

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

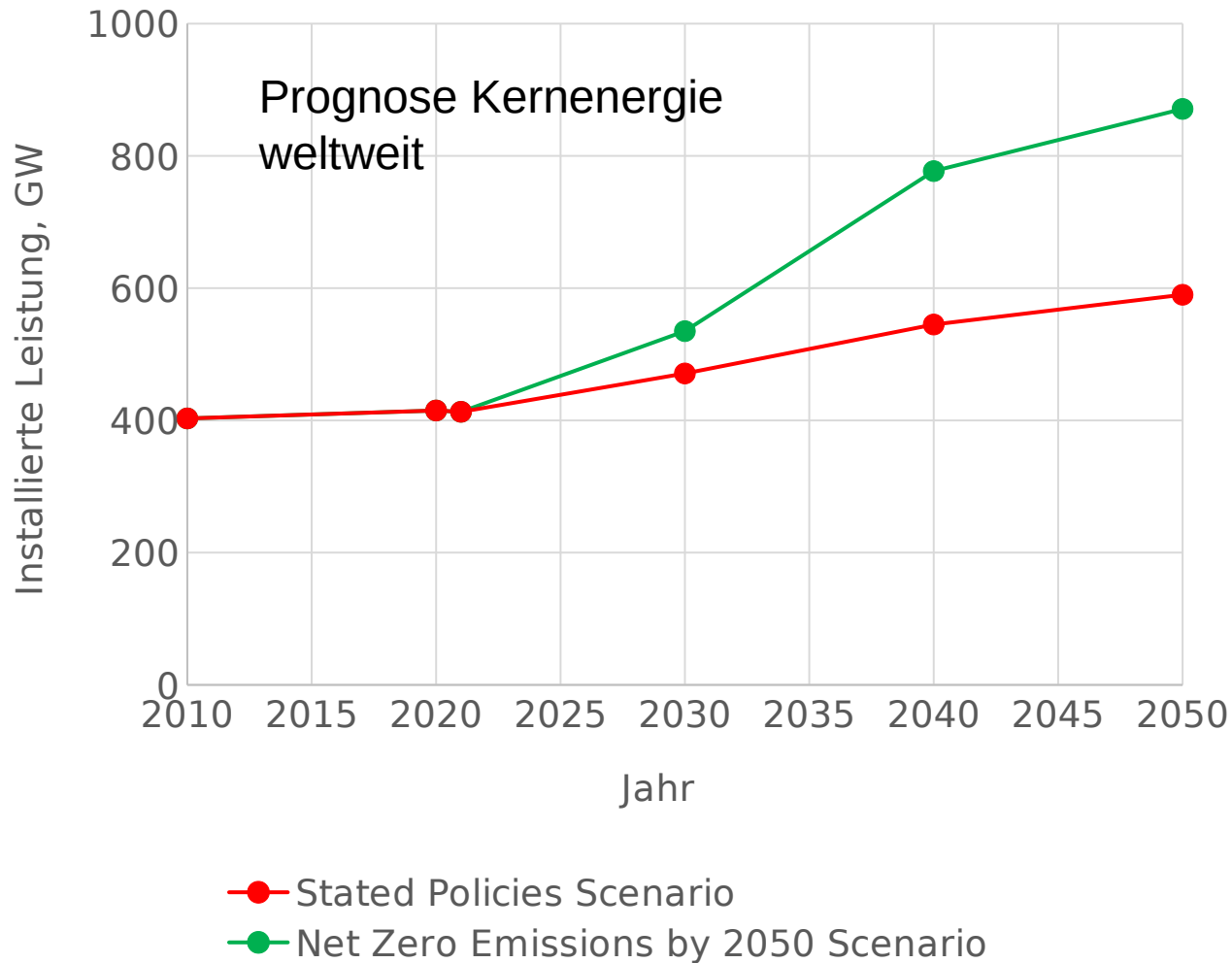
Horst-Michael Prasser

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.)

