

SMR und "Neue" Reaktoren

Sicherheit, Proliferationsrisiken, Wirtschaftlichkeit, Entsorgung,
Realisierbarkeit

Dr. Matthias Englert

Nuclear Energy Conference Linz,
16.05.2023

Agenda

- 1** Sogenannte neue Reaktorkonzepte
- 2** Kleine Modulare Reaktoren
- 3** Diskussion und Schlussfolgerungen

Sogenannte neue Reaktorkonzepte

Aktuelles Gutachten zu „neuen“ Reaktorkonzepten

- Überblick über gegenwärtig international verfolgte Technologielinien und Reaktorkonzepte
- Einschätzung zu möglichen Einsatzbereichen
- Einschätzung zu Sicherheitsfragen und Risiken

→ Verfügbar unter:

https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/neuartige-reaktorkonzepte/sogenannte-neuartige-reaktorkonzepte_node.html

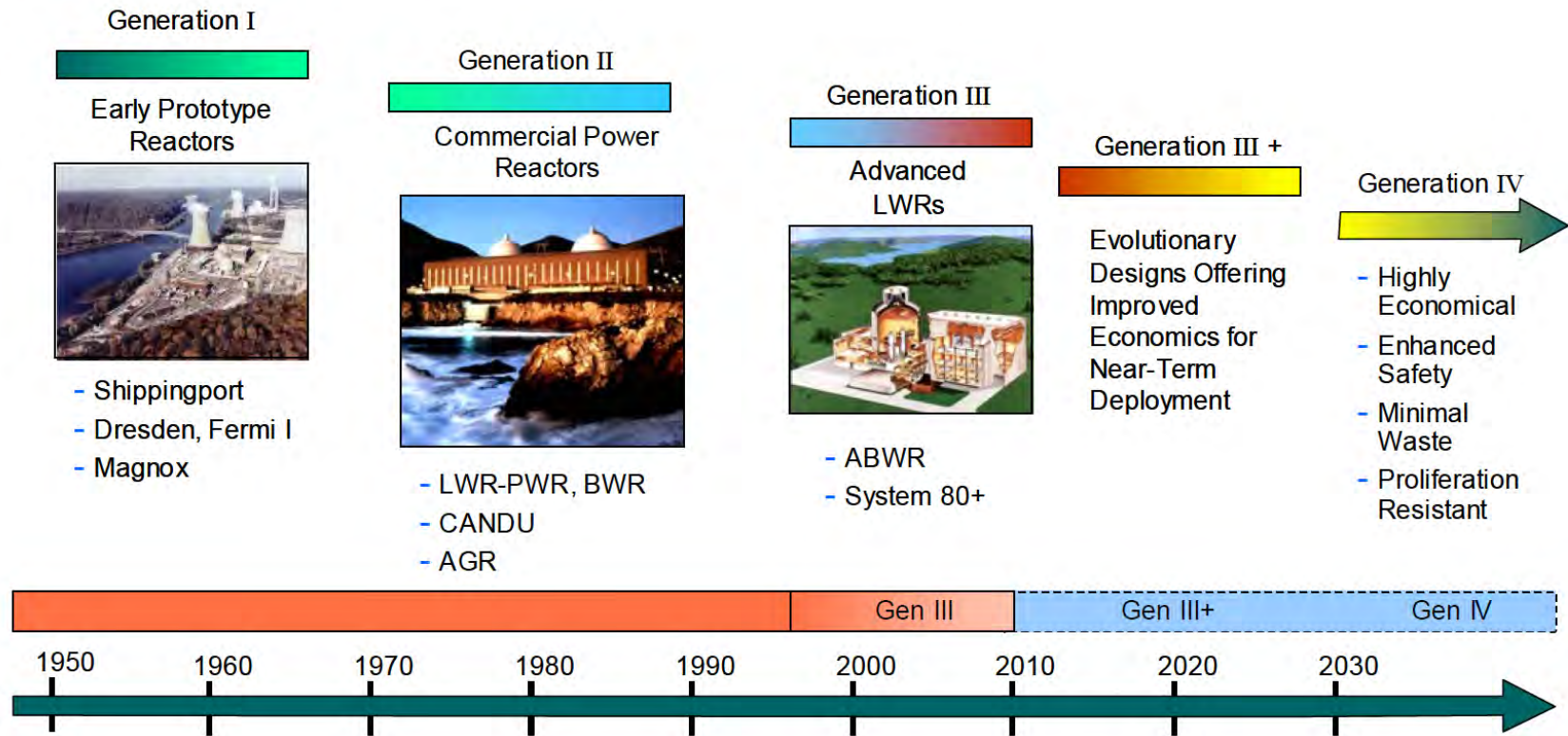


Wichtige Begriffsbestimmungen

- Begriff „sogenannte neuartige Reaktorkonzepte“ oder „alternative Reaktorkonzepte“
 - Historie der Konzepte ist oft jahrzehntealt
 - Infragestellung des „linearen“ Generationenbegriffs des GIF (Generation IV)
- Unterscheidung „Technologielinien“ vs. „Reaktorkonzepte“
 - Übergeordneter Begriff für grob gleichartige Konzepte: „Technologielinie“
 - Detailliertes Konzept innerhalb einer Technologielinie: „Reaktorkonzept“

Was sind „neue Reaktorkonzepte“?

- In 2000 Gründung des „Generation IV International Forum“



„Technologielinien“

- Natriumgekühlte schnelle Reaktoren (Sodium-cooled Fast Reactors, SFR)
- Bleigekühlte schnelle Reaktoren (Lead-cooled Fast Reactors, LFR)
- Gasgekühlte schnelle Reaktoren (Gas-cooled Fast Reactors, GFR)
- Salzschnmelzereaktoren (Molten Salt Reactors, MSR)
- Mit superkritischem Wasser gekühlte Reaktoren (Supercritical Water-cooled Reactors, SCWR)
- Hochtemperaturreaktoren (Very high Temperature Reactors, VHTR)
- Beschleunigergetriebene Reaktoren (Accelerator Driven Systems, ADS)

Generationenbegriff

Techno- logielinie	Erste Experimental- reaktoren	Erste Leistungsreaktoren (Gen I)	Weiterentwickelte Leistungsreaktor- konzepte (Gen II)	Fortgeschrittene Reaktorkonzepte (Gen III)
PWR	MTR, S1W, S2W, MZFR	Shippingport, Obninsk, Obrigheim	Konvoi	AP-1000, VVER- 1200, EPR
BWR	BORAX-I bis -V, Kahl	Dresden I, Gundremmingen-A	SWR-72	(KERENA), ABWR
PHWR	ZEEP, NRX, NRU	Rolphton	CANDU 500, CANDU 6	(EC 6, ACR-1000)
GCR	CP-1, Windscale	Calder Hall, Marcoule	AGR	-
VHTR	Dragon, AVR, HTR-10	Peach Bottom, THTR, HTR-PM, (VHTR)	-	-
SFR	Fermi I, Br-10, CEFR, KNK I und II, Rapsodie, TWR	BN-800, Monju, Super-Phoenix	(BN-1200)	-
LFR	(BREST-OD300)	-	-	-
GFR	(GFR)	-	-	-
MSR	ARE, MSRE	(LFTR, MCFR)	-	-
SCWR	HDR	(CSR1000)	-	-
ADS	(MYRRHA)	-	-	-

Quelle: (IAEA 2023c; Greenspan 2021; GIF 2002), geplante, jedoch bislang nicht in Betrieb befindliche Konzepte sind kursiv geschrieben und in Klammern gesetzt

Systematisierung von Technologielinien und zugehörigen Reaktorkonzepten

Technologielinie	Unterscheidungskriterien				Reaktorkonzept
	Kritikalität	Kühlmittel	Moderation	Besonderheit	
ADS	Nein				MYRRHA
SCWR	Ja	Wasser			CSR1000
SFR		Natrium		Mit WA	BN-800
				Ohne WA	TWR
LFR		Blei			Brest OD-300
GFR			Nein		GFR
VHTR		Gas		Kugel-BE	HTR-PM
			Ja	Prismatische BE	Prismatic HTR
MSR		Salz	Nein		MCFR
			Ja		LFTR

Wer ist beteiligt?



- Argentina*
- Australia *
- Brazil *
- Canada
- China
- Euratom
- France
- Japan
- Korea, Rep. of
- Russian Federation
- South Africa
- Switzerland
- United Kingdom*
- United States

*Argentina, Australia, Brazil and the United Kingdom are non-active, i.e. they have not acceded to the Framework Agreement which establishes system and project organizational levels for further co-operation. Australia signed the GIF Charter on June 22, 2016, thus becoming the GIF's newest and 14th member.

Gen IV Goals (2018)

- “Gen IV concepts complement existing and evolutionary Gen III/III+ reactors, which will be deployed throughout the century, by providing additional options and applications, such as:
 - optimisation of resource utilisation
 - multi-recycling of fissile materials/used fuel and **reduction of the footprint of geological repositories for high-level waste**;
 - low-carbon heat supply for co-generation and high-temperature industrial applications ...
 - ... reinforcing the defence-in-depth approach ... **aimed at ... eliminating the need for emergency measures ...**”
- The time perspective is a readiness for commercial fleet deployment by **around 2045** (for the first systems).

