

„Neue“ technologische Hoffnung – SMR („Small modular Reactors“) und Gen IV?

Zukunft der Kernenergienutzung 10 Jahre nach Fukushima

Dr. C. Pistner

BOKU/Zoom

12.03.2021

Agenda

1 „SMR“ – Was ist das eigentlich?

2 Einsatzbereiche und Ökonomie

3 Regulatorische Fragestellungen

4 Sicherheitstechnische Fragestellungen

5 Schlussfolgerungen

Aktuelles Gutachten zu SMR

- Überblick über gegenwärtig international verfolgte Reaktorkonzepte unter dem Begriff SMR („Small Modular Reactors“)
- Einschätzung zu möglichen Einsatzbereichen
- Einschätzung zu Sicherheitsfragen und Risiken

→ Verfügbar unter:

https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/neue_reaktoren/neue-reaktoren_node.html



Projektteam

- Öko-Institut e.V.:
 - Dr. C. Pistner
 - Dr. M. Englert
 - C. Küppers
- TU Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (Anwendungsgebiete & Wirtschaftlichkeitsaspekte)
 - Dr. B. Wealer
 - B. Steigerwald
 - Prof. Dr. C. von Hirschhausen
- Physikerbüros Bremen (Sicherheitsaspekte & Regelwerke):
 - R. Donderer

1

„SMR“ – Was ist das eigentlich?

Definitionen „SMR“ – einige Beispiele

- IAEA ARIS:

“advanced reactors that produce electric power up to 300 MW(e), designed to be built in factories and shipped to utilities for installation as demand arises”

- U.S. NRC (2020):

“The NRC refers to light water reactor (LWR) designs generating 300 MWe or less as small modular reactors (SMRs).”

- WNA (2020):

“Small modular reactors (SMRs) are defined as nuclear reactors generally 300 MWe equivalent or less, designed with modular technology using module factory fabrication, pursuing economies of series production and short construction times.”

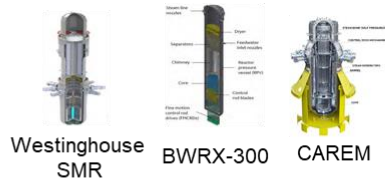
Definitionsproblematik SMR

- Problem einer Definition bei Berücksichtigung von
 - Leistungsgröße:
 - z.T. Ausschluss oft als SMR bezeichneter Systeme
 - < 10 MWe: bspw. Aurora Powerhouse, U-Battery
 - > 300 MWe: bspw. TWR-P, U.K. SMR
 - Modularität: kein einheitlicher Begriff der „Modularität“ bei verschiedenen Systemen feststellbar, viele Systeme nicht klassisch „modular“
 - Einsatzfelder: nur wenige Systeme explizit eingeschränkte Einsatzfelder, wenig „Unterscheidungspotenzial“
 - Mobilitätseigenschaften: Gesamtgröße von Komponenten durch Transportierbarkeit begrenzt, Genehmigungsfragen von Transporten nuklearer Brennstoffe offen

Informationslage

- Konkrete und verlässliche Informationen zu SMR-Konzepten schwierig zu erlangen
 - Vielfach keine detaillierten Designinformationen aufgrund „kommerzieller“ Interessen
 - Kontinuierliche Weiterentwicklung von Designs mit z.T. deutlichen Änderungen im Konzept