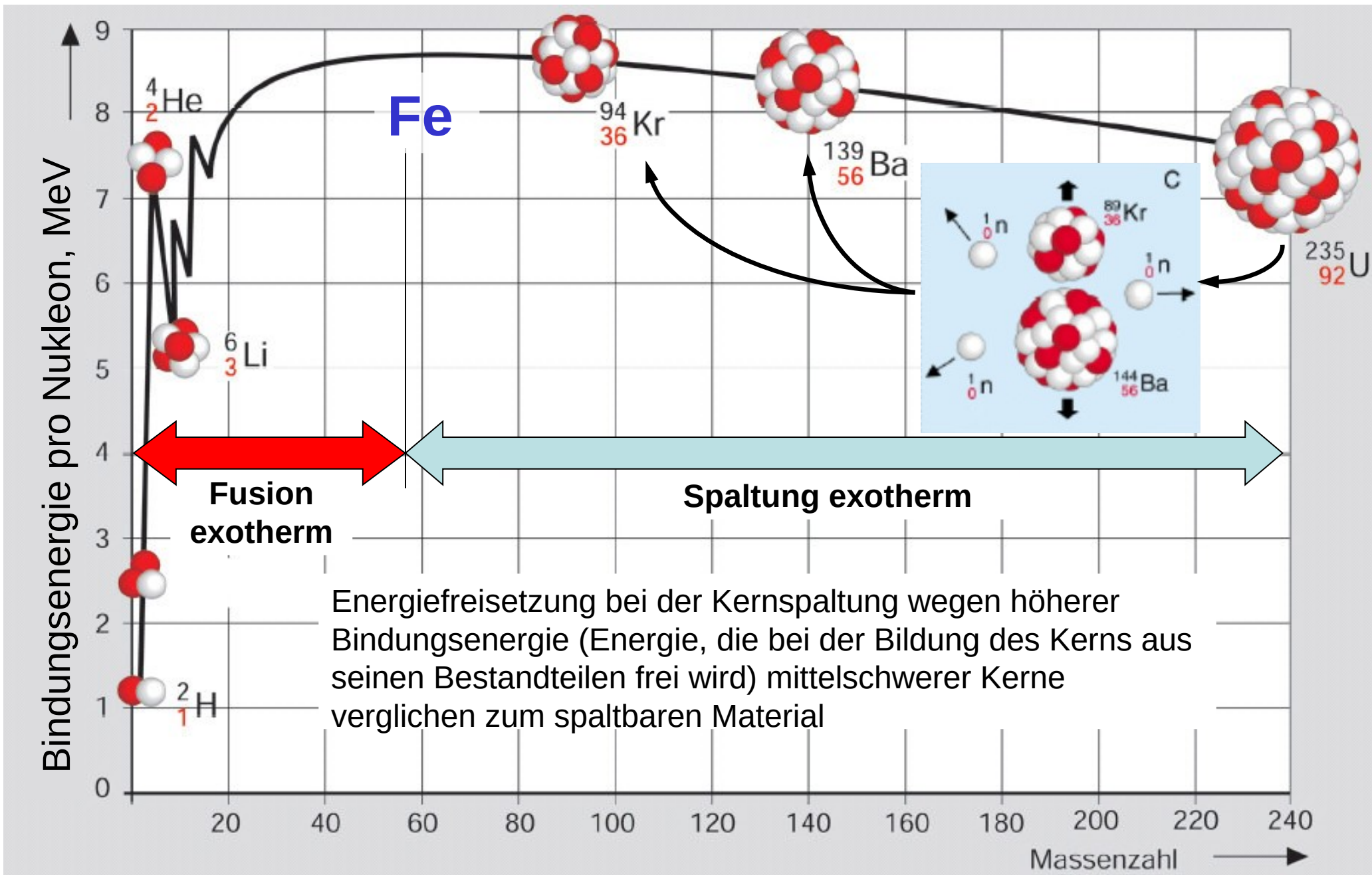
... sonst ist mehr Raum für Kernenergie

... und weniger Raum für



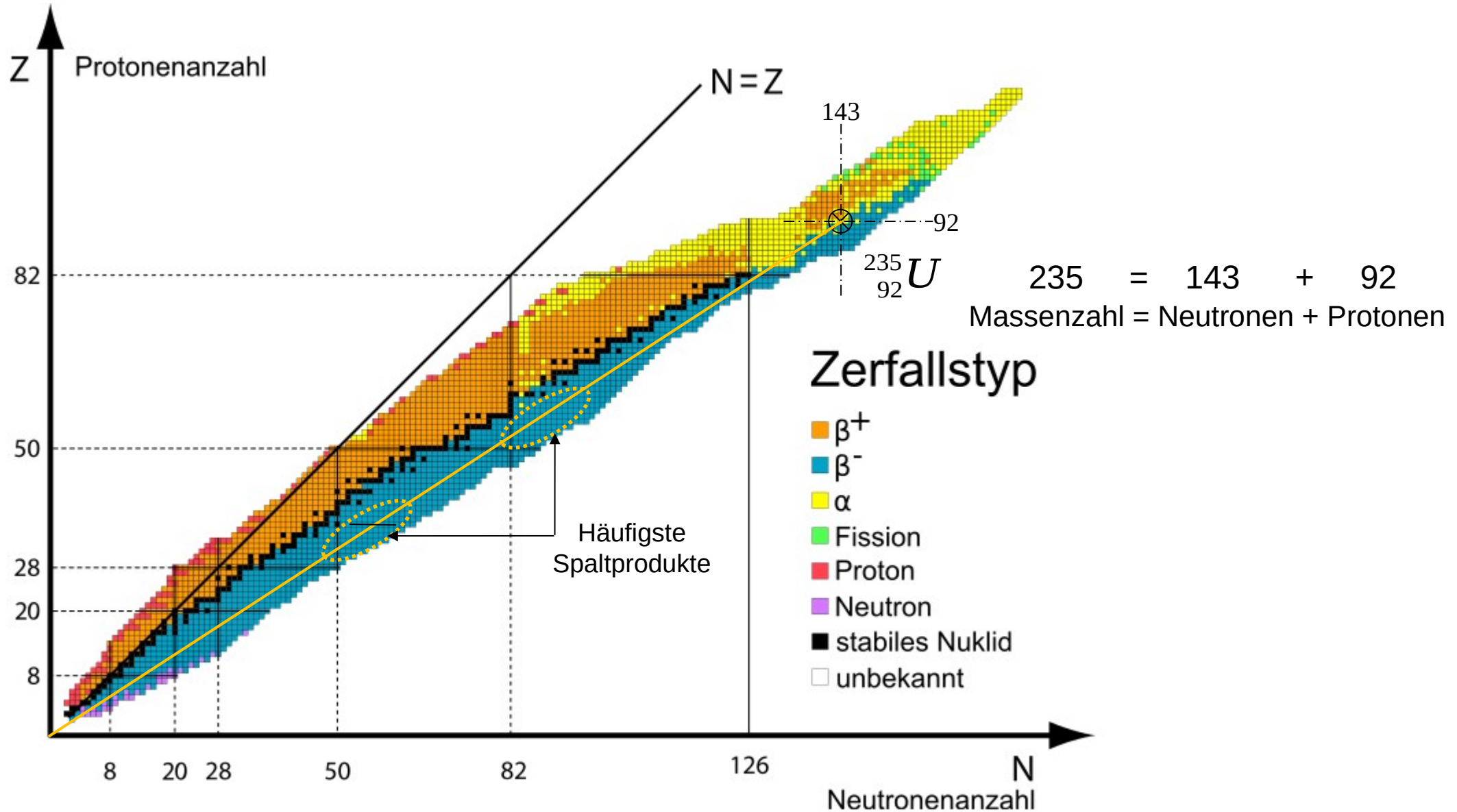
«Gelingen» heisst auch,

«umweltverträglich realisierbar sein»



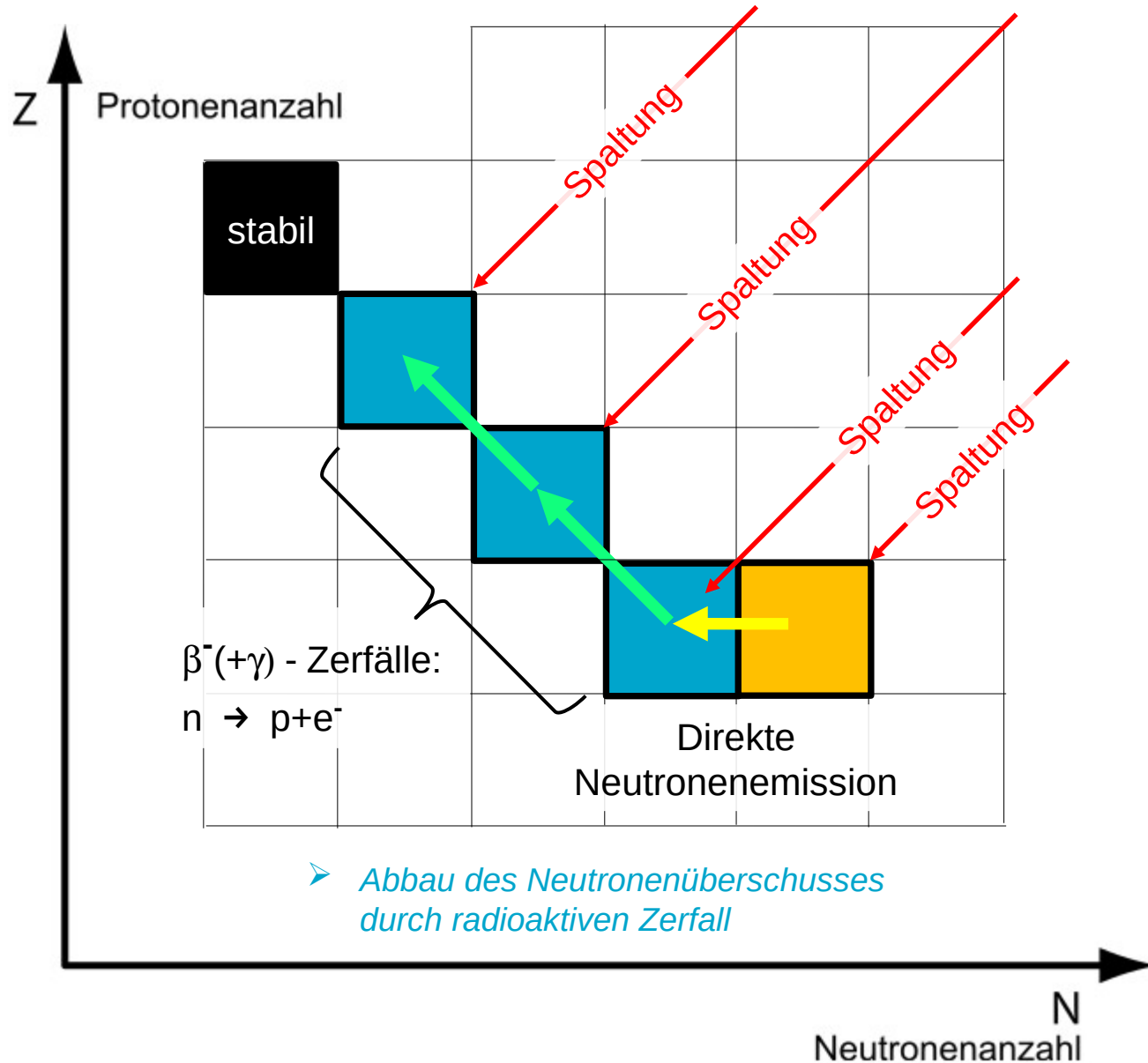
Energiefreisetzung bei der Kernspaltung wegen höherer Bindungsenergie (Energie, die bei der Bildung des Kerns aus seinen Bestandteilen frei wird) mittelschwerer Kerne verglichen zum spaltbaren Material

Stabilitätsinsel und Radioaktivität



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

Vor- und Nachteile des Neutronenüberschusses in den Spaltprodukten



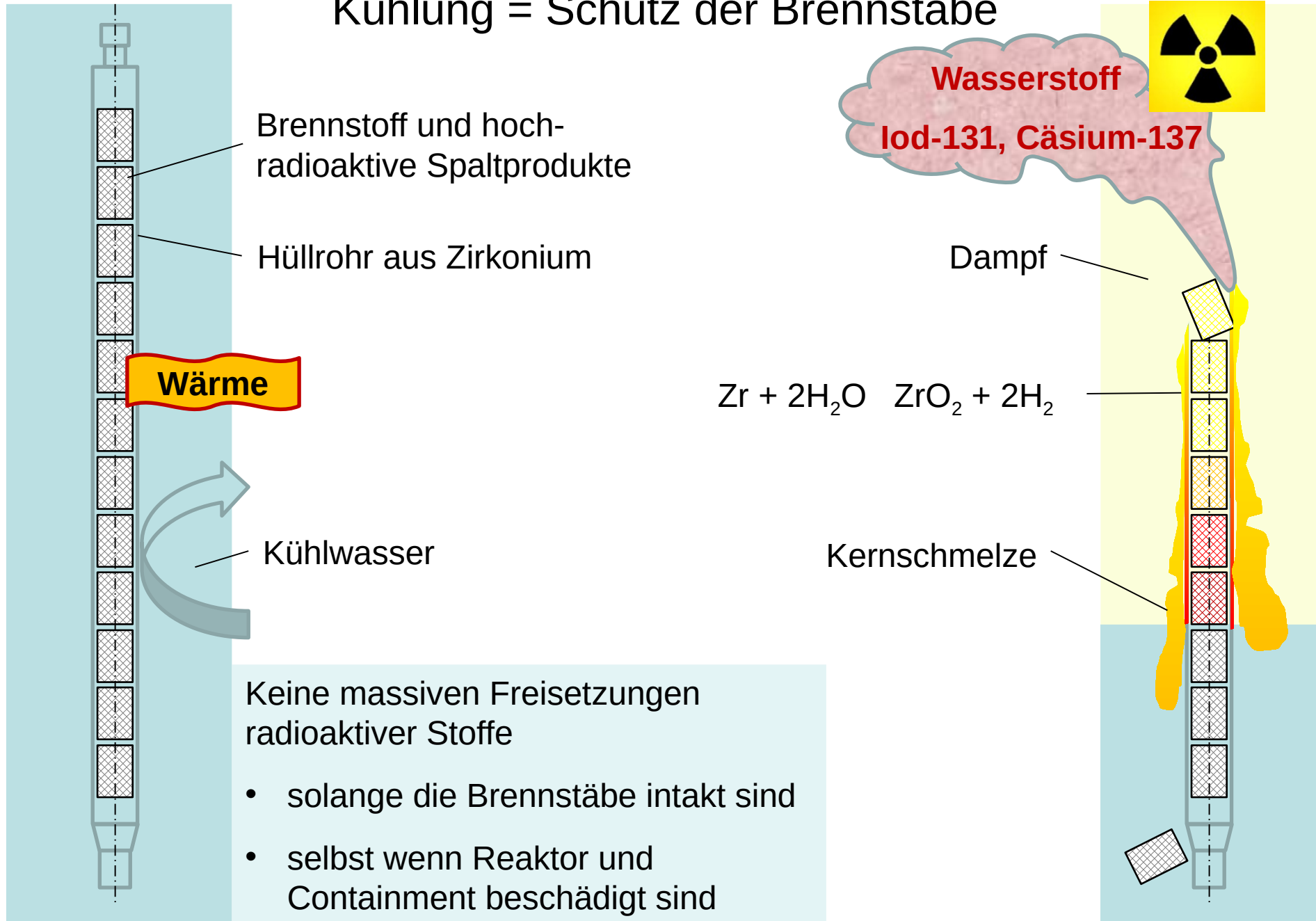
Vorteile:

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

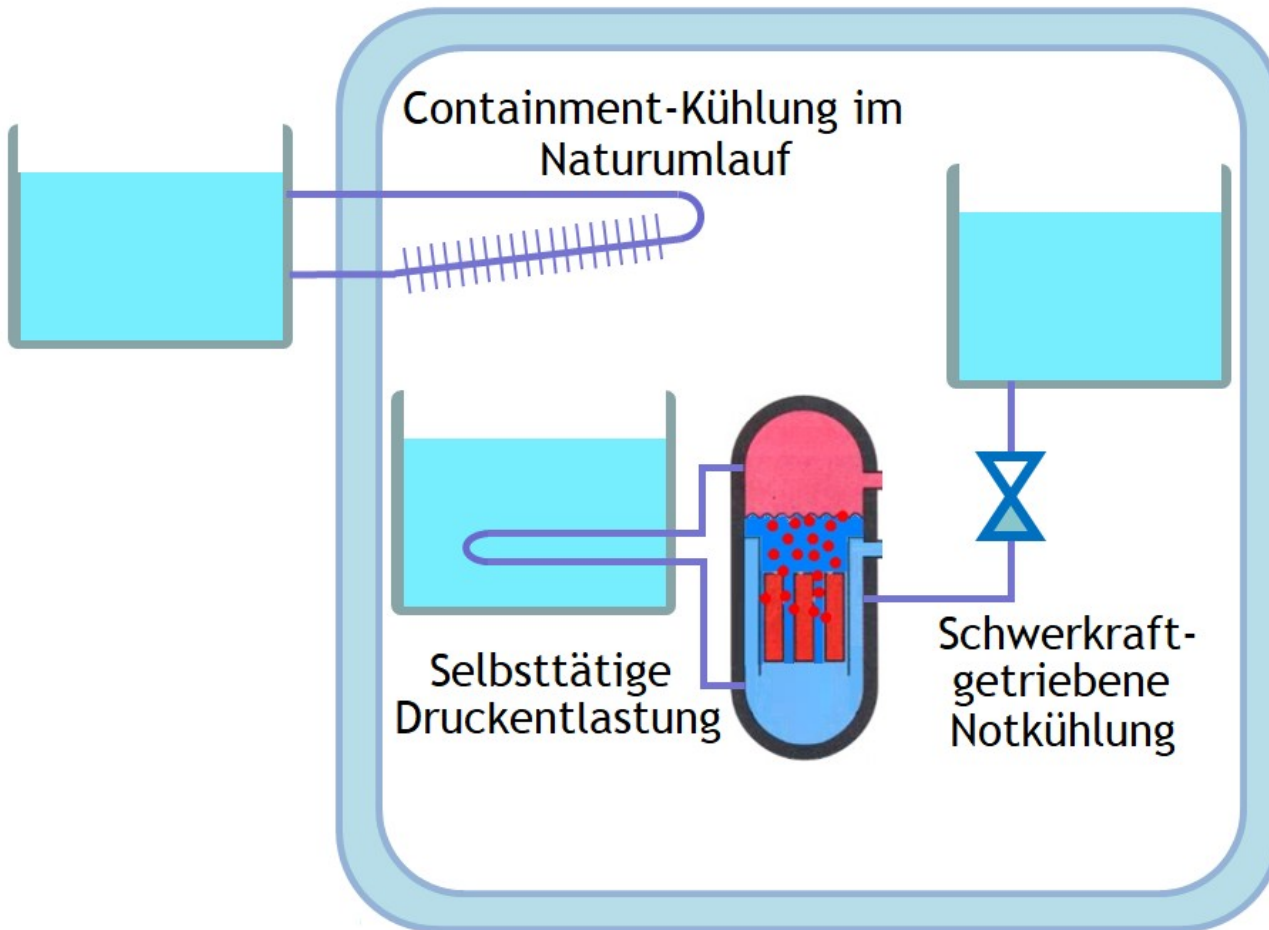
Nachteile:

- Starke Radioaktivität der Spaltprodukte
 - Strahlenschutz und sichere Entsorgung
 - Quelle der Nachzerfallswärme
- Emission von Spaltneutronen
 - Aktivierung und Alterung von Bauteilen und Strukturen
 - Produktion von langlebigen alpha-toxischen 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)