Medien zu „Neuen Reaktorkonzepten“ (z.B. in CH in 2016)

- „10.000 mal weniger Abfälle“ wie gängige Kernkraftwerke
- Diese Abfälle bereits „nach 1.000 Jahren“ ungefährlich
- Stromproduktion „so billig, dass sich sogar Schwellenländer die Technik leisten können“,
- Die sind Reaktoren „inhärent sicher“, schwere Unfälle werden somit unmöglich
- Aufgrund des verwendeten Thoriums als Brennstoff bieten solche Reaktoren „keine Möglichkeit, Waffen herzustellen“
- Bereits „in 15 bis 25 Jahren“ am Markt verfügbar

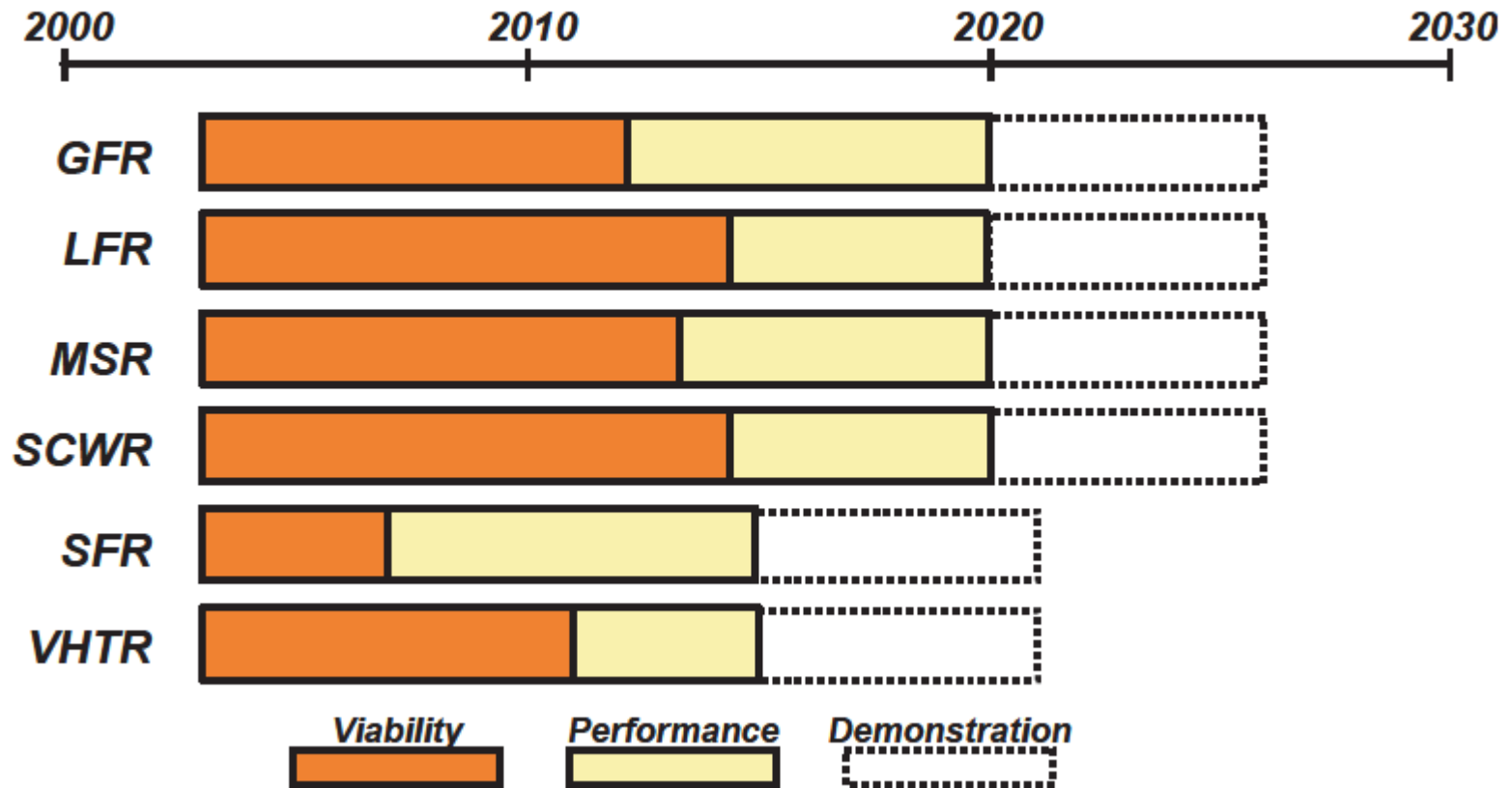
Die „neuen“ Reaktoren seien sicher, sauber, günstig, zuverlässig (und klein) und werden das Atommüllproblem lösen. Sie stünden vor dem Durchbruch und könnten daher wesentliche Beiträge zur CO₂ Einsparung leisten

Gen IV Timelines (2002)

- Viability Phase:
 - resolve key feasibility and proof-of-principle issues
- Performance Phase:
 - key subsystems need to be developed and optimized
- when the system is sufficiently mature and performs well enough to attract industrial interest in large-scale demonstration of the technology →
- Demonstration phase:
 - at least six years (2014: at least 10 years), funding of several billion U.S. dollars, if successful, a system may enter a commercialization phase

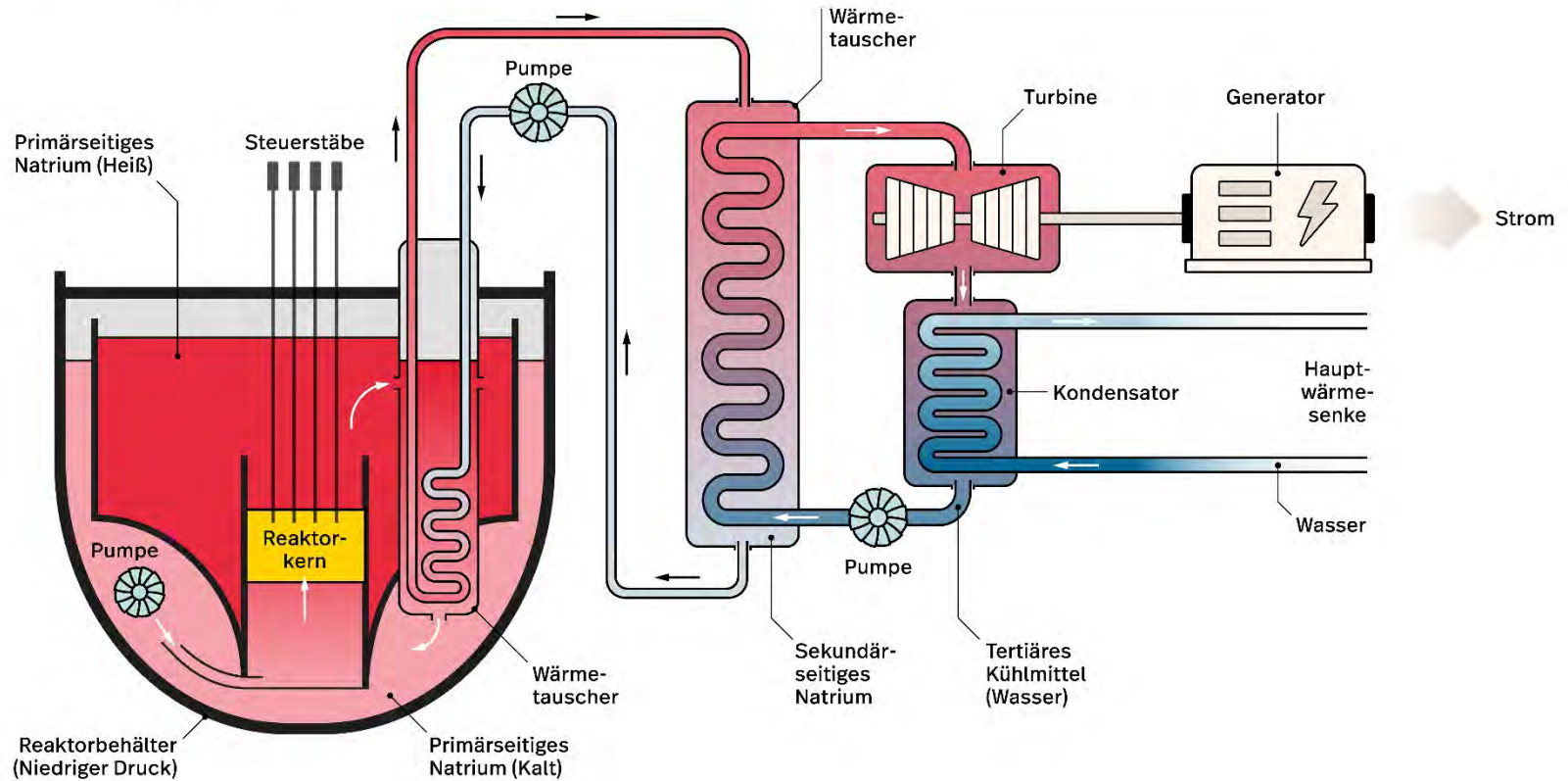
Gen IV Timelines (2002)

System Development Timelines



Sodium-cooled Fast Reactors (SFR)

Natriumgekühlter Schneller Reaktor



(Zentrale) Vor-/Nachteile

- Bessere Ausnutzung von Uran
- Niedrige Drücke bei gleichzeitig höheren Temperaturen
- Problematik der Reaktivitätskontrolle (positive Rückkopplungseffekte)
- Chemisch reaktives Kühlmittel (Natriumbrände)
- Proliferationsgefahren im Zusammenhang mit Plutoniumnutzung

BN-800

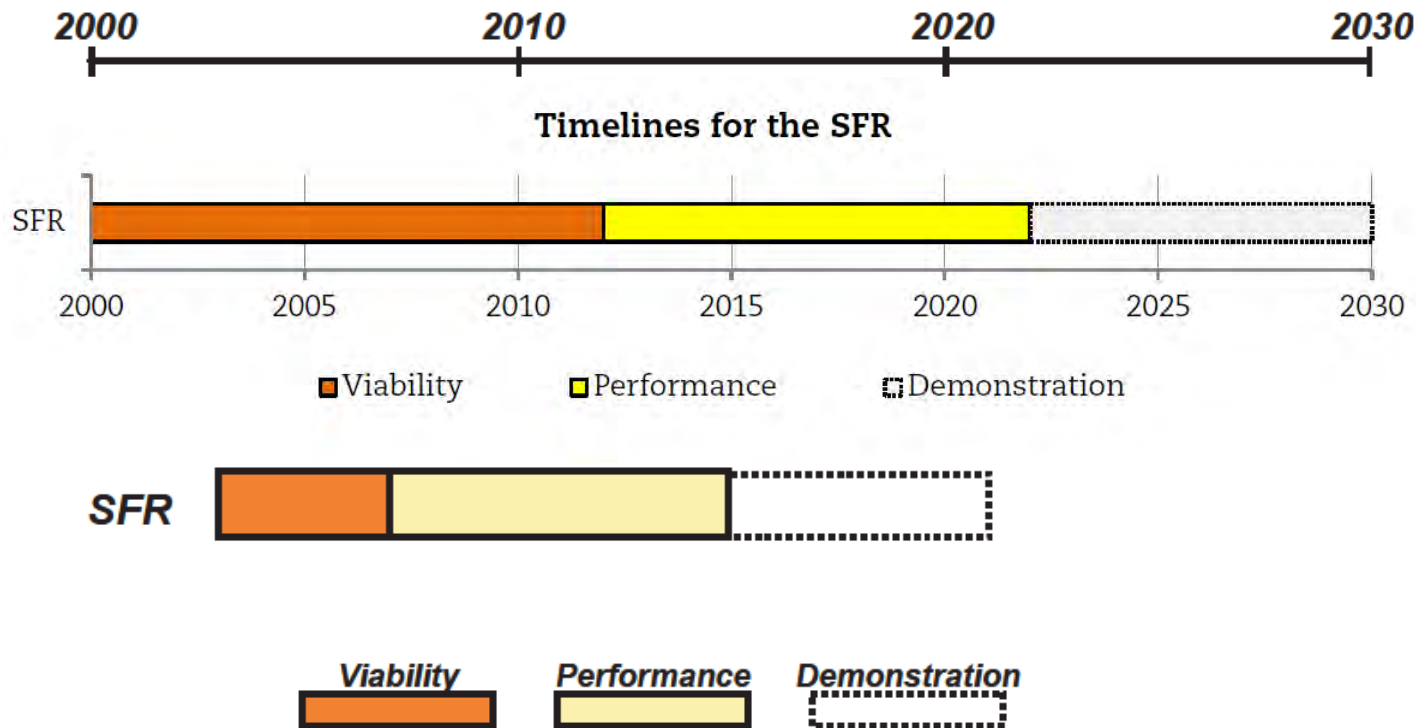


Quelle: Nori, DOI: 10.13140/RG.2.2.31153.81761/1

Linie:	SFR
Name:	Beloyarsk-4
Land:	Russland
Entwickler:	Rosenergoatom
Leistung:	820 MWe (Net) / 885 MWe (Gross)
Kühlmittel:	Natrium
Moderator:	/
Brennstoff:	MOX (mit WA)
Neutronenspektrum:	Schnell

