für U-Boote. Neuartig im Design – Verwendung von Betonfertigteilen, Herstellungs- und Konstruktionsmethoden,	Der SMR-160 plant Innovation durch Vereinfachung und den Einsatz vollständig passiver Sicherheitssysteme und soll sich gleichzeitig auf die jahrzehntelange bewährte Betriebsgeschichte der bestehenden kommerziellen Flotte von PWRs stützen.	Das Designkonzept des ACP100 basiert auf der PWR-Technologie und dem Einsatz passiver Sicherheitssysteme. CNNC verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung in der Planung von Kernkraftwerken und Nuklearanlagen Zu den ACP100-Innovationen gehören: Integriertes Design

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	NPM sind teilweise in einem Sicherheitsbecken untergetaucht, das als ultimative Wärmesenke dient und sich unter der Erde befindet. Das Containment wird während des normalen Betriebs unter Vakuum gehalten.	Der BWRX-300 ist ein wassergekühlter SMR mit Naturumlauf und passiven Sicherheitssystemen. Die Neuheiten des BWRX-300 umfassen: Der Reaktor und die NSSS-Sicherheitsanlagen befinden sich größtenteils unter der Erdoberfläche. Passives Containment-Kühlsystem Passive Zerfallswärmeabfuhr Untergetauchter Abschnitt des Containment	integriertes Reaktordesign Passive Kerninjektion Passive Zerfallswärmeabfuhr Unterwasser-Containment sorgt für passive Kühlung für mehrere Tage Ein kleiner Kern in einem großen RPV unterstützt die Rückhaltestrategie im RPV Passive Flutung der Reaktor Grube Bor-freies Design zur Reduzierung der erzeugten Abwässer	umfassender Einsatz digitaler Systeme. Die Neuheiten des britischen SMR-Designs umfassen: Passives Containment-Kühlsystem Passives Zerfallswärmeabfuhrsystem Passives Notfall-Kernkühlsystem Kleines Leck Injektion System Bor-freies Design zur Reduzierung der erzeugten Abwässer	Die Neuheit des SMR-160-Designs umfasst: Integriertes Design NSSS befindet sich unter der Erde Passives Kernkühlsystem Sekundärzerfallswärmeabfuhrsystem Passives Containment-Kühlsystem Start ohne externe Stromversorgung (d. h. „Schwarzstart“-Fähigkeit) Unterirdische Lagerung von SNF vor Ort 80 Jahre Lebensdauer Optional – luftgekühlter Kondensator für wasserarme Regionen	NSSS befindet sich unter der Erdoberfläche Passive Kernkühlung Passives Restwärmeabfuhrsystem Passive Containment-Kühlung Automatisches Druckentlastungssystem Passive Reaktor Grube Überflutung
<p><i>Alle SMR-Designs basieren auf der LWR-Technologie (PWR- und BWR) und verfügen außerdem über neue Merkmale, die für große KKW-Designs nicht typisch sind:</i></p> <p><i>Umfangreicher Einsatz passiver Sicherheitssysteme – alle sechs untersuchten SMRs</i></p> <p><i>Integriertes Design – NuScale, Nuward, SMR-160, ACP100</i></p> <p><i>Unterirdisches NSSS – NuScale, BWRX-300, Nuward, SMR-160, ACP100</i></p> <p><i>Borfreies Design eines Reaktivitätskontrollsystems – Nuward, RR UK SMR</i></p> <p><i>Untergetauchtes/teilweise untergetauchtes Containment – NuScale, BWRX-300, Nuward</i></p> <p><i>80 Jahre Lebensdauer – SMR-160.</i></p> <p><i>Achtzig Jahre HOLTEC SMR-160 werden in der EU möglicherweise nicht akzeptiert, da dies der erste Präzedenzfall sein wird, der in der Entwurfsphase eine Lebensdauer von 80 Jahren vorsieht</i></p>						
Bewährte Technologien	NuScale verwendet Technologien zur Herstellung von Brennstoff und	Aufbauend auf der ESBWR-Entwicklung nutzt der BWRX-300 die Design- und Lizenzbasis	Der Entwurf wird sich auf französische Erfahrungen mit PWR stützen	Das Design basiert auf einem optimierten und verbesserten Einsatz von PWR-Technologien	SMR-160 ist ein konventioneller PWR Reaktor, der Wasser als Kühlmedium verwendet	Das ACP100-Design beinhaltet gesammelte Betriebserfahrungen und nutzt bewährte

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Hauptausrüstung, die seit vielen Jahren für den Bau von Druckwasserreaktoren verwendet werden. Allerdings ist das Design und die Verwendung des modularen Designs eine Neuheit des FOAK-Werks, sodass dies bei der Kommissionierung und Betrieb der Anlage zu Schwierigkeiten/Problemen führen kann	des NRC-zertifizierten ESBWR, reduziert jedoch den Umfang und die Komplexität der Installation.			und auf der Grundlage weltweiter industrieller Betriebserfahrung mit Druckwasserreaktoren entwickelt wird.	PWR-Technologien im Betrieb
<i>Alle SMR-Designs basieren auf der LWR-Technologie (PWR BWR), ergänzt durch neuartige SMR-Funktionen, die sich im Design und im Betrieb noch beweisen müssen</i>						
Mögliche Probleme mit der Technologie und dem Design	Während NuScale im Werk montiert wird und somit Verzögerungen vermieden werden könnten, können diese auch nicht ausgeschlossen werden. Neuartige Funktionen und integriertes Design sind noch nicht betriebsgeprüft	Sowohl GE als auch Hitachi verfügen über Erfahrung in der Lieferung großer Leistungsreaktoren sowie Erfahrung in der Lizenzierung des ESBWR in den USA und sollten daher keine Schwierigkeiten/Probleme mit Technologien oder Design haben. Neue Features sind noch nicht betriebsgeprüft	Die Erfahrung von CEA, EDF, Naval Group und TechnicAtome im Design und Betrieb von Nuklearanlagen wird bei der Entwicklung und dem Einsatz von NUWARD hilfreich sein. Neuartige Features und integriertes Design sind noch nicht betriebsgeprüft	Das SMR-Design basiert auf der jahrzehntelangen Erfahrung von Rolls-Royce in der Nuklearkonstruktion und -technik, daher sind keine großen technologischen Probleme zu erwarten, FOAK-Anlagen sind jedoch immer anspruchsvolle Projekte. Neue Features sind noch nicht betriebsgeprüft	Das SMR-160-Design von HOLTEC ist die erste Unternehmenserfahrung im Design von Kernkraftwerken, HOLTEC verfügt über umfassende Erfahrung im Design von SNF-Managementanlagen.	CNNC verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung in der Entwicklung und Lizenzierung von Reaktoren und Nuklearanlagen in China. Die Erfahrung mit der Lizenzierung von Kernkraftwerken im Ausland ist jedoch eher begrenzt und verfügt über keine Erfahrung in den EU-Ländern. Neuartige Features und integriertes Design sind

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
						noch nicht betriebsgeprüft
<i>Mit Ausnahme von Holtec (und möglicherweise RR) gibt es keine großen Herausforderungen im Hinblick auf die Fähigkeit der Entwickler, die Technologie zu beherrschen. Dennoch wurden verwendete neuartige Features und integriertes Design noch nicht betriebsgeprüft</i>						
Benötigtes Material und neue Probleme/Herausforderungen	NuScale verwendet typische Materialmuster für PWR mit einem ähnlichen Druck- und Temperaturbereich wie bei PWR	BWRX-300 weist die für BWR typischen Druck- und Temperaturbereiche auf, sodass keine Materialprobleme zu erwarten sind	NUWARD verwendet typische Materialmuster für PWR mit einem ähnlichen Druck- und Temperaturbereich wie bei PWRs	RR SMR verwendet typische Materialmuster für PWR mit einem ähnlichen Druck- und Temperaturbereich wie bei PWRs	SMR-160 verwendet typische Materialmuster für PWR mit einem ähnlichen Druck- und Temperaturbereich wie bei PWRs	ACP100 verwendet typische Materialmuster für PWR mit einem ähnlichen Druck- und Temperaturbereich wie bei PWRs
<i>Alle sechs SMRs verwenden typische Materialmuster für PWR, Standardbrennstoff und weisen einen ähnlichen Druck- und Temperaturbereich wie PWRs auf, sodass die Materialien keine Herausforderung für die Entwicklung/den Einsatz darstellen sollten.</i>						
Bewertung des Technologie-Bereitschaftsgrads	Die Technologie befindet sich in der Entwicklung, daher sind einige Herausforderungen für die FOAK-SMR-Designs unvermeidbar					ACP100 befindet sich in Bau
Bekannte und potenzielle Herausforderungen vor der Reife						
<i>Die Technologie für fünf von sechs SMRs befindet sich in der Entwicklung, ist also noch nicht fertig. Die potenzielle Herausforderung für die Entwicklung, Herstellung und den Betrieb von SMRs könnte in der Neuheit ihrer Funktionen liegen, wie dem integrierten Design von NuScale, NUWARD und SMR160, passiven Sicherheitssystemen, Bor-freier Reaktivitätskontrolle usw., die noch nicht im Betrieb getestet/bewiesen wurden.</i>						
4) Lizenzierung						
Normen und Vorschriften, die als Grundlage für die Designentwicklung dienen	US: 10 CFR Part 50, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, 10 CFR Part 51, "Environmental	US: 10 CFR Part 50, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, 10 CFR Part 51, "Environmental	EU: EUR Volume 1, Chapter 5 – EUR KEY POSITIONS ON SMLWR AFCEN: RCC-M – Design and Construction Rules for Mechanical	UK: Nuclear Installations Act Nuclear Installations Regulations Nuclear Industries Security Regulations 2003	US: 10 CFR Part 50, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, 10 CFR Part 51, "Environmental	China: Domestic standards and requirements. Die IRRS-Mission in China im Jahr 2016 kam zu dem Schluss, dass

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Protection Regulations for Domestic Licensing and Related Regulatory Functions” 10 CFR Part 52, “Licenses, Certifications, and Approvals for Nuclear Power Plants” NRC Regulatory Guides – Power Reactors	Protection Regulations for Domestic Licensing and Related Regulatory Functions” 10 CFR Part 52, “Licenses, Certifications, and Approvals for Nuclear Power Plants” NRC Regulatory Guides – Power Reactors	Components of PWR Nuclear Islands PTAN 2018 RCC-MRx Seismic analysis components RSE-M In-Service Inspection Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands RCC-E- Design and construction rules for electrical and I&C systems and equipment RCC-C – Design and Construction rules for Fuel Assemblies of PWR Nuclear Power Plants	Nuclear Safeguards (EU Exit) Regulations 2019 Ionising Radiations Regulations 2017 The Radiation (Emergency Preparedness and Public Information) Regulations 2019 The Construction (Design and Management) Regulations 2015	Protection Regulations for Domestic Licensing and Related Regulatory Functions” 10 CFR Part 52, “Licenses, Certifications, and Approvals for Nuclear Power Plants” NRC Regulatory Guides – Power Reactors	das Land in den sechs Jahren seit der letzten Überprüfung im Jahr 2010 erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung des Regulierungsrahmens erzielt hat.
<i>Jedes Land, in dem die sechs SMRs entwickelt/gebaut werden, verfügt über einen eigenen Rechtsrahmen, der eine Reihe von Standards und Vorschriften für die Gestaltung und den Betrieb von Kernkraftwerken umfasst. Während dies bei der Lizenzierung in der EU berücksichtigt wird, ist es sehr wahrscheinlich, dass Anbieter aufgefordert werden, ihre Designs an spezifische nationale Anforderungen und Lizenzierungsverfahren anzupassen.</i>						
Lizenzüberprüfungen durchgeführt oder geplant	US: https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/nuscale.html Design Certification Application im Aug 2020 abgeschlossen Combined licence application (COL) für SMR UAMPS im Januar 2024 zur Einreichung geplant.	US: https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/pre-application-activities/bwrx-300.html GEH hat dem NRC insgesamt fünf Zopical Reports für das GEH BWRX-300 SMR-Design vorgelegt CANADA: Pre-licensing	NUWARD befindet sich in der Konzeptionsphase Eine vorläufige Dokumentation wurde dem französischen ASN vorgelegt	UK: RR SMR befindet sich in der detaillierten Entwurfsphase, es wurden jedoch noch keine Lizenzprüfungen durchgeführt. Am 1. April 2022 hat ONR Schritt 1 des Generic Design Assessment (GDA) für das Design des Rolls-Royce SMR 470 MW bekannt gegeben.	US: https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/pre-application-activities/holtec/documents.html HOLTEC hat der NRC zwei Topical Reports für den SMR-160 vorgelegt	China: Der ACP100 Final safety assessment report (FSAR) wurde von der NNSA genehmigt und die Baugenehmigung erteilt Keine Lizenzprüfungen in anderen Ländern.