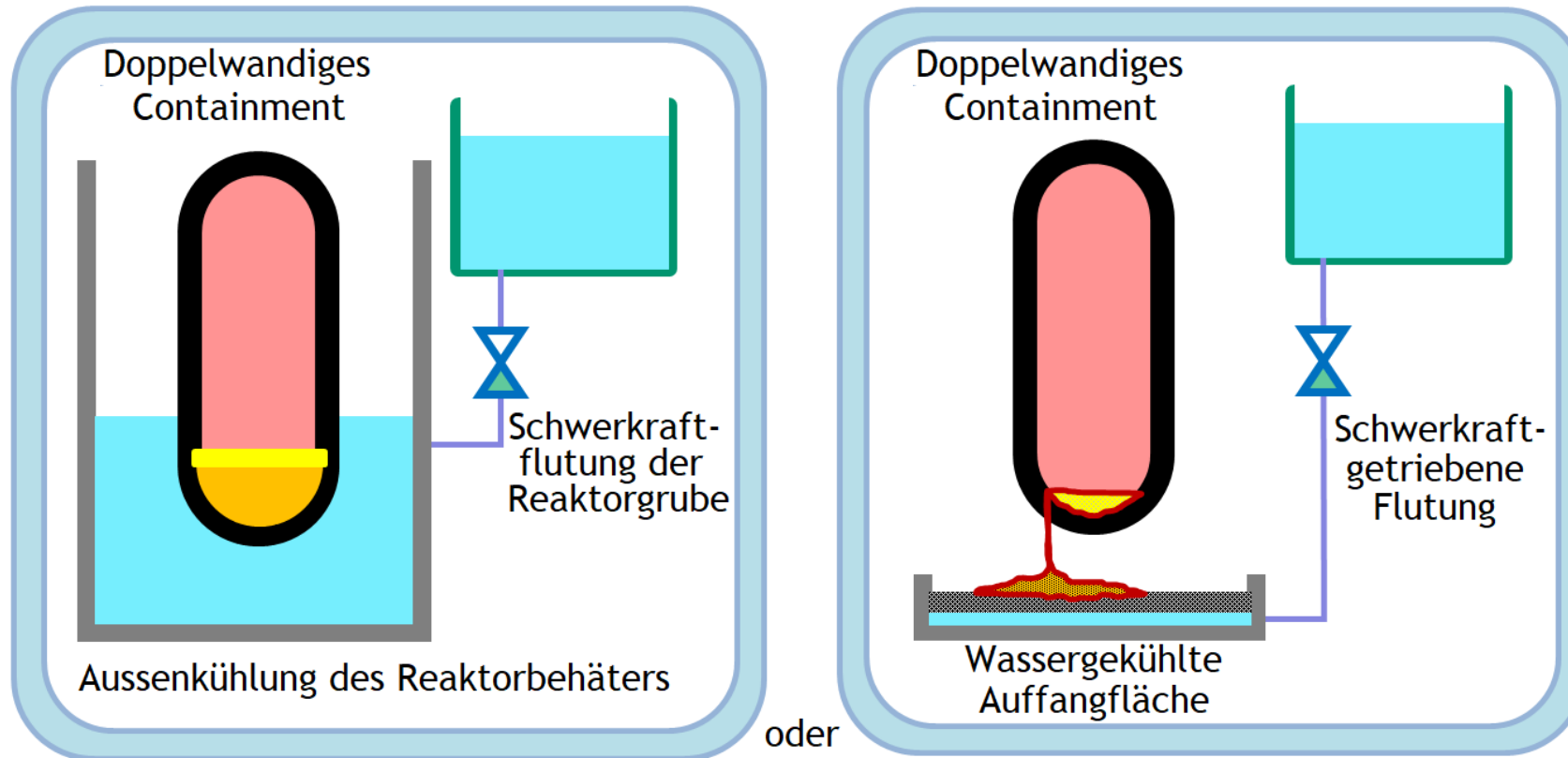
❖ **Autonomie:**

- 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

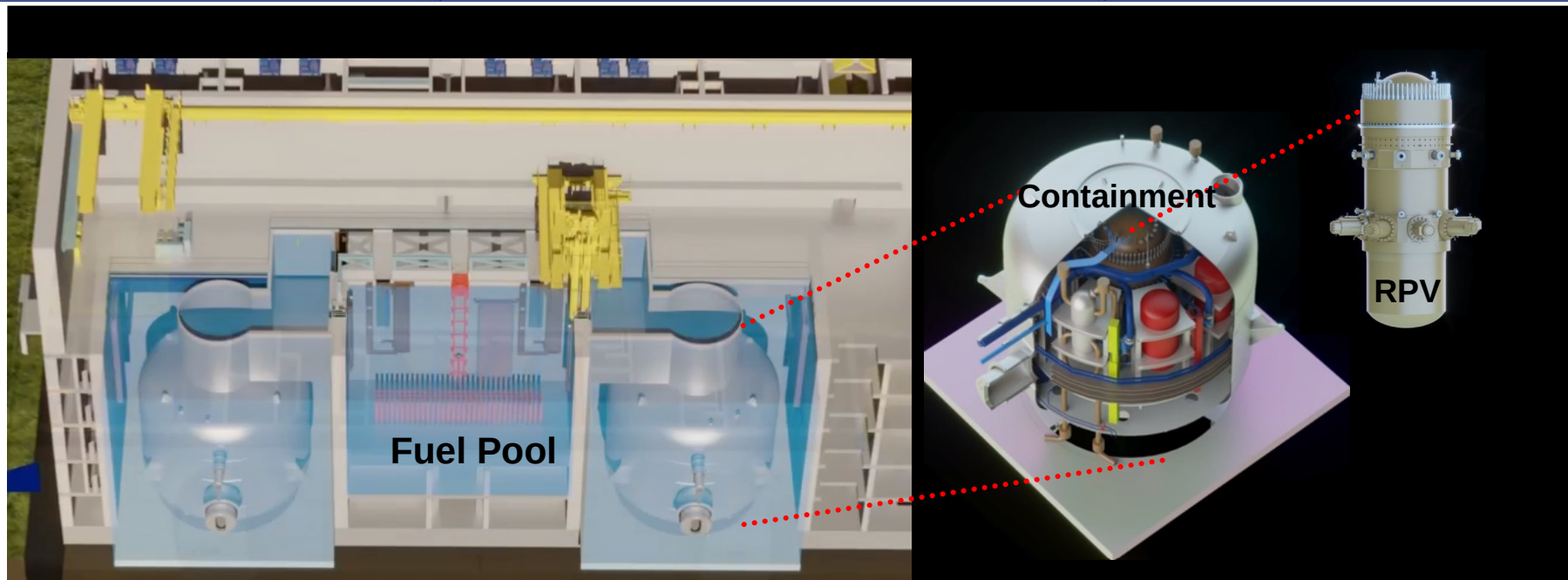
	Typ	Sicherheit	Nettoleistung*	Planung	Bau	Betrieb	Erstbetrieb
ABWR (Japan)	SWR	aktiv	1350 MW	4	2	4**	2005
APR-1400 (Korea***)	DWR	aktiv	1340 MW	3	3	7	2016
AP1000 (USA***)	DWR	passiv	1250 MW	10	0	6	2018
CAP1000 (China)	PWR	passiv	1100 MW	27	3	0	-
CAP1400 (China)	PWR	passiv	1400 MW	0	2	0	-
EPR (Frankreich***)	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

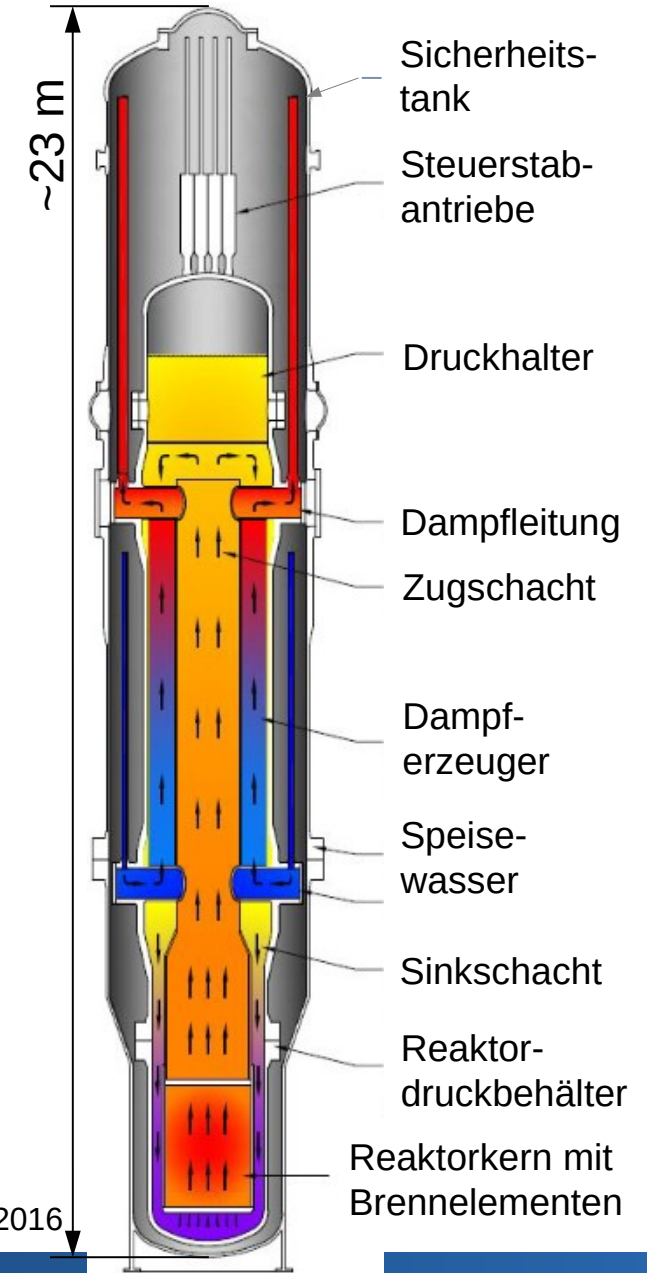
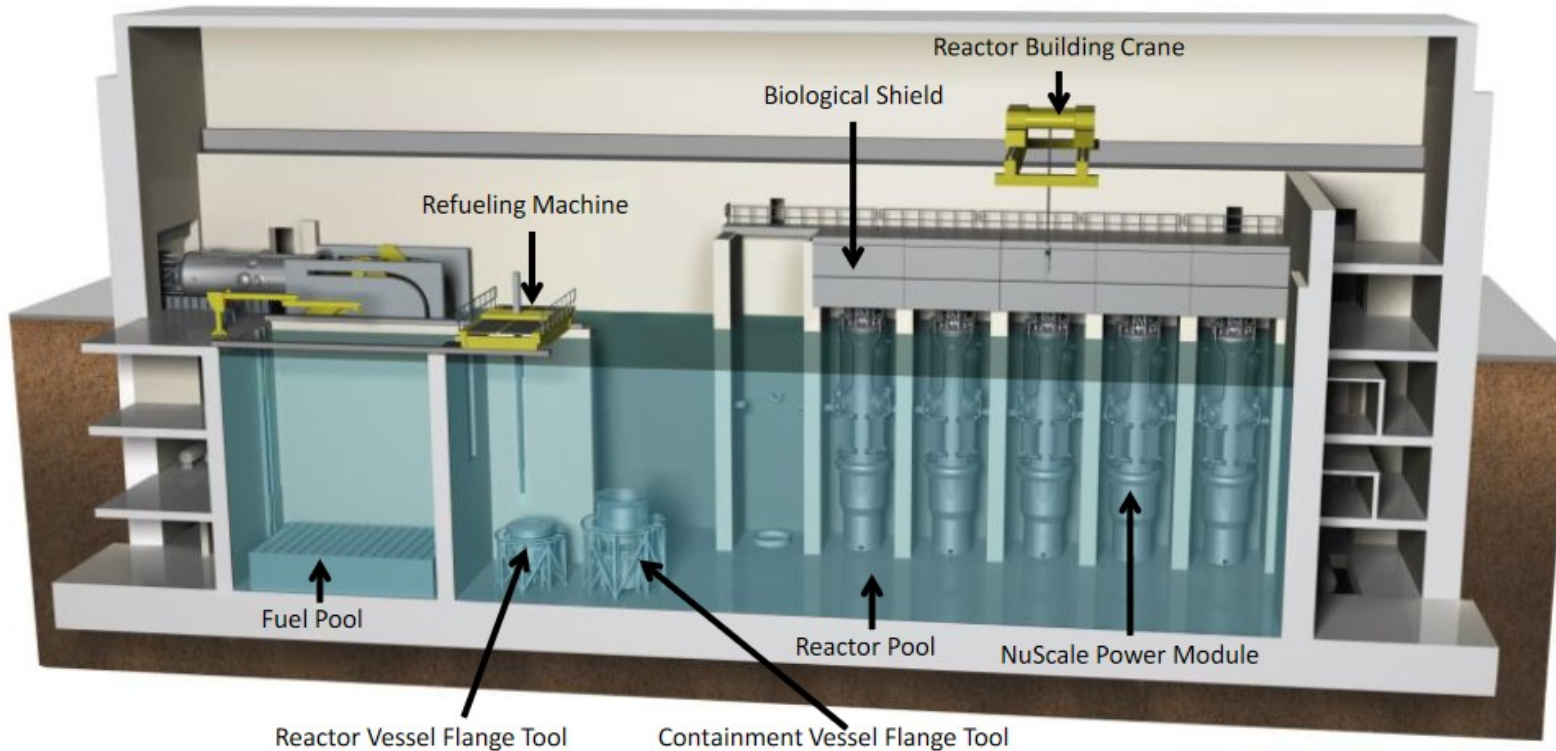
Frankreich: Reaktoren im EdF Portfolio