SFR Timelines (2002/2014)

System Development Timelines



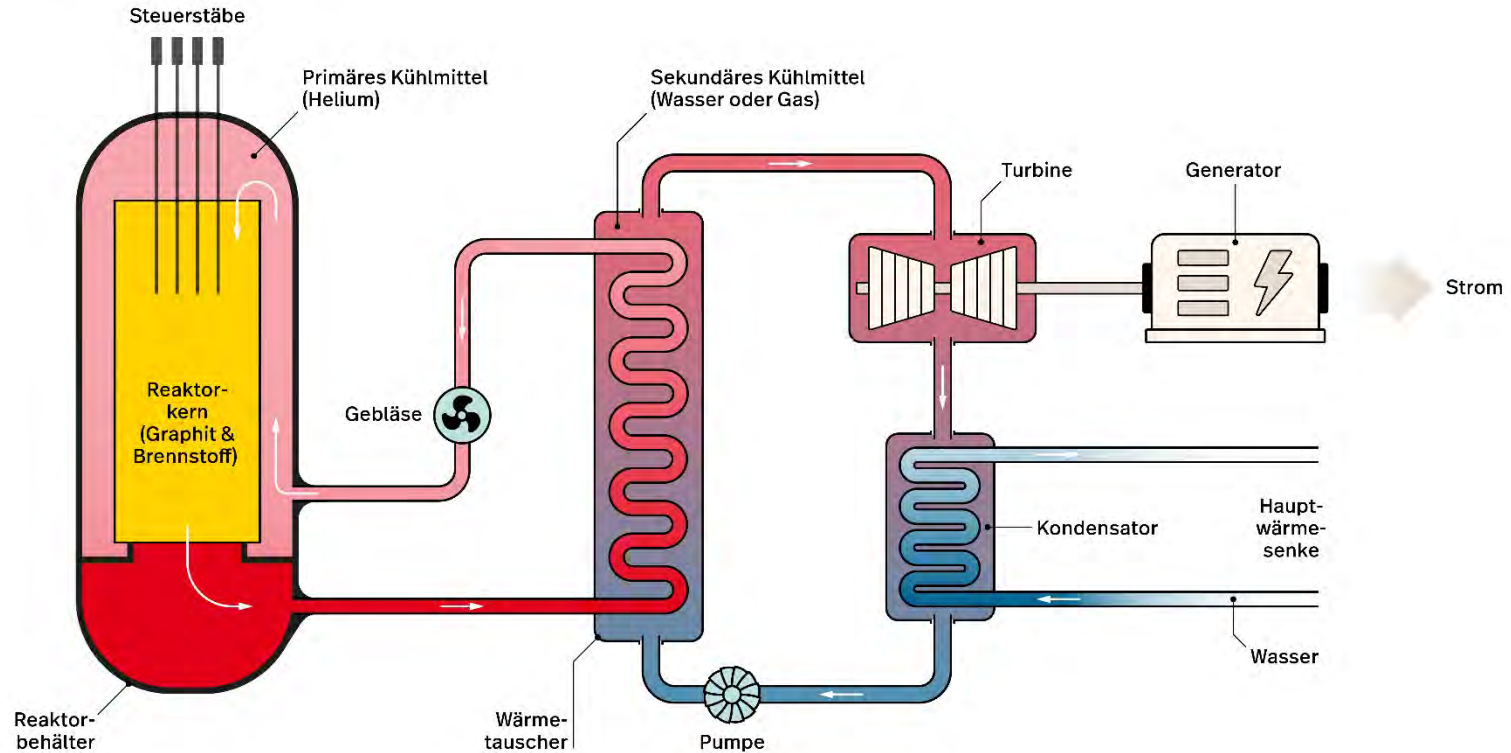
- Le Monde, 29.08.2019: la France abandonne la quatrième génération de réacteurs (ASTRID)

SFR – Ein paar Schlussfolgerungen

- Status: Mehr als 20 Prototypreaktoren und 400 Jahre Betriebserfahrung seit 70 Jahren Forschung und Entwicklung, aber immer noch kein kommerziell nutzbares System
- Brennstoffnutzung: Grundlegender Aspekt des Brütens von neuem spaltbarem Material, das in absehbarer Zukunft nicht benötigt wird
- Sicherheit: Spezifische Vor- und Nachteile, aber die Sicherheits-/Leistungsbilanz ist bisher schlecht
- Proliferation: Potenziell signifikanter Nachteil, da waffenfähiges spaltbares Material produziert werden kann, aber stark abhängig von der tatsächlichen technischen Auslegung

(Very) High Temperature Reactors – (V)HTR

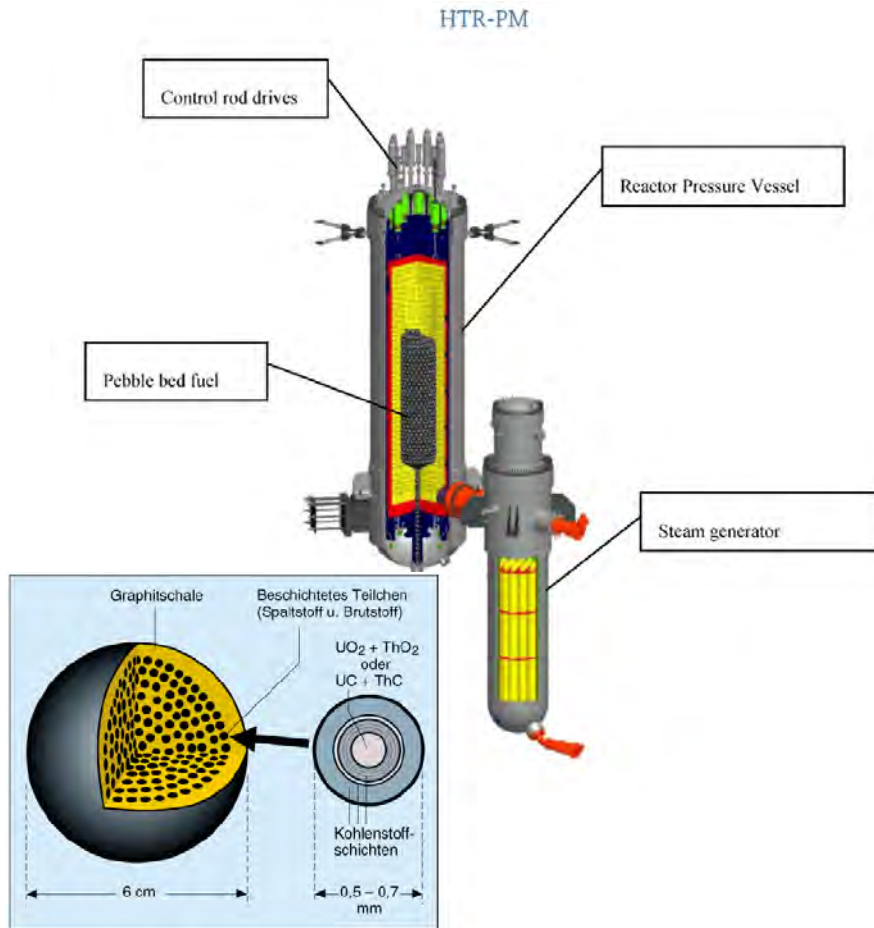
Hochtemperaturreaktor



(Zentrale) Vor-/Nachteile

- Hohe Arbeitstemperaturen des Kühlmittels
- Stark negative Reaktivitätsrückwirkungen
- Mögliche passive Nachwärmeabfuhr aus dem Reaktorkern
- Einschluss durch TRISO-Brennstoff bis ca. 1600°C
- Begrenzung der Leistungsgröße für passive Eigenschaften
- Beherrschung anderer Unfallabläufe (Luft-/Wassereintrich)

HTR-PM (Tsinghua Universität, China)

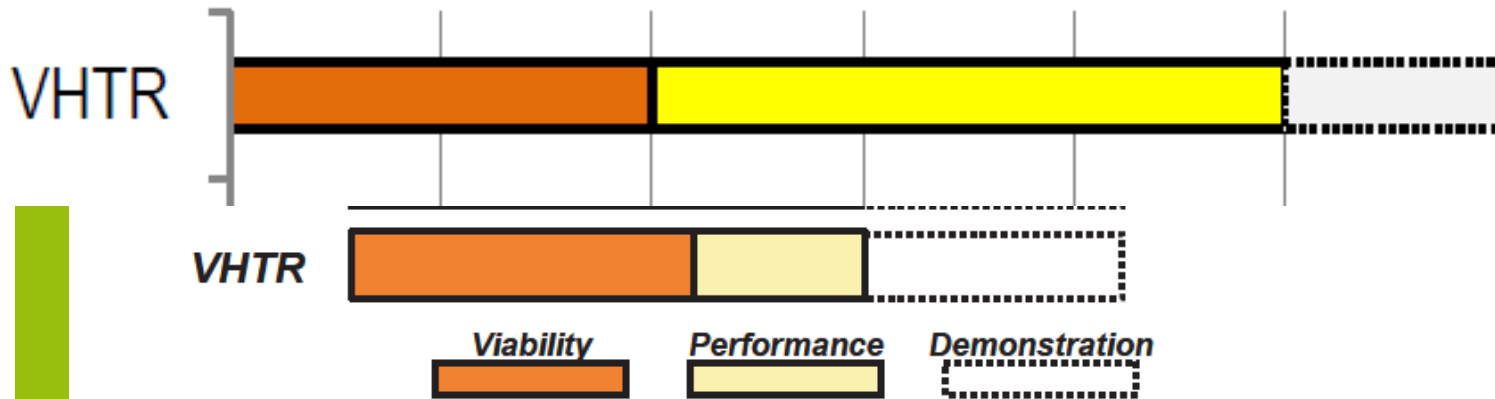


Schematische Darstellung der Brennstoffkugel des Kugelhaufen-Reaktors

- Entwicklung (in China) seit 2001, Inbetriebnahme Dezember 2021
- 210/2 MWe, Gasgekühlt (Helium), graphitmoderiert
- 8,5% angereichertes UO_2 -TRISO
- Teilweise passive Sicherheits-eigenschaften (stark negative Temperaturkoeffizienten, hohe Wärmekapazität)
- Kontinuierlicher BE-Wechsel
- Stromproduktion/750°C Ausgangstemp.
- Kein Containment
- Neutronenspektrum thermisch

