

*Forum Wissenschaft, Wirtschaft und Politik
der Metropolregion Rhein-Neckar*

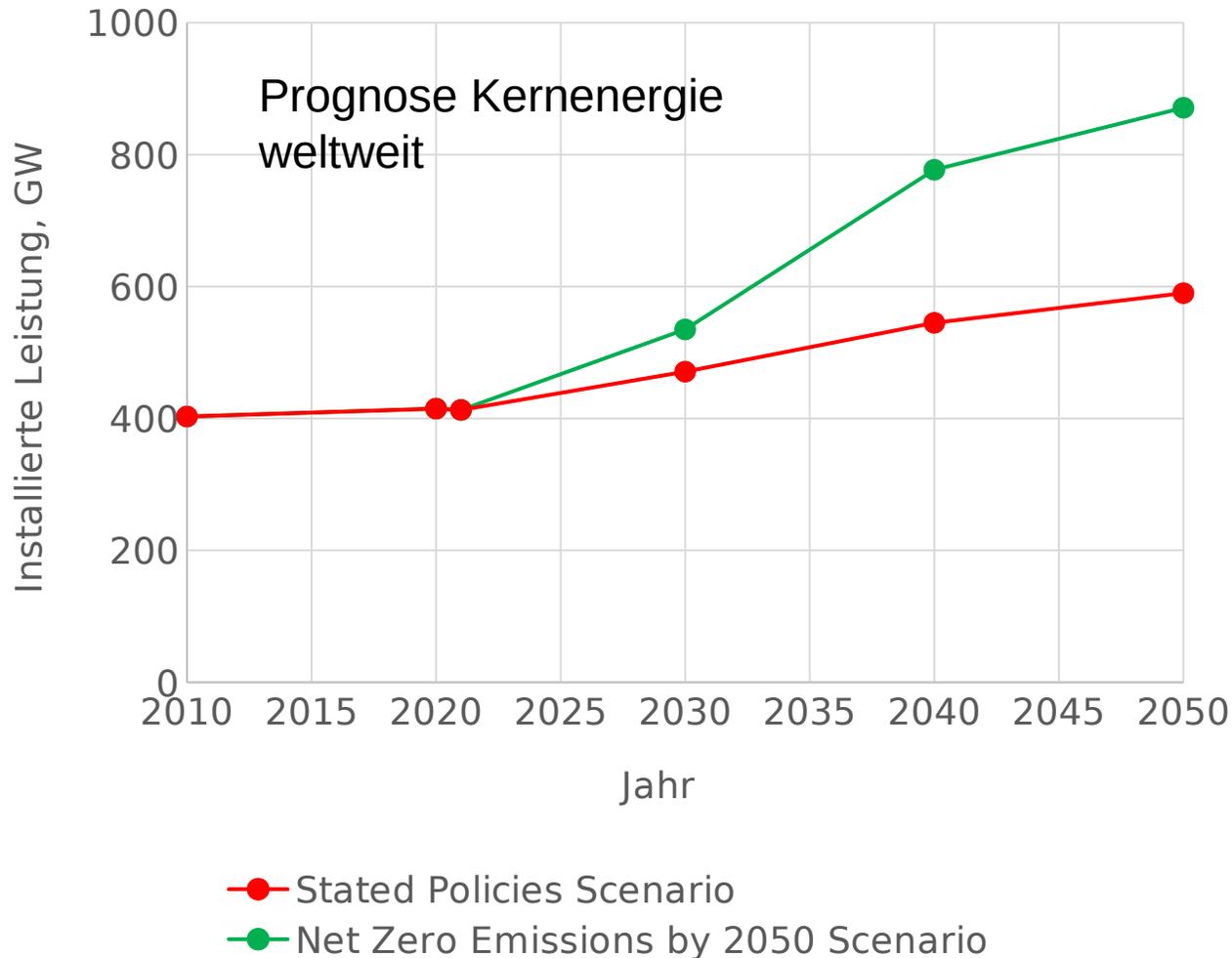
Horst-Michael Prasser

Innovative Kernreaktoren für die Energiewende

Inhalt

- Generation III - sicher und einsatzbereit
- Geschlossener Brennstoffkreislauf mit Reaktoren der Generation IV
- Generation IV - so sicher wie Gen-III, bereit für den Probebetrieb
- Kleine Modulare Reaktoren - Breites Spektrum von ersten (guten!) Ideen bis zum einsatzbereiten Kraftwerk
- Akzeptanz der Kernenergie

IEA World Energy Outlook 2022



... wenn bis 2050, bezogen auf heute, folgender Ausbau gelingt:

- Solar PV x 17
- Wind x 9
- Wasserkraft x 2
- Nachwachsende Energieträger x 4
- Batteriespeicher x 142
- Einführung von CCS für Kohle- und Gaskraftwerke (u.v.a.m.)

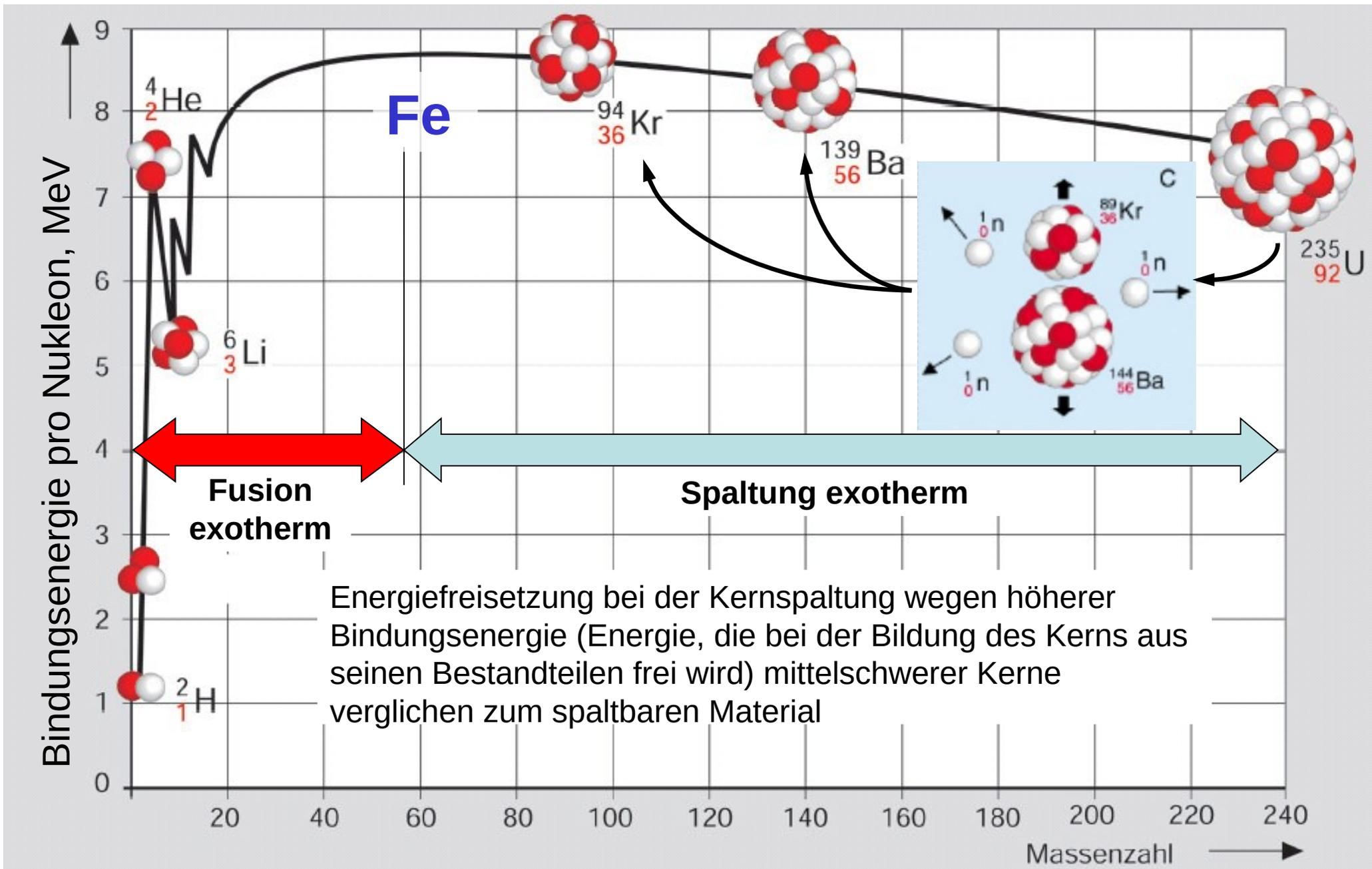
... sonst ist mehr Raum für Kernenergie

... und weniger Raum für

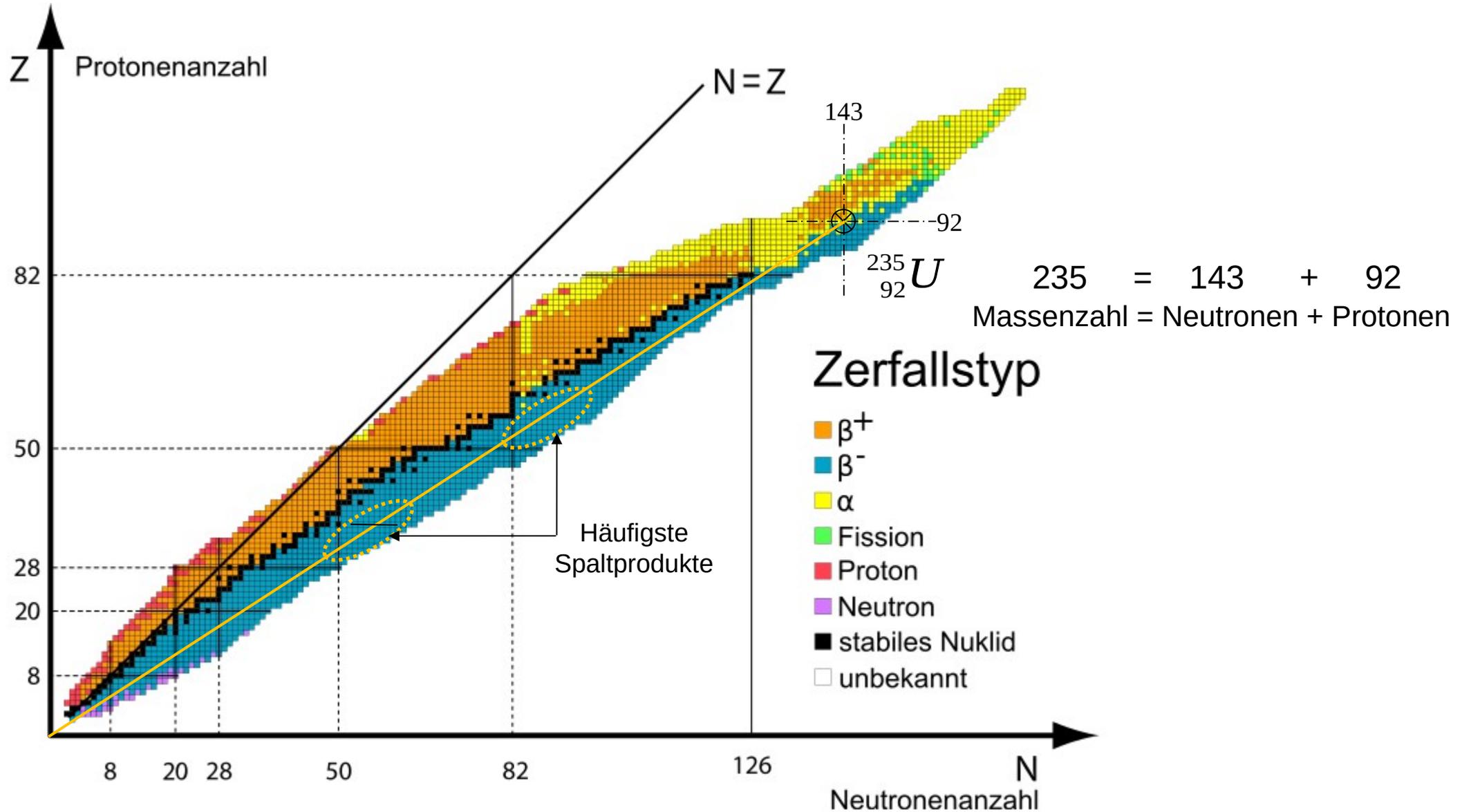


«Gelingen» heisst auch,

«umweltverträglich realisierbar sein»

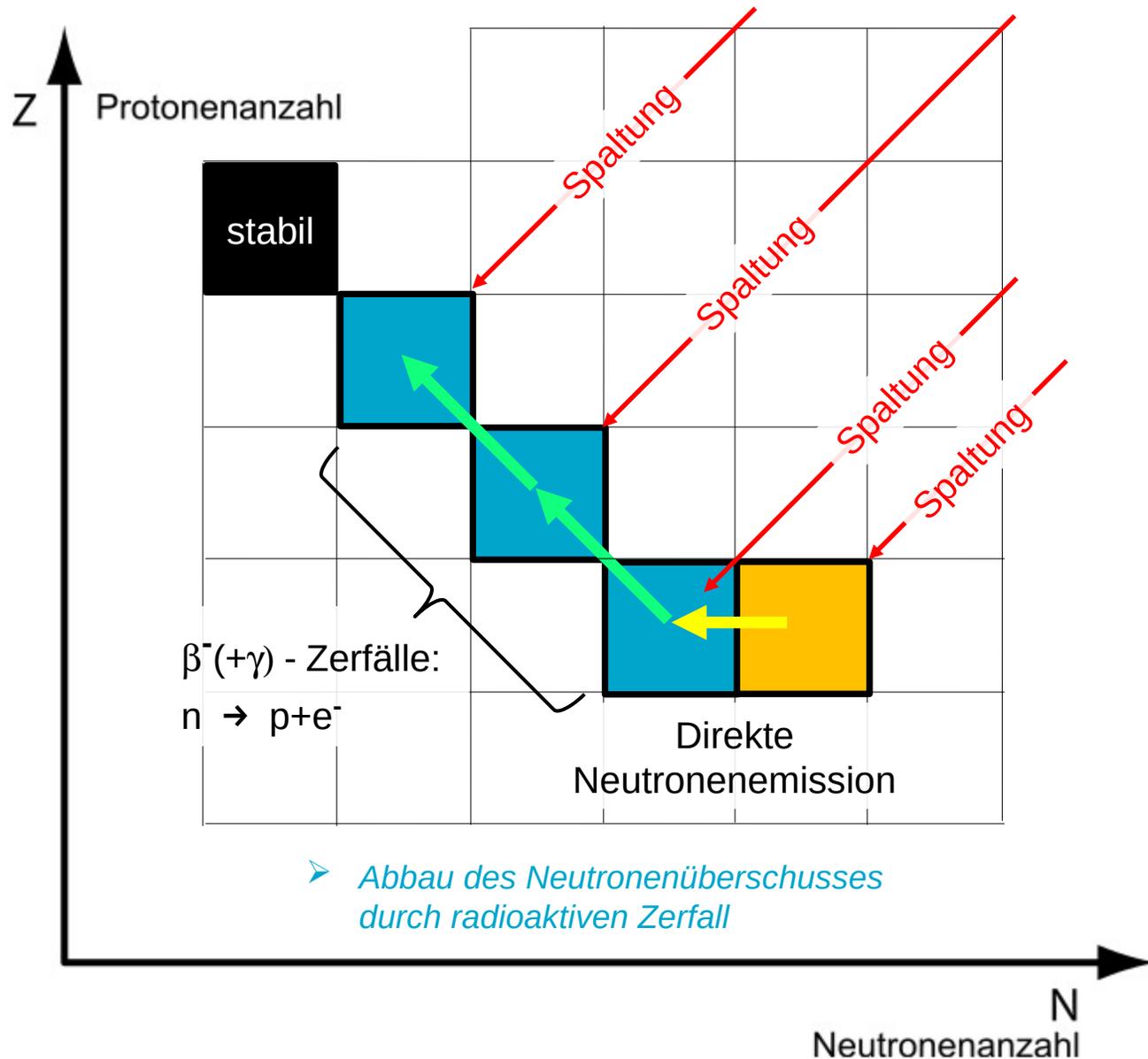


Stabilitätsinsel und Radioaktivität



Bildquelle: https://ibe.physik.rwth-aachen.de/build-MTL12_RAD/index.html (modifiziert)