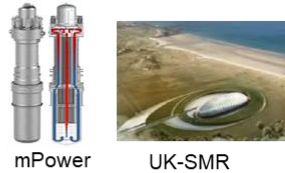
Betrachtete SMR-Konzepte



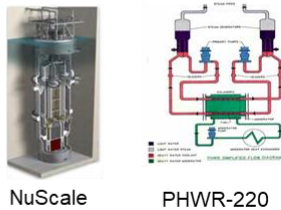
Westinghouse SMR BWRX-300 CAREM



SMR-160 SMART ELK River



mPower UK-SMR



NuScale PHWR-220



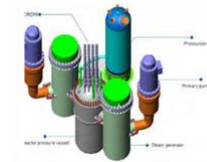
S2W



RITM-200M



KLT40S



ACPR50S



Peach Bottom



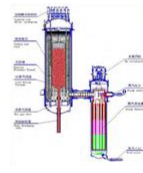
PBMR-400



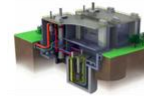
THTR-300



Xe-100



HTR-PM



PRISM

CEFR



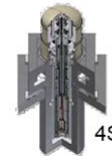
ARC-100



BREST-OD-300



EM2



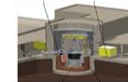
4S



MSRE



IMSR



SSR-W300



U-Battery



MMR



d/eVinci



AURORA

Land-based,
Water - cooled

Marine-based,
Water - cooled

High temperature,
gas - cooled

Fast neutron
spectrum reactors

Molten salt
reactors

Microreactors

Einsatzbereiche und Ökonomie

Warum SMR?

- Industrie- und geopolitische Motivlagen:
 - Die meisten SMR-Aktivitäten finden in Ländern mit großen Atomprogrammen und in Ländern mit Kernwaffen und Atom-U-Booten statt (Ausnahme: Kanada)
 - Bsp. Kanada: vor allem als alternative Energieversorgungsoption für abgelegene Bergbauprojekte und Gemeinden
 - Bsp. Jordanien: Energiesicherheit scheint eine Motivation zu sein. Große Kernkraftwerke bedeuten finanzielle aber auch technisch/infrastrukturelle Herausforderungen
 - Bsp. Saudi Arabien: unklare Motivlage. Reduktion des Ölanteils an der Stromproduktion könnte auch durch höheren Ausbau von erneuerbaren Energien erreicht werden

„Neue“ Einsatzbereiche?

- Einsatzbereiche und energiewirtschaftliche Einordnung
 - „Neue“ Einsatzbereiche für SMR-Konzepte, die insb. in Richtung neuer Dezentralität gehen, sind aus heutiger Sicht nicht abzusehen
 - Bspw.: erneuerbaren Energien in Verbindung mit Speichersystemen lösen das Problem der dezentralen Versorgung. Heute ist eine vollständige Abdeckung dieser Regionen mit Microgrids technisch zuverlässig machbar und zu geringen Kosten darstellbar
 - Somit entfallen wesentliche diskutierte Einsatzbereiche für SMR. Dies steht in Widerspruch zu der bis heute hervorgebrachten „SMR“-Argumentation neuer Marktsegmente

Einsatzbereich Klimaschutz

- Sofern SMR auch im Kontext der Bekämpfung der Gefahren des Klimawandels zur globalen Stromversorgung vorgeschlagen werden, ist die mit ihnen erzielte Stromproduktion relevant:
 - Heutige neue Atomkraftwerke: 1.000-1.600 MWe
 - SMR: 1,5-300 MWe
- Um weltweit dieselbe elektrische Leistung zu erzeugen wäre eine um den Faktor 3-1000 (typisch Faktor 10) größere Anzahl an SMR-Anlagen erforderlich
- Alleine zum Ersatz der heute circa 400 Reaktoren mit großer Leistung würde dies also den Bau von vielen tausend bis zehntausend SMR-Anlagen bedeuten