(V)HTR Timelines (2002/2014)

System Development Timelines

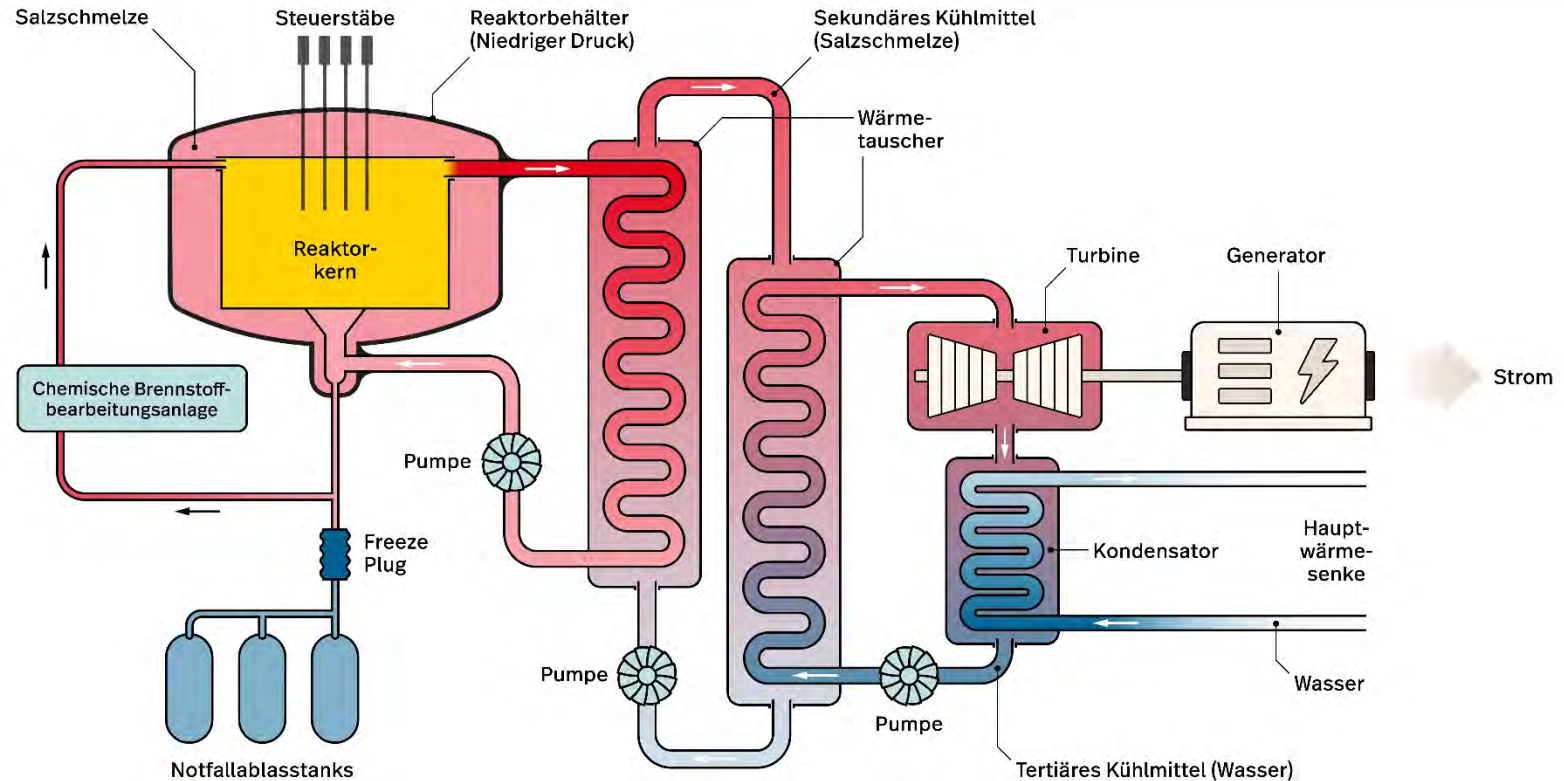


(V)HTR – Ein paar Schlussfolgerungen

- Status: 60 Jahre Entwicklungszeit, mehrere ehrgeizige Forschungs- und Entwicklungsprogramme (USA, Deutschland, Südafrika) sind gescheitert. Neuer Versuch in China.
- Sicherheit: Mögliche spezifische Vorteile in Bezug auf den Verlust der Kühlung und die Brennstoffschmelze, aber andere Unfallszenarien müssen im Detail betrachtet werden (Eindringen von Luft und Wasser, Graphitbrände usw.), daher keine allgemeine Schlussfolgerung
- Abfälle: Vergleichbares Abfallproblem, aber unterschiedliche Abfalleigenschaften (Graphit) sind zu berücksichtigen
- Ökonomie: Beschränkung auf niedrige Leistung, um passive Kühleigenschaften zu erhalten. Niedrige Temperaturen $<750^{\circ}\text{C}$ und Wasser-Dampf Sekundärkreislauf, um Entwicklungszeiten und Risiken zu minimieren. Bisher keine Prozesswärmenutzung.

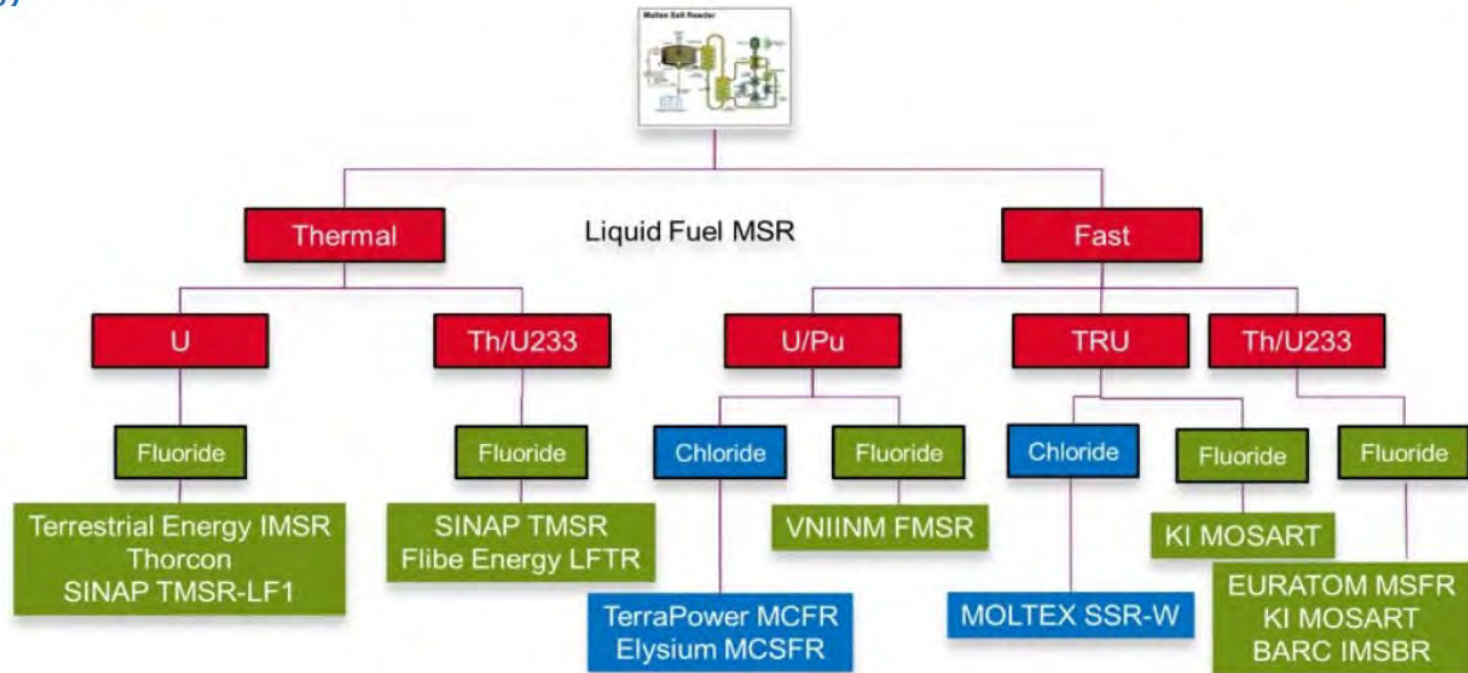
Molten Salt Reactors, MSR

Salzschmelzereaktor



Viele Weitere Reaktorkonzepte z.B. MSR

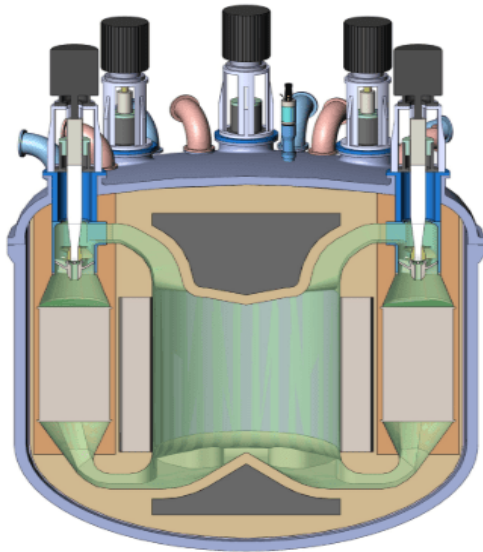
Figure MSR-1. The most studied MSR concepts, with key players (research & technology organization or vendors)