Vor- und Nachteile des Neutronenüberschusses in den Spaltprodukten



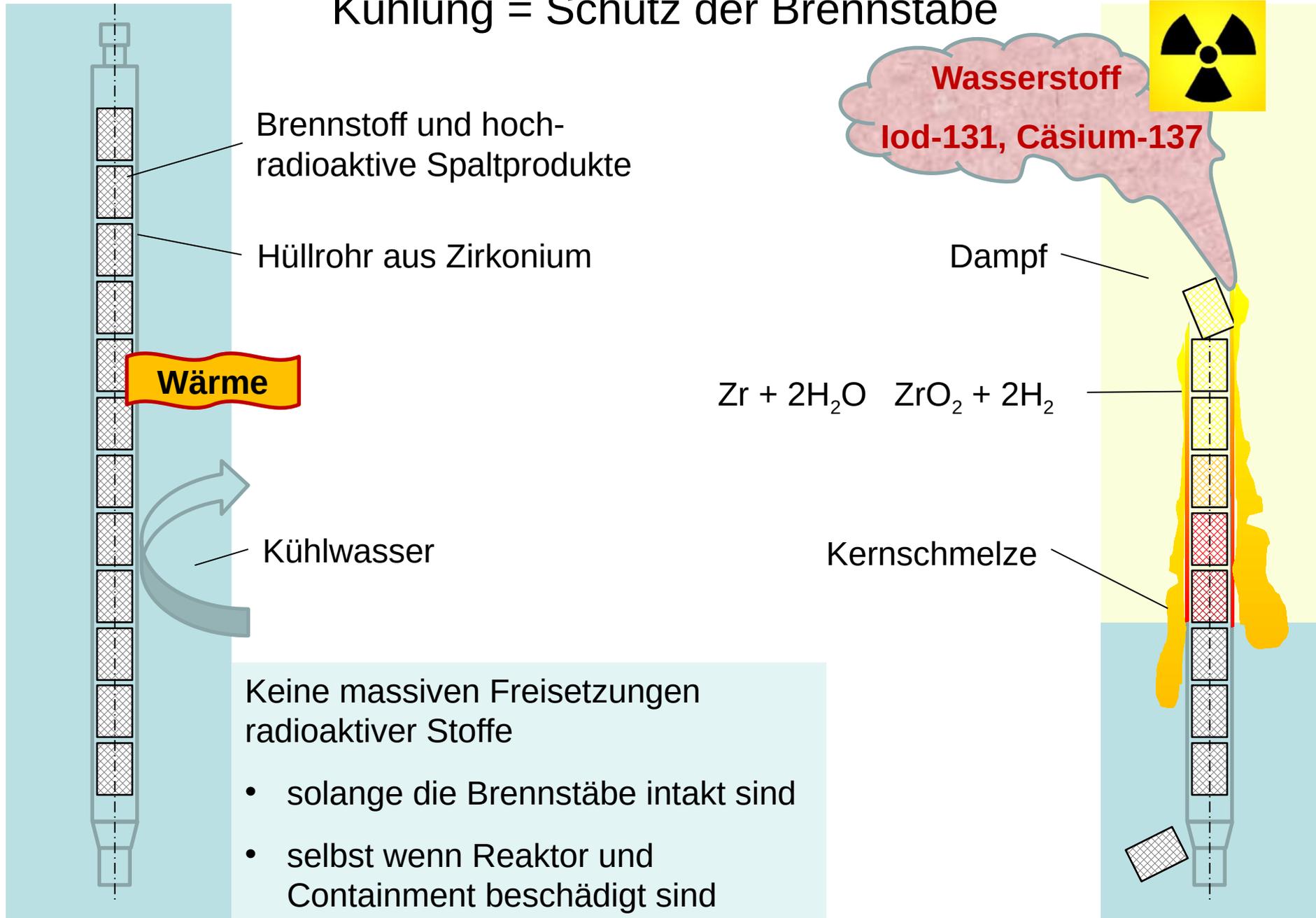
Vorteile:

- Emission von Spaltneutronen
 - Möglichkeit einer Kettenreaktion
 - Umwandlung von nicht spaltbaren in spaltbare Isotope

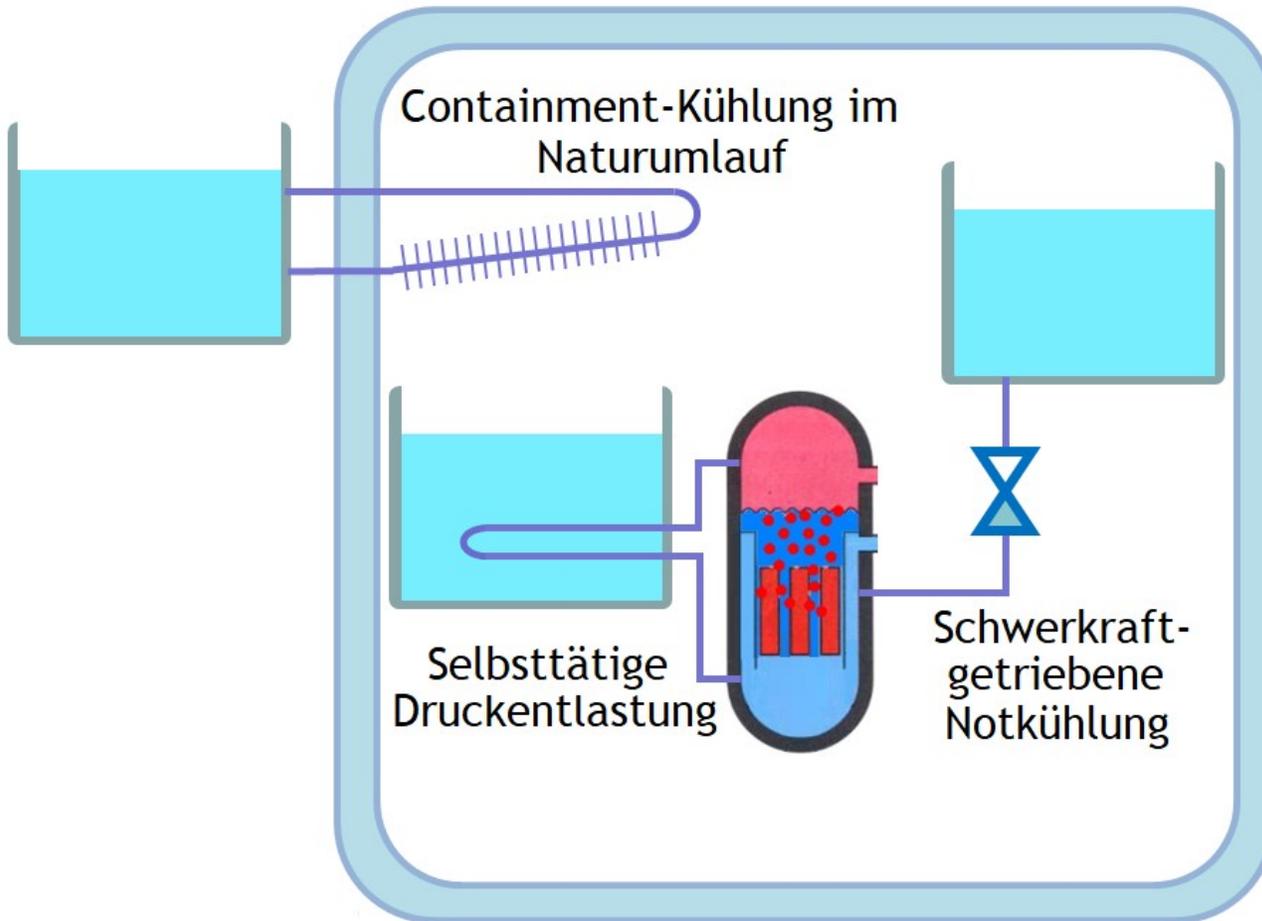
Nachteile:

- Starke Radioaktivität der Spaltprodukte
 - Strahlenschutz und sichere Entsorgung
 - Quelle der Nachzerfallswärme
- Emission von Spaltneutronen
 - Aktivierung und Alterung von Bauteilen und Strukturen
 - Produktion von langlebigen alphanotoxischen Isotopen der Transuran-Elemente (Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf.... = minore Aktinoide)

Kühlung = Schutz der Brennstäbe



Passive Sicherheitssysteme (Gen III und Gen IV)



Autonome Systeme ohne Notstrombedarf

❖ **Autarkie:**

- Entkopplung von der Notstromversorgung (**oder** massiv gebunkerte Diesel)

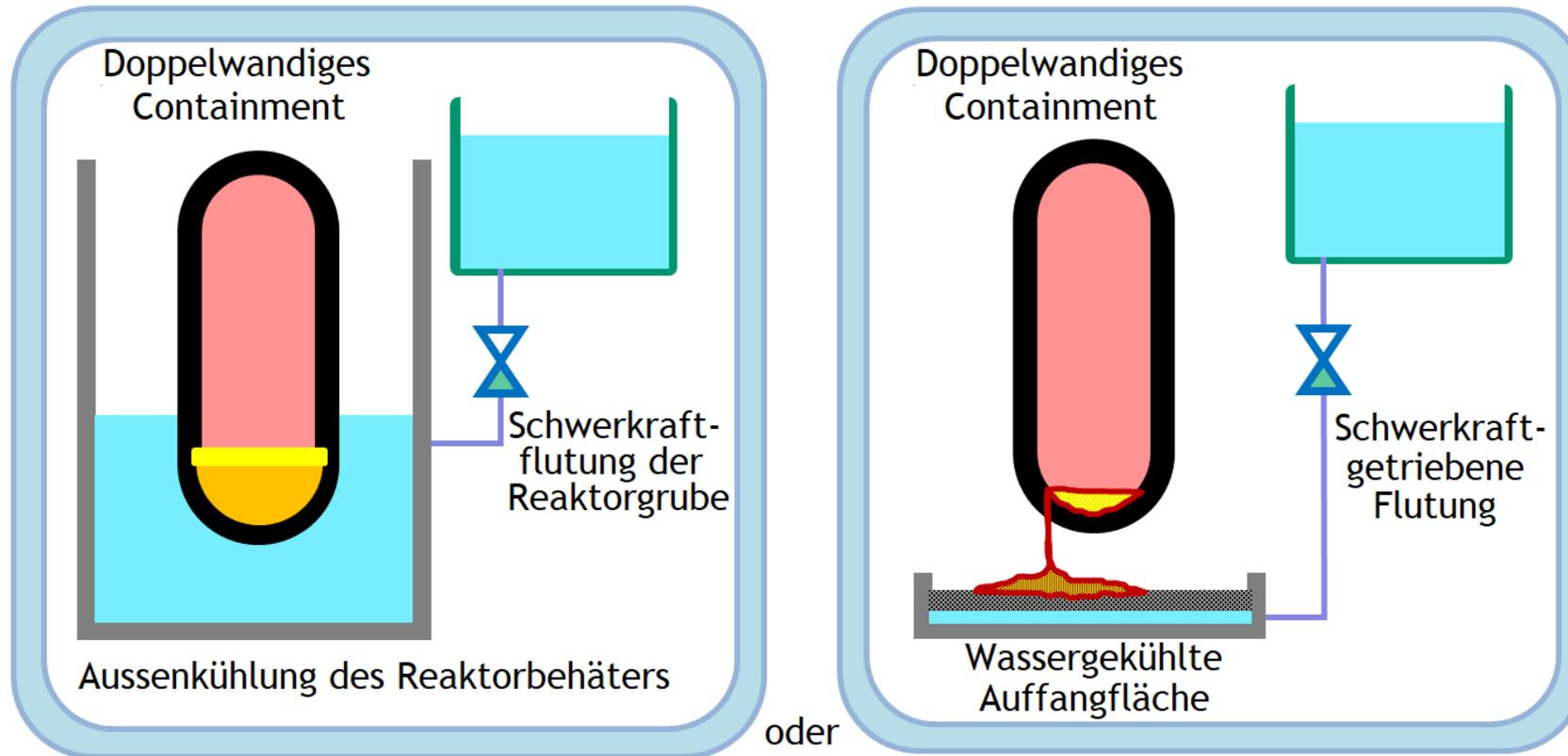
❖ **Autonomie:**

- Zurückdrängung des Faktors Mensch

❖ **Robustheit:**

- Entkopplung von Kernschaden und Freisetzung
- Starker Schutz vor externen Einwirkungen

Passive Sicherheitssysteme – Verstärkung der Containmentfunktion



Kernschmelze-Rückhaltung im Reaktor

Core-Catcher unter dem Reaktor

Verhinderung einer grossen Freisetzung radioaktiver Stoffe selbst bei einer Kernschmelze