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	CANADA: Pre-licensing vendor design review im Januar 2020 begonnen	vendor design review im Januar 2020 begonnen UK: Pre-licensing vendor design im Januar 2020 begonnen. Im Dezember 2020 akzeptierte ONR, dass die Offenlegung von BRWX-300-Informationen den kommerziellen Interessen von GE-Hitachi schaden und seinen Wettbewerbern helfen würde. Da jede formelle Prüfung des BWRX-300-Designs in einem GB-Kontext, die möglicherweise in der Zukunft stattfinden wird oder nicht, behördliche Beurteilungen von ONR erfordern würde, die öffentlich dokumentiert sind, ist jedes öffentliche Interesse im Zusammenhang mit der Freigabe von kommerziellen Informationen von GE-Hitachi derzeit erheblich eingeschränkt.		ONR erhielt eine Anfrage vom Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriestrategie, eine GDA zu dem von Rolls-Royce vorgeschlagenen Design zu starten, nachdem die Regierung die Bereitschaftsprüfung des Rolls-Royce-Antrags geprüft hatte. ONR hat eine Gebührenvereinbarung mit Rolls-Royce SMR Limited unterzeichnet und ausreichende Management-, Bewertungs- und Geschäftsunterstützungsressourcen mobilisiert, um die GDA durchzuführen.		
<p><i>Bisher haben nur zwei von sechs SMRs (NuScale und ACP100) Lizenzunterlagen entwickelt, die von nationalen Regulierungsbehörden überprüft wurden. Es ist auch zu beachten, dass keine Lizenzdokumentation für ACP100 verfügbar ist, ACP100 jedoch im Jahr 2016 die von der IAEA durchgeführte allgemeine Reaktorsicherheitsprüfung bestanden hat. Die weiteren vier Reaktoren befinden sich in unterschiedlichen Stadien der Vorbereitung der Genehmigungsdokumentation und streben eine Fertigstellung bis 2025–2030 an.</i></p>						

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Fehlende Normen oder Vorschriften	In den USA fehlen keine Standards und Vorschriften, NRC erwägt jedoch bestimmte Änderungen in den 10 CFR-Teilen hin zu SMR-Zertifizierungsanforderungen. Es könnte notwendig sein, entsprechende Vorschriften in anderen Ländern zu entwickeln, in denen der Einsatz geplant ist	In den USA fehlen keine Standards und Vorschriften, NRC erwägt jedoch bestimmte Änderungen in den 10 CFR-Teilen hin zu SMR-Zertifizierungsanforderungen. Es könnte notwendig sein, entsprechende Vorschriften in anderen Ländern zu entwickeln, in denen der Einsatz geplant ist	In Frankreich fehlen keine Standards und Vorschriften für die Entwicklung von PWR-Reaktoren. Allerdings könnten einige Änderungen erforderlich sein, um den SMR-Besonderheiten Rechnung zu tragen. Es könnte notwendig sein, entsprechende Vorschriften in anderen Ländern zu entwickeln, in denen ein Einsatz stattfinden könnte.	Derzeit gibt es keine gesetzliche Definition eines SMR und NIA 1965 [65] enthält keine spezifischen Bestimmungen für SMRs, daher muss das Gesetz geändert werden, um SMR-spezifische Bestimmungen aufzunehmen	In den USA fehlen keine Standards und Vorschriften, NRC erwägt jedoch bestimmte Änderungen in den 10 CFR-Teilen hin zu SMR-Zertifizierungsanforderungen. NRC hat die Frist für die Einreichung von Kommentaren auf Oktober 2022 festgelegt. Es könnte notwendig sein, entsprechende Vorschriften in anderen Ländern zu entwickeln, in denen der Einsatz geplant ist	Die IRRS-Mission in China im Jahr 2016 kam zu dem Schluss, dass das Land erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung des Regulierungsrahmens erzielt hat.
<i>In allen Ländern, in denen die sechs SMRs entwickelt/gebaut werden, gelten Normen und Vorschriften für die Konstruktion und den Betrieb von Kernkraftwerken. Für die Lizenzierung außerhalb von Anbietern/Ländern wird dies jedoch wenig helfen, da in diesem Fall länderspezifische nationale Standards und Vorschriften verwendet werden müssen. Dies könnte für die meisten Länder, die sich für den Import von SMR-Technologie entscheiden, eine Herausforderung darstellen, da das Land neben der grundsätzlichen Entscheidung auch einen eigenen, für diesen Zweck geeigneten Regulierungsrahmen aktualisieren/entwickeln müsste.</i>						
Lizenzstatus in Ländern, in denen der Einsatz geplant ist, und Bedarf an zusätzlicher Entwicklung	DCA im August 2020 abgeschlossen; Design erhielt endgültige Zertifizierung im Februar 2023 in den USA, Pre-Licensing Vendor Design Review (VDR) in Canada (2020)	Pre-licensing activities in den USA 2019 begonnen, Pre-licensing vendor design review durch kanadische CNSC im Januar 2020 begonnen. Pre-licensing vendor design review durch britische ONR im Januar 2020 begonnen.	Vorlizenzierungsantrag an ASN übermittelt	UK: Im April 2022 kündigte ONR Schritt 1 des General Design Assessment an. Der GDA-Prozess konzentriert sich auf den Entwurf eines generischen Kernkraftwerks und ist nicht standortspezifisch.	Die Vorlizenzierungsaktivitäten begannen in den USA im Jahr 2014, Lizenzierungsaktivitäten in anderen Ländern begannen noch keine	CNNC hat noch keine Einsatzpläne/Vereinbarungen mit anderen Ländern bekannt gegeben

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
<i>Die einzigen SMRs, die derzeit in den Herkunftsländern zugelassen sind, sind NuScale und ACP100. Der Lizenzierungsprozess für weitere vier SMRs und für andere Länder befindet sich in der Anfangsphase.</i>						
Gesamtbeurteilung der Lizenzdauer	Die Fertigstellung des DCA dauerte etwa drei Jahre. COL soll im Januar 2024 beginnen und bis 2025 fertiggestellt sein (unter Berücksichtigung einer Bauzeit von 48 Monaten und der geplanten Inbetriebnahme im Jahr 2029). Es ist wahrscheinlich, dass es bei COL zu Verzögerungen kommt und es nicht realistisch ist, es innerhalb eines Jahres nach Prozessbeginn zu erhalten (bei großen PWR dauerte der COL-Prozess 8–10 Jahre vom Start bis zur Fertigstellung).	Die Dauer sollte mit NuScale vergleichbar sein, hängt jedoch stark vom Zeitpunkt und der Qualität der Lizenzanträge ab	Die Dauer sollte vergleichbar sein, dies hängt jedoch stark von der Position der Regulierungsbehörde in Bezug auf SMR ab	Die typische Mindestdauer gemäß ONR (guide to the Regulatory Process rev.0 2013) beträgt ~ 48 Monate ohne GDA-Schritt 1	Die Dauer sollte mit NuScale vergleichbar sein	Dez. 2012, Basic Design Approval 2019 FSAR bei NNSA eingereicht, Baugenehmigung erteilt 2021 Erster Beton
<i>Der Lizenzierungsprozess für ACP100 ist abgeschlossen, es sind jedoch keine Informationen zu den Meilensteinen des Lizenzierungsplans verfügbar. Der andere SMR mit erweiterter Lizenzierung ist NuScale, das im Januar 2023 die endgültige Designzertifizierung durch das US-amerikanische NRC erhielt. Die Gesamtdauer der NuScale-Lizenzierung soll etwa 4 Jahre betragen, dies ist jedoch ein eher optimistischer Plan, der sich verzögern könnte (wie die Lizenzierung großer Kernkraftwerke zeigt)</i>						
Weitere regulatorische Herausforderungen	DCA hat die folgenden Probleme nicht behoben: (1) die Gestaltung der Abschirmwände in bestimmten Bereichen	Herausforderungen bei der Lizenzierung sind möglich, Ausmaß und Art können jedoch nicht vorhergesagt werden.	In Anbetracht der Tatsache, dass das NUWARD-Konsortium INAB gegründet hat und geplant ist, eine	Derzeit gibt es keine gesetzliche Definition eines SMR und NIA 1965 enthält keine spezifischen Bestimmungen für SMRs,	Noch offen	Die CNNC-Erfahrung bei der Lizenzierung von Kernkraftwerken im Ausland ist eher begrenzt und verfügt

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	der Anlage; (2) die Möglichkeit einer Containment-Leckage aus dem combustible gas monitoring system und (3) die Fähigkeit der Dampferzeugerrohre, die Struktur- und Leckageintegrität während Dichtwellenoszillationen im Sekundärflüssigkeitssystem aufrechtzuerhalten Alle diese Probleme werden in der COL-Phase behandelt	Der reibungslose Ablauf des Lizenzierungsprozesses hängt stark von der Qualität der Einreichungen ab.	gemeinsame regulatorische Überprüfung durch ASN aus Frankreich, SUJB aus Tschechien und STUK aus Finnland durchzuführen, wird dies die regulatorische Überprüfung in diesen, aber auch in anderen EU-Ländern erleichtern.	daher muss das Gesetz geändert werden, um SMR-spezifische Bestimmungen aufzunehmen		über keine Erfahrung in den EU-Ländern.

Weitere regulatorische Herausforderungen neben den oben aufgeführten könnten auf die Lizenzierung in den Ländern zurückzuführen sein, in denen potenzielle SMRs eingesetzt werden, da es sich bei all diesen um die Lizenzierung einer FOAK-Anlage in einem Land handelt.

5) Bau und Einsatz						
Fabrik- und Standortaktivitäten, jeweils %	Das NuScale Power Module™ (NPM) einschließlich des Containments wird vollständig im Werk hergestellt und per LKW, Bahn oder Lastkahn zum Werksstandort transportiert, ohne dass eine Fertigung vor Ort erforderlich ist. Insgesamt werden ca.	60/40 Basierend auf dem Kostenverhältnis. Dieses Verhältnis wird stark von der Existenz einer seebasierten Entladeanlage am Standort beeinflusst	Das Verhältnis zwischen Fabrik- und Standortaktivitäten ist noch nicht definiert	Mit dem Ziel eines 500-tägigen modularen Aufbaus minimiert dieses Konzept laut RR den Zeit- und Arbeitsaufwand vor Ort, der für den Bau und die Errichtung der Anlage erforderlich ist, da etwa 90 % der Fertigungs- und Montageaktivitäten unter Fabriksbedingungen durchgeführt werden.	Das Verhältnis zwischen Fabrik- und Standortaktivitäten ist noch nicht definiert SMR-160 basiert darauf, dass die Anlage im Wesentlichen in einer Fabrikumgebung hergestellt wird und aus vorgefertigten Baugruppen besteht, um die Baukosten und den	Laut CNNC sollen die Installationsprozesse des ACP100 vor Ort optimiert werden (unter Berücksichtigung der Erfahrungen des ACP100-Demonstrationsprojekts).