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)

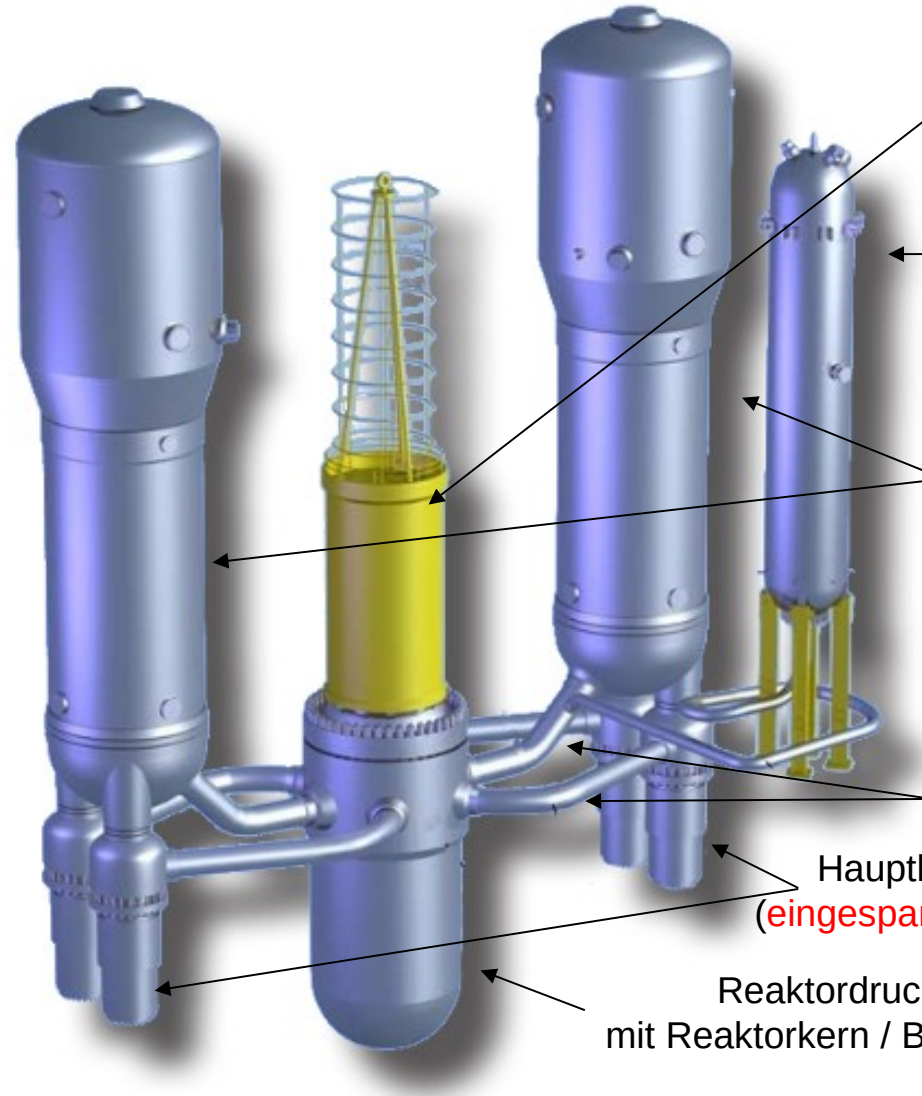
Ökonomie der Größe ⇔ Ökonomie der Serie
 Kleinere Investitionsschritte → schnellere Amortisation

?