Grosskraftwerke der Generation III

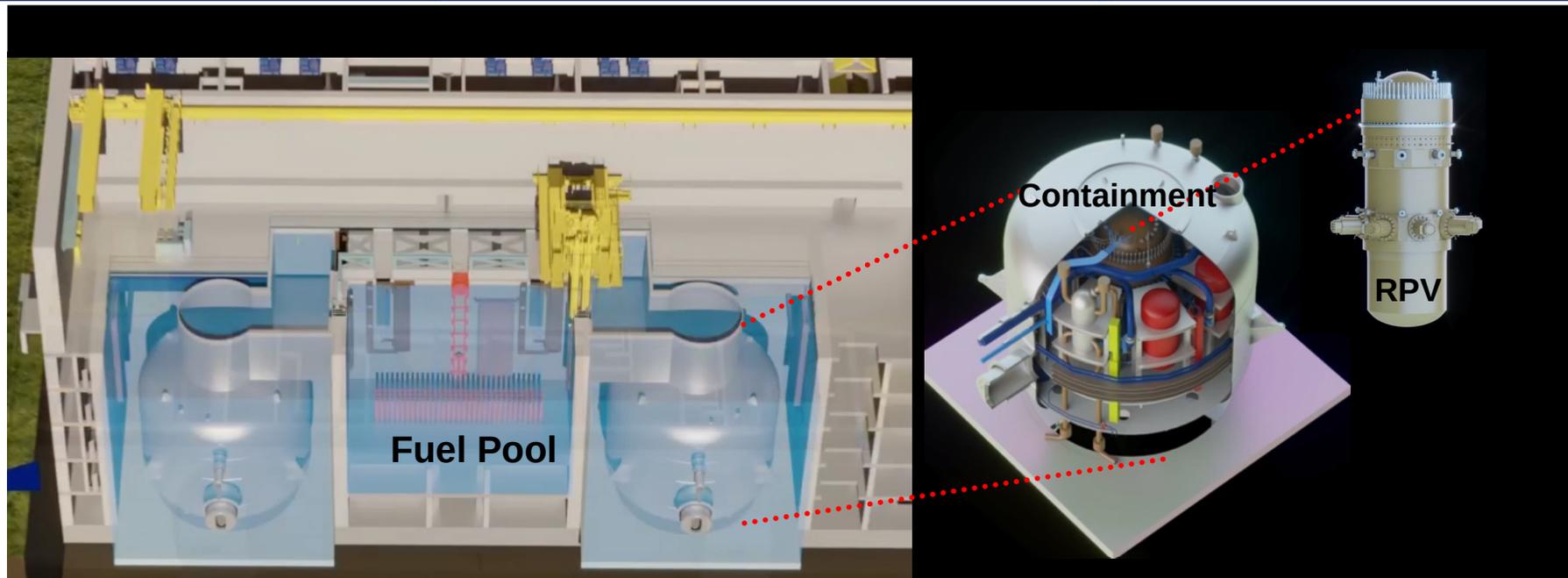
	Typ	Sicherheit	Nettoleistung*	Planung	Bau	Betrieb	Erstbetrieb
ABWR (Japan)	SWR	aktiv	1350 MW	4	2	4**	2005
APR-1400 (Korea***)	DWR	aktiv	1340 MW	3	3	7	2016
AP1000 (USA***)	DWR	passiv	1250 MW	10	0	6	2018
CAP1000 (China)	PWR	passiv	1100 MW	27	3	0	-
CAP1400 (China)	PWR	passiv	1400 MW	0	2	0	-
EPR (Frankreich***)	DWR	aktiv	1660 MW	12	3	3	2018
VVER-1200 (Russ. ***)	PWR	passiv + aktiv	1300 MW	26	14	5	2018
Hualong One (China***)	DWR	passiv + aktiv	1126 MW	20	10	4	2021
			Summe	102	39	27	

* Leistung der stärksten Variante

** Derzeit ausser Betrieb, Wiederanfahren in Vorbereitung

*** Bau auch für den Export

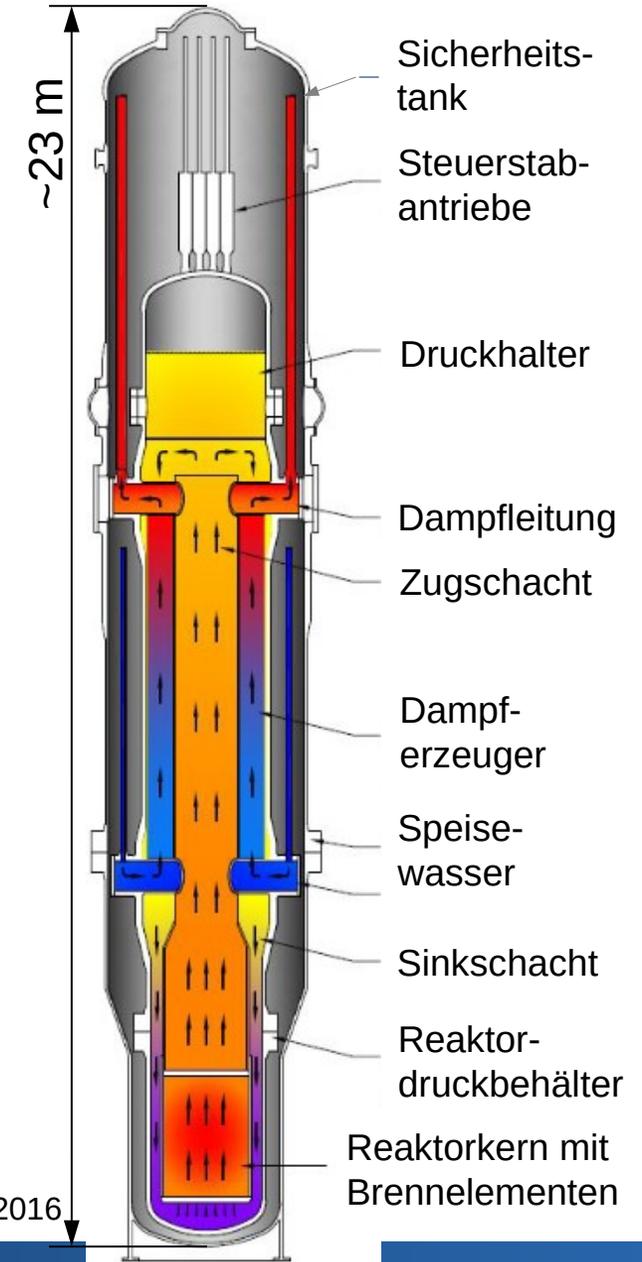
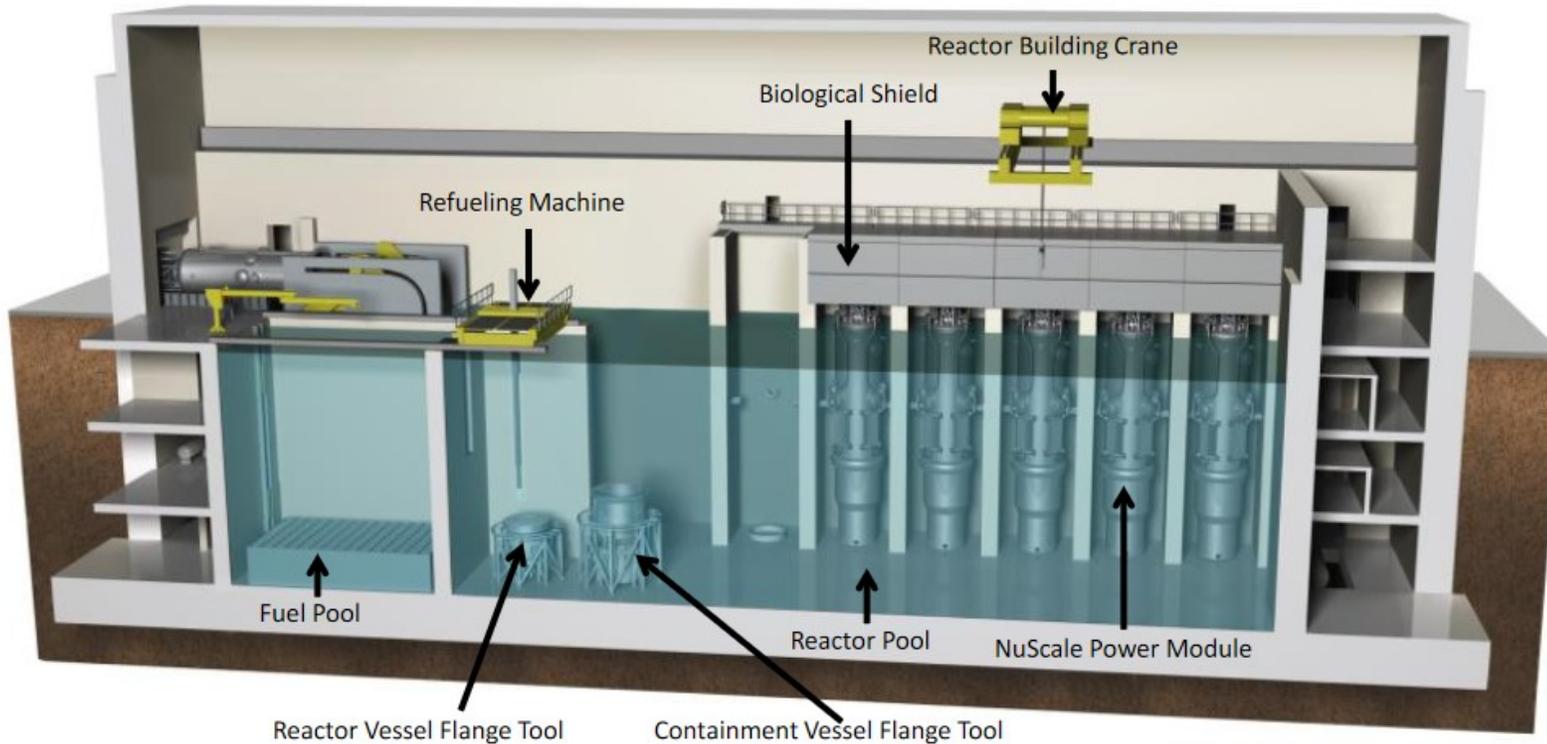
Frankreich: Reaktoren im EdF Portfolio



Bildquelle: <https://czech-republic.edf.com/en/our-technology>

Beispiel für einen Kleinen Modulare Druckwasserreaktor

NuScale SMR Technology, Oregon, USA



Bildquelle: J, Reyes et al., Trans. Am. Nucl. Soc, 118, June 18-21, 2018.

1 Modul: 250 MW_{th}, 77 MW_{el} (brutto)

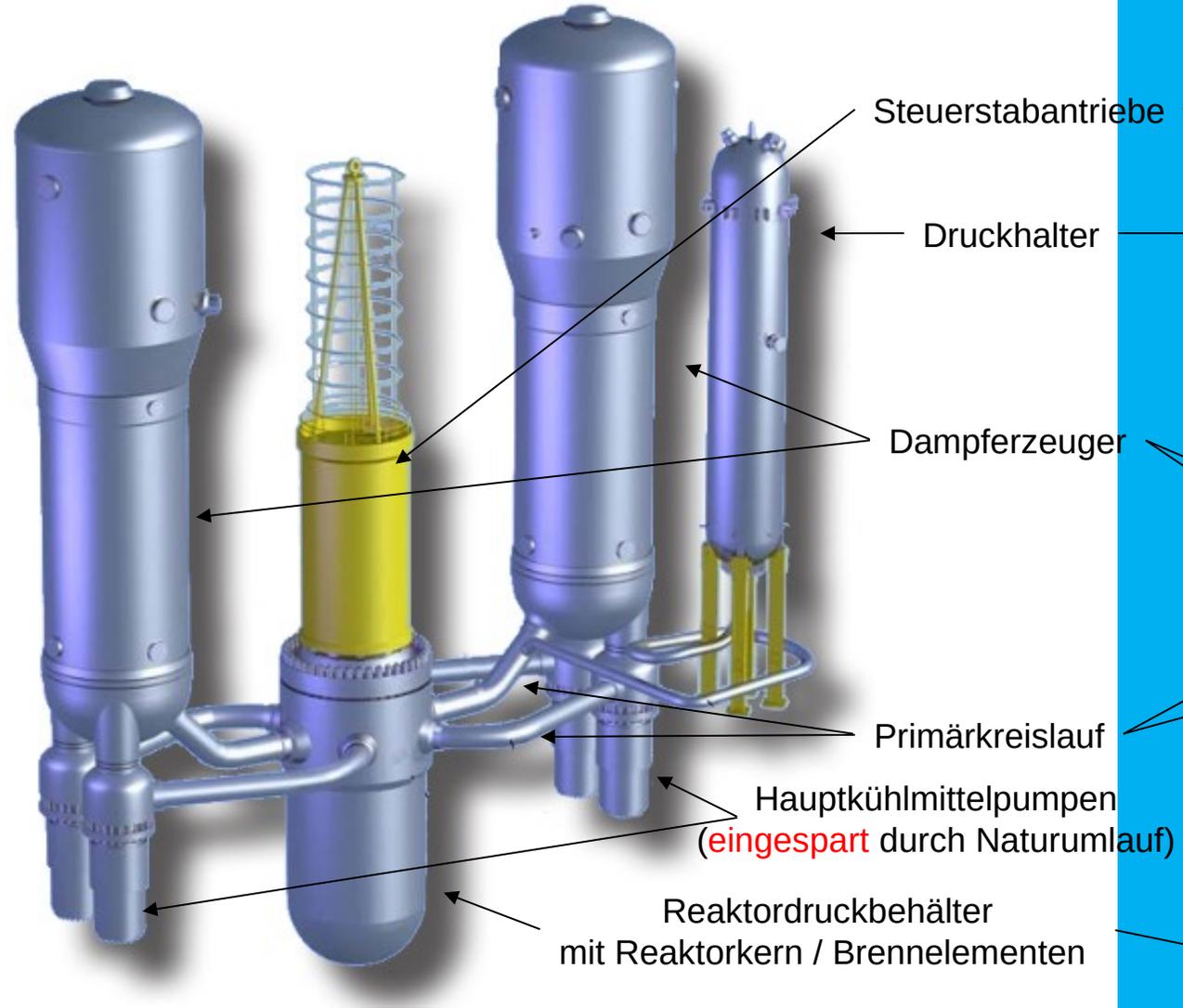
Ökonomie der Größe ⇔ Ökonomie der Serie
 Kleinere Investitionsschritte → schnellere Amortisation

?