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	700 Tonnen in drei Segmenten vom Werk verschickt Turbinengeneratoren, chemische Steuerungsprozesse und andere modulare Systeme werden außerhalb des Standorts zusammengebaut, auf Rahmen montiert und zum Anlagenstandort transportiert. Die Produktionskapazität der Lieferkette in den USA beträgt 36 Module pro Jahr			Der Personalbedarf wurde durch die dedizierte Offsite-Modulfertigung um über 40 % gesenkt. Das SMR-Design ist zu etwa 85 % standardisiert und zu 15 % standortspezifisch.	Zeitplan vor Ort zu reduzieren.	
<i>Nach Angaben der Anbieter sollen 60 bis 90 % der Montagearbeiten unter Werksbedingungen durchgeführt werden.</i>						
Erwartete Bauzeit	36 Monate ab Grundsteinlegung	30 -36 Monate ab Grundsteinlegung	36 Monate ab Grundsteinlegung	24 Monate ab Grundsteinlegung (NOAK) 48-monatiger Bauplan, der die Vorbereitung, den Bau und die Inbetriebnahme vor Ort umfasst	36 Monate für den ersten SMR-160, wobei die Bauzeit für nachfolgende Einheiten auf 30 Monate oder weniger verkürzt wird und mehrere Einheiten an einem Standort nur durch Standortbeschränkungen oder Eigentümerbedürfnisse begrenzt sind.	58 Monate für FOAK und es liegt derzeit im Zeitplan
<i>Die geplante Baudauer für das FOAK liegt zwischen 30 und 36 Monaten. Der ACP100-FOAK-Zeitplan ist länger – 58 Monate für eine Doppelblockanlage</i>						

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Einsatzkonzept – einzelne oder mehrere Einheiten – Anzahl	Bis zu 12 NPM pro Standort	Referenzdesign – 1 Einheit	Referenzdesign – Doppeleinheit	Einzeleinheit	Einzeleinheit	Das Demonstrationsprojekt ist eine Anlage mit zwei Einheiten
<i>Das Einsatzkonzept von SMR sieht den Einsatz von Einzel-, Doppel- oder bis zu 12 Modulen (NuScale) vor, das Design spezifischer Anlagen kann jedoch an die Bedürfnisse des Kunden angepasst werden</i>						
Schrittweiser Einsatz	Der schrittweise Einsatz von NPMs ist möglich, allerdings müssen einige gemeinsame Strukturen vorhanden sein, bevor das erste Modul in Betrieb genommen wird – z. B. Pool, Turbine, Nebengebäude, etc.	Im Referenzdesign nicht vorgesehen	Im Referenzdesign nicht vorgesehen	Im Referenzdesign nicht vorgesehen	Im Referenzdesign nicht vorgesehen	Im Referenzdesign nicht vorgesehen
<i>Der schrittweise Einsatz von SMRs ist in Anlagen mit mehreren Modulen/Mehreinheiten möglich</i>						
6) Komplementarität des Betriebs mit erneuerbaren Energien						
Beurteilung der Kompatibilität des Betriebs mit intermittierenden Stromquellen	Moduldesign und Betriebsparameter ermöglichen Änderungen der Reaktorleistung nur durch Bewegung des Steuerstabs bis hin zu 40 % der Reaktorleistung, d. h. es sind keine Anpassungen der Borkonzentration im	Lastfolge im Bereich von 50 bis 100 % (0,5 % pro Minute) Der BWRX-300 sollte in der Lage sein, die tägliche Last zu steuern, um die Auswirkungen schwankender erneuerbarer Energien zu kompensieren. Die	Lastfolge im Bereich von 20 bis 100 % (5 % pro Minute.)	Lastfolge im Bereich von 50 bis 100 % (3-5 % pro Minute)	Lastfolge im Entwurf vorgesehen (Raten werden in der späteren Entwurfsphase bekannt gegeben)	Lastfolgefähigkeiten sind nicht angegeben

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
realisierbarem Leistungsniveau, zulässiger Betrieb auf minimalem, intermittierendem Leistungsniveau	wird durch Turbinenbeschränkungen bestimmt. Wenn man bedenkt, dass das NuScale-Design bisher vorsieht, dass jedes NPM über eine eigene 77-MWe-Turbine verfügt und die empfohlene Turbinenlast typischerweise im Bereich von 25–100 % liegt, würde die minimale Langzeitbetriebslast im Bereich von etwa 20 MWe liegen. Das 12-NPM-Design bietet die Flexibilität, die Anlage durch die Inbetriebnahme zusätzlicher NPMs mit einer Last von 20 bis 924 MWe zu betreiben.	wird durch Turbinenbeschränkungen bestimmt. Wenn man bedenkt, dass GEH eine Turbinenlast von 300 MWe vorsieht und die empfohlene Turbinenlast typischerweise im Bereich von 25–100 % liegt, würde die minimale Langzeitbetriebslast im Bereich von etwa 75 MWe liegen.	wird durch Turbinenbeschränkungen bestimmt. Wenn man bedenkt, dass NUWARD eine Konstruktion mit zwei Einheiten vorsieht, eine Turbinenlast von 170 MWe und die typische empfohlene Turbinenlast im Bereich von 25–100 % liegt, würde die minimale Langzeitbetriebslast im Bereich von etwa 42 MWe liegen.	wird durch Turbinenbeschränkungen bestimmt. Wenn man bedenkt, dass RR SMR eine Nennleistung von 470 MWe vorsieht und die empfohlene Turbinenlast typischerweise im Bereich von 25–100 % liegt, würde die minimale Langzeitbetriebslast im Bereich von etwa 118 MWe liegen.	wird durch Turbinenbeschränkungen bestimmt. Wenn man bedenkt, dass SMR-160 eine Nennleistung von 160 MWe vorsieht und die empfohlene Turbinenlast typischerweise im Bereich von 25–100 % liegt, würde die minimale Langzeitbetriebslast im Bereich von etwa 40 MWe liegen.	Leistungsniveau wird durch Turbinenbeschränkungen bestimmt. Wenn man bedenkt, dass ACP100 eine Nennleistung von 125 MWe vorsieht und die empfohlene Turbinenlast typischerweise im Bereich von 25–100 % liegt, würde die minimale Langzeitbetriebslast im Bereich von etwa 30 MWe liegen.
<i>Die untere Betriebsgrenze wird durch den empfohlenen Lastbereich der Turbine bestimmt, der zwischen 25 und 100 % der Nennleistung liegt</i>						
Technische und wirtschaftliche Probleme und „Kompensation“ bei zyklischem oder intermittierendem Betrieb	Es gibt keine technischen Schwierigkeiten, SMR-Anlagen bei einer für den Langzeitbetrieb zulässigen Turbinenlast oder zyklisch zu betreiben. Ein Betrieb mit reduzierter Last führt jedoch zu einer längeren Investitionsrendite. „Kompensation“ für den intermittierenden Betrieb sind beim Abschluss des Stromlieferungsvertrages zwischen Betreiber und Stromnetz zu vereinbaren.					

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
<i>Es gibt keine technischen Schwierigkeiten, SMR-Anlagen bei einer für den Langzeitbetrieb zulässigen Turbinenlast zu betreiben. „Kompensation“ für den intermittierenden Betrieb sind beim Abschluss des Stromlieferungsvertrages zwischen Betreiber und Stromnetz zu vereinbaren.</i>						
Technische Möglichkeit zum schnellen Hochfahren nach einer vollständigen Abschaltung (z. B. Einschränkungen durch „Xenon-Effekt“) und/oder andere Einschränkungen des Betriebs	Das Multimoduldesign der NuScale-Anlage und die gestaffelte Beladung einzelner Module führen zu einer Anlagenkonfiguration, bei der sich mindestens ein Modul kurz vor dem Beginning of Life (BOL) befindet. Es ist im Allgemeinen einfacher, Leistungsmanöver auf BOL-Kernen durchzuführen, da die höhere Reaktivität im Kern eine bessere Xenon-Übersteuerung ermöglicht.	Aufgrund des großen negativen Reaktivitätskoeffizienten der Moderatorichte bietet der BWRX-300 eine Reihe inhärenter Vorteile, darunter 1) Selbstabflachung der Radialleistungsverteilung, 2) räumliche Xenon-Stabilität und 3) Fähigkeit zur Lastfolge Xenon zu überwinden. Die inhärente räumliche Xenon-Stabilität des BWRX-300 ermöglicht die tägliche Lastverfolgung über einen großen Kernleistungspegelbereich.	Informationen und Daten stehen in der detaillierten Entwurfsphase zur Verfügung	Informationen und Daten stehen in der detaillierten Entwurfsphase zur Verfügung	Informationen und Daten stehen in der detaillierten Entwurfsphase zur Verfügung	Informationen und Daten liegen nicht vor
<i>Die technische Möglichkeit eines schnellen Starts nach einer vollständigen Abschaltung kann durch den „Xenon-Effekt“ am Ende des Brennstoffzyklus beeinträchtigt werden, dieses Verhalten ist jedoch typisch für alle LWRs.</i>						
Wirtschaftliche Auswirkungen des Komplementärbetriebs	Die ergänzende Erzeugung von Wärme für industrielle Anwendungen oder Fernwärme könnte sowohl für den Anlagenbetreiber als auch für die Industrie und die Bevölkerung von Vorteil sein und die Wärmeerzeugung könnte im Vergleich zu Gas- oder Elektroheizungsoptionen wettbewerbsfähig sein					
<i>Wirtschaftliche Auswirkungen von Betriebsdaten liegen noch nicht vor, da keines der FOAK-SMRs eine oder mehrere ergänzende Betriebsanlagen vorsieht.</i>						

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
7) Co-Generation Strom- und Wärmeproduktion						
Der Stand der Entwicklung eines Konzepts der Kraft- Wärme- Koppelung, d. h. der Nutzung von Abwärme für Fernwärme	Je nach Kundenwunsch ist die Nutzung von Wärme für Industrieanwendungen und Fernwärme möglich	Eine Nutzung als Wärme für Industrieanwendungen und Fernwärme ist möglich	Das NUWARD-Design wird auch für nichtelektrische Anwendungen angepasst Alle Details werden in der detaillierten Entwurfsphase der jeweiligen Anlage zur Verfügung gestellt	Das RR-SMR-Design sieht Möglichkeiten für Kraft-Wärme-Koppelung vor. Einzelheiten werden jedoch in der detaillierten Entwurfsphase der jeweiligen Anlage bekannt gegeben	Das Design des SMR-160 sieht Möglichkeiten für die Kraft-Wärme-Koppelung für z.B., thermische Energiespeicherung, Fernwärme, Meerwasserentsalzung vor, aber diese Optionen werden während der Entwurfsphase der jeweiligen Anlage im Detail definiert	Das ACP100-Design sieht Möglichkeiten für die Kraft-Wärme-Koppelung für, z. B. Fernwärme, Meerwasserentsalzung usw. vor, diese Optionen werden jedoch während der Entwurfsphase der jeweiligen Anlage im Detail definiert
<i>Während die nichtelektrische Anwendung von SMRs als möglich angezeigt wurde, einschließlich Fern-/Industriewärme, Entsalzung usw., wurden diese Einrichtungen bei keinem der SMRs als Standardoption in die FOAK-Anlagenkonstruktion einbezogen. Diese Funktionen sind Gegenstand einer Vereinbarung zwischen Anbieter und Kunde über die Anpassung des Designs einer bestimmten Anlage an die Bedürfnisse des Kunden</i>						
8) Fragen im Zusammenhang mit dem Brennstoffzyklus						
Brennstofftyp	UO ₂ , NuFuel-HTP2 mit Gd ₂ O ₃ Standard LWR Brennstoff in 17 x 17 Konfiguration, jede Einheit 2 meter lang/ 37 Brennstoffelemente pro NPM Pin burn-up (max) – 62 MWd/kgHM	UO ₂ 240 GNF2 Brennelemente mit B4C, Hf, Gd ₂ O ₃ Pin burn-up (max) – 62 MWd/kgHM Core discharge burnup - 49,5 GWd/t	UO ₂ 76 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration Gd ₂ O ₃ Die Abbrandeigenschaften werden in der detaillierten Entwurfsphase bestimmt	UO ₂ 121 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration Gd ₂ O ₃ Pin burn-up (max) – noch nicht definiert Core discharge burnup - 55-60 GWd/t	UO ₂ 57 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration– keine Daten Pin burn-up (max) – noch nicht definiert Core discharge burnup - 45 GWd/t	UO ₂ 57 Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration – Gd ₂ O ₃ Pin burn-up (max) – noch nicht definiert Core discharge burnup - <52 GWd/t