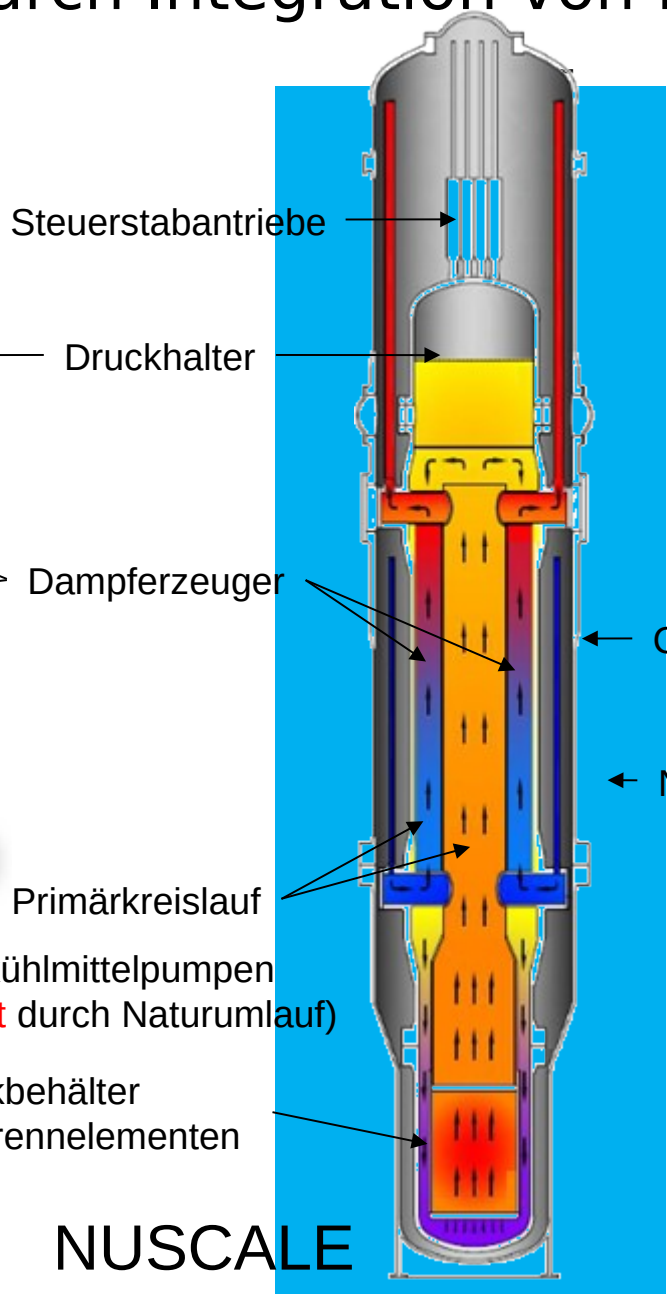
Bildquelle: J. Doyle et al, ICAPP 2016

Vereinfachung durch Integration von Komponenten

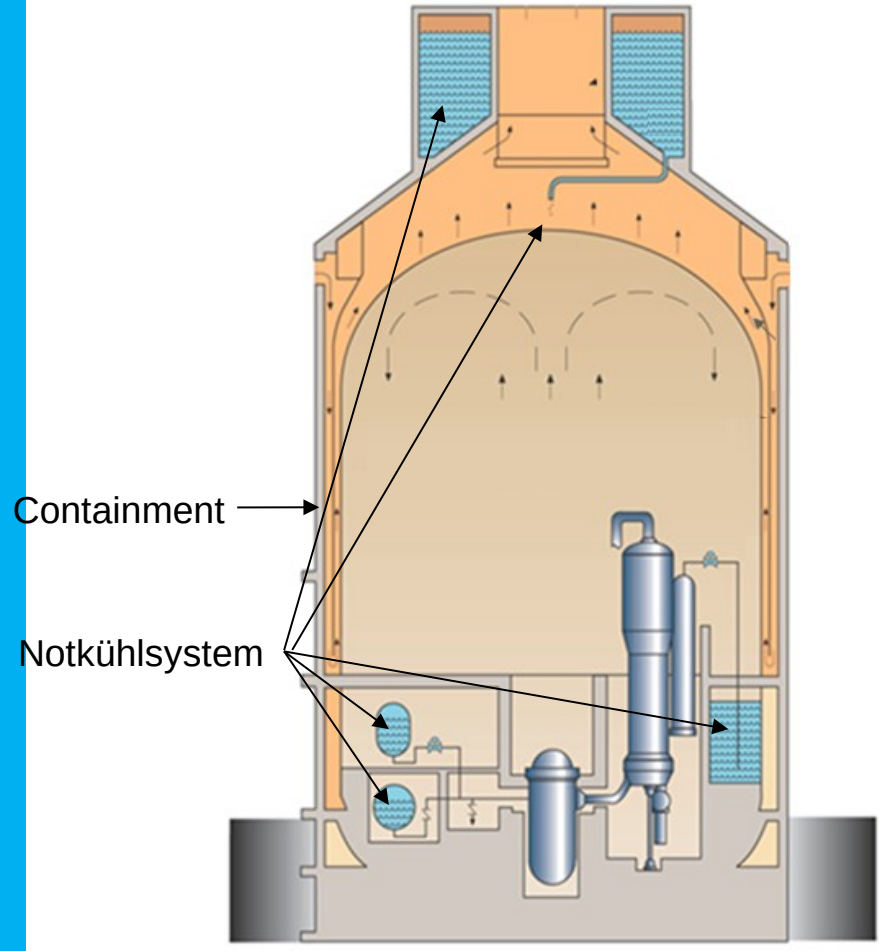
Bildquelle: IAEA ARIS supplement, 215



AP1000

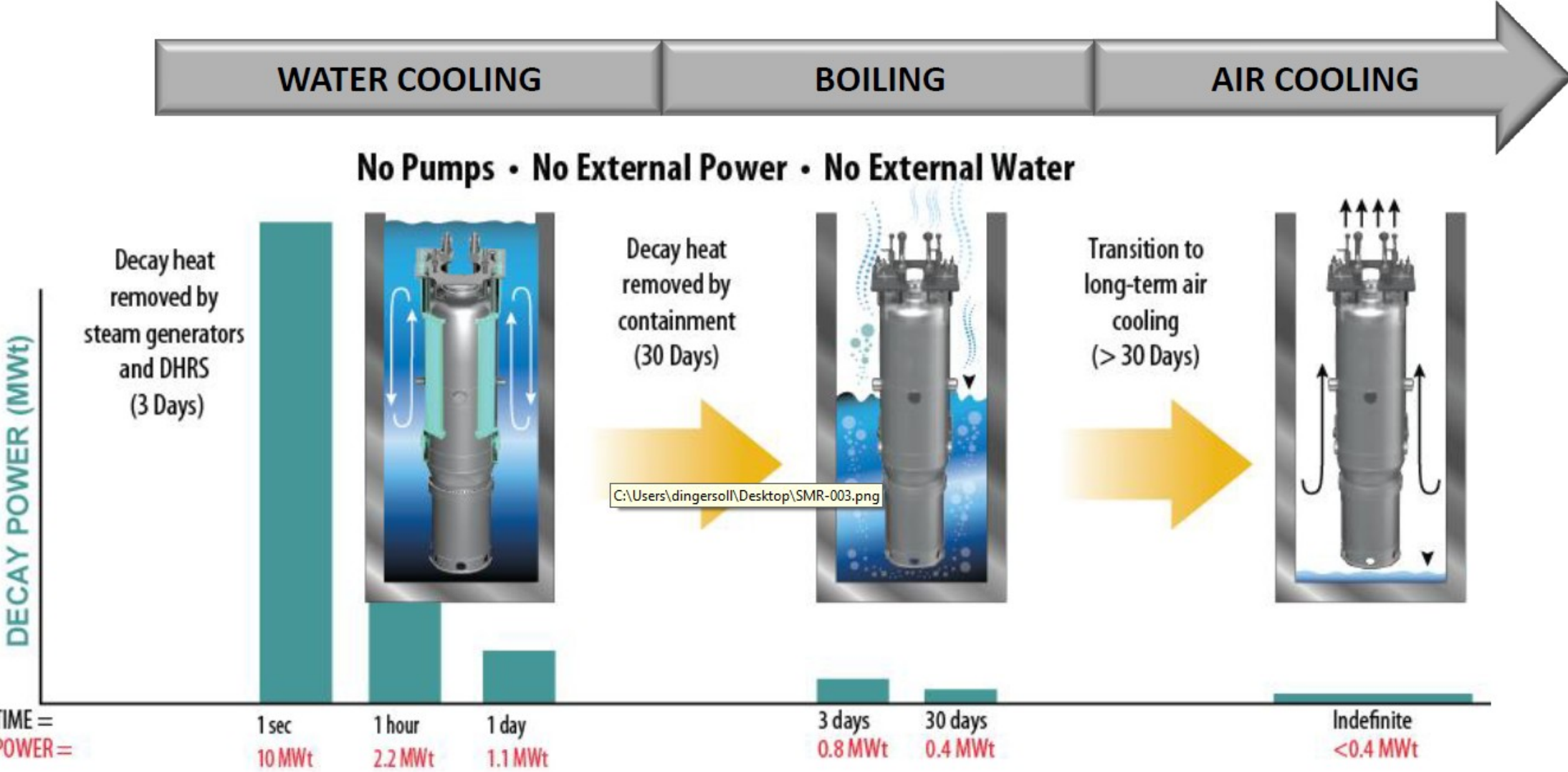


NUSCALE



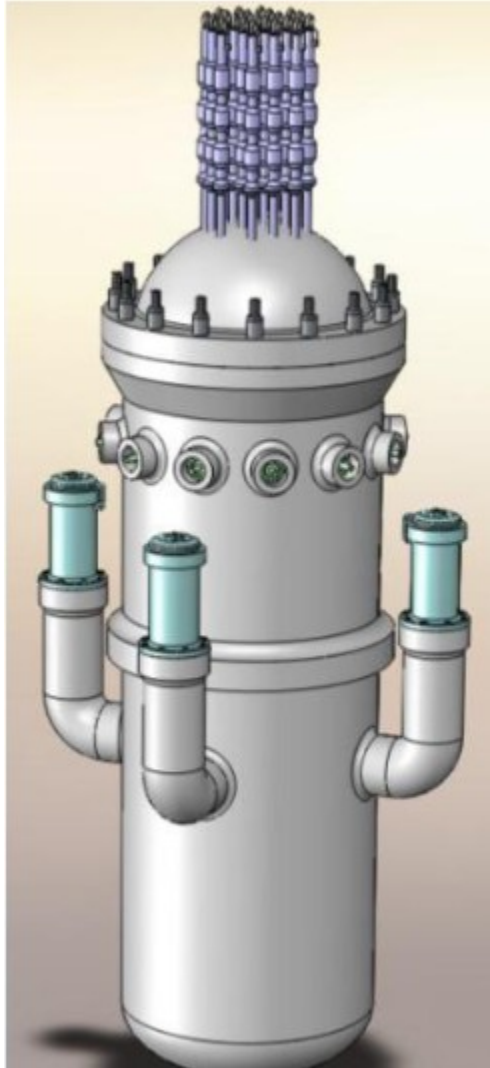
AP1000

Mehrere Reaktoren nutzen gemeinsame Systeme / hier: passive Notkühlung



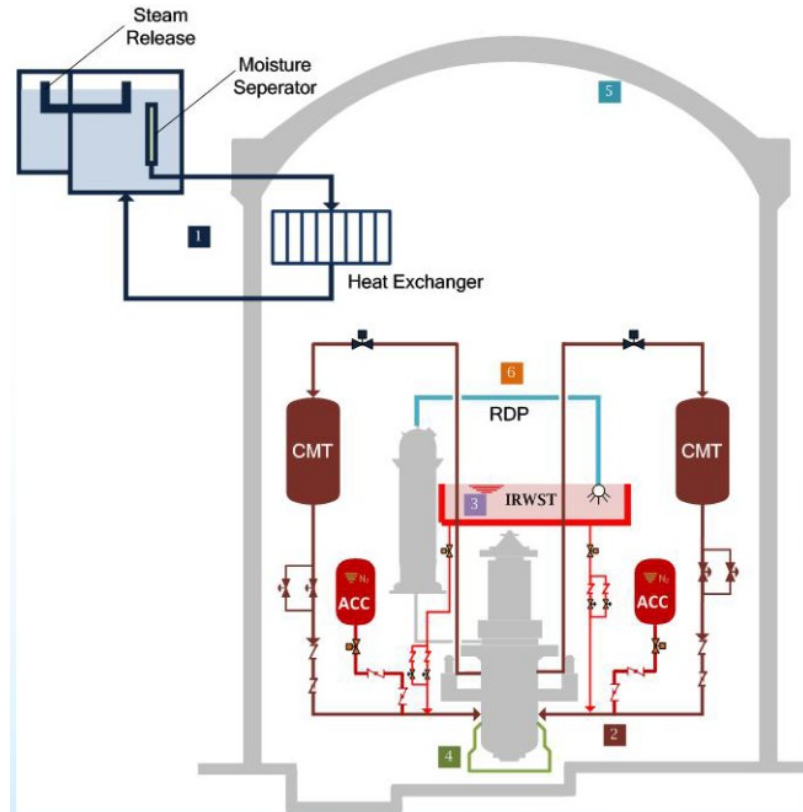
Bildquelle: Tom Mundy: NuScale SMR Technology, UK IN SMR; Manchester, UK, September 25, 2014