Ökonomie I

Abbildung 6: Kostensteigerungen beim Bau von SMRs

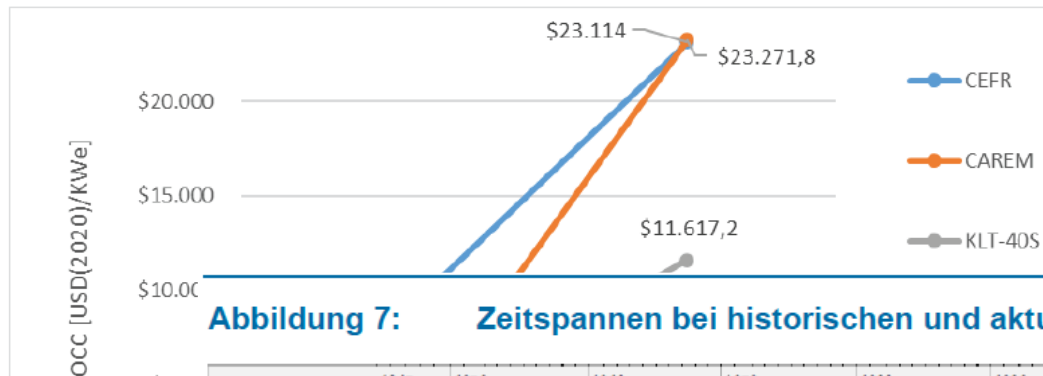
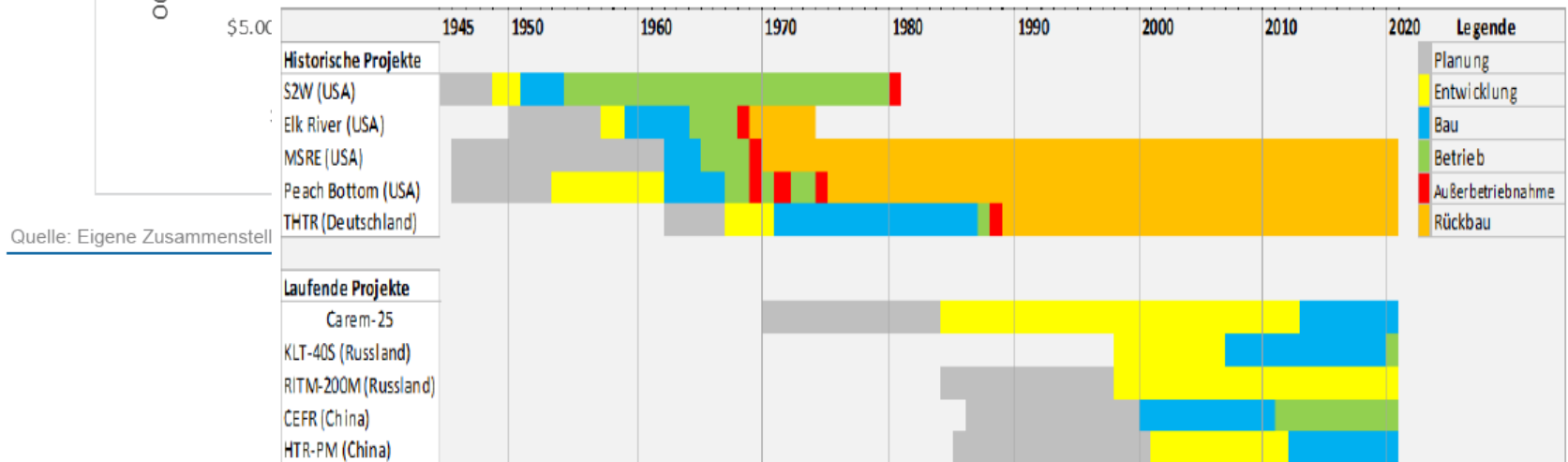