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Core discharge burnup – 45 GWd/t					
<i>Alle sechs untersuchten SMRs verwenden „Standard“-UO2-Brennstoff</i>						
Effizienz- /Nutzungsfaktoren	> 95%	95%	90%	>90%	> 95%	>90%
<i>Der Auslastungsgrad von SMRs soll im Bereich von 90–95 % liegen, dies hängt jedoch stark davon ab, wie oft und wie tief die Last im Lastfolgemodus reduziert wird. Ein häufiger Betrieb im Lastfolgemodus könnte sich auch negativ auf die Investitionsrendite auswirken</i>						
Beladungs- Intervalle	24 Monate Das Multimoduldesign des NuScale VOYGR ermöglicht eine gestaffelte Befüllung. Beispielsweise kann in einer NuScale-Anlage mit 12 Modulen, die 924 MWe (brutto) produziert, ein 77-MWe-Modul beladen werden, während die restlichen 11 Module weiterhin 847 MWe (brutto) produzieren.	12-24 Monate	24 Monate	18-24 Monate	24 Monate	24 Monate s
Anreicherungslevel	<4.95%	3.40 / 4.95% (avg./max.)	<5%	4.95%	4.95% (4.0 average)	< 4.95
<i>Alle sechs SMRs haben Beladungsintervalle im Bereich von 12–24 Monaten und verwenden bis zu 4,95 % angereicherten UO2-Brennstoff (typische Anreicherung für LWR-Designs).</i>						
Verwendung von Thorium und Plutonium	Recycelter Brennstoff oder gemischter Uran-Plutoniumoxid-Brennstoff (MOX). Eine vom britischen National Nuclear Laboratory durchgeführte Studie	Der Einsatz von Thorium und Plutonium ist noch nicht definiert, aber wie bei anderen kommerziellen Kernkraftwerken potenziell möglich	Recycelter Brennstoff oder gemischter Uran-Plutoniumoxid-Brennstoff (MOX).	Noch nicht definiert, aber potenziell möglich wie bei anderen kommerziellen Kernkraftwerken	Noch nicht definiert, aber potenziell möglich wie bei anderen kommerziellen Kernkraftwerken	Noch nicht definiert, aber potenziell möglich wie bei anderen kommerziellen Kernkraftwerken

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	bewertete und bestätigte, dass MOX im NuScale-Kern verwendet werden könnte.					
<i>Der Einsatz von MOX-Brennstoff ist in gewissen Desings möglich, gilt jedoch nicht als Standard.</i>						
Spezifischer Brennstoffbedarf	Standard LWR Brennstoff in 17 x 17 Konfiguration, jedes Element 2 Meter lang. Zykluslänge ist anpassbar	GNF möchte eine höhere Urananreicherung nutzen, um den Brennstoffbedarf zu senken, das SNF-Volumen zu verringern und die Befüllungsintervalle auf 30–36 Monate zu verlängern. Ungefähr 32 Bündel werden nach einem 12-Monats-Zyklus ersetzt und 72 Bündel im Anschluss an einen 24-Monats-Zyklus.	Der Befüllungszyklus der Referenzanlage umfasst alle zwei Jahre einen halben Kern.	Bis zu 4,95 % angereichertes UO2 nach Industriestandard, mit einer Zirkoniumlegierung ummantelt und in einer 17x17-Anordnung. Der Kern hat eine aktive Brennstofflänge von 2,8 m. Der Rolls-Royce SMR arbeitet mit einem 18-monatigen Treibstoffzyklus und einem Gleichgewichtskern mit drei Chargen	Der SMR-160-Brennstoffkreislauf ist darauf ausgelegt, bei jedem Befüllungszyklus etwa ein Drittel der Brennelemente im Kern zu entladen und gleichzeitig einen Teil der verbleibenden Brennelemente umzuschichten.	Brennelemente in 17 x 17 Konfiguration
<i>Alle sechs untersuchten SMRs verwenden „Standard“-UO2-Brennstoff, der an die Höhe des Kerns angepasst ist</i>						
Unfalltoleranter Brennstoff	Könnte verwendet werden, wenn die ATF-Technologie kommerziell verfügbar sein wird Durch die Einführung von ATF-Kraftstoff kann das Abbrandlimit erhöht werden					
<i>Die Verwendung unfalltoleranter Brennstoffe wird in den SMRs nicht berücksichtigt, die Frage könnte jedoch erneut aufgegriffen werden, wenn ein solcher Brennstoff verfügbar gemacht und getestet wird</i>						
Konzept der Konditionierung und vorgeschlagenes Konzept für das	18 Betriebsjahre	8 Betriebsjahre	10 Betriebsjahre	5 Betriebsjahre	Entladen in Trockenlager nach der zweiten Befüllung	10 Jahre lang vorübergehend im Becken für abgebrannte Brennelemente gelagert.

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Management abgebrannter Kernbrennstoffe (z. B. Einmaldurchlauf, Wiederaufbereitung, Nutzung von MOX usw.)	<p>NuScale-Reaktorgebäude: Ein mit Edelstahl ausgekleidetes Betonbecken hält verbrauchten Brennstoff mindestens fünf Jahre lang unter 10 Metern Wassertiefe. Der verbrauchte Brennstoff wird sowohl durch den Boden als auch durch das Reaktorgebäude aus Stahlbeton der seismischen Kategorie 1 geschützt, das so ausgelegt ist, dass es einem Flugzeugaufprall und einer Vielzahl natürlicher und vom Menschen verursachter Phänomene standhält. Das Standard-Anlagendesign von NuScale umfasst einen Bereich für die trockene Lagerung aller abgebrannten Brennelemente für die 60-jährige Lebensdauer der VOYGR-Anlage. Die Wiederaufbereitung von Brennstoffen ist möglich, dies wird jedoch</p>	<p>Die Kapazität des Pools reicht aus, um den SNF zu lagern, der während eines 8-jährigen Betriebs bei voller Leistung und vollständiger Kernausslastung erzeugt wird Die Entscheidung über die Wiederaufbereitung und den Einsatz von MOX-Brennstoff wird in der detaillierten Entwurfsphase oder sogar während des Betriebs getroffen</p>	<p>Die Kapazität des Pools reicht aus, um den SNF zu lagern, der während eines 10-jährigen Betriebs (20 Jahre als Option) erzeugt wird. Die Entscheidung über die Wiederaufbereitung und den Einsatz von MOX-Brennstoff wird in der detaillierten Entwurfsphase oder sogar während des Betriebs getroffen</p>	<p>Die Kapazität des Pools reicht aus, um den SNF zu lagern, der während eines 5-jährigen Betriebs mit voller Leistung erzeugt wird Die Entscheidung über die Wiederaufbereitung und den Einsatz von MOX-Brennstoff wird in der detaillierten Entwurfsphase oder sogar während des Betriebs getroffen</p>	<p>Die abgebrannten Brennelemente werden kurzzeitig im Becken für abgebrannte Brennelemente gelagert, das innerhalb desselben Sicherheitsbehälters wie der Reaktor ist (Dauer der SFP-Lagerung ist noch nicht definiert). Nach der Entfernung abgebrannter Brennelemente aus dem SFP innerhalb eines Multi-Purpose-Canister (MPC-37) können alle abgebrannten Brennelemente für die Lebensdauer der Anlage vor Ort in einem Array von HI-STORM UMAX-Modulen (eine unterirdische vertikale Lagerbehälterkonstruktion) gelagert werden.</p>	

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	in einer späteren Phase der Projektentwicklung entschieden (noch keine konkreten Informationen/Zusagen bekannt).					
<p><i>Das SNF-Konzept für alle SMRs sieht die vorübergehende Lagerung der Brennelemente in den SFPs vor. Je nach Ausführung zwischen 5 - 18 Jahre. Eine verwirrende Information liefert HOLTEC in einem Interview mit dem Nuclear Advisory Council, in dem es heißt, dass das SNF nach der zweiten Befüllung in das Trockenlager verlegt wird [75]. Die SFP-Nasskühlzeit von nur 48 Monaten scheint für die derzeit verwendeten Anreicherungs- und Abbrände ungewöhnlich kurz zu sein.</i></p>						
9) Safety				operation		
Safety Konzept	Das Anlagendesign von NuScale bietet mehrere Verteidigungsebenen zur Unfallminderung (gestaffeltes Sicherheitskonzept): Integriertes Design, passive Kernkühlung und untergetauchtes NPM,	Die grundlegende Sicherheitsdesignphilosophie des BWRX-300 basiert auf der Nutzung inhärenter Margen (z. B. größere Strukturvolumina und Wasservorräte). Natürliche Zirkulation des Kühlmittels	Großer Primärwasserbestand (kg/MWth) sorgt für Trägheit gegenüber Leistungstransienten - Integrierte Architektur des Reaktorkühlsystems, wodurch die maximale	Umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen eingesetzt, darunter: - Wärmeabfuhr über den geschlossenen SG-Dampf-Wasserspeise-Kreislauf - Passives Decay Heat Removal (PDHR) System	Der Reaktorkern liegt tief unter der Erde. - Natürliche Zirkulation des Kühlmittels. - Keine Abhängigkeit von der Stromversorgung vor Ort oder außerhalb des Reaktors, um den Reaktor	Das ACP100-Sicherheitskonzept umfasst: - passive Kernkühlung, - passive Restwärmeabfuhr, - passive Containment-Kühlung,