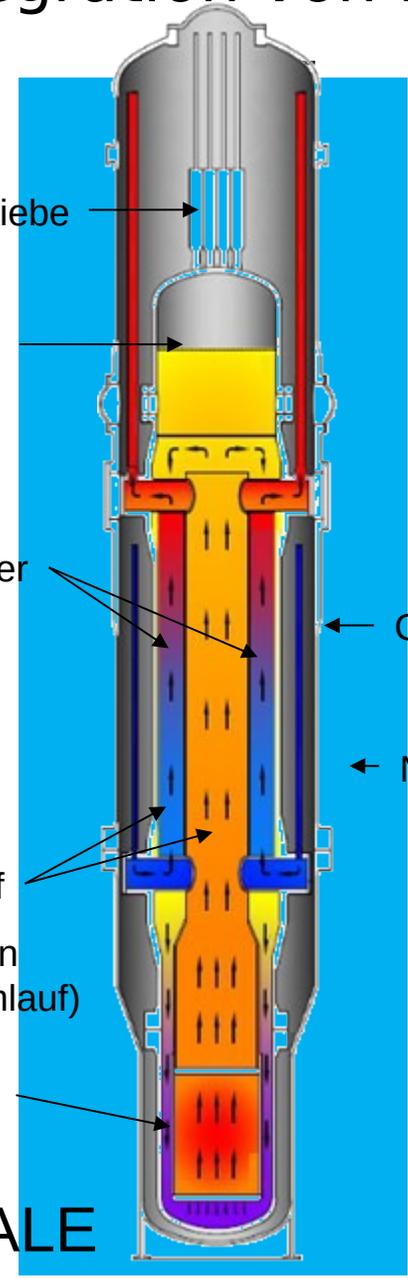
Bildquelle: J. Doyle et al, ICAPP 2016

Vereinfachung durch Integration von Komponenten

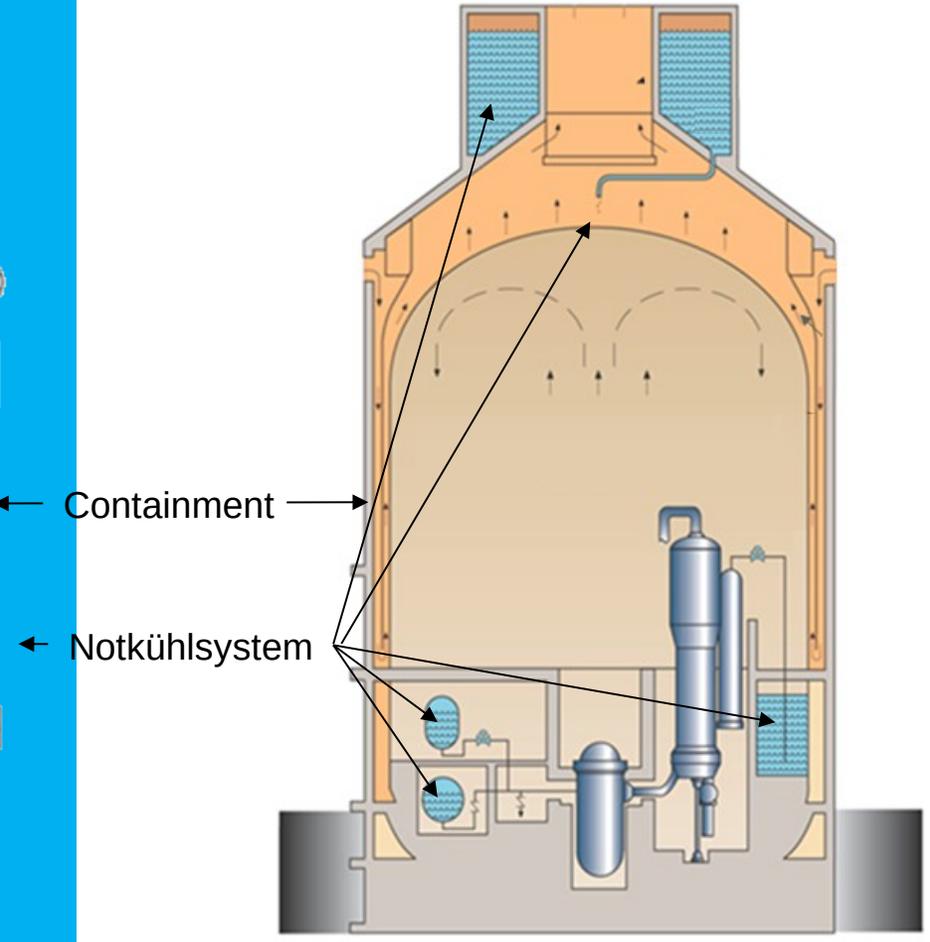
Bildquelle: IAEA ARIS supplement, 215



AP1000

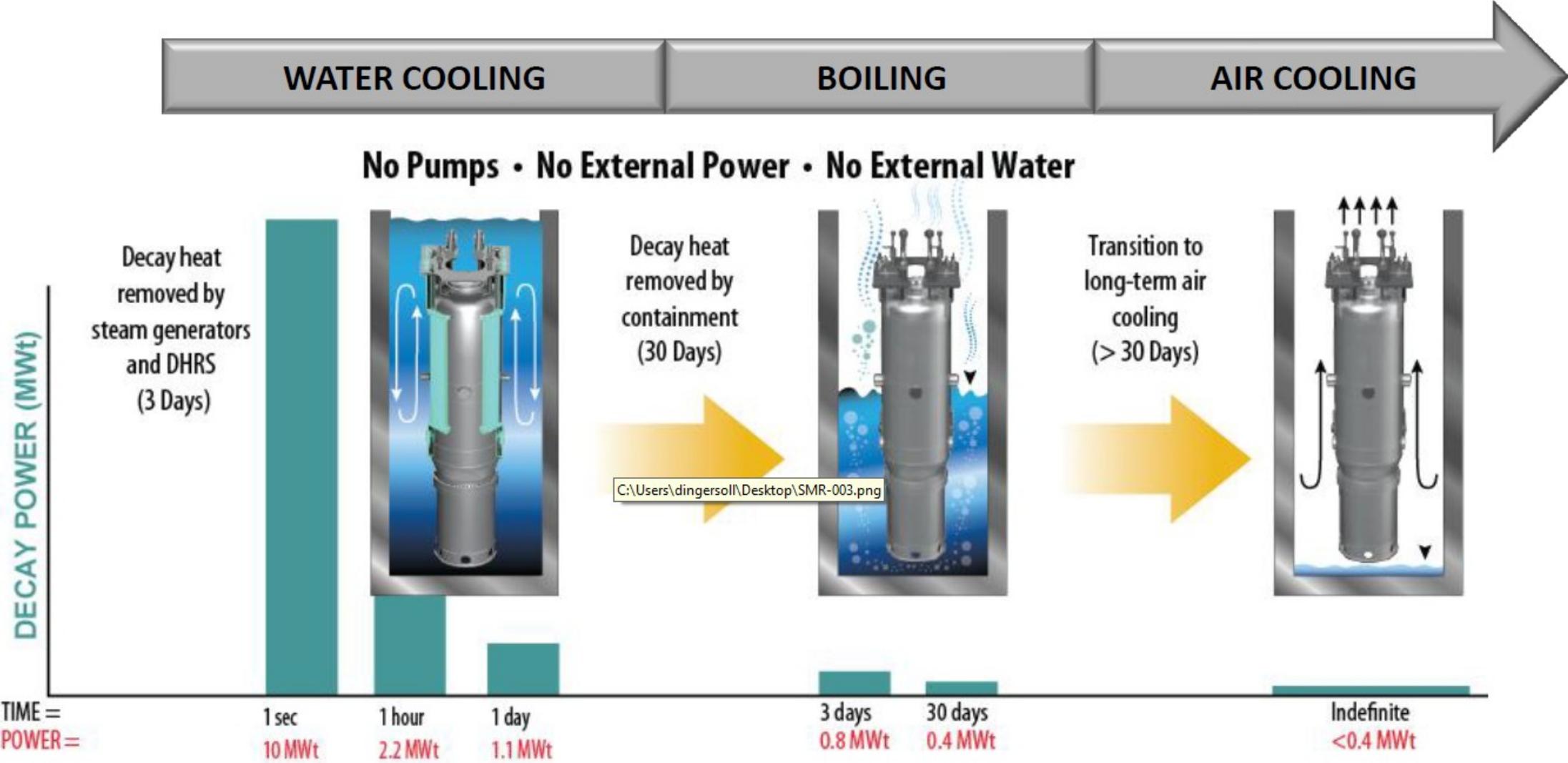


NUSCALE



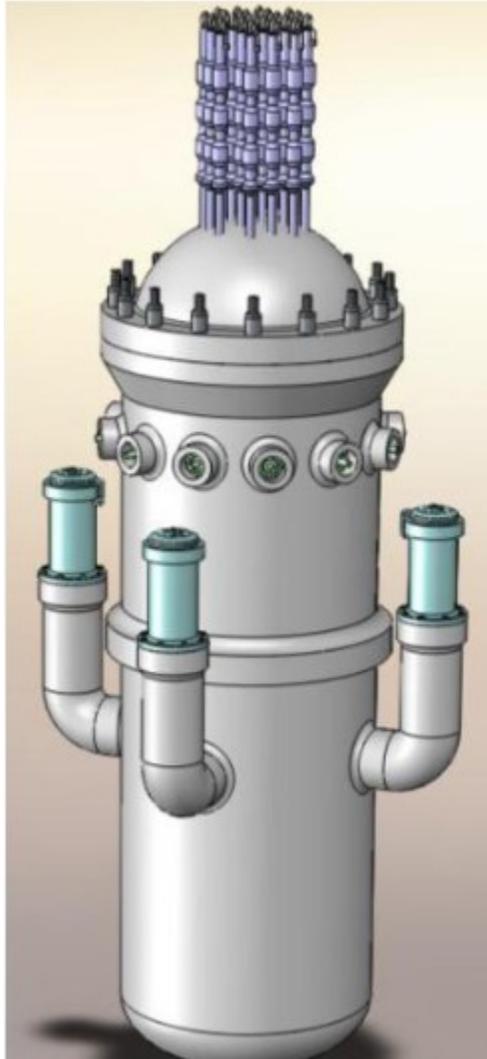
AP1000

Mehrere Reaktoren nutzen gemeinsame Systeme / hier: passive Notkühlung



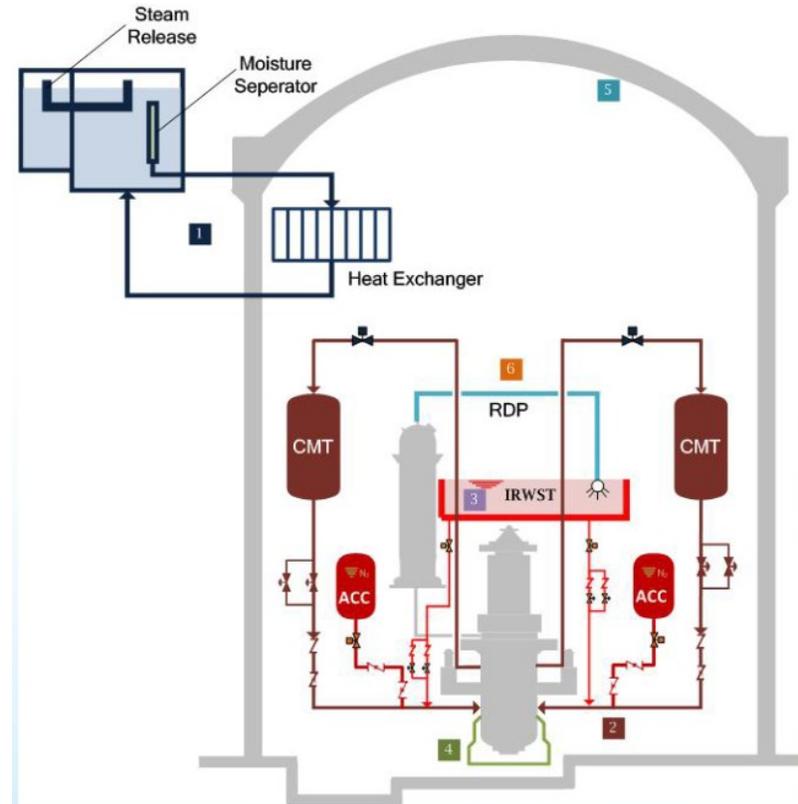
Bildquelle: Tom Mundy: NuScale SMR Technology, UK IN SMR; Manchester, UK, September 25, 2014