(Zentrale) Vor-/Nachteile

- Hohe Kühlmitteltemperaturen
- Geringe Betriebsdrücke
- Hohe und flexible Brennstoffausnutzung
- Entwicklung einer geeigneten Salzschnelze
- Korrosive Eigenschaften der Salzschnelze
- Freifließendes radioaktives Inventar (Strahlenschutz)
- Erforderliche (Vor-Ort)-Wiederaufarbeitung

MCFR

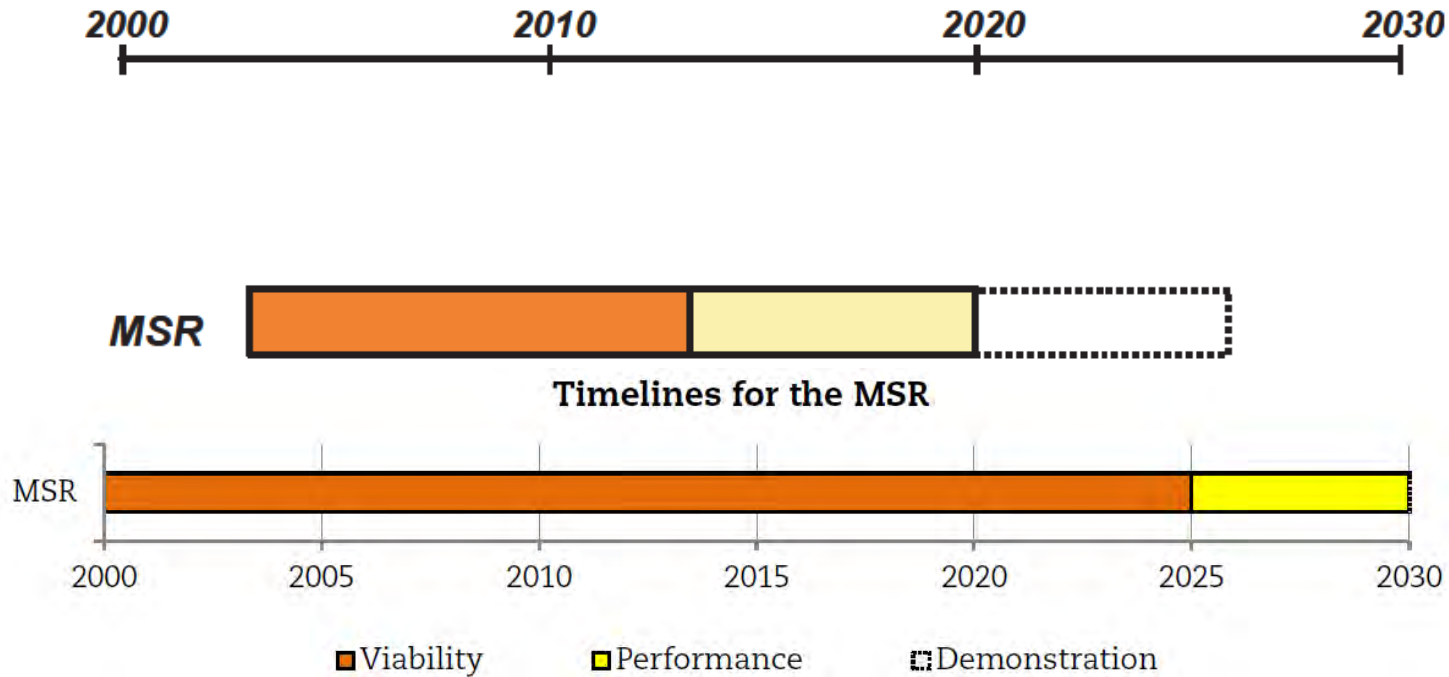


Quelle: https://www.terrapower.com/wp-content/uploads/2022/03/TP_2022_MCFR_Technology.pdf

Linie :	MSR
Name:	Molten Chloride Fast Reactor
Land:	USA
Entwickler:	TerraPower
Leistung:	1200 MWe
Kühlmittel:	Chloridsalz
Moderator:	/
Brennstoff:	U/Pu
Neutronenspektrum:	Schnell

MSR Timelines (2002/2014)

System Development Timelines



MSR - Conclusions

- Status: Erhebliche Anstrengungen zwischen den 1940er und 1970er Jahren, Wiederbelebung nach 2000, ein kommerziell nutzbares System ist nicht vor 2050 zu erwarten
- Sicherheit: Einige Vorteile möglich, aber
 - Erhebliche technologische Entwicklung erforderlich (Materialien, Instrumentierung, Nachweisverfahren)
 - Schwerwiegende Strahlenschutzprobleme auch im Normalbetrieb müssen gelöst werden
- Abfälle: Verschiedene Abfallströme und andere relevante Nuklide (Cl-36, C-14)
- Proliferation: Spezifische Probleme aufgrund der erforderlichen Online-Wiederaufbereitung von Brennstoff

3

„SMR“

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



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).”

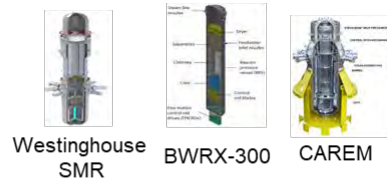
- WNA (2020):

“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

Betrachtete SMR-Konzepte



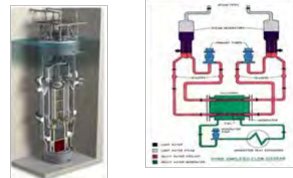
Westinghouse SMR BWRX-300 CAREM



SMR-160 SMART ELK River



mPower UK-SMR



NuScale PHWR-220



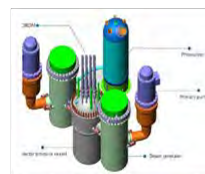
S2W



RITM-200M



KLT40S



ACPR50S



Peach Bottom



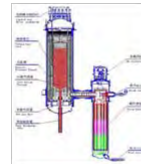
PBMR-400



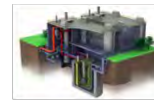
THTR-300



Xe-100



HTR-PM



PRISM



ARC-100



BREST-OD-300



EM2



4S

CEFR



MSRE



IMSR



SSR-W300



U-Battery



MMR



d/eVinci



AURORA

Land-based,
Water - cooled

Marine-based,
Water - cooled

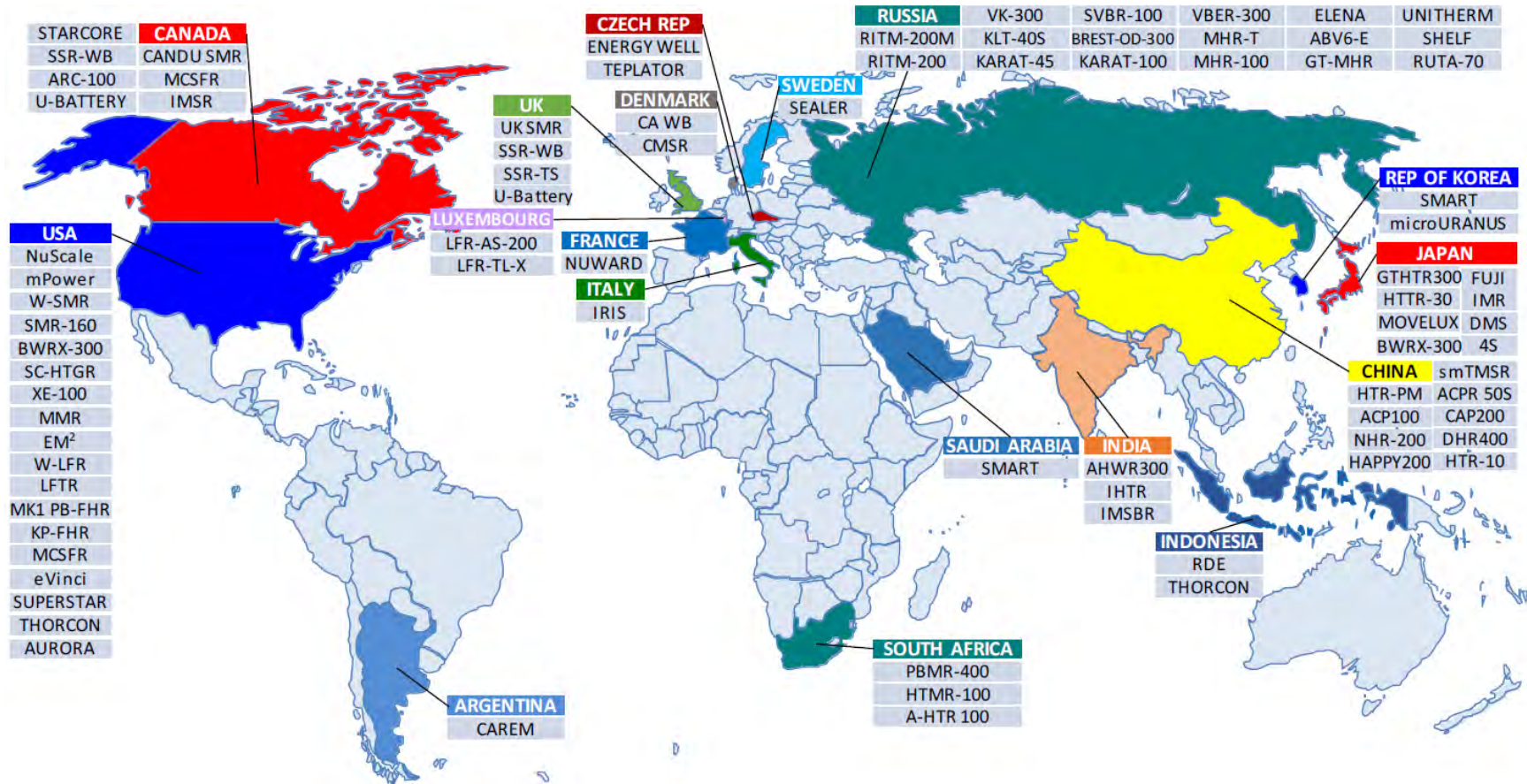
High temperature,
gas - cooled

Fast neutron
spectrum reactors

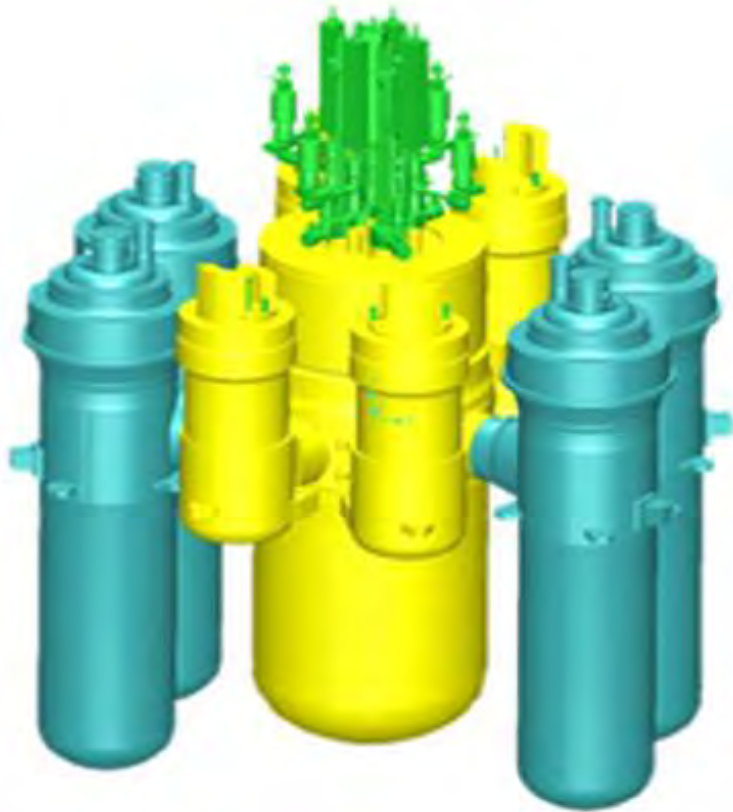
Molten salt
reactors

Microreactors

Wer macht mit?