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	<p>Natürliche Zirkulation des Kühlmittels.</p> <p>Reihe technischer Sicherheitsfunktionen NSSS und CNV im Reaktorbecken</p> <p>System zur Zerfallswärmeabfuhr</p> <p>Notfall-Kernkühlsystem, entwickelt, um unter allen Bedingungen eine stabile, langfristige Kühlung des Kerns zu gewährleisten und gleichzeitig schwere Unfälle abzumildern.</p> <p>Der Reaktorpool erlaubt passive Containment-Kühlung und Zerfallswärmeabfuhr.</p> <p>Der Reaktorpool stellt eine Wärmesenke dar, die über einen Zeitraum von mehr als 30 Tagen die gesamte, von bis zu 12 Kernen erzeugte, Zerfallswärme absorbieren kann. Nach 30 Tagen sieht das Konzept eine ausreichende Luftkühlung vor, um</p>	<p>Die Fähigkeit des normalen Betriebssystems, Transienten und Unfälle zu bewältigen, wird mithilfe von motorbetriebenen Wasserspeisepumpen mit einstellbarer Geschwindigkeit und Control Rod Drive (CRD)-Pumpen mit höherer Kapazität und Notstromversorgung verbessert</p> <p>Einsatz passiver sicherheitsrelevanter Systeme:</p> <p>Isolationskondensatorsystem</p> <p>Passives Containment-Kühlsystem</p> <p>Absperrventile für Reaktordruckbehälter</p>	<p>LOCA-Größe reduziert wird</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interne CRDMs verhindern Unfälle durch CR Auswurf - Ein metallischer Unterwasserbehälter, der mehrere Tage lang passive Kühlung bietet - Ein kleiner Kern in einer großen Einfassung, der die Strategie zur Rückhaltung der Kernschmelze im RDB ermöglicht <p>Passives Management aller DBC-Szenarien</p> <p>Aktives Management von DEC-A-Unfällen</p> <p>Passives Management von DEC-B</p> <p>-Borfreier Betrieb verhindert Verdünnungsunfälle und reduziert die erzeugten Abwässer</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Passives Emergency Core Cooling System (ECCS) - Zusätzliches Small Leak Injection System (SLIS) für kleinere Lecks. - Drei Sicherheitsventile zum Schutz vor Überdruck. - Abschaltung des Steuerstabs (SCRAM) und Notfall-Boreinspritzung zum Abschalten des Reaktors - Stahlbehälter, um die Freisetzung von Spaltprodukten in die Umwelt im Falle einer Kernschädigung zu verringern. - Bor-freier Betrieb verhindert Verdünnungsunfälle und reduziert die erzeugten Abwässer 	<p>abzuschalten und Zerfallswärme abzuleiten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Passiv gekühlt für konstruktionsbedingte Abschaltung. - Natürliche Kühlmittelzirkulation - NSSS-Komponenten befinden sich unter der Erde. - Containment-Stahlkonstruktion leitet die Wärme mithilfe passiver Kühlung an die Umgebung ab. - Alle sicherheitsrelevanten Systeme befinden sich im Containment. - Unfälle mit großem Kühlmittelverlust durch Rohrbrüche (LOCA) sind konstruktionsbedingt nicht wahrscheinlich: keine großen Rohrleitungen im Kreislauf des Reaktorkühlmittelsystems (RCS). - Der Kraftstoff ist durch eine gegen Flugzeugabstürze 	<ul style="list-style-type: none"> - passive Hohlraumflutung, - passive Wasserstoff-Rekombinatoren, - mehrstufige automatische Druckentlastung, - Nach einem Unfall ist 72 Stunden lang kein Bedienereingriff erforderlich. - Gleichstromquelle zur Unfallvermeidung bis zu 72 Stunden + Aufladen der Batterie für bis zu sieben (7) Tage, - ACP-Hülle, Schutz vor externen Ereignissen, - tief vergrabenes NSSS

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Brennstoffschäden zu vermeiden.				resistente Eindämmung geschützt - Großer Kühlmittelvorrat, der sicherstellt, dass der Kern nicht freigelegt wird.	
<i>Das Sicherheitskonzept aller 6 SMRs basiert auf der umfassenden Nutzung passiver Sicherheitsfunktionen, einem Unterwasser-Containment (NuScale, BWRX-300, NUWARD), einem unterirdischen Standort des NSSS (NuScale, BWRX-300, Nuward, SMR-160, ACP100) und Bor-freiem Design des Reaktivitätskontrollsystems (Nuward, RR UK)</i>						
Gestaffeltes Sicherheitskonzept	Oxid-Brennstoffpellets und Verkleidung Reaktordruckbehälter Containment Reaktorpool Unterirdische, mit Edelstahl ausgekleidete Betonbeckenwände und -boden Biologisches Schutzschild Gebäude der Erdbebenkategorie 1 mit HVAC-Filterung	Defence Line 1 DL1 minimiert das Risiko von Unfällen durch hohe Qualität und Konservatismus bei Anlagendesign, Bau, Betrieb und Wartung. Defence Line 2 DL2 umfasst Anlagenfunktionen, die dazu dienen, auslösende Ereignisse zu steuern oder darauf zu reagieren, bevor Anlagenparameter einen DL3-Betätigungssollwert erreichen Defence Line 3 DL3 enthält Anlagenfunktionen, die ein auslösendes Ereignis abmildern, indem sie Brennstoffschäden nach Möglichkeit verhindern,	Nuward folgt dem üblichen gestaffelten Sicherheitskonzept: : Abweichungen vom Normalbetrieb verhindern Abweichungen erkennen und kontrollieren Integrierte Sicherheitsfunktionen, Sicherheitsysteme und -verfahren, um Kernschäden zu verhindern Milderung der Unfallfolgen Milderung der radiologischen Konsequenzen	Das gestaffelte Sicherheitskonzept wird durch die Bereitstellung robuster aktiver und passiver Sicherheitsmaßnahmen gewährleistet gegen konservative Bedingungen, die den Richtlinien der Designbisanalyse entsprechen.	Das gestaffelte Sicherheitskonzept wird durch passive Systeme zur Kühlung und aktive nicht sicherheitsrelevante Systeme bedient. Die kritischen Systeme befinden sich unterhalb der Erde. Der SMR-160 verfügt über mehrere Sicherheitsebenen, um die Wärme aus dem Reaktor abzuleiten und die Sicherheit zu gewährleisten. Alle Sicherheitssysteme befinden sich innerhalb der robusten Containment-Struktur und sind so vor äußeren Bedrohungen, sowohl natürlichen als auch künstlichen Ursprungs, geschützt. Die Systeme	Das gestaffelte Sicherheitskonzept ist Teil des ACP100 Designs

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
		<p>die Integrität von Spaltproduktbarrieren schützen, die Anlage in einen sicheren Zustand versetzen und die Anlage nach einem Ereignis in einem sicheren Zustand halten, bis der normale Betrieb wieder aufgenommen wird. Zu den DL3-Funktionen gehören typischerweise Reaktor-SCRAM und die Betätigung technischer Sicherheitsfunktionen</p> <p>Defence Line 4 DL4a-Funktionen können die Anlage nach auslösenden Ereignissen mit Ausfall von DL3-Funktionen in einen sicheren Zustand versetzen und aufrechterhalten. Die DL4a-Funktionen sollen das Fortschreiten von Unfällen und die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Öffentlichkeit verhindern. DL4b-Funktionen verhindern oder mildern einen schweren Unfall</p>			<p>sind einfacher als aktuell betriebene Reaktoren, wodurch aktive Pumpen aus den Sicherheitsfunktionen entfallen und sie dadurch zuverlässiger werden. Laut HOLTEC sind keine Bedienereingriffe erforderlich, um den Reaktor in einen sicheren Abschaltzustand zu versetzen und aufrechtzuerhalten, dem "walk away safe". Das gesamte zusätzliche Wasserinventar, das für einen postulierten Kühlmittelverlust-Unfall benötigt wird, befindet sich im Containment, wodurch das Containment vollständig isoliert werden kann, wodurch die Belastung der Öffentlichkeit und die Auswirkungen dieses Ereignisses auf die Umwelt vermieden werden.</p>	

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
		und halten gleichzeitig die Freisetzung radioaktiver Stoffe auf einem akzeptablen Niveau. DL4b bietet auch Schutz für Ereignisse, die die DL1-Annahmen hinsichtlich der Auslösung von Ereignissen aufgrund extremer Ereignisse, mehrerer Ereignisse oder mehrerer Ausfälle überschreiten. Defence Line 5 DL5 befasst sich mit der Notfallvorsorge außerhalb des Standorts, um die Öffentlichkeit vor erheblichen radioaktiven Freisetzungen zu schützen.				
<i>Alle sechs SMRs nutzen das für die LWR typisches gestaffelte Sicherheitskonzept – das Verhindern von Abweichungen vom Normalbetrieb; Abweichungen erkennen und kontrollieren; Verwendung von Sicherheitsfunktionen, Sicherheitssystemen und -verfahren, um Kernschäden zu verhindern, die Folgen von Unfällen abmildern; radiologische Folgen abmildern</i>						
Spektrum konstruktionsbedingter Bedrohungen/Gefahren	Kühlmittelverluststörfall Ausfall kleiner Leitungen, die das Primärkühlmittel außerhalb des Containments transportieren Ausfall der	DBA, DBC und DEC-A/B werden im Detailentwurf definiert	DBA, DBC und DEC-A/B werden im Detailentwurf definiert	DBA, DBC und DEC-A/B werden im Detailentwurf definiert	DBA, DBC und DEC-A/B werden im Detailentwurf definiert	Das PDHRS verhindert eine Kernschmelze im Fall von DBA und auslegungsüberschreitenden Unfällen(BDBA), wie z. B. Verlust der externen

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Dampfgenerator-Rohre Bruch der Hauptdampfleitung außerhalb des Containment CR -auswurf Unfall beim Umgang mit Brennstoff Kernschadensereignis					Stromversorgung, vollständiger Wasserverlust, Small- Break-LOCA (d. h. um den Übergang zu BDBA in schwere Phasen zu verhindern).
<i>Das Spektrum der Auslegungsunfälle ist nur für zwei von sechs SMRs (NuScale und ACP100) definiert.</i>						
Schwere Unfälle	30 Tage Wärmeabfuhrkapazität für 12 Module ohne AC/DC, anschließend Luftkühlung für unbegrenzte Zeit. Normale Wechselstrom- Stromversorgungssysteme sind nicht sicherheitsrelevant und können DBA/DBC nicht mindern	Das Design des BWRX- 300 basiert auf passiver Kühlung und Naturumlauf des Kühlwassers Zur LOCA-Abschwächung ist keine Kerninjektion erforderlich Eine Notstromversorgung ist nicht erforderlich Gleichstromkapazität – 24–72 Stunden	Der Reaktor ist autark und an eine interne ultimative Wärmesenke (den Reaktorpool) angeschlossen, die eine Bewältigungszeit von mehr als drei Tagen ohne die Notwendigkeit eines Eingriffs ermöglicht. Es ist kein Strom der Sicherheitsklasse 1E erforderlich.	Das Werk strebt nach einem DBA eine Kulanzzeit von 72 Stunden an, in der kein Bedienereingriff erforderlich ist. Das Design sieht zwei Notstromversorgungsstränge vor	Erste 72 Stunden Kühlung durch PCCS und PCHR < 90 Tage, passive Kühlung durch PCHR > 90 Tage, unbegrenzte Kühlung durch passive Luftkühlung	(Gleichstrom-)Stromquelle zur Unfallminderung bis zu 72 Stunden, unterstützt durch das System zum Aufladen der Batterie für bis zu sieben (7) Tage
<i>Alle sechs SMR basieren auf der erweiterten Nutzung passiver Systeme und verfügen über eine Kulanzzeit ohne Bedienereingriffe von mindestens 72 Stunden</i>						
Grundlegende Sicherheitsparameter einschließlich Thermohydraulik	Naturumlauf NSSS Operating Pressure (primary/secondary), mPa 13.8 / 4.3 Core Inlet/Outlet Coolant Temperature 249 / 316 (oC)	Naturumlauf NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 7.2 / n/a Core Inlet / Outlet Coolant Temperature 270 / 288 (oC)	Zwangsumlauf (6 pumpen) Integral NSSS NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15/4.5 Core Inlet / Outlet Coolant	Zwangsumlauf (3 Pumpen) NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15.5 / 7.8 Core Inlet / Outlet Coolant Temperature 295 / 325 (oC)	Naturumlauf NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15.5 / 3.4 Core Inlet / Outlet Coolant Temperature 243 / 321 (oC)	Zwangsumlauf (4 Pumpen) NSSS Operating Pressure (primary/secondary) 15.0 / 4 Core Inlet / Outlet Coolant