ACP100 - 125 MW_{el} - im Bau - Inbetriebnahme 2027

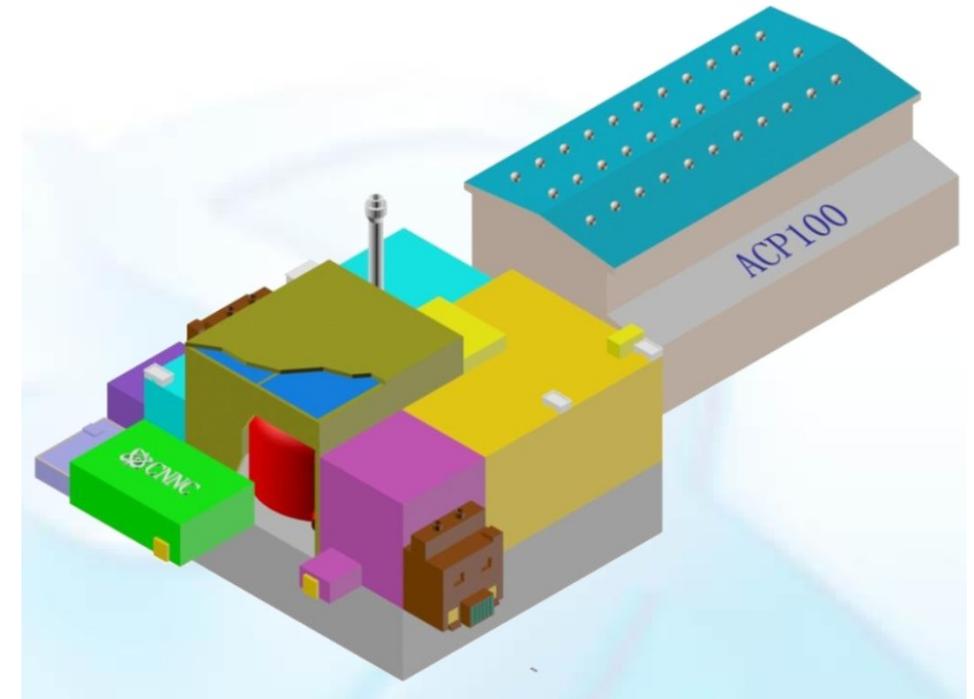


Starke Integration

Druckwasserreaktor, entspricht GEN-III+



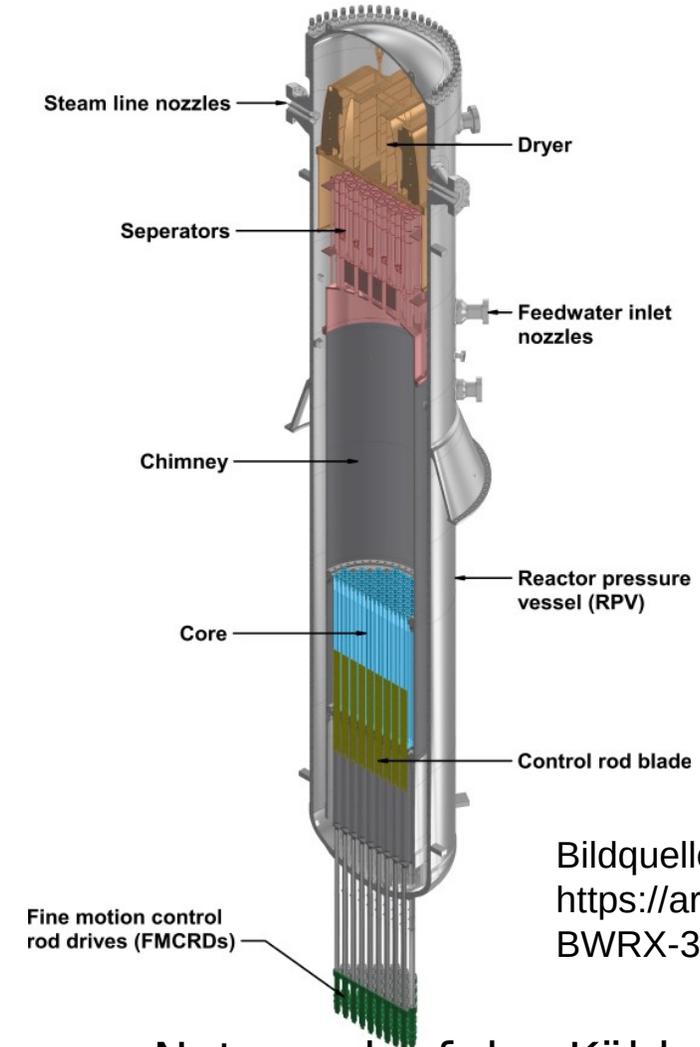
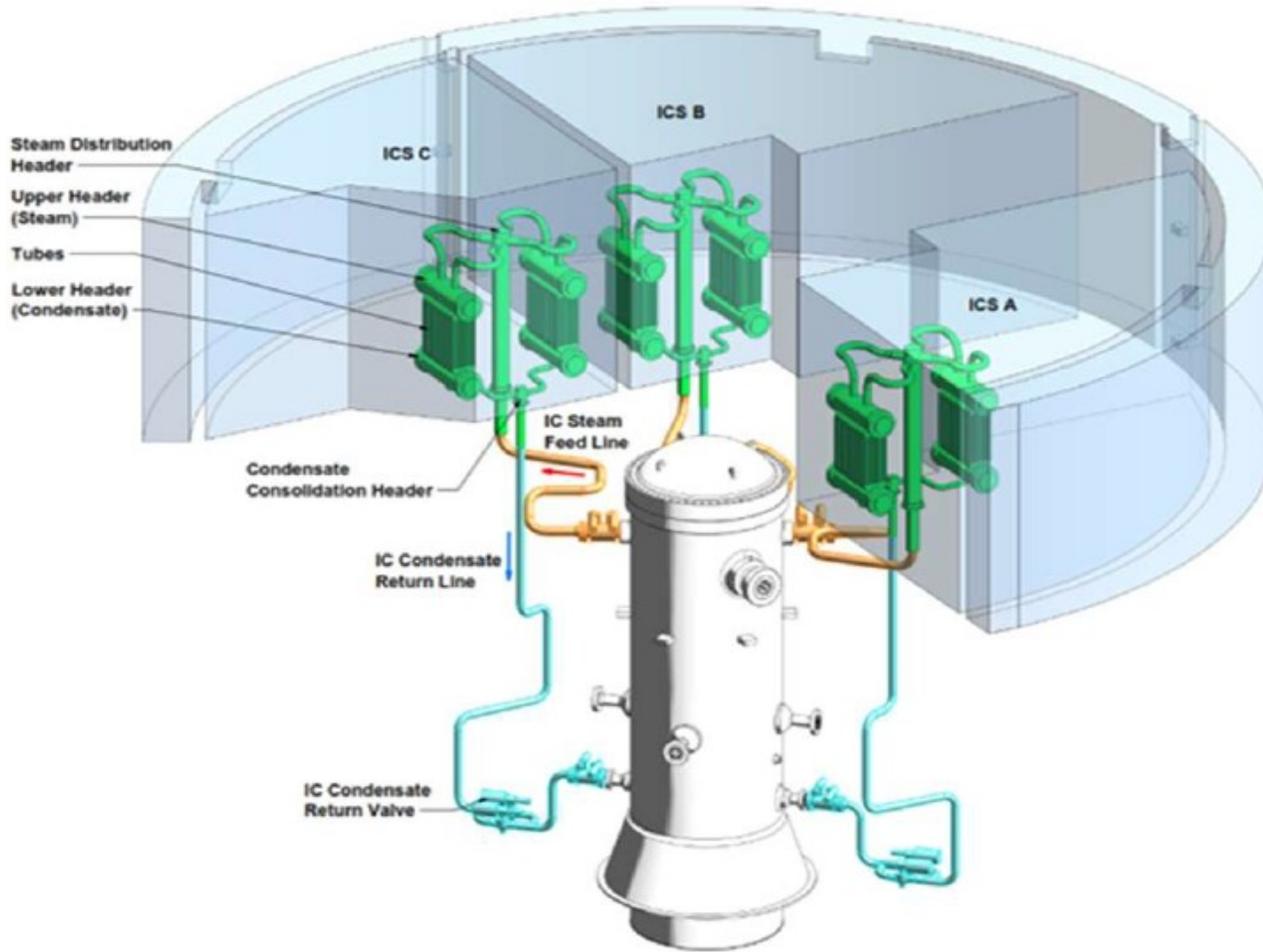
Passive Sicherheitssysteme



Eher ein Beispiel für eine Einzelblockanlage

CNNC (China National Nuclear Corporation)

GE-Hitachi: BWRX-300 - im Bau in Kanada (Ontario Power Generation at Darlington)



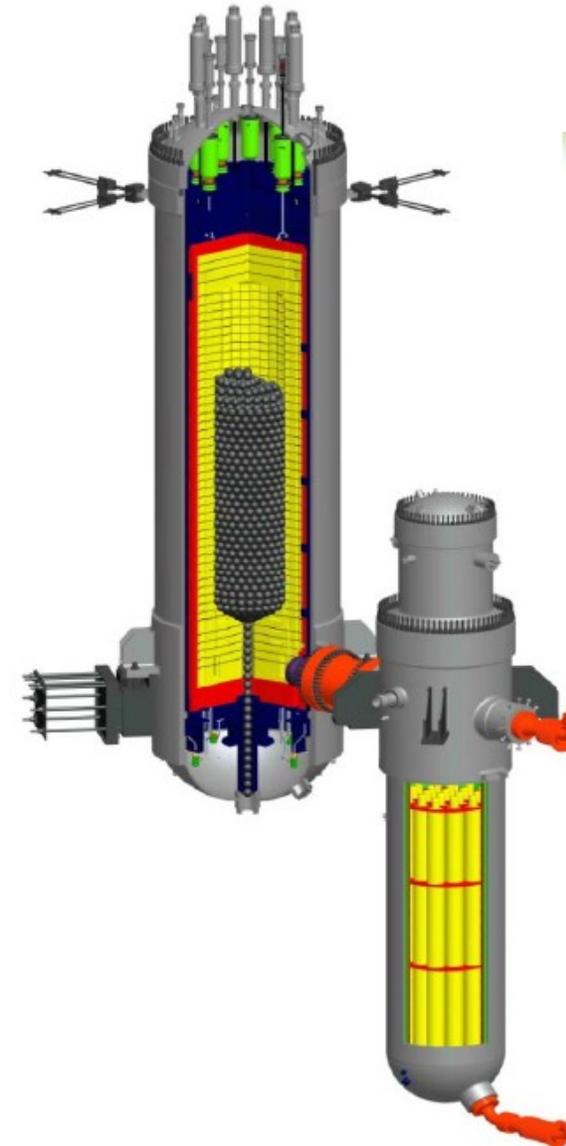
Bildquelle:
https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf

- Siedewasserreaktor, 270-290 MW_{el}, ohne Primärpumpen = Naturumlauf des Kühlmittels
- Passive Sicherheitssysteme des SBWR und ESBWR (Entwicklung u.a. am PSI, Schweiz)

Bildquelle: https://conferences.iaea.org/event/295/attachments/12035/18043/Day1_04_DougMcDonald_GEH-BWRX-300_TM_SMR_CS.pdf

China: High-Temperature Reactor - Pebble bed / Modular (HTR-PM) - in Operation

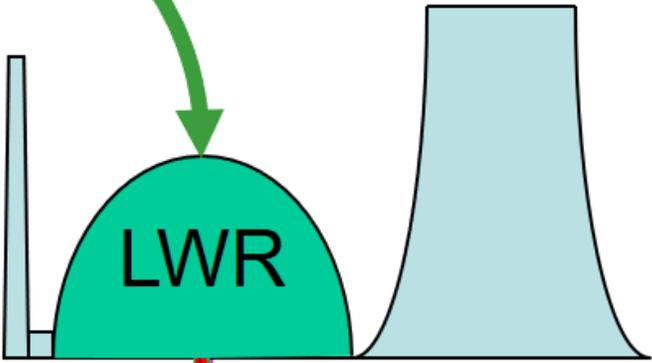
- Zwillingsanlage in Inbetriebnahme in China (Rongcheng, Province Shandong)
- Kühlmittel: Helium (70 Bar, 250 → 750 °C)
- Dampferzeuger / Dampfturbine
- 2 x 250 MW_{th} 2 x 100 MW_{el}
- Geplant: 6 Reaktoren in gemeinsamem Containment



Bildquelle: Zhang et al., NUCL SCI TECH (2022) 33:101

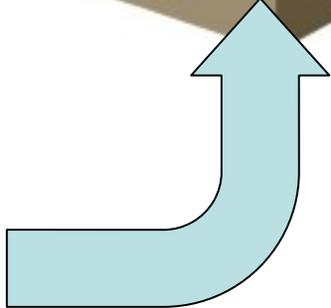
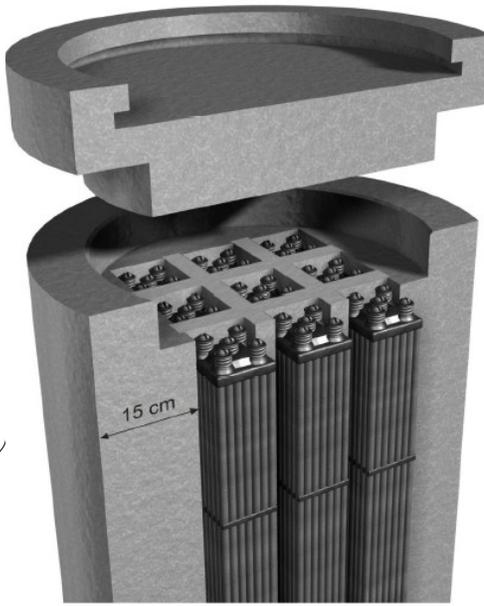
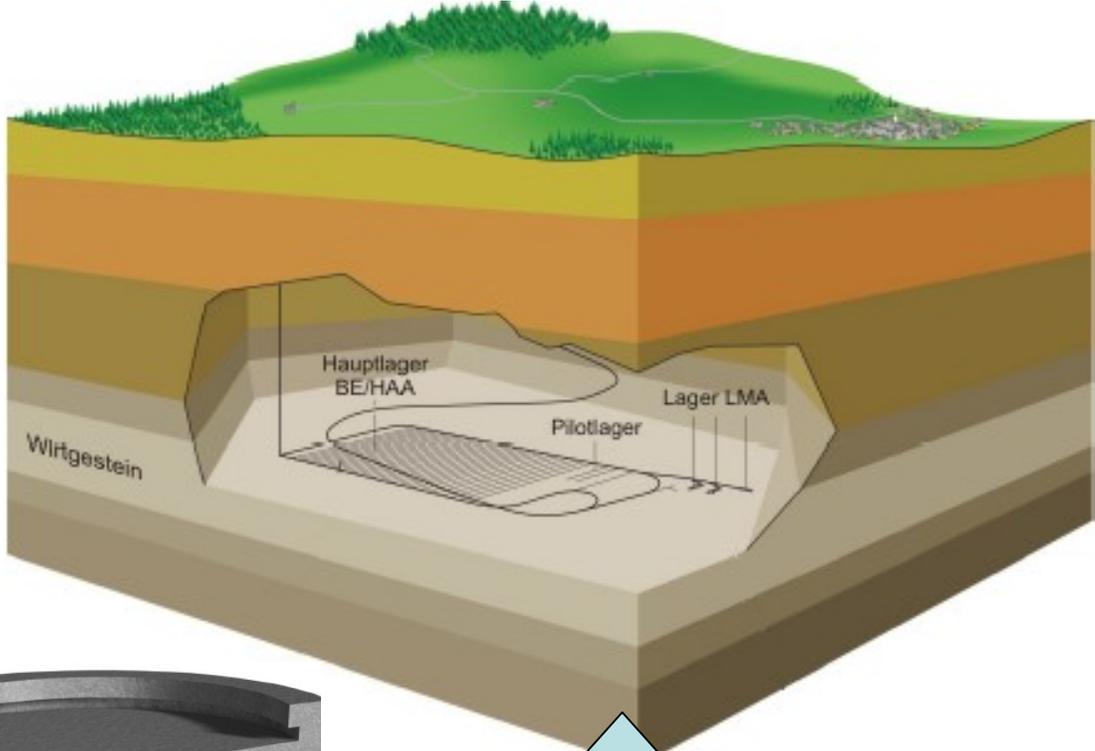
Entsorgung des hochaktiven Abfalls – direkte Tiefenlagerung

U-238 + U-235



- **Minore Aktinoide**
- **Plutonium**
- **U-238 + etwas U-235**
- **Spaltprodukte**