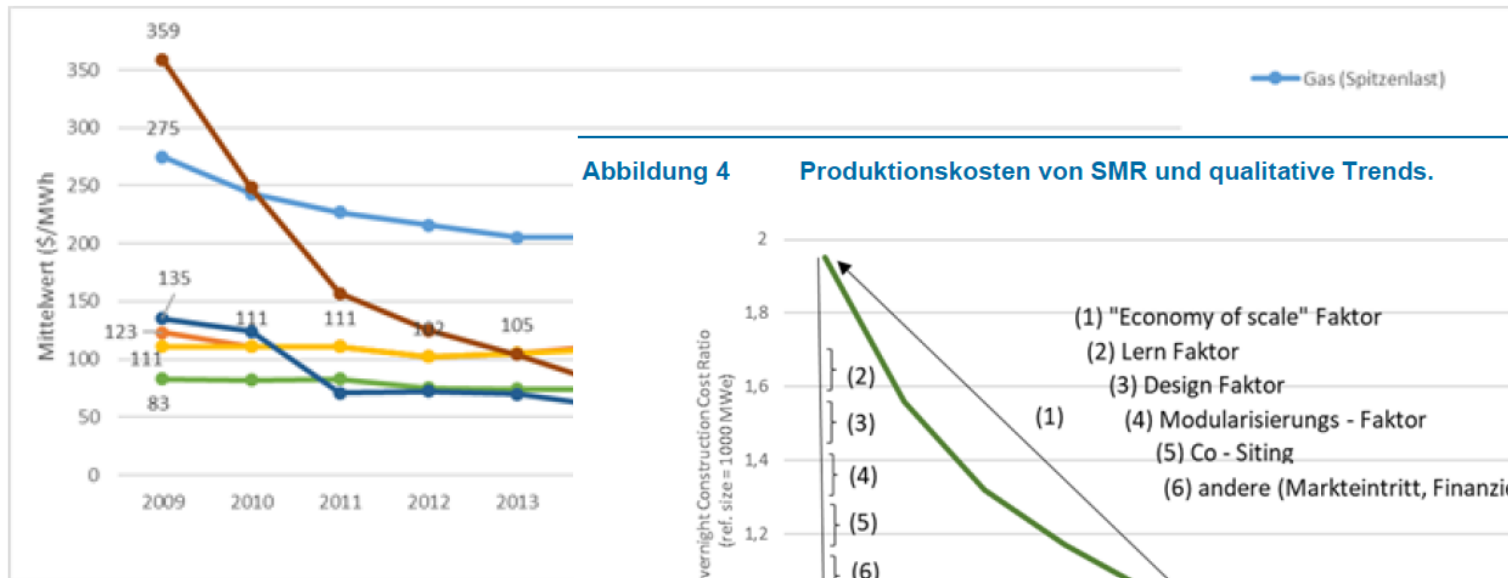
Abbildung 7: Zeitspannen bei historischen und aktuellen SMR-Konzepten



Quelle: Eigene Darstellung

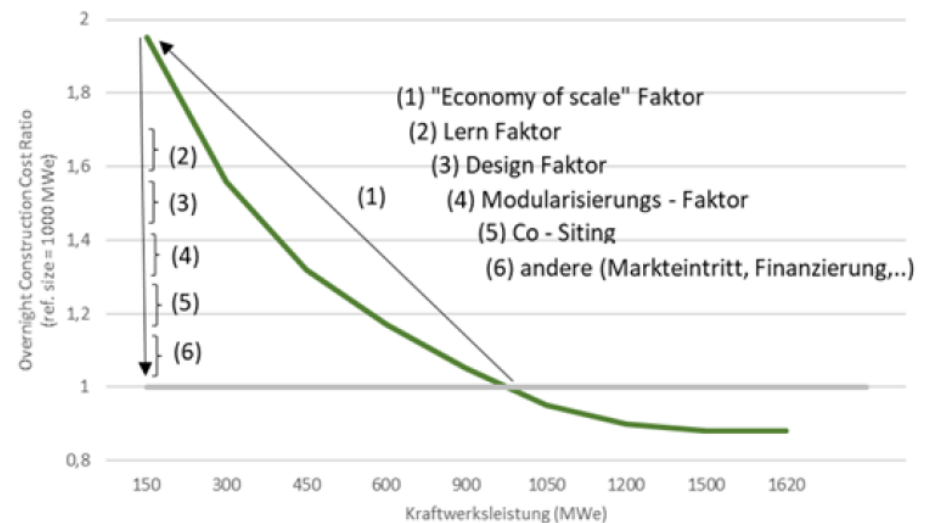
Ökonomie II

Abbildung 1: Stromgestehungskosten verschiedener Erzeugungstechnologien (2009-2020).



Quelle: (Lazard 2020)

Abbildung 4 Produktionskosten von SMR und qualitative Trends.