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
			Temperature 280/307 (oC)			Temperature 282 / 323 (°C)
<i>Drei von sechs SMRs nutzen den Naturumlauf</i>						
Verfügbarkeit von SAR, PSA und deren Ergebnisse	Final Safety Evaluation Report NRC, U.S., 2020	Fünf Topical Licensing Reports sind verfügbar NRC, U.S., 2020	NUWARD befindet sich in der Konzeptionsphase, daher sind keine Lizenzberichte verfügbar	Rolls-Royce UK SMR befindet sich in der detaillierten Entwurfsphase, es sind jedoch noch keine Lizenzberichte verfügbar	Zwei Topical Licensing Reports bei US NRC eingereicht im Rahmen der Vorlizenzierungskonsultationen. SMR-160 hat Phase 1 des Vendor Design Review (VDR) in Canada abgeschlossen	Der ACP100 Preliminary Safety Assessment Report (PSAR) wurde 2019 von NNSA angenommen PSA-Level 1 soll unabhängig überprüft worden sein
Durchgeführte Reviews						
10) Standortanforderungen						
Vorgeschriebene Standort-Merkmale und -Ausschlüsse	Die Gesamtfläche innerhalb der Schutzgrenze beträgt nominell 140.000 m ² (VOYGR TM -12). Sämtliche Sicherheitssysteme sind im zentralen Reaktorgebäude untergebracht. Das Reaktorgebäude wird von zwei Turbinengebäuden mit jeweils sechs Turbinen-Generatorsätzen, dem Kontrollraumgebäude	Um die Montagearbeiten vor Ort zu reduzieren, wäre eine Schiffsentladungsanlage am Standort vorzuziehen Anlagenfläche 9.800 m ² Standortfläche 26.300 m ²	Anlagenfläche: 3500 m ² Standorte an der Küste und/oder am Flussufer, mit konventioneller Kondensatorkühlung im offenen Kreislauf. Auch ein Standort im Landesinneren mit Trockenluftkondensatoren ist eine mögliche Option. Die meisten Komponenten/Schaltkreise werden als Module in der Größe eines 20-40-Zoll-Schiffscontainers	Das UK SMR verfügt über eine kompakte Standortfläche von etwa 40.000 m ² . Anlagenfläche 10.000 m ² Konstruktionsmerkmale wie die seismische Isolierung für sicherheitsrelevante Bereiche und straßentransportierbare Module stellen sicher, dass das Kraftwerk auf einer Vielzahl von Standorten mit unterschiedlichen	Anlagengrundfläche ~28.000 m ² für Einzelanlagenkonfigurationen	Standortgrundfläche 200.000 m ² für die Doppeleinheit der Referenzanlage

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	und dem Gebäude für die Behandlung radioaktiver Abfälle flankiert. Für die Kondensatorkühlung werden Umluftkühltürme eingesetzt. Zum Standort gehören außerdem eine Schaltanlage, ein Verwaltungsgebäude, ein Lager und ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente.		geliefert. Dafür sind Standardstraßen erforderlich, die für LKWs befahrbar sind. Einige schwere Komponenten (z. B. RDB, Turbine und Teile des Stahlbehälters) erfordern möglicherweise einen speziellen Transport. Für den Bau und den Betrieb sind keine schweren Hebegeräte erforderlich.	Bodenverhältnissen errichtet werden kann. Obwohl das Basisdesign eine direkte Kühlung nutzt und daher an Standorten mit ausreichend Kühlwasserzugang installiert werden müsste, kann eine indirekte oder direkte Luftkühlung spezifiziert werden, was die Installation an einem breiteren Spektrum von Standorten im Landesinneren erleichtert.		
Bereits vorgeschlagene/diskutierte/geplante Standorte	Idaho National Laboratory, Idaho, USA Doicești, Romania	GEH wurde vom Ontario Power Generation (OPG) als Technologiepartner für das Darlington New Nuclear Project ausgewählt.	Mit der französischen Regierung wurde eine Vereinbarung getroffen, dass in Frankreich ein FOAK NUWARD gebaut wird. Eine Reihe potenzieller Standorte wird derzeit geprüft.	Rolls Royce identifizierte im November 2022 eine Reihe bestehender Kernkraftwerksstandorte im Vereinigten Königreich, die möglicherweise SMRs beherbergen könnten: Trawsfynydd, Sellafield, Wylfa, Oldbury, Berkeley, Hartlepool, Heysham, Bradwell.	Bisher wurden keine Standortvorschläge vorgeschlagen	Linglong One, Changjiang NPP, Hainan, China
<i>Für 4 von 6 SMRs sind potenzielle/vorausgewählte Standorte identifiziert, einer davon (ACP100) befindet sich im Bau</i>						

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Notfallvorsorge-Anforderungen	In den USA soll die EPZ-Größe nicht über die Grenzen des Anlagenstandorts hinausgehen (spezielle Vorschriften zur Definition von SMR-EPZ werden derzeit diskutiert). Die Anlage ist für den Betrieb in einem vollständig isolierten Netz ausgelegt.	Es ist vorgesehen, dass die EPZ-Größen mithilfe dosisbasierter und konsequenzorientierter Methoden berechnet werden. Laut GEH ist das TVA Clinch River Early Site Permit-Verfahren eine repräsentative Schätzung (Spezifische Regelungen zur Definition von SMR EPZ werden derzeit diskutiert)	NUWARD befindet sich in der Konzeptdesignphase, daher werden EPZ- und Notfallvorsorgevereinbarungen erst während der detaillierten Designphase definiert	Die UK SMR EPZ und die Vorkehrungen zur Notfallvorsorge werden später in der detaillierten Designphase festgelegt	Der SMR-160 befindet sich in der Konzeptdesignphase, daher werden EPZ- und Notfallvorsorgemaßnahmen während der detaillierten Designphase definiert	Nichtwohngebiet weniger als 300 m; LPZ Weniger als 800 m FEZ-interne Zone Weniger als 400 m; extern – weniger als 600 m.
<p><i>SMR-Anbieter behaupten, dass die EPZ wesentlich kleiner sein wird als bei großen Kernkraftwerken (10 Meilen in den USA) und zielen darauf ab, dass sie nicht über die Grenzen des Kraftwerksgeländes hinausragen sollte. Während die von NuScale vorgeschlagene Methodik bereits vom NRC genehmigt wurde, muss noch ein formeller Sicherheitsbewertungsbericht erstellt werden. Die Diskussion über die Größe der SMR-EPZ wurde von den EU-Regulierungsbehörden bereits begonnen [21] und wird im Zuge der Prüfung der von den Anbietern vorgeschlagenen SMR-EPZ weitergeführt. Die EPZ für SMR wäre abhängig von den Ergebnissen einer Gefahrenbewertung, der Technologie, neuartigen Merkmalen und spezifischen Designkriterien sowie einigen politischen Faktoren skalierbar. Das gleiche SMR-Design, das in verschiedenen Ländern implementiert wird, kann je nach Regulierung, Schutzstrategie, Dosiskriterien, politischen Faktoren und öffentlicher Akzeptanz zu unterschiedlichen EPZ-Größen führen.</i></p>						
Standortzugang Standortnutzung	Normale Straßen reichen aus, um alle für den Bau benötigten Anlagenteile und Materialien an die Baustelle zu liefern	Die Schiffsentladeanlage am Standort wird dazu beitragen, die direkt vor Ort durchgeführten Montagearbeiten zu reduzieren	Die meisten Komponenten/Schaltkreise werden als Module in der Größe eines 20-40-Zoll-Schiffscontainers geliefert. Dies erfordert die Nutzung von Standardstraßen. Für einige schwere Komponenten (z. B. RDB, Turbine und Teile des Stahlbehälters) sind möglicherweise	Das Design umfasst straßentransportierbare Module. Der RDB-Durchmesser darf weniger als 4,5 m betragen, um sicherzustellen, dass die britische Straßentransporthöhe von 4,95 m nicht überschritten wird.	Das nach Größe und Gewicht größte Gerät des Holtec SMR-160 ist der Dampfgenerator. Dieser ist für den Versand als einzelnes schweres Modul per Bahn, Schiff oder Straße konzipiert, im Einklang mit den Logistikprozessen von Holtec und in strikter Übereinstimmung mit US-amerikanischen und	Standortzugang ist gewährleistet. Die Bauarbeiten am Linglong One, KKW Changjiang, dauern seit Juli 2021 an

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
			besondere Transportvorkehrungen erforderlich		internationalen Vorschriften Transportanforderungen, Routen und Einschränkungen.	
<i>Alle sechs SMRs betrachten normale Straßen oder Schiffsentladeeinrichtungen am Standort als Standardoption für die Lieferung der schweren Komponenten der SMRs</i>						
11) Betrieb						
Betriebskonzept für Einzel- und Mehrfachanlagen	NuScale bietet: VOYGR-12 Kraftwerk Power Module™ mit 924 MWe. VOYGR – vier Module VOYGR-4 mit 308 MWe und sechs Module VOYGR-6 mit 462 MWe. Jedes Modul verfügt über eine eigene 77-MWe-Turbine	Das Referenzdesign sieht eine einzelne Einheit vor, dies könnte sich jedoch für das Design anderer Anlagen ändern	Das Referenzdesign sieht ein Dopeleinheitskonzept vor	Das Referenzdesign sieht eine einzelne Einheit vor, dies könnte sich jedoch für das Design anderer Anlagen ändern	Das Referenzdesign sieht Konfigurationen mit einer oder zwei Einheiten vor	Das Referenzdesign sieht ein Dopeleinheitskonzept vor
<i>Das Betriebskonzept von SMRs sieht den Betrieb von Einzel-, Doppel- oder bis zu 12 Modulen (NuScale) vor, das Design spezifischer Anlagen kann jedoch an die Bedürfnisse des Kunden angepasst werden</i>						
Automatisierungsgrad	Digital Instrumentation & Control (I&C): Das proprietäre digitale I&C-System mit feldprogrammierbarem Gate-Array von NuScale ermöglicht eine umfassende Überwachung und Steuerung aller Anlagensysteme in einem einzigen Kontrollraum.	Die BWRX-300-Steuerungs- und Instrumentensysteme bieten manuelle und automatische Mittel zur Kontrolle des Anlagenbetriebs und Einleitung von Schutzmaßnahmen, falls Anlagenstörungen auftreten. Der BWRX-300 nutzt digitale Controller	Die I&C-Designarchitektur entspricht der Norm IEC61226. NUWARD nutzt moderne digitale nukleare Leittechnik, die dem Einzelfehlerkriterium und der Diversität entspricht. Die beiden Einheiten derselben Anlage teilen sich den gleichen	Die Anlage wird durch eine Reihe von Steuerungs- und Instrumentierungssystemen (I&C) gesteuert und geschützt. Das Steuerungssystem der Reaktoranlage, das den Betrieb verwaltet, verwendet industrieübliche Programmable Logic	Holtec wird die MELTAC© Digital I&C Plattform von Mitsubishi Electric einsetzen, die von der U.S. Nuclear Regulatory Commission für den Einsatz in Kernkraftwerken und nuklearen Sicherheitsanwendungen zugelassen wurde	Das für ACP100 entwickelte Instrumentation and Control (I&C) system basiert auf dem gestaffelten Sicherheitskonzept, der Einhaltung des Einzelfehlerkriteriums und den vielfältigen I&C-Systemen des NSSS, darunter Reactor