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

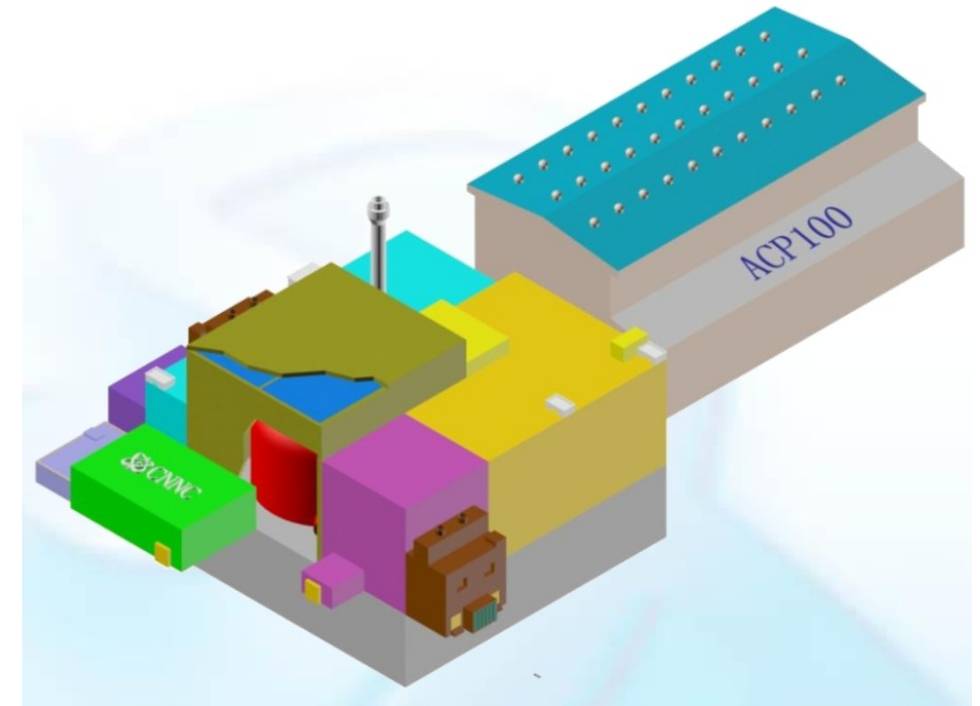


Starke Integration

Druckwasserreaktor, entspricht GEN-III+



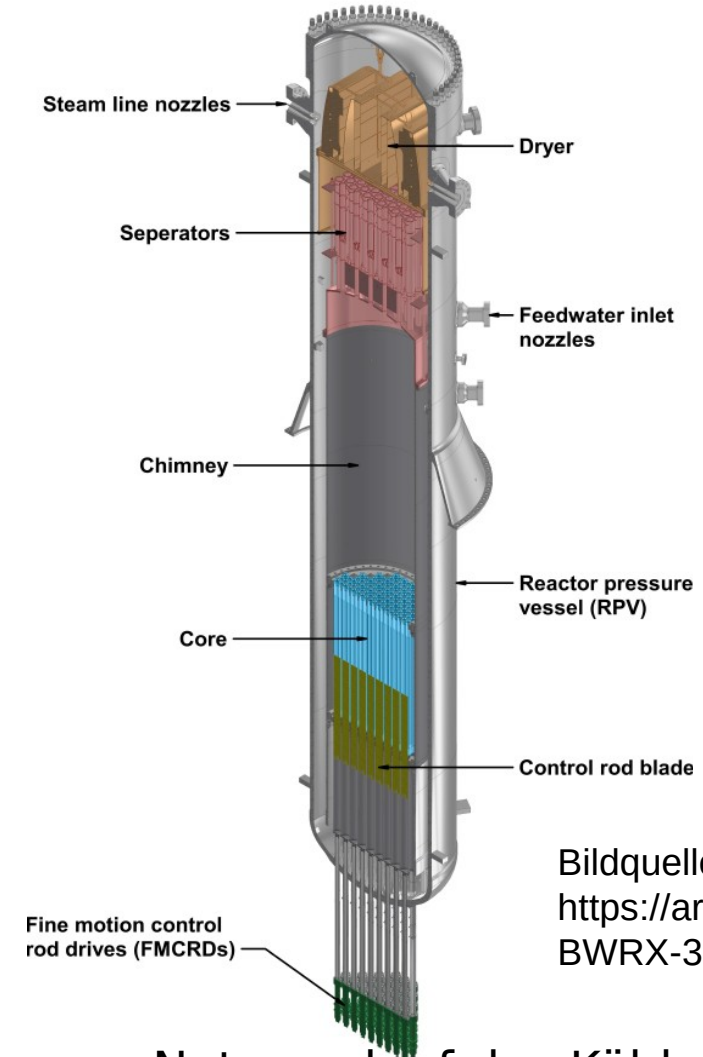
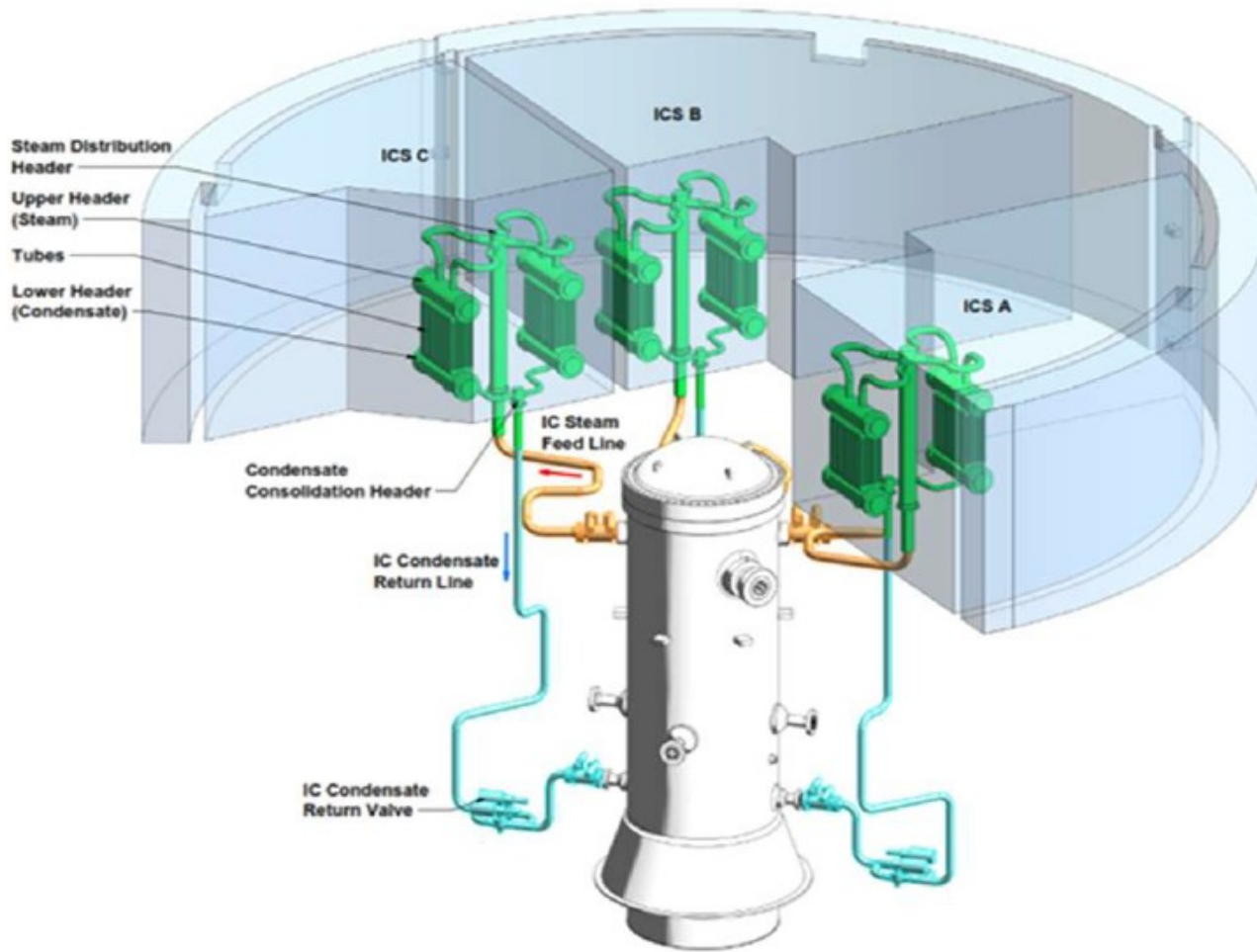
Passive Sicherheitssysteme



Eher ein Beispiel für eine Einzelblockanlage

CNNC (China National Nuclear Corporation)