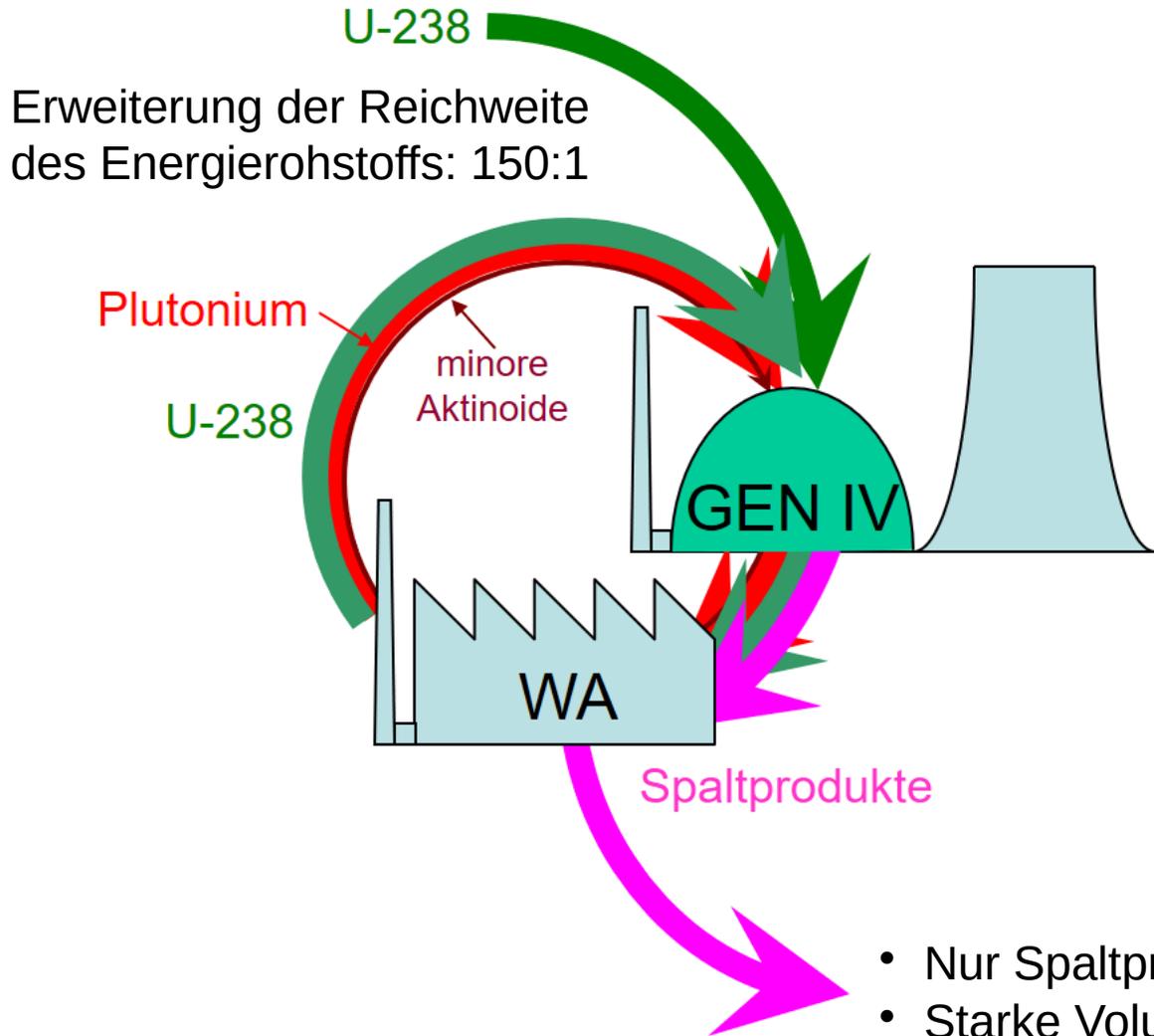
Direkte Tiefenlagerung der Brennelemente



Kanister (min. 15 cm Stahl)

Bild aus: NAGRA: Technical report 01-04

Innovation GenIV: Geschlossener Brennstoffzyklus



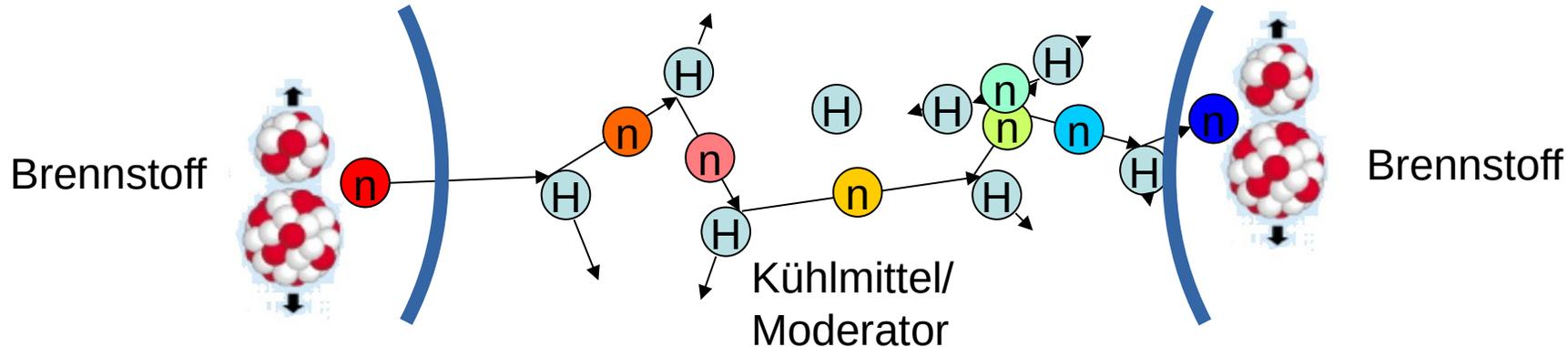
Voraussetzungen:

- Reaktoren mit schnellen Neutronen (Gen-IV)
 - Brüten
 - Transmutation
- Spezialfall: Thorium
- Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente
 - Partitioning = erweitert um Abtrennung der minoren Aktinoide
- Tiefenlager weiterhin erforderlich
- **Akzeptanz der Anhäufung alphatoxischer Aktinoide**
- **in den Anlagen des Brennstoffzyklus**

- Nur Spaltprodukte ins Tiefenlager (Einschlusszeit < 500 Jahre)
- Starke Volumenreduktion
- Zu Beginn kaum Verringerung der Radioaktivität
- Zusätzlicher schwach- und mittelaktiver Abfall aus Wiederaufarbeitung

Moderation = Abbremsung der Neutronen

Elastische Streuung von Neutronen an leichten Kernen



Thermischer Reaktor

Kernmasse = Neutronenmasse

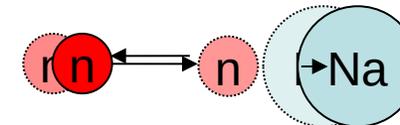


Maximaler Energieverlust 100%
guter Moderator

- Reaktor läuft mit wenig spaltbarem Material
- kann aber nicht Brüten und nicht transmutieren
- Wasser als Kühlmittel geeignet - ist gleichzeitig Moderator

Reaktor mit schnellen Neutronen

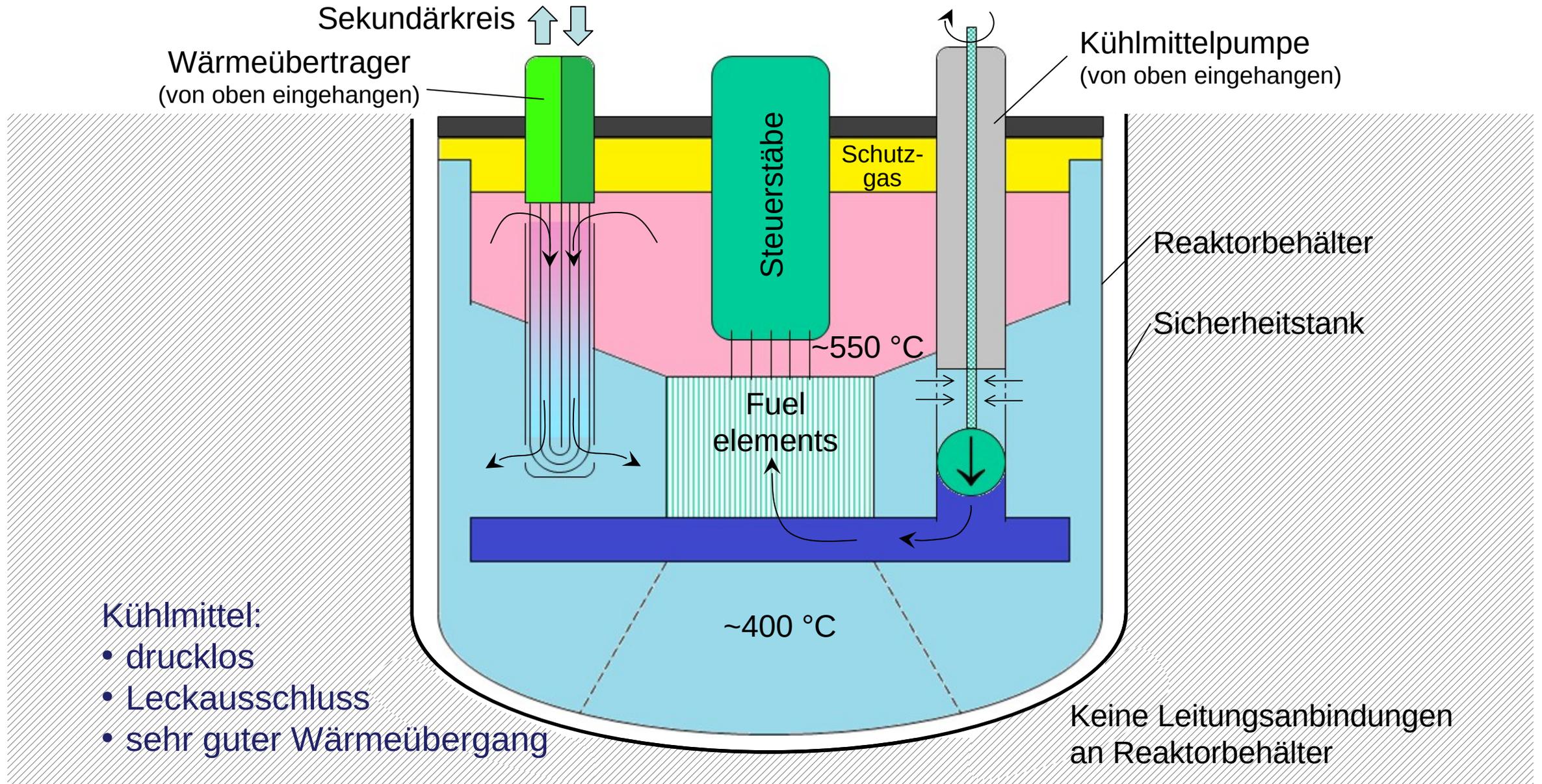
Kernmasse \gg Neutronenmasse



Maximaler Energieverlust klein
schlechter Moderator

- Reaktor braucht mehr spaltbares Material
- kann dafür aber brüten und transmutieren
- Wasser als Kühlmittel ungeeignet - es müssen schwerere Elemente als Kühlmittel eingesetzt werden

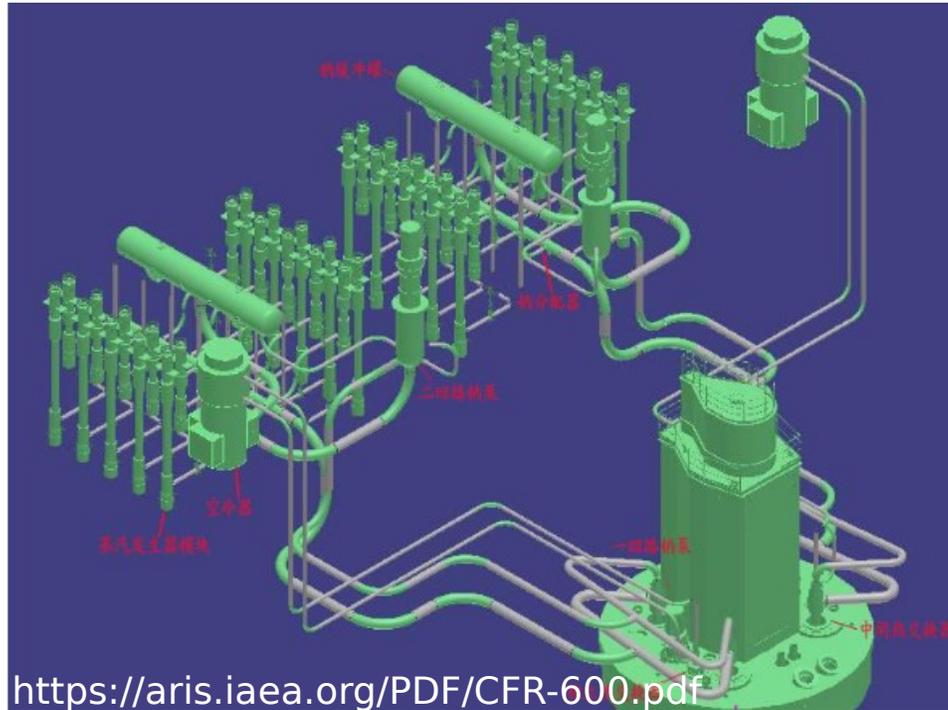
Natriumgekühlte Reaktoren - Leckausschluss durch Poolbauweise



Kühlmittel:

- drucklos
- Leckausschluss
- sehr guter Wärmeübergang

Kurz vor Inbetriebnahme: Der Natriumgekühlte Brüter in Xiapu, China



<https://aris.iaea.org/PDF/CFR-600.pdf>



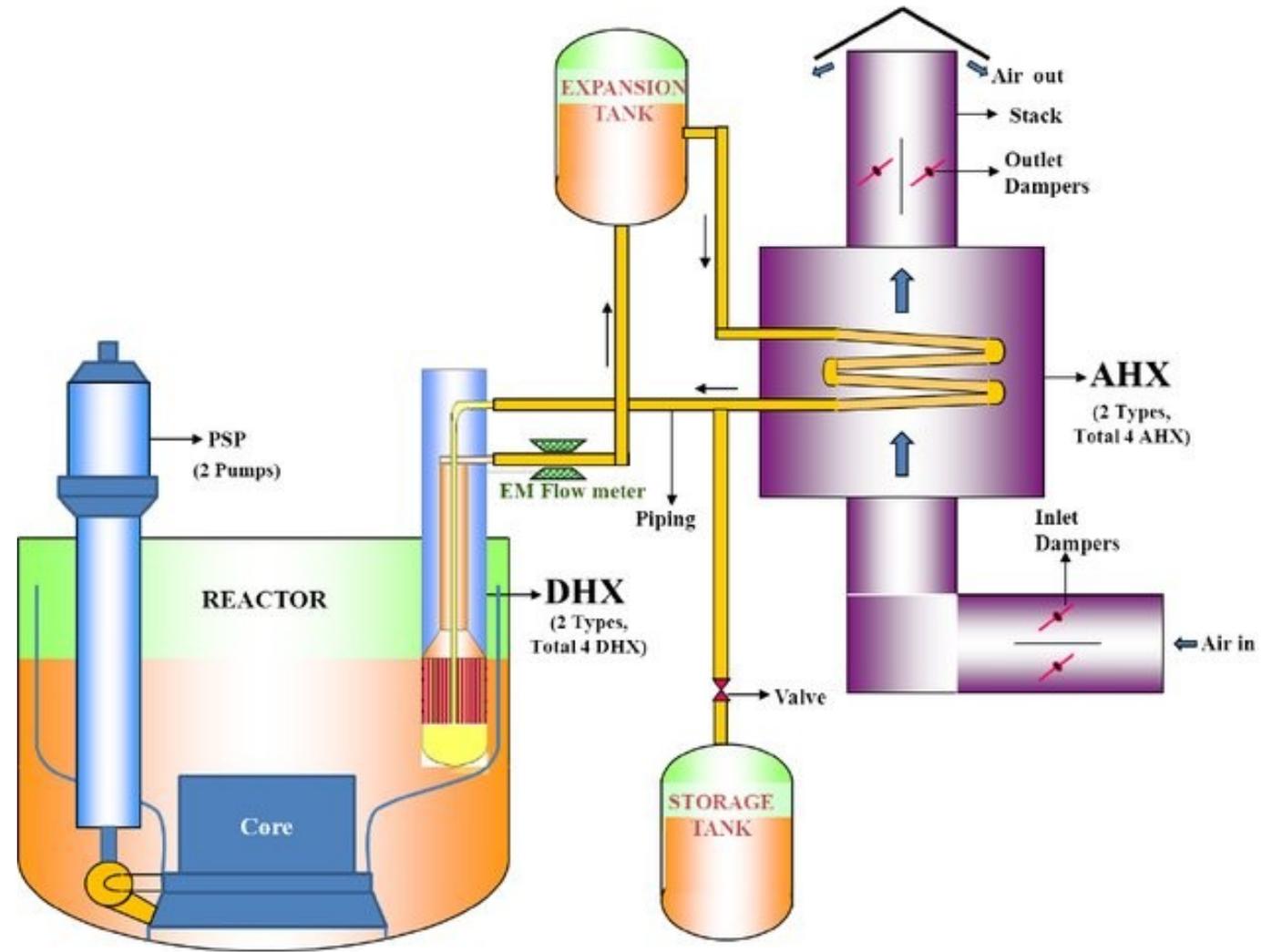
Pool-Reaktor mit Sekundärschleifen und Dampferzeugern ROSATOM liefert Erstbeladung und erste Umladung

- Inbetriebnahme erwartet in 2023 (Baustart 2017)
- Baustart 2. Einheit: 2020
- $1500 \text{ MW}_{\text{th}}$, $600 \text{ MW}_{\text{el}}$, 41% Wirkungsgrad, Dampf mit 480°C , Brutrate 1.10
- Lebensdauer 40 Jahre
- Passive Sicherheitssysteme

Bildquelle rechts: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Fuel-despatched-to-China-for-CFR-600-fast-neutron>

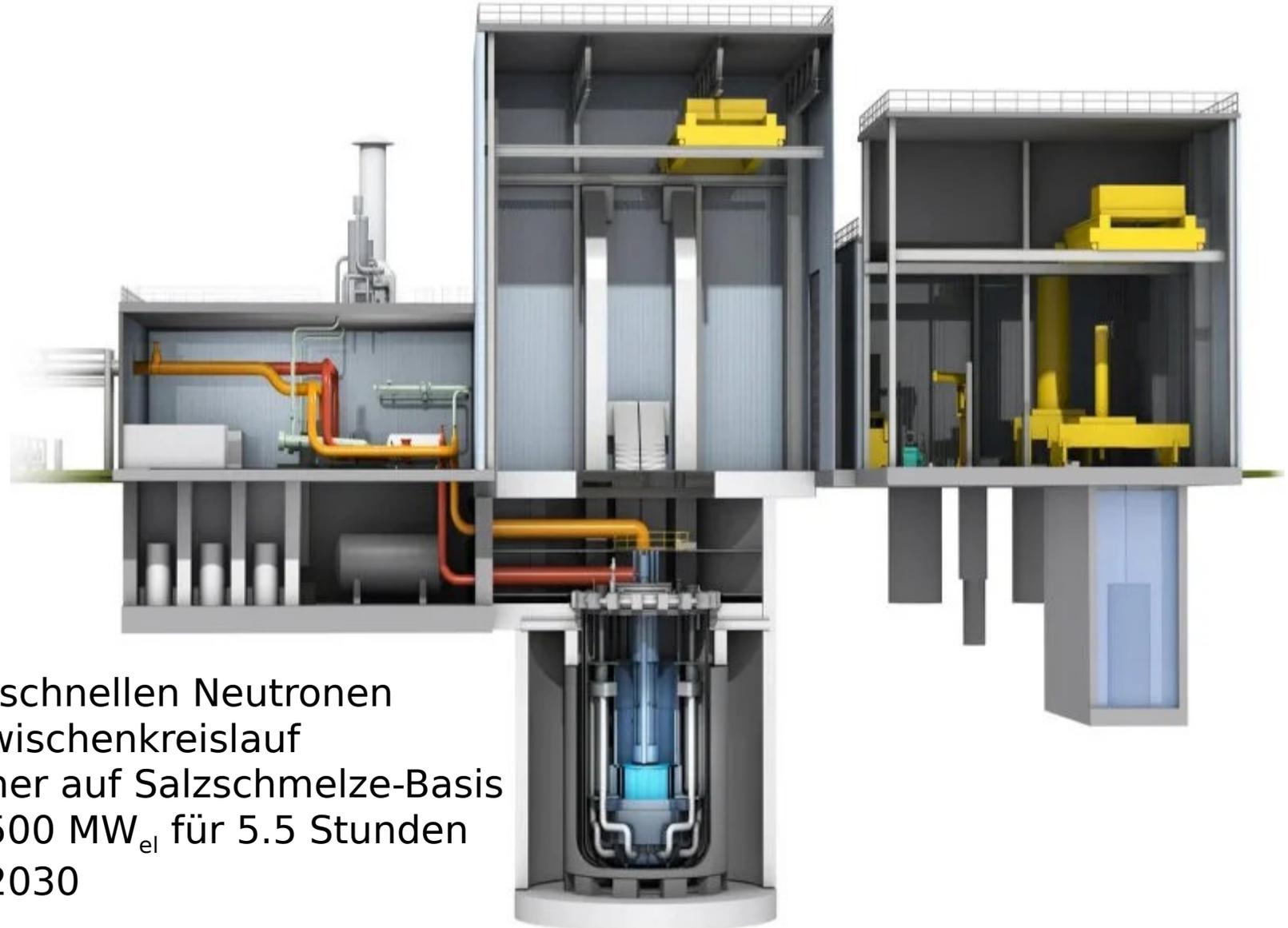
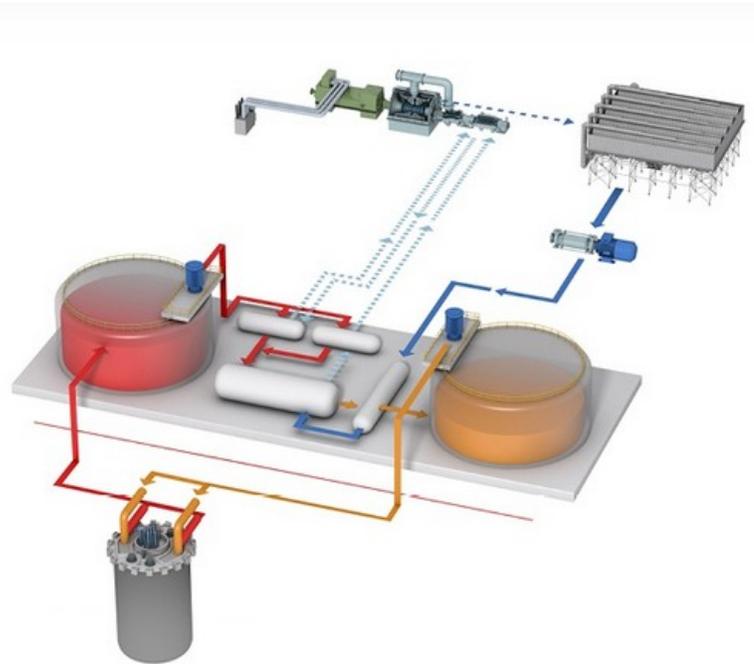
Indien: PFBR = Prototype Fast Breeder Reactor, Kalpakkam, Brennstoffbeladung hat begonnen

- Natriumgekühlter Reaktor
- 500 MW_{el}
- Poolbauweise
- Spaltstoff: Plutonium
- Passive Notkühlung
- Rezyklierung des erbrüteten Plutoniums
- Zuladung nur U-238



Bildquelle: Sravanthi et al., Process Safety and Env. Protection, 111(2017),232-243

TerraPower: NATRIUM - Baugenehmigung für Anlage in Wyoming eingereicht, Ziel: 2030



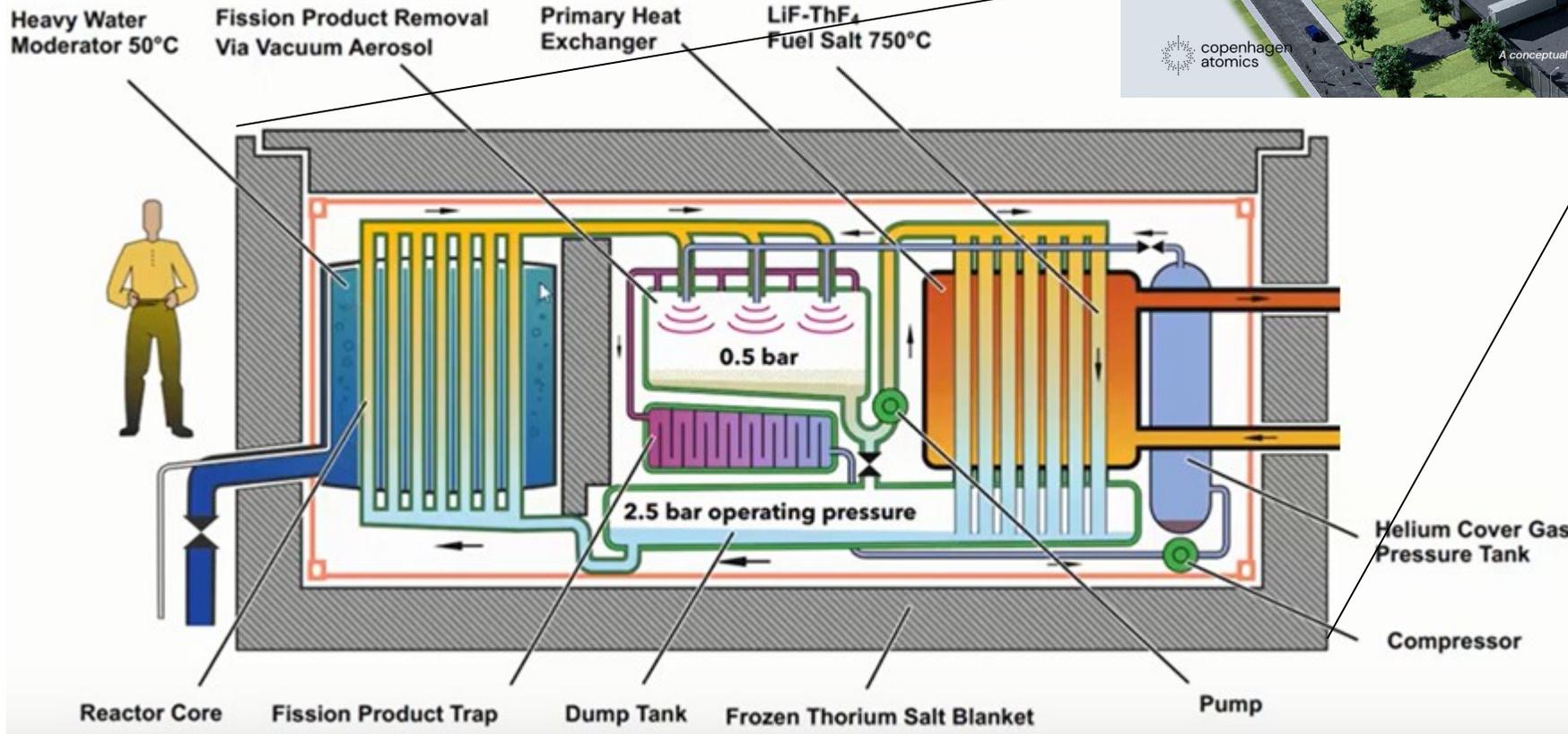
- Natriumgekühlter Reaktor mit schnellen Neutronen
- Pool-Bauweise mit Natrium- Zwischenkreislauf
- Hochtemperatur-Energiespeicher auf Salzschnmelze-Basis
- 345 MW_{el} mit Spitzenlast von 500 MW_{el} für 5.5 Stunden
- In Planung in Wyoming, USA, 2030

Bilder: <https://www.power-technology.com/projects/natrium-reactor-demonstration-project-wyoming-us/?cf-view>

CAWB = Copenhagen Atomics Waste Burner

Ehrgeizige Pläne: Erster kommerzieller Reaktor 2028

Ziel: 1GW modulares Kraftwerk



- Thermischer Reaktor
- Moderator D₂O
- Thorium als Brutstoff
- Spaltstoff: Erbrütetes U-233
- Start mit Plutonium