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Das Layout des Kontrollraums und die Bedienfeldanzeigen wurden mithilfe eines Simulators, eines umfassenden Programms zur Entwicklung menschlicher Faktoren und zur Bewertung der Mensch-System-Schnittstelle entwickelt.	und stellt eine Schnittstelle zu Anlagengeräten, Sensoren und Bedienelementen über ein Multiplexsystem zur Signalübertragung zur Erreichung dieser Funktionen her.	Kontrollraum mit speziellen unabhängigen Schalttafeln für die in Betrieb befindlichen Reaktoren. Nach etwaigen Auslegungsunfällen (DBA) ist für mehr als 3 Tage kein Eingriff des Betriebspersonals erforderlich.	Controller (PLC) oder Distributed Control System (DCS). Das Reactor Protection System (RPS) sorgt für ein sicheres Herunterfahren. Das RPS nutzt digitale Systeme, die speziell für die Nuklearindustrie entwickelt wurden. Alle Systeme wurden unter Berücksichtigung des gestaffelten Sicherheitskonzepts, Diversität und Redundanz etc. entwickelt.		Nuclear Instrumentation System, RPS, Diverse Actuation System, Reactor Control System, Rod Control and Rod Position Monitoring System, Reactor in-core Instrumentation System, Loose Parts and Vibration Monitoring System und andere Prozesskontrollsysteme.
<i>Alle sechs SMR-Steuerungssysteme wurden/werden nach einem modernen Ansatz entwickelt, der auf der Erfahrung der Anbieter und einem allgemein bekannten und angewandten gestaffelten Sicherheitskonzepts, der Einhaltung des Einzelfehlerkriteriums und vielfältigen I&C-Systemen basiert</i>						
Kritische Fragen im Zusammenhang mit Betrieb und Wartung	Kritische Fragen bei Betrieb und Wartung werden nach Betriebsbeginn bekannt.					
Multiple Unit Crews	Für das NuScale-Kraftwerk mit 12 Modulen und 924 MWe wird geschätzt, dass 270 Kraftwerksmitarbeiter den Betrieb, die betrieblicheWartung, das Beladen, die Wartung bei Ausfällen, die Sicherheit	Betrieb & Wartung Personal insgesamt ca. 75	Betrieb & Wartung Personal insgesamt 56/50	Die Anforderungen an Personal/Bediener sind noch nicht definiert	Die Anforderungen an Personal/Bediener sind noch nicht definiert	Anforderungen an Personal/Bediener werden nicht veröffentlicht

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	usw. unterstützen werden.					
<i>Schätzungen zur voraussichtlichen Personalstärke werden nur für drei von sechs SMRs bereitgestellt. Angesichts der Tatsache, dass keines der sechs SMRs in Betrieb ist, sollten diese Schätzungen jedoch als vorläufig betrachtet werden</i>						
Bedarf an Bedienern	Für den MCR des NuScale-Kraftwerks mit 12 Modulen und 924 MWe sind 6 lizenzierte Operatoren pro Schicht erforderlich	Die Anzahl der lizenzierten Betreiber ist noch nicht definiert	Die Anzahl der lizenzierten Betreiber ist noch nicht definiert	Die Anzahl der lizenzierten Betreiber ist noch nicht definiert	Die Anzahl der lizenzierten Betreiber ist noch nicht definiert	Die Anzahl der lizenzierten Betreiber wird nicht veröffentlicht
<i>Nur NuScale lieferte Informationen zur Anzahl der lizenzierten Operatoren, bei denen 6 Operatoren in einem einzigen Kontrollraum 12 NPMs steuern. Während dieser NuScale-Vorschlag vom NRC in den USA angenommen wurde, könnte der Ansatz von den EU-Regulierungsbehörden noch näher geprüft werden.</i>						
12) Radioaktiver Abfall						
Abwässer und radioaktive Abfälle: flüssig, gasförmig und fest	Radioactive Waste Building (RWB) beherbergt Geräte und Systeme zur Verarbeitung radioaktiver gasförmiger, flüssiger und fester Abfälle sowie zur Vorbereitung von Abfällen für den externen Transport. Flüssigkeitsfreisetzungen und gasförmige Entladungen müssen innerhalb der Grenzwerte von 10 CFR 20 Anhang B liegen	Das Design von radioaktiven Abfallsystemen und die Klassifizierung der Abfälle werden in den Licensing Topical Reports nicht behandelt. Bei künftigen Lizenzierungsaktivitäten wird eine weitere Überprüfung erfolgen, wenn detaillierte Designinformationen zur Verfügung gestellt werden.	Informationen und Daten stehen in der detaillierten Designphase zur Verfügung	Waste Treatment Systems (WTS) Die WTS sorgen für die Sammlung und Verarbeitung zur Entsorgung und Ableitung gasförmiger, flüssiger und fester radioaktiver Abfälle, die im SMR entstehen. Sie bestehen aus Gaseous Waste Treatment System (GWTS), Liquid Waste Treatment System (LWTS) und	Das SMR-160-Standortlayout sieht ein Radwaste-Gebäude vor. Weitere Details werden während der detaillierten Entwurfsphase festgelegt. Bereits festgelegt ist, dass sämtliche abgebrannten Brennelemente während der Lebensdauer der Anlage vor Ort gelagert werden können.	Laut CNNC ähnelt der Abfallmanagementansatz und der Entsorgungsplan denen anderer Kernkraftwerke.

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Vergleich mit traditionellen Reaktoren	Einige Studien (Krall et al., „Nuclear Waste from Small Modular Reactors“) betonen, dass NuScale im Vergleich zu großen Druckwasserreaktoren wesentlich höhere RAW-Raten und einen geringeren Abbrand aufweisen wird. NuScale veröffentlichte Daten und geht davon aus, dass diese vergleichbar sein werden. Das Moduldesign und die Betriebsparameter ermöglichen Änderungen der Reaktorleistung nur durch die Bewegung des Steuerstabs bis hin zu 40 % der Reaktorleistung, wodurch die Erzeugung flüssiger Rohabfälle reduziert wird			Solid Waste Treatment System (SWTS), die sich im Bereich für radioaktive Abfälle neben dem Reaktorcontainment befinden.		
Waste management Konzept	DCA legt fest, dass bei NuScale das folgende RAW-Managementsystem verwendet wird: System zur Entsorgung flüssiger Abfälle, System zur Entsorgung gasförmiger Abfälle,					

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	<p>System zur Entsorgung fester Abfälle. SNF soll vor Ort gelagert werden: für 5 Jahre im SNF-Becken unter der ~18 m Wasserschicht. Das Standarddesign umfasst einen Bereich für die trockene Lagerung aller abgebrannten Brennelemente für die 60-jährige Lebensdauer der VOYGR-Anlage. SAR definiert die Menge an gasförmigem, flüssigem sowie nassem und trockenem Feststoffabfall, die pro Jahr anfällt</p>					
Abfallminimierung	<p>Bestimmungen zur Minimierung radioaktiver Abfälle sind Teil des Entwurfs, z. B. Verarbeitung verbrauchter Harze, Leistungsreduzierung durch Stäbe nur bis zu 40 % der Nennleistung usw.</p>					
Abfalllagerung vor Ort	<p>Das NuScale-Konzept sieht die Verarbeitung und Verbringung von RAW außerhalb des</p>					

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Standorts vor, daher ist nur eine vorübergehende Lagerung von RAW vorgesehen, bevor RAW zur Lagerung/Entsorgung an einen anderen Standort verbracht wird. Gemäß ANSI/ANS-55.1-1992 und BTP 11-3 ist eine Lagerung vor Ort vorgesehen, um feste Abfälle mindestens 30 Tage lang aufzubewahren.					
<p><i>Alle sechs SMRs werden über eine Reihe von RAW-Behandlungssystemen verfügen. Der einzige SMR, der Informationen zum RAW-Management und RAW-Management-Konzept veröffentlicht hat, ist NuScale. Die Anbieter anderer SMRs veröffentlichten nur sehr begrenzte Informationen zur RAW-Behandlung. Das von Nuward, RR UK SMR und NuScale vorgeschlagene borfreie Design des Reaktivitätskontrollsystems ermöglicht die Reduzierung der Menge des erzeugten flüssigen RAW um bis zu 40 %.</i></p>						
13) Rechtsfragen						
Nicht Weiterverbreitung (Safeguards)	Es gibt keine NuScale-spezifischen Nicht Weiterverbreitungs-Fragen, da die Anlage Brennstoff mit typischer LWR-Anreicherung verwendet, mit einem entsprechenden Safeguardsystem ausgestattet ist und einem staatlichen Safeguardsprogramm unterliegt	Es gibt keine BWRX-300 -spezifischen Nicht Weiterverbreitungs-Fragen, da die Anlage Brennstoff mit typischer LWR-Anreicherung verwendet, mit einem entsprechenden Safeguardsystem ausgestattet ist und einem staatlichen Safeguardsprogramm unterliegt	Es gibt keine NUWARD -spezifischen Nicht Weiterverbreitungs-Fragen, da die Anlage Brennstoff mit typischer LWR-Anreicherung verwendet, mit einem entsprechenden Safeguardsystem ausgestattet ist und einem staatlichen Safeguardsprogramm unterliegt	Es gibt keine Rolls-Royce UK SMR -spezifischen Nicht Weiterverbreitungs-Fragen, da die Anlage Brennstoff mit typischer LWR-Anreicherung verwendet, mit einem entsprechenden Safeguardsystem ausgestattet ist und einem staatlichen Safeguardsprogramm unterliegt	Es gibt keine HOLTEC SMR-160 -spezifischen Nicht Weiterverbreitungs-Fragen, da die Anlage Brennstoff mit typischer LWR-Anreicherung verwendet, mit einem entsprechenden Safeguardsystem ausgestattet ist und einem staatlichen Safeguardsprogramm unterliegt	Es gibt keine CNNC ACP100 -spezifischen Nicht Weiterverbreitungs-Fragen, da die Anlage Brennstoff mit typischer LWR-Anreicherung verwendet, mit einem entsprechenden Safeguardsystem ausgestattet ist und einem staatlichen Safeguardsprogramm unterliegt

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Für alle sechs SMRs bestehen keine spezifischen Nicht Weiterverbreitungs-Fragen, da sie Brennstoff mit der für LWR-Anreicherung typischen Art verwenden, mit einem entsprechenden Safeguardsystem ausgestattet sind und einem staatlichen Safeguardsprogramm unterliegen würden						
Verfügbarkeit von Komponenten	Die Verfügbarkeit der Komponenten unterliegt einem entsprechenden Vertrag mit der Industrie. Für diese SMR-Anlagen sollte es kein Problem sein, es könnte jedoch für einige SMRs zu einem Problem werden. Wenn der Betrieb der Anlagen gute Ergebnisse zeigt, könnte die Zahl der Bestellungen steigen. Aber auch dieses Problem könnte durch die Einbindung neuer Lieferanten gelöst werden.					Die Verfügbarkeit von Komponenten für ACP100 SMR wird bereits geprüft, da sich die Anlage im Bau befindet. Das Problem könnte konkret werden, wenn es zu einem massiven Einsatz kommt, aber selbst dies könnte durch die Einbindung neuer Lieferanten gelöst werden.
Die Verfügbarkeit von Komponenten sollte für die SMRs in der ersten Bereitstellungsphase kein Hindernis darstellen, könnte jedoch später zu einer Herausforderung werden, wenn die Zahl der Bestellungen steigt.						
Einschränkungen der Lieferungen aufgrund geistigen Eigentums	NuScale verwendet eigene Designtechnologien, sodass Einschränkungen aufgrund von Rechten an geistigem Eigentum kein Problem darstellen sollten	GEH verwendet eigene Designtechnologien, sodass Einschränkungen aufgrund von Rechten an geistigem Eigentum kein Problem darstellen sollten	Das federführende Konsortium von EDF wird eigene Designtechnologien verwenden, sodass Einschränkungen aufgrund von Rechten an geistigem Eigentum kein Problem darstellen sollten	Das von Rolls-Royce geführte Konsortium wird eigene Designtechnologien verwenden, sodass Einschränkungen aufgrund von Rechten an geistigem Eigentum kein Problem darstellen sollten	HOLTEC SMR-160 ist ein proprietäres Design von HOLTEC. HOLTEC hat außerdem MoU/MoAs mit einer Reihe von Unternehmen abgeschlossen, die an der Entwicklung und Herstellung von Ausrüstung für SMR-160 beteiligt sein werden – z. B. Skoda, Mitsubishi, Hyundai usw., sodass die Einschränkungen des	CNNC wird eigene Designtechnologien verwenden, sodass Einschränkungen aufgrund von Rechten an geistigem Eigentum kein Problem darstellen sollten
Lizenzierung von Technologie						