Quelle: (Boarin et al. 2021, 253, Abbildung 6), eigene „Übersetzung“

Ökonomie III

- SMR teilen viele Kosten- und Strukturcharakteristika mit größeren Anlagen, (u.a. systematische Kostenüberschreitungen)
 - Einige Komponenten können in industriellen Fabriken standardisiert hergestellt werden, jedoch scheinen die dadurch erzielbaren Produktivitätssteigerungen als relativ gering
 - Signifikante Kostenersparnisse aufgrund stärkerer Modularität sind in den vergangenen Reaktorentwicklungen nicht zu beobachten und sind auch für die Zukunft nicht zu erwarten
 - Die Modularität beim Zusammenbau von Reaktoren kann ebenfalls leichte Produktivitätssteigerungen erbringen, ist aber auch mit steigenden Transportbedarfen verbunden
 - Es ist nicht zu erwarten, dass der strukturelle Nachteil kleiner Leistungen durch Lern- bzw. Masseneffekte kompensiert werden kann

3

Regulatorische Fragestellungen

Regulatorisches I

- Bislang liegen keine SMR-spezifischen nationalen oder internationalen Sicherheitsstandards vor.
 - Viele heutige Regelwerksanforderungen sind grundsätzlich auf SMR-Konzepte übertragbar
 - SMR sollen mindestens das integrale Sicherheitsniveau heutiger neuer bzw. in Bau befindlicher Kernkraftwerke erfüllen

Regulatorisches II

- Heutige Regelwerke oftmals an wassergekühlten Reaktorkonzepten orientiert
 - Neue Herstellungsverfahren, Materialien und technologische Lösungen für Sicherheitsfunktionen erfordern vielfach neue regulatorische Ansätze
 - Weiterentwicklung insbesondere für nicht-wassergekühlte Reaktoren erforderlich und zeitaufwändig
 - SMR-Entwickler streben weltweiten Einsatz an, was eine starke internationale Standardisierung erforderlich machen würde

Regulatorisches III

- Spezielle Einsatzszenarien werfen neue regulatorische Fragestellung auf, bspw.
 - Wechselwirkungen zwischen mehreren Modulen an einem Standort – sowohl im Betrieb wie während der Errichtung von neuen Modulen – müssen analysiert werden.
 - Wechselwirkungen mit industriellen Anlagen (die selbst potenziell Störfallanlagen sein können), die von SMR mit Prozesswärme versorgt werden sollen, müssen analysiert werden.

Regulatorisches IV

- Unterschiede zwischen SMR und heutigen Kernkraftwerken führen zu einer Diskussion über „Graded Approach“
 - Potenzielle Vorteile durch geringeres radioaktives Inventar pro Reaktor und erwartete höhere Sicherheit durch „Vereinfachung“ und „passive Systeme“
 - Demgegenüber ggf. Anspruch auf reduzierte Anforderungen (Redundanzgrad, Diversität), ggf. Verzicht auf heutige Anforderungen (gestaffelte Sicherheitsebenen, anlageninterner Notfallschutz, reduzierte Planungsradien oder gar Verzicht auf externe Notfallplanung)
- Offene Frage: Wie wird gewünschtes/erforderliches/machbares Sicherheitsniveau national/international festgelegt?

4

Sicherheitstechnische Fragestellungen

Sicherheitsaspekte

- SMR sollen mindestens das integrale Sicherheitsniveau heutiger neuer bzw. in Bau befindlicher Kernkraftwerke erfüllen
- Ein Design-spezifischer Nachweis ist jedoch erforderlich
- Wichtige, zu betrachtende Aspekte:
 - Erfüllung der Sicherheitsfunktionen Einschluss der radioaktiven Stoffe, Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der Brennelemente
 - Relevantes Ereignisspektrum
 - Defence in Depth (insb. anlageninterner und externer Notfallschutz)
 - Proliferationsaspekte