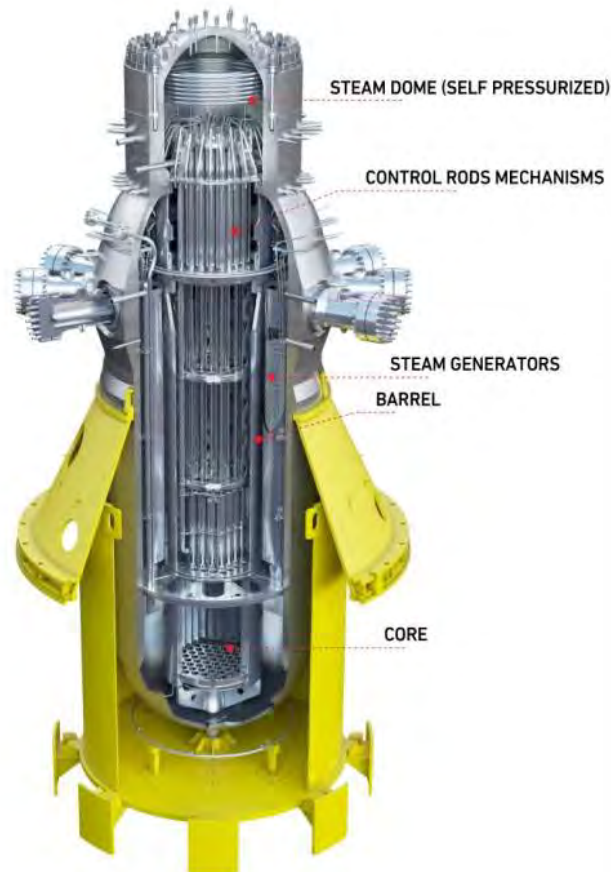


KLT-40S (Afrikantov OKBM, Russland)



- Entwicklung seit 1998, In Betriebnahme 2020
- 35 MWe, Wassergekühlt und moderiert
- 18,6% angereicherter UO_2 -
Dispersionsbrennstoff
- Teilweise passive Sicherheitssysteme
- BE-Lagerung an Bord
- Strom/Wärme, ggf.
Meerwasserentsalzung
- Präventive und mitigative
Notfallmaßnahmen
- Containment (nicht Volldruck)
- Auslegung gegen Flugzeugabsturz (10 t)

Carem-25 (CNEA, Argentinien)



- Entwicklung seit 1984, In Betriebnahme geplant 2022 (new contract for concrete Nov 22)
- 30 MWe, Wassergekühlt und moderiert
- 1,8-3,1% angereicherter UO_2 -Brennstoff
- Teilweise passive Sicherheitssysteme (mind. 36 Stunden Karenzzeit)
- Integraler RDB
- Strom, ggf. Meerwasserentsalzung
- Präventive und mitigative Notfallmaßnahmen
- Containment (nicht Volldruck)
- Auslegung gegen Erdbeben (0,25 g)

NuScale (NuScale Power Inc., USA)



- Entwicklung seit 2003, In Betriebnahme 2026 geplant
- 50 MWe, Wassergekühlt und moderiert
- <4,5% angereichertes UO_2
- Passive Sicherheitssysteme
- Integraler RDB, kein LB-LOCA
- Strom/Prozesswärme
- skalierbar, 12 Module/Anlage, Industrielle Herstellung geplant
- Containment, passive Kühlung durch Pool
- Auslegung gegen Erdbeben (0,5 g), unterirdische Bauweise

Proklamierte Ziele von SMR-Entwicklungen

- Breitere Einsatzfelder
 - Off-Grid (auch Militär), Fernwärme, Prozesswärme, Wasserstoff, Meerwasserentsalzung, Klimawandel ...
- Bessere Ökonomie
 - Große Stückzahlen mit quasi-industrieller Herstellung sollen günstigen Strom ermöglichen
- Höhere Sicherheit
 - Insbesondere durch Vereinfachung, passive Systeme, geringeres radioaktives Inventar

Diskussion und Schlussfolgerungen

Die „neuen“ Reaktoren seien sicher, sauber, günstig, zuverlässig (und klein) und werden das Atommüllproblem lösen. Sie stünden vor dem Durchbruch und könnten daher wesentliche Beiträge zur CO₂ Einsparung leisten

Einsatzbereiche und Ökonomie

„Neue“ Einsatzbereiche

- Einsatzbereiche und energiewirtschaftliche Einordnung
 - Hohe Temperaturen zur Nutzung der Prozesswärme $>750^{\circ}\text{C}$. Hohe Temperaturen sind herausfordernd für Materialien. Wird in der Entwicklung dann meist zugunsten einer hohen Entwicklungssicherheit aufgegeben (HTR-PM, prismatische HTR)
 - Neue“ Einsatzbereiche für SMR-Konzepte, die insb. in Richtung neuer Dezentralität gehen, sind aus heutiger Sicht nicht abzusehen, da erneuerbaren Energien in Verbindung mit Speichersystemen das Problem der dezentralen Versorgung lösen.
 - Somit entfallen wesentliche diskutierte Einsatzbereiche für SMR. Dies steht in Widerspruch zu der bis heute hervorgebrachten „SMR“-Argumentation neuer Marktsegmente

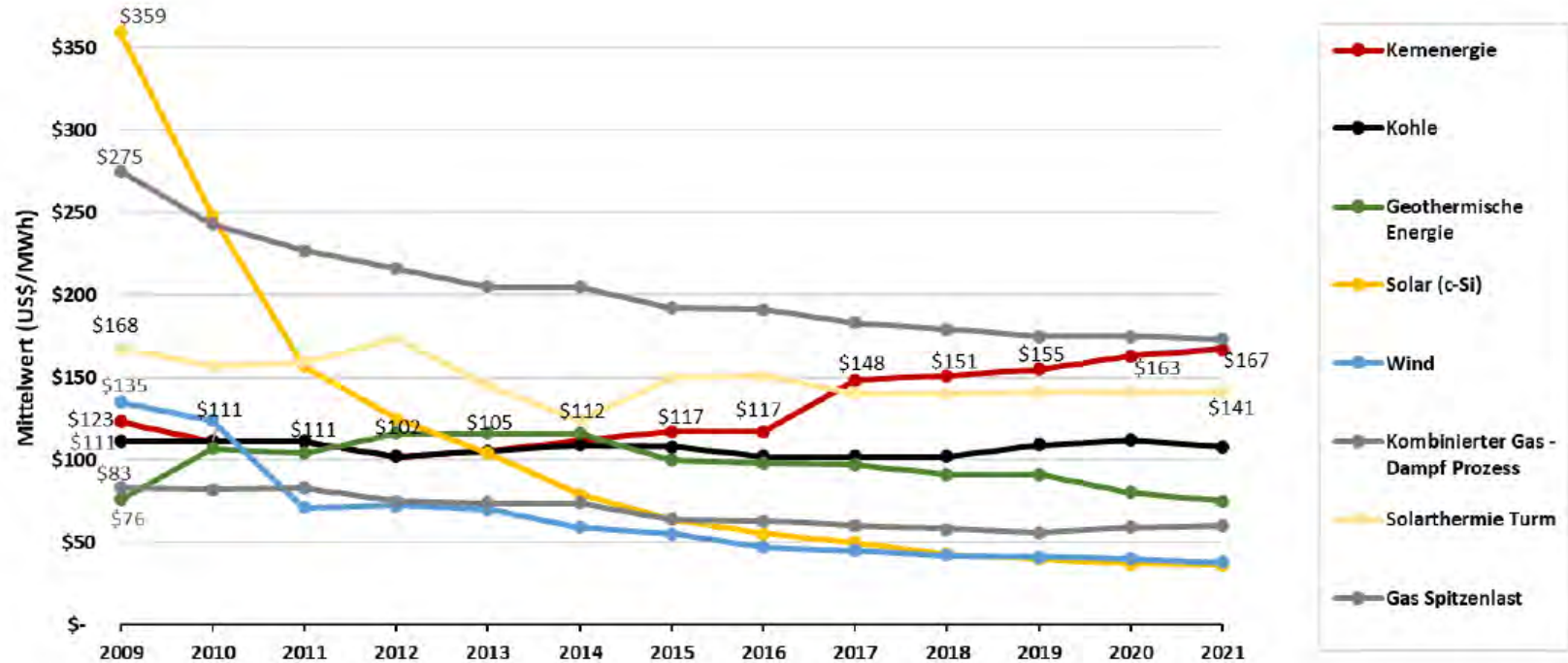
Einsatzbereich Klimaschutz

- Sog. neue Reaktoren kommen zu spät. Entwicklungs- und Bauzeit mindestens 20 Jahre (GIF: 2045).
- 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

- Keines der SNR Konzepte lässt eine massive Kostensenkung in Zukunft erwarten.
- SMR teilen viele Kosten- und Strukturcharakteristika mit größeren Anlagen, (u.a. systematische Kostenüberschreitungen)
- Es ist nicht zu erwarten, dass der strukturelle Nachteil kleiner Leistungen durch Lern- bzw. Masseneffekte kompensiert werden kann