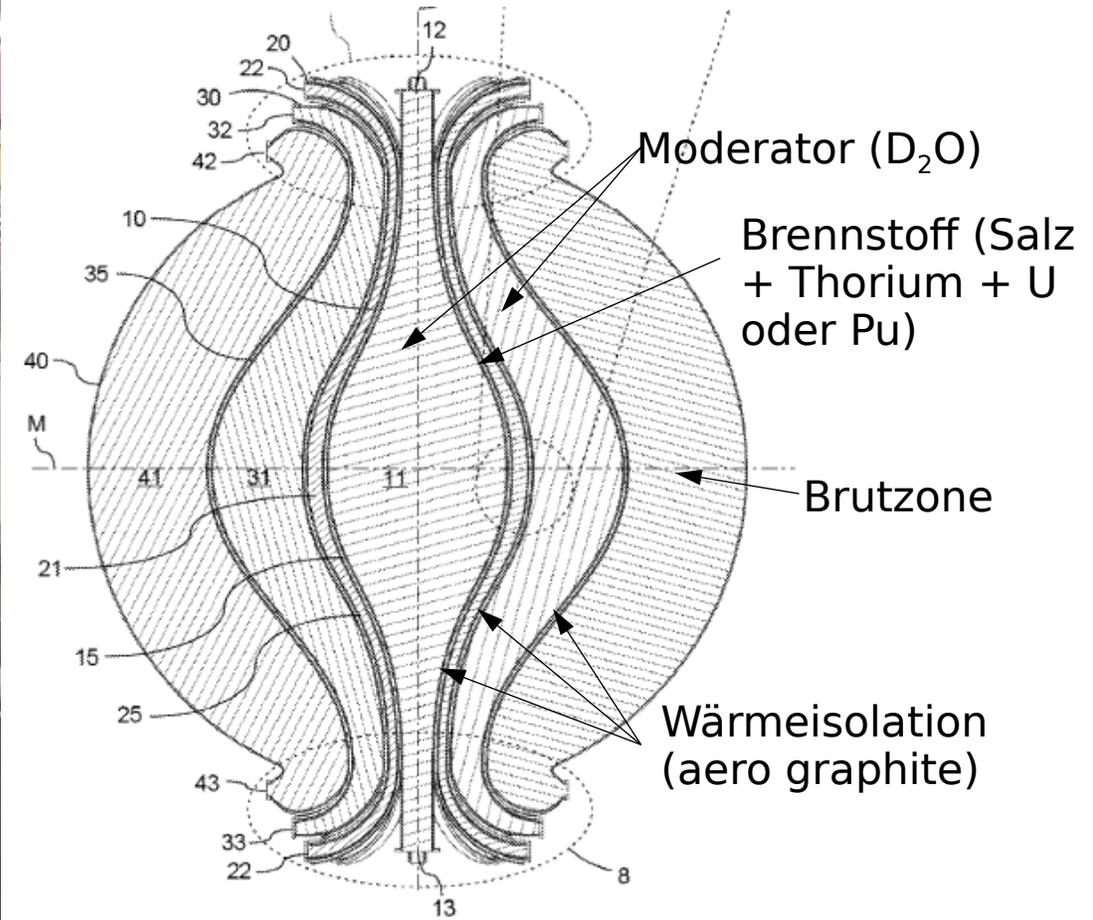
Bildquelle: Advances in Small Modular Reactor, Technology Developments, supplement to ARIS, IAEA, 2020

Testanlage des «Copenhagen Waste Burners» mit Salzschnmelze



Photo: Copenhagen Atomics

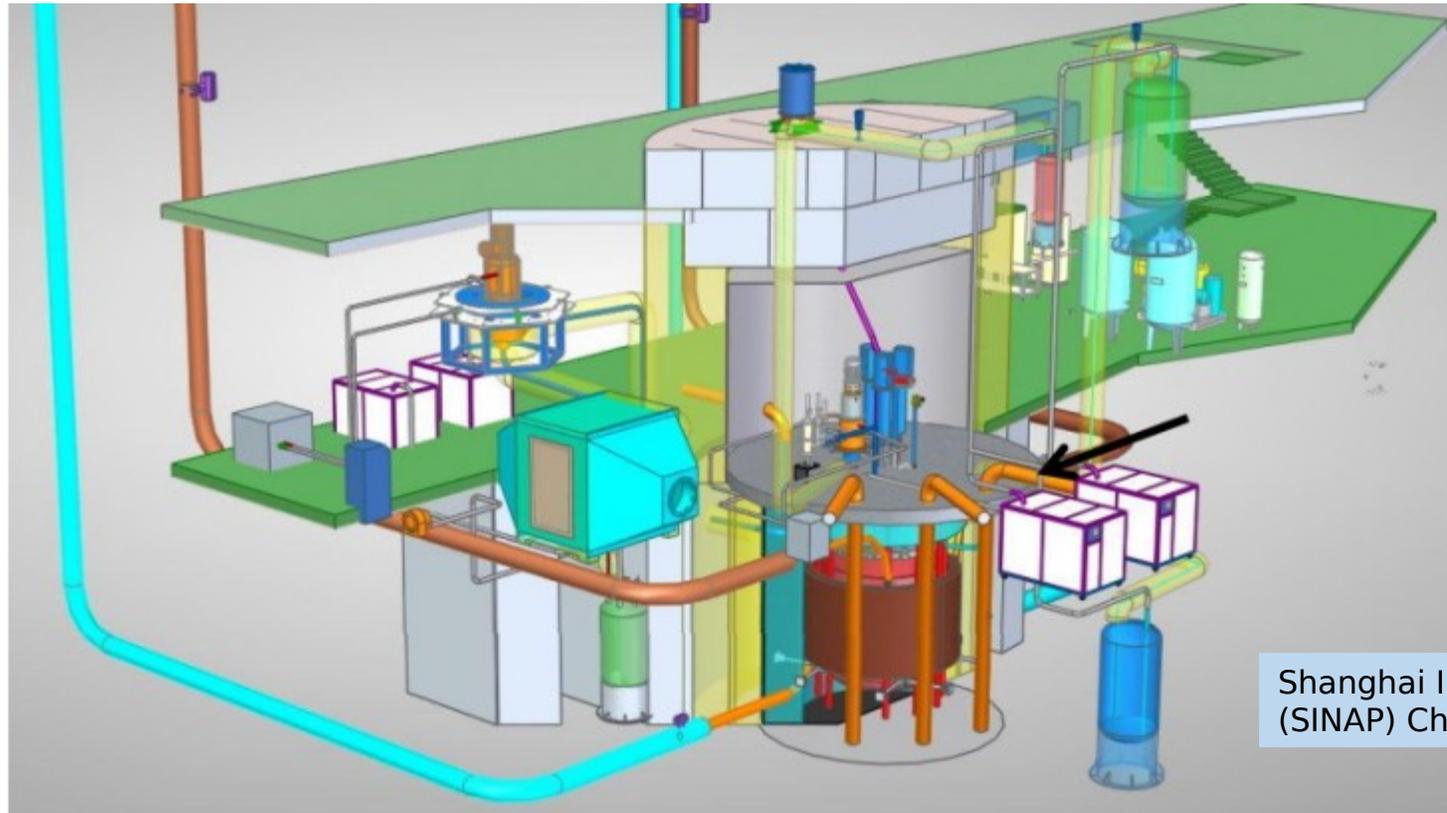
mit Elektroheizung, Salzschnmelze wird bei 560 °C zirkuliert



Aufbau des Reaktors

Bildquelle: Aslak et al., A method of operating a nuclear reactor core of a molten salt nuclear reactor, Patent DK202170281A1, 2021.

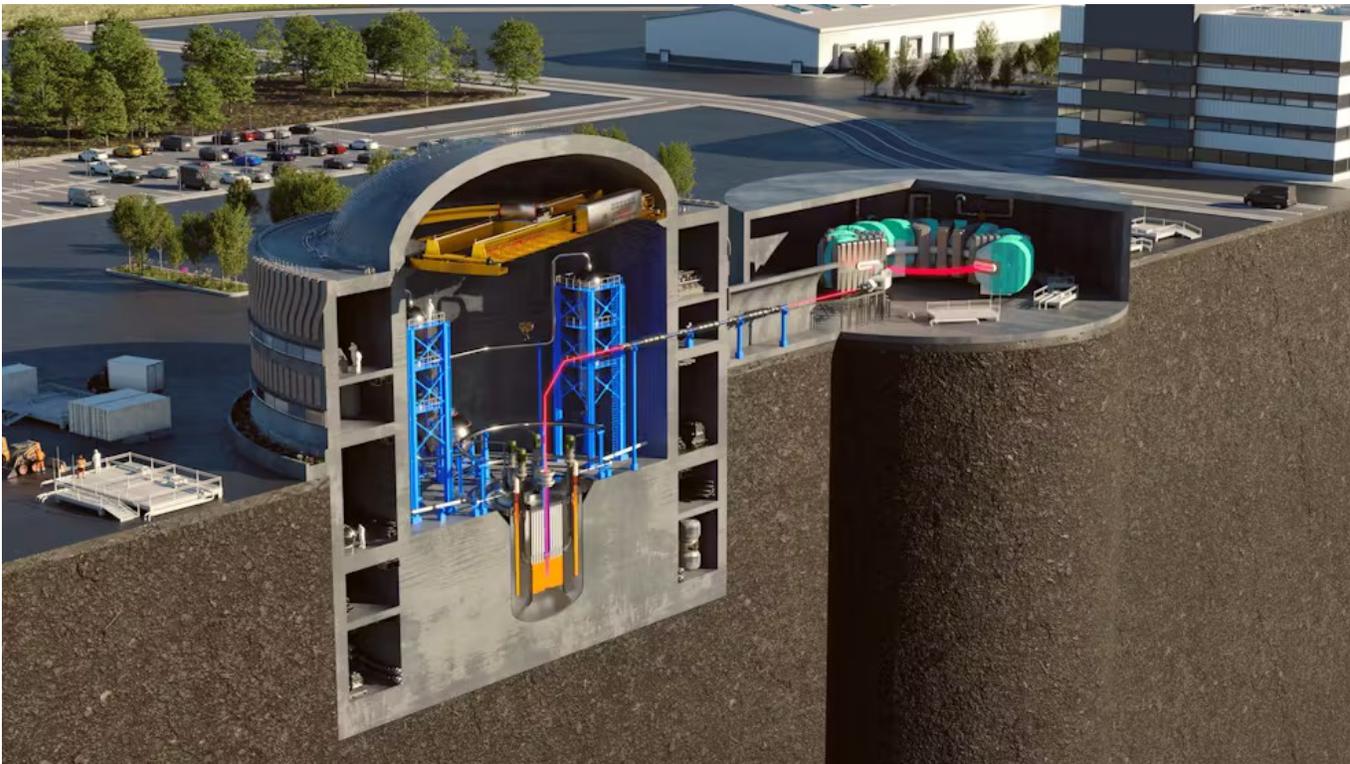
TMSR-LF1 - Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP)



Shanghai Institute of Applied Physics
(SINAP) Chinese Academy of Sciences (CAS)

- Leistung 2 MW_{th} → fertiggestellt 2021 (Nachfolger geplant für 2030 mit $373 \text{ MW}_{\text{th}}$)
- Salz Reaktor: Lithium-Berylliumfluorid (FLiBe) mit 99.95% Li-7 + UF_4 (19.75% U-235) + 50 kg Thorium
- Salz Kühlkreislauf: Lithium-Berylliumfluorid (FLiBe)
- Reaktorausstrittstemperatur: $650 \text{ }^\circ\text{C}$, Kühlmitteltemperatur: $580 \text{ }^\circ\text{C}$
- Mit erbrütetem U-233 später Übergang zu reinem Th/U3

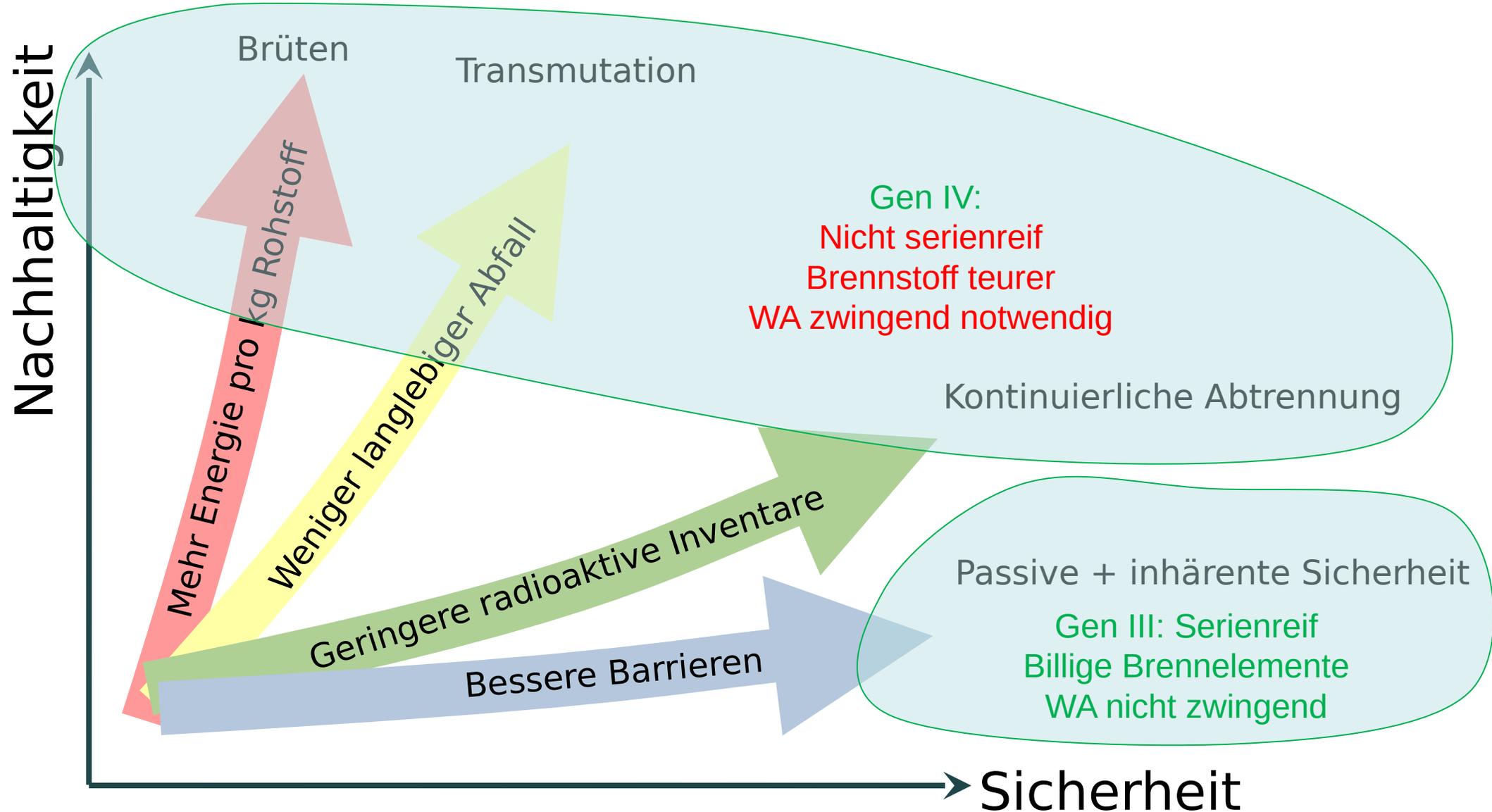
Transmutex - Subcritical Transmutation Accelerated Reactor using Thorium (TMX-START)



- Unterkritischer Reaktor mit Thorium + Aktinoiden aus ausgedientem Brennstoff anderer Reaktoren
- Spaltungsreaktionen durch Neutronen aus Spallationsquelle
- Spallationsquelle wird mit hochenergetischen Protonen aus starkem Cyclotron versorgt
- Kühlmittel und Target der Spallationsquelle: Bleischmelze
- Rezyklierung des Erbrüteten U-233

<https://www.bluewin.ch/de/news/wissen-technik/schweizer-firma-entwickelt-revolutionaeren-kernreaktor-1917883.html>

Entwicklungspotentiale



WA = Wiederaufbereitung → politisches Verbot