Einschluss radioaktiver Stoffe

- Für wassergekühlte SMR-Konzepte werden vergleichbare Containment-Konzepte verfolgt, wie für heutige Leichtwasserreaktoren
- Für SMR-Konzepten, die infolge von kreditierten besonderen Einschlusseigenschaften des Brennstoffs auf ein Reaktorcontainment verzichten wollen (insbesondere HTR), fehlen konkrete regulatorische Festlegungen wie dennoch ein ausreichend wirksamer und zuverlässiger gestaffelter Einschluss der Aktivitätsinventare erreicht werden kann
- Spezifisch für Salzschnmelzereaktoren, bei denen der Brennstoff nicht in einem Hüllrohr als erster Barriere eingeschlossen ist, muss der Nachweis der funktionellen Wirksamkeit des Containments neu definiert werden

Kontrolle der Reaktivität

- Reaktivitätskontrolle erfolgt bei praktisch allen betrachteten SMR-Konzepten wie bei heutigen LWR im Wesentlichen über Steuerelemente (oder bewegliche Reflektoren, bei heutigen LWR nicht üblich). Daraus ergeben sich insgesamt keine wesentlichen Unterschiede mit Blick auf die Reaktivitätskontrolle im Vergleich zu heutigen Leistungsreaktoren.
- Insbesondere nicht-wassergekühlte SMR-Konzepte verweisen oftmals auf sicherheitstechnisch vorteilhafte „negative Reaktivitätskoeffizienten“
- Eine Beschränkung der Betrachtung auf einzelne (negative) Reaktivitätskoeffizienten wäre nicht sachgerecht. Vielmehr muss das Reaktivitätsverhalten unter allen zu betrachtenden physikalischen Änderungen (Störungen, Störfälle) zeitlich und räumlich analysiert und bewertet werden.

Kühlung der Brennelemente

- Passive Nachwärmeabfuhr bei SMR-Konzepten kann grundsätzlich zu einer erhöhten Sicherheit führen, da mögliche Versagensmechanismen von aktiven Komponenten ausgeschlossen werden können und so eine erhöhte Zuverlässigkeit der Funktion erreicht werden kann
- Allein aufgrund der Eigenschaften der Passivität kann jedoch noch nicht von einer erhöhten Zuverlässigkeit ausgegangen werden
- Theoretische und experimentelle Nachweise eines konkreten passiven Nachwärmeabfuhrsystems sind ebenso erforderlich wie detaillierte Analysen der zu unterstellenden Einsatzrandbedingungen

Ereignisspektrum

- Durch Design-Maßnahmen sollen bestimmte Ereignisse ausgeschlossen (insbesondere großer KMV) oder zumindest unwahrscheinlicher gemacht werden
- Bei nicht-wassergekühlten SMR verlieren einige Ereignisklassen an Gewicht (insbesondere KMV), andere kommen jedoch hinzu
- Einwirkungen von außen können an Bedeutung gewinnen (abgelegene Regionen, Versorgung von Industrieanlagen, hohe Zahl an Standorten), auch bspw. für FNPPs sind andere Ereignisse zu berücksichtigen
- Für SMR müssen zu postulierende einleitende Ereignisse, einschließlich der Einwirkungen von innen und außen, mittels eines systematischen Ansatzes, der alle Betriebs- bzw. Bauzustände einer ggf. auch modular ausgelegten Anlage umfasst, identifiziert werden

Anlageninterner und externer Notfallschutz

- Anlageninterne Notfallschutzmaßnahmen sind in verschiedenen SMR-Konzepten vergleichbar zu heutigen Kernkraftwerken vorgesehen aber
- für andere SMR-Konzepte fordern Entwickler aufgrund erwarteter höherer Zuverlässigkeit von vorgelagerten Sicherheitsmaßnahmen einen Verzicht auf zusätzliche Maßnahmen des anlageninternen und externen Notfallschutzes.
- Es muss bisher davon ausgegangen werden, dass für den anlagenexternen Notfallschutz bei SMR die Notwendigkeit von Planungsgebieten besteht, die deutlich über das Anlagengelände hinausreichen