Stromgestehungskosten



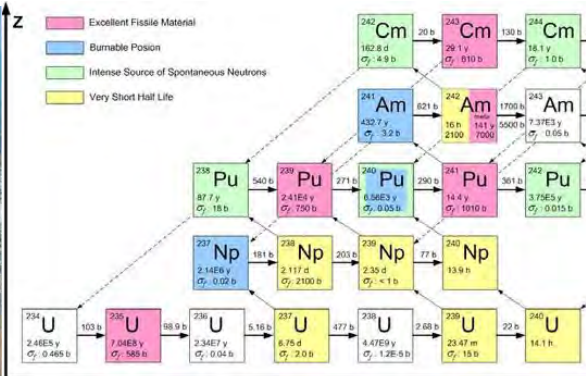
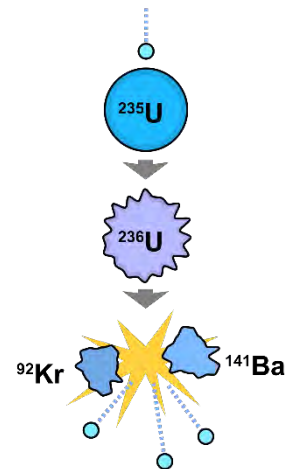
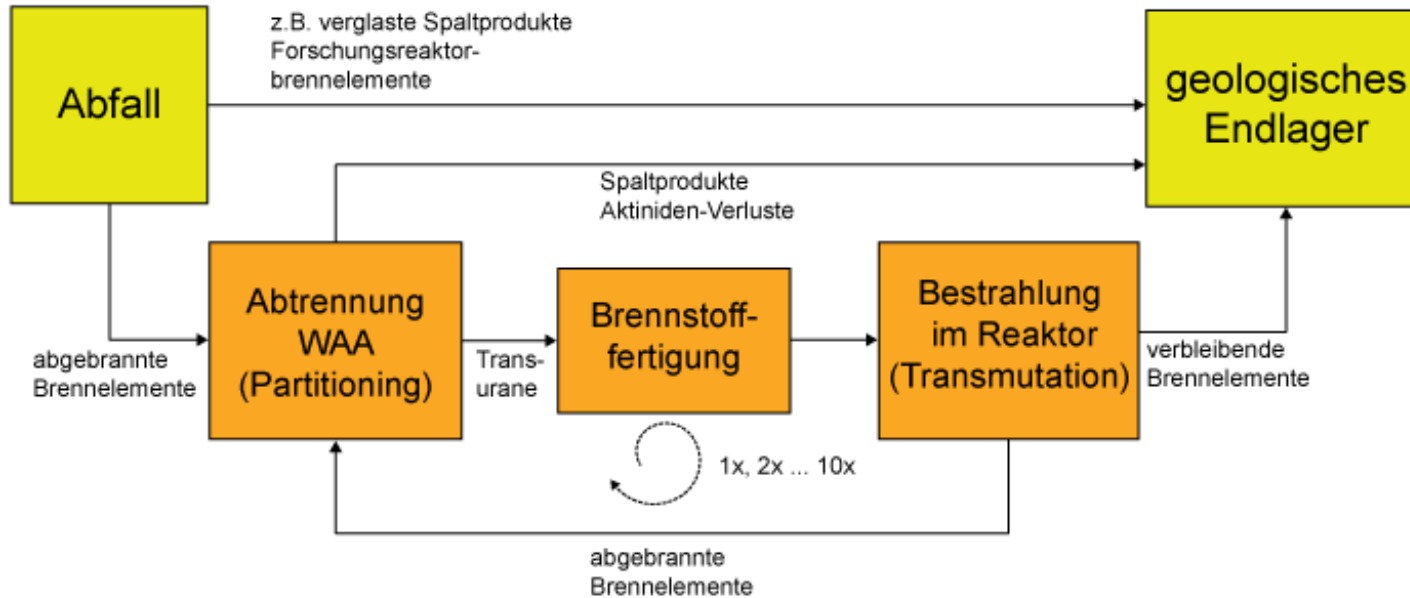
Quelle: Eigene Abbildung basierend auf Daten aus (Lazard 2022)

Ökonomie

- Demonstriertes Reaktorkonzept (Entwicklungsstand) ist nicht gleich Marktdurchdringung
- Hoffnung auf Disruption.
 - Private Unternehmen (Startups) nutzen staatliche Programme zur Vorentwicklung, scheitern aber bisher bei der Finanzierung eines Demonstrationsreaktors (mehrere Milliarden).
 - Kleine Startups müssen auf „fake it till you make it“ setzen (unrealistische Zeitversprechen), um private Investoren anzuziehen. Oft auch Investition ohne „Radiaktivität“.
 - Nuklear ist nicht vergleichbar mit Tesla, SpaceX etc. Kein Spielraum für Fehler aufgrund der Radioaktivität und damit zusammenhängender Kosten.