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
					geistigen Eigentums kein Risiko für die Projektumsetzung darstellen sollten.	
<i>Alle sechs SMR-Anbieter sind Eigentümer des von ihnen vorgeschlagenen SMR-Designs. Durch die Verwendung eigener Designs und die Einbeziehung von Partnern bei der Entwicklung spezifischer SMR-Komponenten – z. B. I&C – werden potenzielle geistige Eigentumsrechte und Probleme bei der Lizenzierung von Technologie beseitigt</i>						
14) Wirtschaftliche Parameter						
Kosten in der Designphase	NuScale schätzt: \$3,600/kW (NOAK)	GEH zielen auf: \$3,000/kW	Informationen und Daten stehen in der detaillierten Designphase zur Verfügung	Rolls-Royce schätzt: 1.8 bn £ (~ £3800/kW)	Bekannte Schätzungen: \$650 Mio. pro Einheit/ \$4,000/kW (Bisher keine verlässlichen Informationen zu den SMR-160-Kosten)	CNNC-Bewertung: ACP100, Demonstrationsprojekt, die Kosten sind doppelt so hoch wie die eines großen KKW. Bei SMR mit geringerer Leistung sind die Baukosten pro kW aufgrund des Skaleneffekts höher als bei großen KKW
Geplante/prognostizierte Baukosten	NOAK— 4250 €/kWe FOAK— 6850 €/	GEH schätzt: FOAK 1 bn USD (3300 USD/kW), NOAK 2250 USD/kW		~ £75/MWh für FOAK ~ £40-60/MWh für NOAK		
FOAK und NOAK Kosten	LCOE - \$40/MWh to \$65/MWh \$51/MWh–\$54/MWh (PNNL)	GEH: LCOE - \$35 to \$50 USD/MWh, \$44–\$51/MWh (PNNL)		Rolls-Royce: LCOE— of ~ £40-60/MWh für NOAK		
Zuverlässigkeit und Plausibilität von Kostenschätzungen	Die Zuverlässigkeit der Kostenschätzungen ist fraglich, insbesondere angesichts der Tatsache, dass UAMPS 89 USD/MWh veranschlagte	Die Zuverlässigkeit der Kostenschätzungen ist fraglich		Die Zuverlässigkeit der Kostenschätzungen ist fraglich		
<i>Die wirtschaftlichen Parameter, die von Anbietern und in verschiedenen Studien veröffentlicht werden, unterscheiden sich erheblich. Die Anbieter geben SMR-Kosten im Bereich von 3.000 bis 4.000 \$/kW an, die Zuverlässigkeit der Kostenschätzungen könnte jedoch in Frage gestellt werden und ist wahrscheinlich zu optimistisch.</i>						
Alle veröffentlichten Studien und	NEA 2016/2021: Small Modular Reactors: Challenges and	NEA 2016/2021: Small Modular Reactors: Challenges and	Bisher liegen keine Studien zu NUWARD vor	Bisher liegen keine Studien zu RR SMR vor	Bisher liegen keine Studien zu SMR-160 vor	Bisher liegen keine Studien zu ACP100 vor

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Parameter, die die Kostenschätzungen unterstützen würden	Opportunities PNNL 2021: Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest	Opportunities PNNL 2021: Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest				
<i>Die PNNL-Studie aus dem Jahr 2021 zeigt Stromgestehungskosten im Bereich von 51 bis 54 US-Dollar/MWh für NuScale und 44 bis 51 US-Dollar/MWh für BWRX-300-NOAK-Anlagen. Allerdings könnte die Zuverlässigkeit der Kostenschätzungen durch aktuelle Schwankungen der Gas-/Energiemarktpreise gefährdet sein.</i>						
Durchgeführte unabhängige Überprüfungen	Economics of nuclear power plants: bottom-up cost estimation model for SMR Matteo Mauri 2020-2021	Es wurden keine unabhängigen Bewertungen durchgeführt				
<i>Die Studie gibt für die NuScale-Anlage Kapitalkosten von 4.700 €/kWe für die FOAK-Anlage und 3.250 €/kWe für die NOAK-Anlage an.</i>						
Investitionspläne und Verpflichtungen	Das DoE genehmigte im Oktober 2020 einen Zuschuss in Höhe von 1,355 Milliarden US-Dollar zur Finanzierung des Carbon Free Power Project (CFPP), eines potenziellen 720-MWe-NuScale-Kraftwerks für die Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS). Das Projekt wurde auf sechs 77-MWe-Module mit einer Gesamtleistung von 462 MWe verkleinert	Fermi Energia, das den Bau eines Kernkraftwerks in Estland plant, hat Vorverträge mit estnischen Geschäftskunden abgeschlossen. Die Verträge sind die Grundlage für den Abschluss weiterer Verträge über den Kauf und Verkauf von Strom. Der Zielpreis pro MWh in diesen Verträgen beträgt 55 Euro.	September 2020 – 50 Millionen Euro von der französischen Regierung im Rahmen des France Recovery Plan bereitgestellt. Am 10. Februar kündigte der Präsident eine zusätzliche Intervention des Staates in Höhe von bis zu 500 Millionen Euro an, um die Bemühungen Frankreichs, SMRs zu exportieren, zu beschleunigen. Das erste Ziel des Frankreich-2030-Plans besteht darin, „in	Im November 2021 verpflichtete sich die britische Regierung, 210 Millionen Pfund an Zuschüssen für Rolls-Royce SMR bereitzustellen, um die privaten Investitionen in dieses Unternehmen zu decken. Rolls-Royce Group, BNF Resources UK und Exelon Generation werden über einen Zeitraum von drei Jahren 195 Millionen Pfund investieren.	Um die Entwicklung des SMR-160 zu unterstützen, gewährte das US-Energieministerium (DOE) im Jahr 2020 einen Zuschuss im Wert von 147,5 Millionen US-Dollar (DOE-Anteil beträgt 116 Millionen US-Dollar, wobei Holtecs Investitionsanteil 31,5 Millionen US-Dollar beträgt). Bis heute hat Holtec mehr als 400 Millionen US-Dollar in das SMR-	Die Bauarbeiten am Linglong One, KKW Changjiang, laufen seit Juli 2021. Über den Einsatz weiterer ACP100-Einheiten innerhalb oder außerhalb Chinas wird zu einem späteren Zeitpunkt entschieden (wahrscheinlich näher am Abschluss des Demonstrationsprojekts).

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	Nuclearelectrica und Nova Power & Gas haben im September 2022 ein Joint Venture, RoPower Nuclear, zur Entwicklung der NuScale SMR-Technologie gegründet.		Frankreich kleine, innovative Kernreaktoren mit besserer Abfallbewirtschaftung zu entwickeln“. Um dieses Ziel zu erreichen, werden bis 2030 1 Milliarde Euro investiert.		160-Programm investiert und hält 25 US-Patente auf die SMR-160-Technologie, wobei viele Patente auch auf andere Länder ausgedehnt wurden.	
<i>Investitionspläne für den Bau von SMR wurden in den USA (Idaho UAMPS), Estland (Fermi Energia), Kanada (SaskPower) und China (CNNC ACP100) erstellt. Darüber hinaus wird die Entwicklung von SMRs stark von den Regierungen der USA, Großbritanniens und Frankreichs unterstützt, mit dem Ziel, SMRs im eigenen Land zu entwickeln, aber auch SMR-Technologie weltweit zu exportieren.</i>						
15) Sicherung						
Herausforderungen in Sicherung	Die SMRs sollten keine designspezifischen Sicherungsherausforderungen aufweisen, da das Design des Sicherungssystems für das bestehende Kernkraftwerk gut entwickelt ist und sich für die SMRs nicht allzu sehr unterscheiden wird.					
<i>Der Einsatz zahlreicher SMRs erfordert die Implementierung robuster Sicherungsmaßnahmen, die möglicherweise erhebliche Ressourcen der Polizei/örtlichen Wachen erfordern, um den unbefugten Zugang zu Standorten/Einrichtungen zu verhindern.</i>						
Standortschutz	Zaun- und Einbruchssysteme schützen eine Perimeterbegrenzung und weisen auf unbefugte Zutrittsversuche hin. Durch die Platzierung des gesamten NSSS, des Sicherheitsbehälters, des Kontrollraums und des Lagers für abgebrannte Brennelemente unterhalb der Erdoberfläche wird die Anfälligkeit für	Die physische Trennung redundanter Systeme unterstützt die physische Sicherung der Anlage. Alle wichtigen Systeme und Komponenten sind in robusten Stahlbetonkonstruktionen untergebracht, die vom Sicherungssystem des Standorts gesteuert und überwacht werden. Viele der Komponenten befinden sich unterirdisch, wodurch die	Die Reaktoren und SNF unterirdisch angelegt und geschützt. Es gibt keinen direkten Zugang von außen zur Reaktoren, alle Zugänge erfolgen über Tunnel und Schleusen. Eine solche Typengestaltung trägt auch zu einer besseren Sicherung bei. Alle weiteren Details werden in der detaillierten Entwurfsphase bekannt gegeben.	Die SMR-Sicherung ist auf die Security Assessment Principles (SyAPS) des britischen Office for Nuclear Regulation (ONR) ausgelegt. Die Sicherung wird gewährleistet durch: 1. Dezierte Sicherungsmaßnahmen 2. Sicherungsmaßnahmen, die in die allgemeinen Designmerkmale des SMR und des Anlagenlayouts integriert sind (z. B. Ein-	Aus Sicherheitsgründen sind alle SMR-160-Sicherheitssysteme in einer robusten und sicheren Containment Enclosure Structure (CES) untergebracht und durch diese geschützt. Das Containment ist unzugänglich und resistent gegen radiologische Sabotage.	Das Gelände wird durch ähnliche Zaun- und Einbruchssysteme geschützt, die in großen Kernkraftwerken eingesetzt werden. Die erhöhte Sicherheit und die physische Sicherung des ACP100 werden durch die unterirdische Platzierung von NSSS und SFP verbessert.

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
	böswillige Sabotageakte von außen oder innen oder andere potenzielle Sicherheitsbedrohungen verringert. Der unterirdische Pool bietet eine erhöhte physische Sicherung, indem er den Zugang zu Kraftstoffen vor zusätzliche Herausforderungen stellt.	Gefährdung durch externe Bedrohungen minimiert wird.		/Ausstiegspunkte, Gebäude-/Gerätestandort, strukturelle Belastbarkeit usw.)		
<i>Beim SMR-Standortschutz werden dieselben Grundsätze angewendet wie beim Standortschutz großer Kernkraftwerke.</i>						
Sicherungs-Konzept während des Betriebs	Das aktuelle Konzept sieht 48 Sicherheitskräfte im Werkspersonal vor	Die Reduzierung des Personals und der Sicherung vor Ort gehört zu den Top-Features des BWRX-300, zu diesem Zeitpunkt sind jedoch keine Details verfügbar	Informationen und Daten stehen in der detaillierten Designphase zur Verfügung	Informationen und Daten werden zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar sein	Das Containment ist während des Betriebs verschlossen und ein Betreten ist nicht möglich. - Die Komponenten des SMR-160 liegen tief unter der Erde und sind für direkte Angriffe von Drohnen oder Raketen unzugänglich. - Der SMR-160-Kontrollraum befindet sich unter der Erde und verfügt über mehrere Sicherheitsebenen.	Die verbesserte Sicherheit und physische Sicherung des ACP100 wird durch die unterirdische Anordnung von NSSS und SFP gewährleistet. Spezifische ACP100-Informationen und -Daten sind nicht in öffentlich zugänglichen Quellen verfügbar.
Kosten für Sicherung	Daten zu den Sicherungskosten stehen möglicherweise in einer späteren Phase der Projektentwicklung zur Verfügung					

	NuScale VOYGR	GE/Hitachi BWRX-300	NUWARD CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Rolls-Royce UK SMR	SMR-160 HOLTEC	ACP100
Vergleich mit herkömmlichen Reaktoren	Die Sicherungskosten der SMRs dürften pro Standort ähnlich sein wie bei herkömmlichen Kernkraftwerken					