Proliferationsaspekte

- Bereits durch die theoretisch höhere Anzahl an Reaktoren an verschiedenen Standorten gibt es mehr Möglichkeiten für Proliferation, gleichzeitig erhöht sich der Aufwand für Überwachungsmaßnahmen
- Verschiedene nicht-wassergekühlte SMR-Konzepte sehen den Einsatz von höheren Urananreicherungen oder die Nutzung von Plutoniumbrennstoffen sowie von Wiederaufarbeitungstechnologie vor, dies wirkt sich grundsätzlich nachteilig auf die Proliferationsresistenz aus
- Manche SMR-Konzepten sehen eine lange Laufzeit und die Lieferung als verschlossenes System vor. Dies könnte die Überwachung vereinfachen und Transporte minimieren, nachteilig wirkt sich aber die hohe erforderliche Menge an Spaltmaterial zu Beginn des Reaktorbetriebs aus

5

Schlussfolgerungen

Schlussfolgerungen I

- Trotz längerer Geschichte der Verwendung des Begriffs SMR („Small modular Reactors“ bis heute keine einheitliche, international übliche Definition:
 - Leistungsobergrenze (bei 300 MWe), zum Teil Abgrenzung gegenüber Mikroreaktoren (< 10 MWe)
 - Verschiedene weitere „Eigenschaften“ (Modularität), die jedoch nicht eindeutig definiert sind und nicht für alle Konzepte gelten/von allen erfüllt werden
 - Bandbreite von „historischen“ oder „heutigen“ Reaktoren mit geringer Leistung bis hin zu weitgehend andersartigen Konzepten mit wenig industrieller Vorerfahrung (wie z.B. Salzschmelzereaktoren)
- Gefahr einer Vermischung von Argumenten, die jeweils für einzelne Konzepte gelten können, aber von „SMR“ als solchen nicht erfüllt werden

Schlussfolgerungen II

- Viele Systeme heute „in Entwicklung“, aber
 - Zum Teil bereits über Jahrzehnte in Entwicklung
 - Systeme „kommen und gehen“,
 - zum Teil (noch) in Listen, obwohl Entwicklung eigentlich eingestellt ist (bspw. Flexblue, PBMR-400 ...),
 - zum Teil Systeme in Bau, aber „Nachfolgekonzept“ bereits angekündigt (CAREM, KLT-40S)
 - Gründe für „Scheitern“ oder „Designänderungen“ häufig nicht transparent

Schlussfolgerungen III

- Reaktorkonzepte mit geringer Leistung sind bereits seit vielen Jahrzehnten in Entwicklung oder im Einsatz, jedoch keine breite Einführung
- Auch „SMR“-Konzepte zum Teil seit den 1980er Jahren in Entwicklung, aber breite Einführung bis heute nicht erfolgt

Schlussfolgerungen IV

- Wassergekühlte SMR-Konzepte können auf umfangreiche Betriebserfahrung heutiger LWR zurückgreifen
 - Geringste Entwicklungsrisiken
 - Keine grundsätzlichen Unterschiede bei Ver- und Entsorgung
 - Neue Herausforderungen wg. großer Zahl und hoher weltweiter Verbreitung

Schlussfolgerungen V

- Nicht-wassergekühlte SMR-Konzepte versprechen grundsätzliche „Neuerungen“
 - Höhere Betriebstemperaturen sollen bspw. höhere Wirkungsgrade und ggf. andere Anwendungsfelder (insb. Prozesswärme) erschließen
 - Viele solcher Konzepte zielen auf geschlossenen Brennstoffkreislauf ab, mit verbundenen hohen technologischen Risiken (Brennstoffentwicklung, Wiederaufarbeitungstechnologien) und andersartigen Sicherheits- und Proliferationsrisiken
 - Deutlich geringere Betriebserfahrung (praktisch nur von Prototyp- und Demonstrationsreaktoren) sowie neuartige Lösungsansätze (technologische Lösungen, Materialien etc.) lassen deutlich längere Entwicklungszeiträume sowie höhere technologische Risiken gegenüber wassergekühlten Reaktoren erwarten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Thank you for your attention!

Haben Sie noch Fragen?
Do you have any questions?