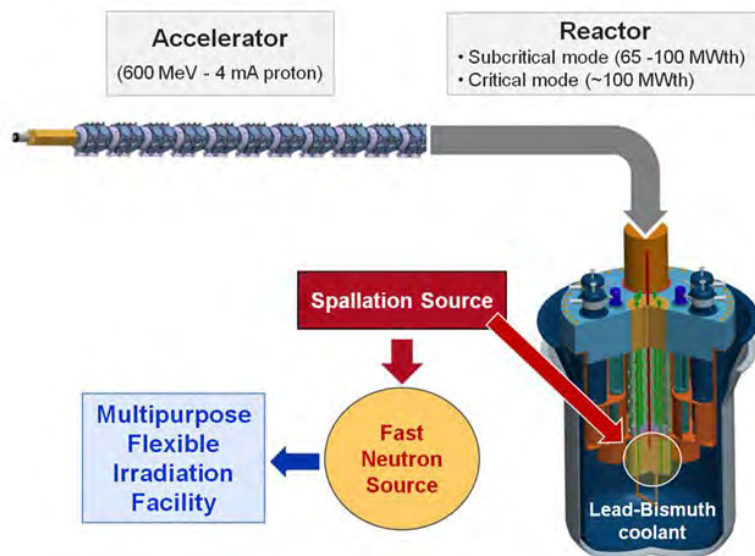
Entsorgung und Transmutation

Grundlagen Partitionierung und Transmutation



Transmutationsreaktoren – Konzepte

Beschleunigergetriebene Systeme

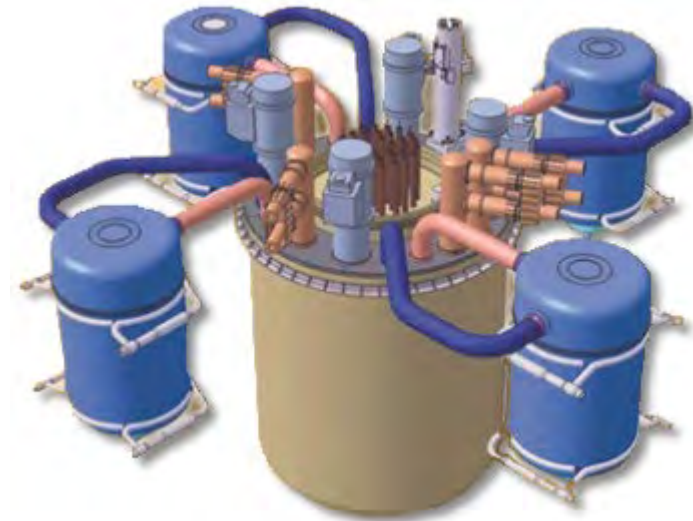


MYRRHA

Quelle: <http://www.accelerators-for-society.org/prospects/index.php?id=10>

EFIT – European Facility for
Industrial Transmutation
Inerte Matrix

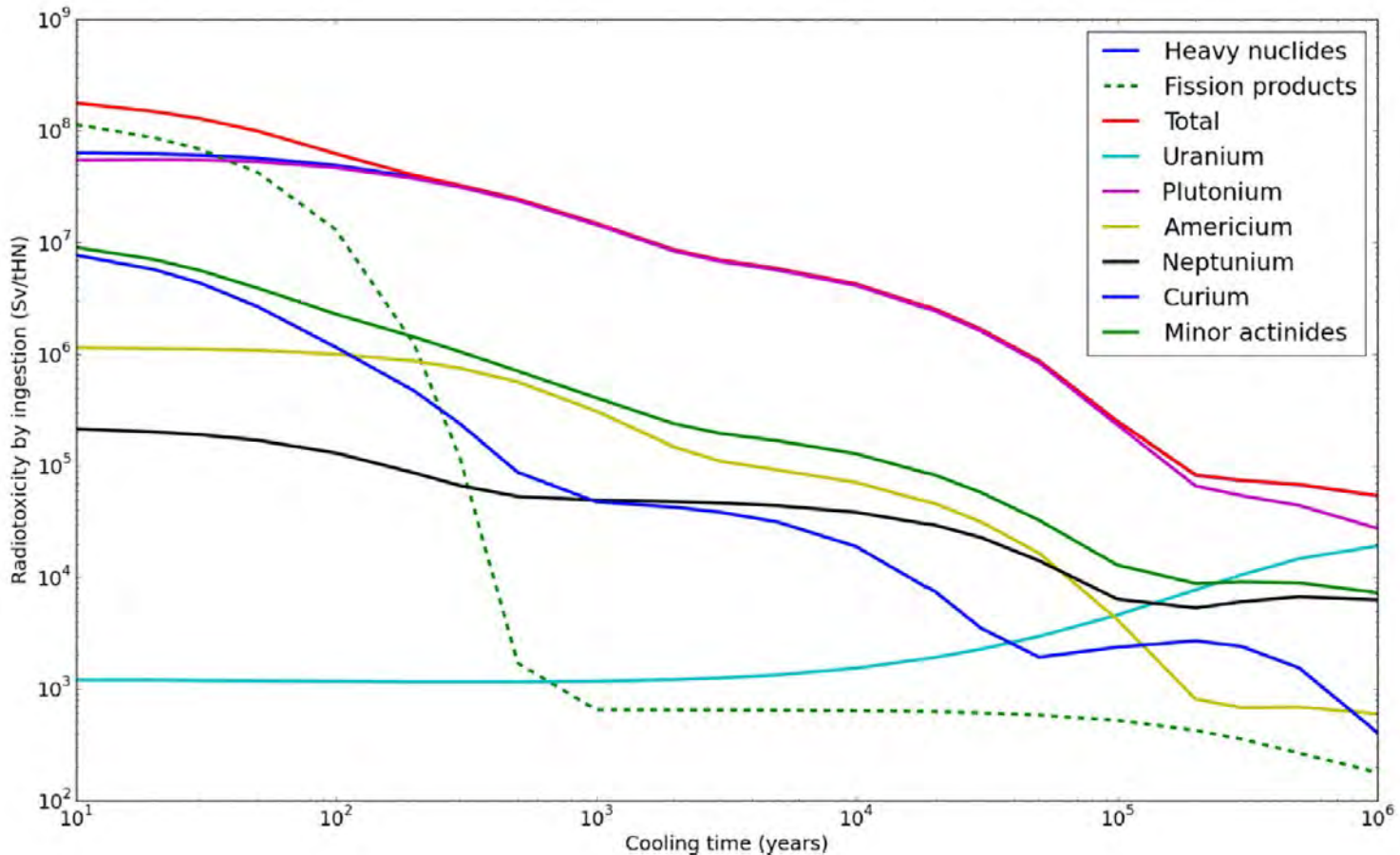
Schnelle Reaktoren



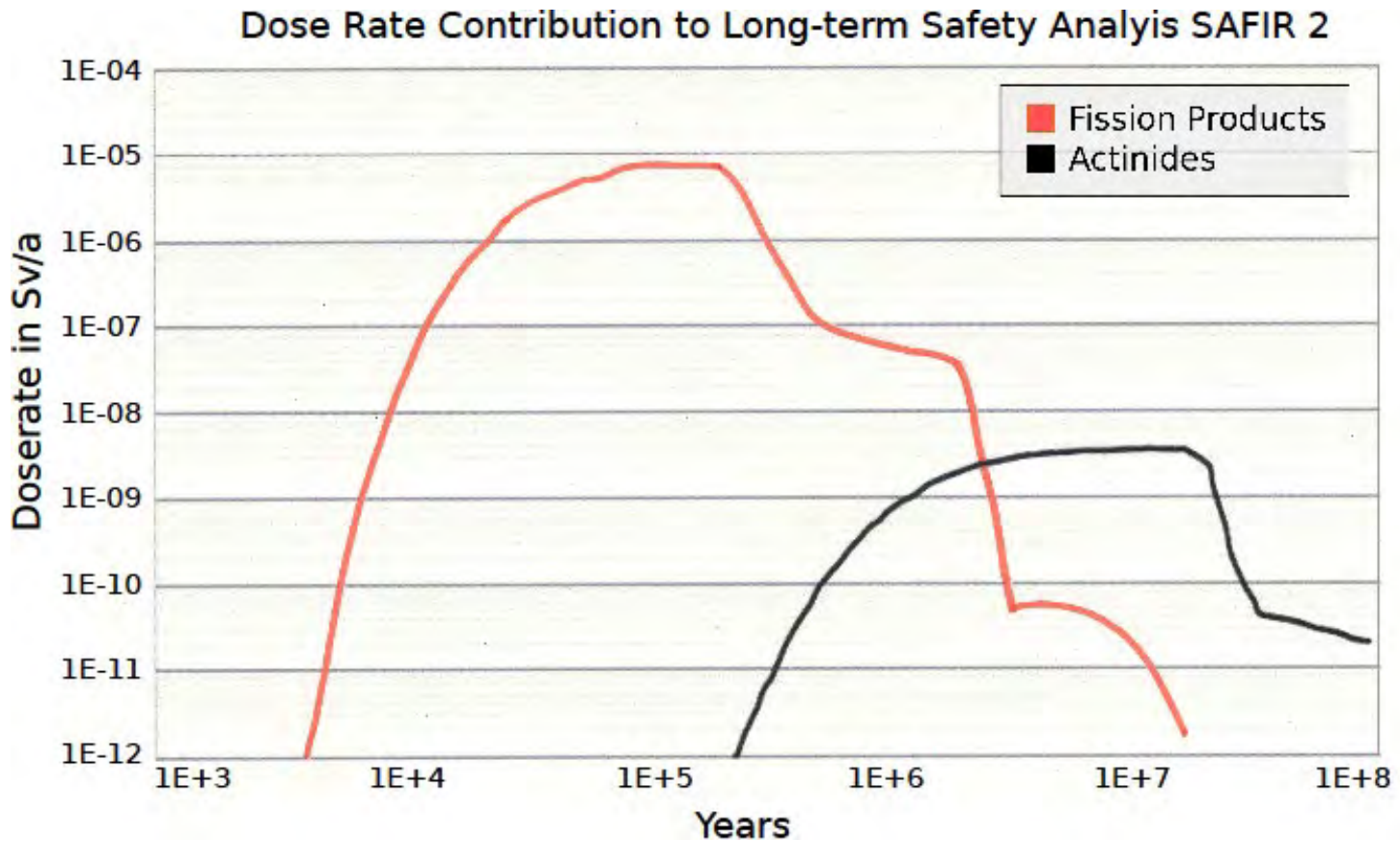
ASTRID

Advanced Sodium Technological Reactor
for Industrial Demonstration (French)
MOX Brennstoff

Einfluss auf die Entsorgung Radiotoxizität – ein irreführender Maßstab



Einfluss auf die Entsorgung Langzeitsicherheitsnachweis



SNR

- Am besten geeignet für die Transmutation wären schnelle Salzschnmelzereaktoren (MSR - Molten Salt Reactors) mit Chlorsalzschnmelzen oder beschleunigergetriebene Systeme (ADS - Accelerator Driven Systems).
- Insgesamt ist der Entwicklungsstand, bis auf Plutonium Abtrennung und MOX Nutzung, noch im Labormaßstab. Entwicklungszeit noch mehrere Jahrzehnte.
- Die Entsorgung der Abfallströme aus MSR ist bisher wenig erforscht und problematisch.
- Bei ADS besteht aufgrund der unterkritischen Anordnung ein Sicherheitsvorteil, schwere Unfallabläufe sind dennoch möglich.

Fazit P&T (Deutschland)

- P&T würde
 - sehr hohen Aufwand (Dutzende Reaktoren und mehrere WAA-Anlagen) für
 - sehr lange Zeiträume (>100 Jahre) bei
 - begrenzter Wirksamkeit (Endlagernotwendigkeit) und
 - erheblichen Belastungen (Sicherheit, Proliferation, Gesellschaft) bedeuten
- Langzeitsicherheit der Endlagerung
 - P&T von Aktiniden trägt wenig zur Dosisreduzierung bei und reduziert nicht die Anforderungen an die Isolation
- Gesellschaftlich
 - Verlagerung der Verantwortung auf zukünftige Generationen
 - Änderung des gesellschaftlichen Konsens zum Atomausstieg notwendig
 - Standorte für Wiederaufarbeitungs- und Transmutationsanlagen

Sicherheitstechnische Fragestellungen

Sicherheitsaspekte

- SMR und SNR 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
- Passive Konzepte haben Vorteile, aber andere Unfallabläufe dennoch möglich
- Sicherheit vs. Ökonomie (Containment, Leistungsgröße, Temperatur)

Proliferationsaspekte

- Verschiedene nicht-wassergekühlte Reaktorkonzepte sehen den Einsatz von höheren Urananreicherungen oder die Nutzung von Plutoniumbrennstoffen sowie von Wiederaufarbeitungstechnologie vor, dies wirkt sich grundsätzlich nachteilig auf die Proliferationsresistenz aus
- SMR: Bereits durch die theoretisch höhere Anzahl an Reaktoren an verschiedenen Standorten gibt es mehr Möglichkeiten für Proliferation, gleichzeitig erhöht sich der Aufwand für Überwachungsmaßnahmen
- 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

Realisierbarkeit

Realisierbarkeit

- Reaktorkonzepte 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
- Viele Systeme heute „in Entwicklung“, aber
 - Systeme „kommen und gehen“,
 - zum Teil (noch) in Listen, obwohl Entwicklung eigentlich eingestellt ist
 - zum Teil Systeme in Bau, aber „Nachfolgekonzept“ bereits angekündigt
 - Gründe für „Scheitern“ oder „Designänderungen“ häufig nicht transparent

Realisierbarkeit

- SNR: Am weitesten fortgeschritten sind SFR und VHTR.
- SMR: Wassergekühlte 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

Realisierbarkeit

- Nicht-wassergekühlte Reaktorkonzepte 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 (Wasser-Dampf-Stahl)

Fazit

Schlussfolgerungen

- Prinzipien der Technologielinien (SFR, VHTR, GFR, LFR, SCWR, MSR, Ausnahme m.E. ADS) seit den 1950er Jahren bekannt
- Einordnung als „Generation II-B“ wäre häufig eher angebracht
- Motivlagen sowohl innovationspolitischer als/oder auch geostrategischer Art
- In Bezug auf Organisationsmodelle (Finanzierung bzw. Industrieregime) aus heutiger Sicht kein Durchbruch abzusehen
- Hinsichtlich Technologischem Reifegrad weiterhin viele TL/RK in frühen Phasen der Entwicklung, kein System in die Phase der „Marktdurchdringung“ vorgestoßen
- Das Versprechen sind Verbesserung in den Kriterien: Ökonomie, Sicherheit, Proliferation, Entsorgung

Vorläufige Schlussfolgerungen

- Einzelne Technologielinien/Reaktorkonzepte bieten potenzielle Vorteile in einzelnen Kriterien (Sicherheit, Ökonomie, Proliferation, Entsorgung)
- Kein Technologielinien/Reaktorkonzepte bietet gleichzeitig Vorteile in allen Kriterien
- Potenzielle Vorteile sind (fast) immer von der konkreten Umsetzung in Form eines Reaktorkonzepts abhängig, daher aus heutiger Sicht offen
- Bisherige (bereits laufende oder geplante) Demonstrationsreaktoren noch nicht geeignet für eine anschließende breite (Markt-)Einführung, immer noch weitere FOAK-Reaktoren erforderlich
- Zeitpläne wurden systematisch nicht eingehalten
- Insbesondere Brennstoff-/Materialienentwicklung ist zeitlich limitierend
- SMR: kein Durchbruch der Systeme aufgrund deutlich sinkender Kosten zu erwarten

Schluß

An academic reactor or reactor plant almost always has the following basic characteristics:

1. It is simple.
2. It is small.
3. It is cheap.
4. It is light.
5. It can be built very quickly.
6. It is very flexible in purpose ("omnibus reactor").
7. Very little development is required. It will use mostly "off-the-shelf" components.
8. The reactor is in the study phase. It is not being built now.

On the other hand, a practical reactor plant can be distinguished by the following characteristics:

1. It is being built now.
2. It is behind schedule.
3. It is requiring an immense amount of development on apparently trivial items. Corrosion, in particular, is a problem.
4. It is very expensive.
5. It takes a long time to build because of the engineering-development problems.
6. It is large.
7. It is heavy.
8. It is complicated.

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

Haben Sie noch Fragen?
Do you have any questions?