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



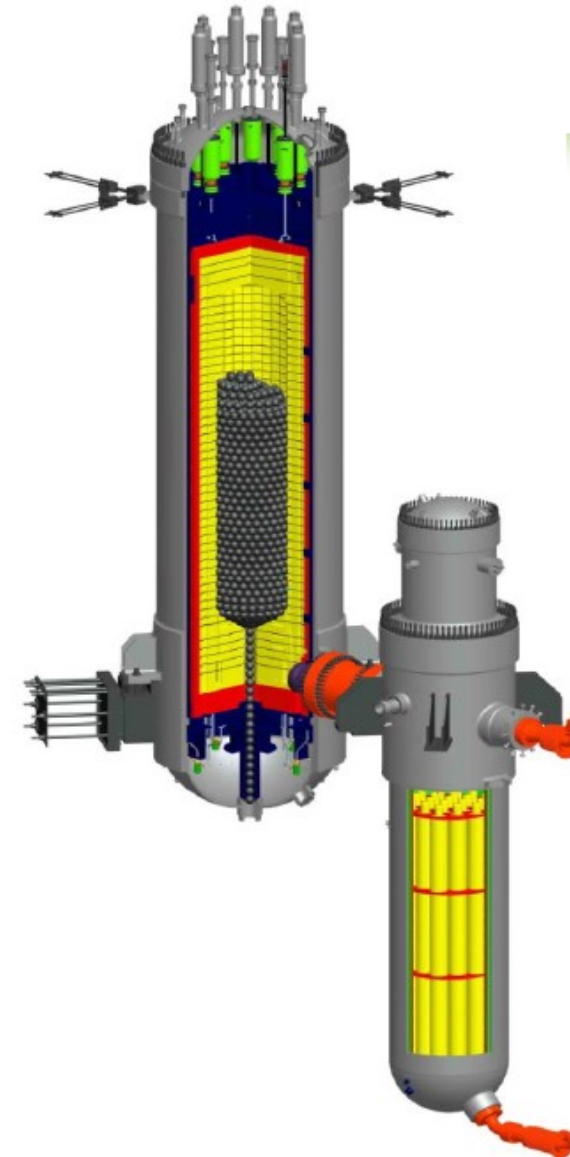
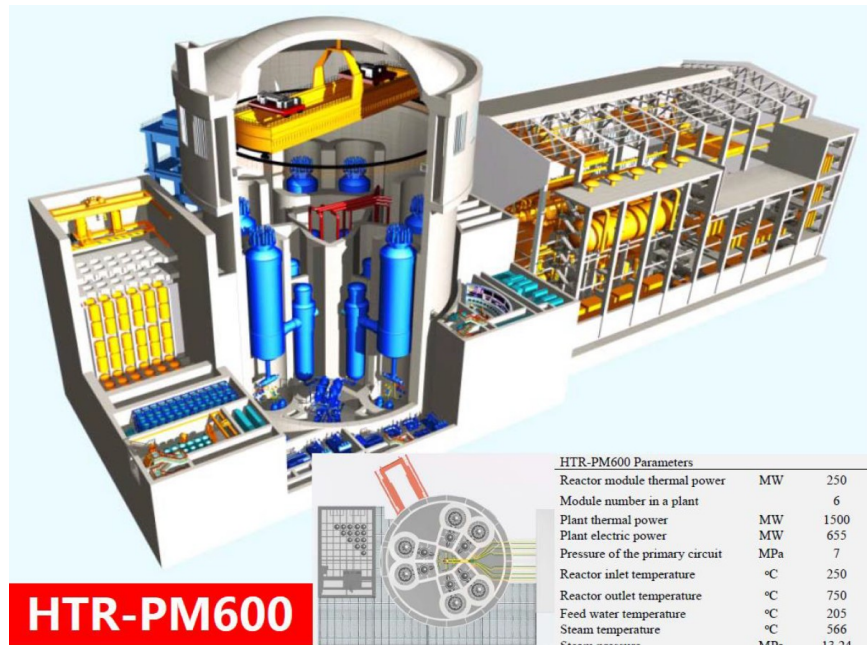
Bildquelle:
https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf

- 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

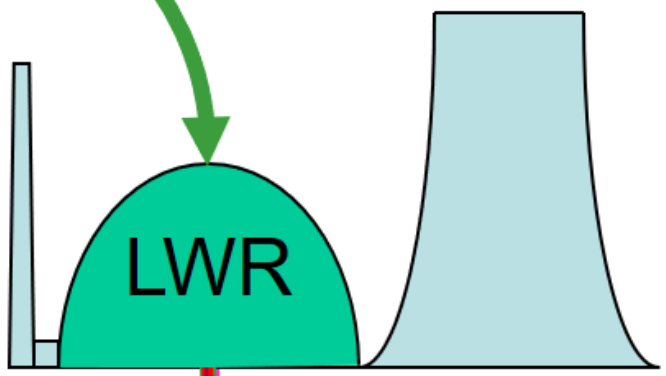
- Zwillingsanlage in Inbetriebnahme in China (Rongcheng, Province Shandong)
- Kühlmittel: Helium (70 Bar, 250 → 750 °C)
- Dampferzeuger / Dampfturbine
- 2 x 250 MW_{th} 2 x 100 MW_{el}
- Geplant: 6 Reaktoren in gemeinsamem Containment



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

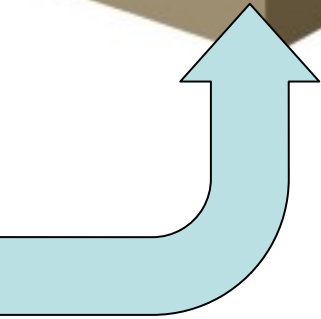
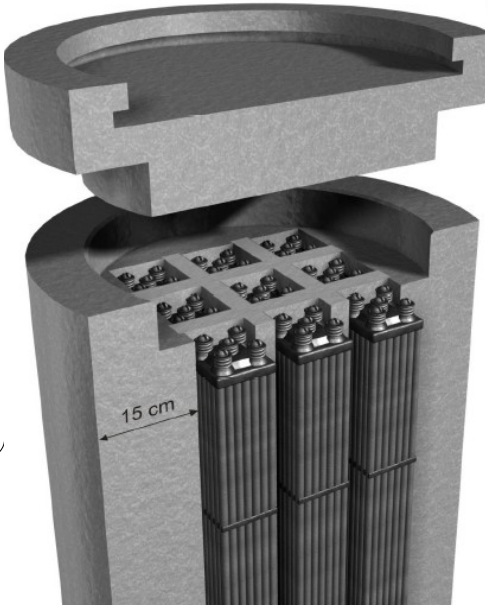
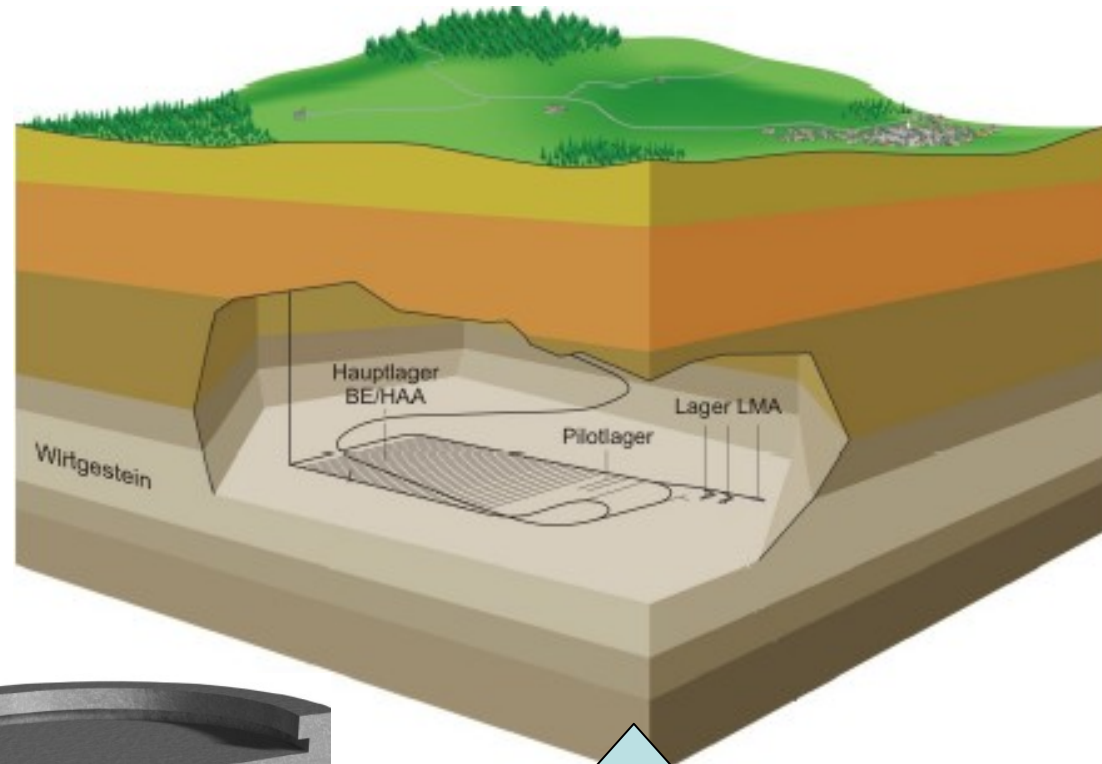
Entsorgung des hochaktiven Abfalls – direkte Tiefenlagerung

U-238 + U-235



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

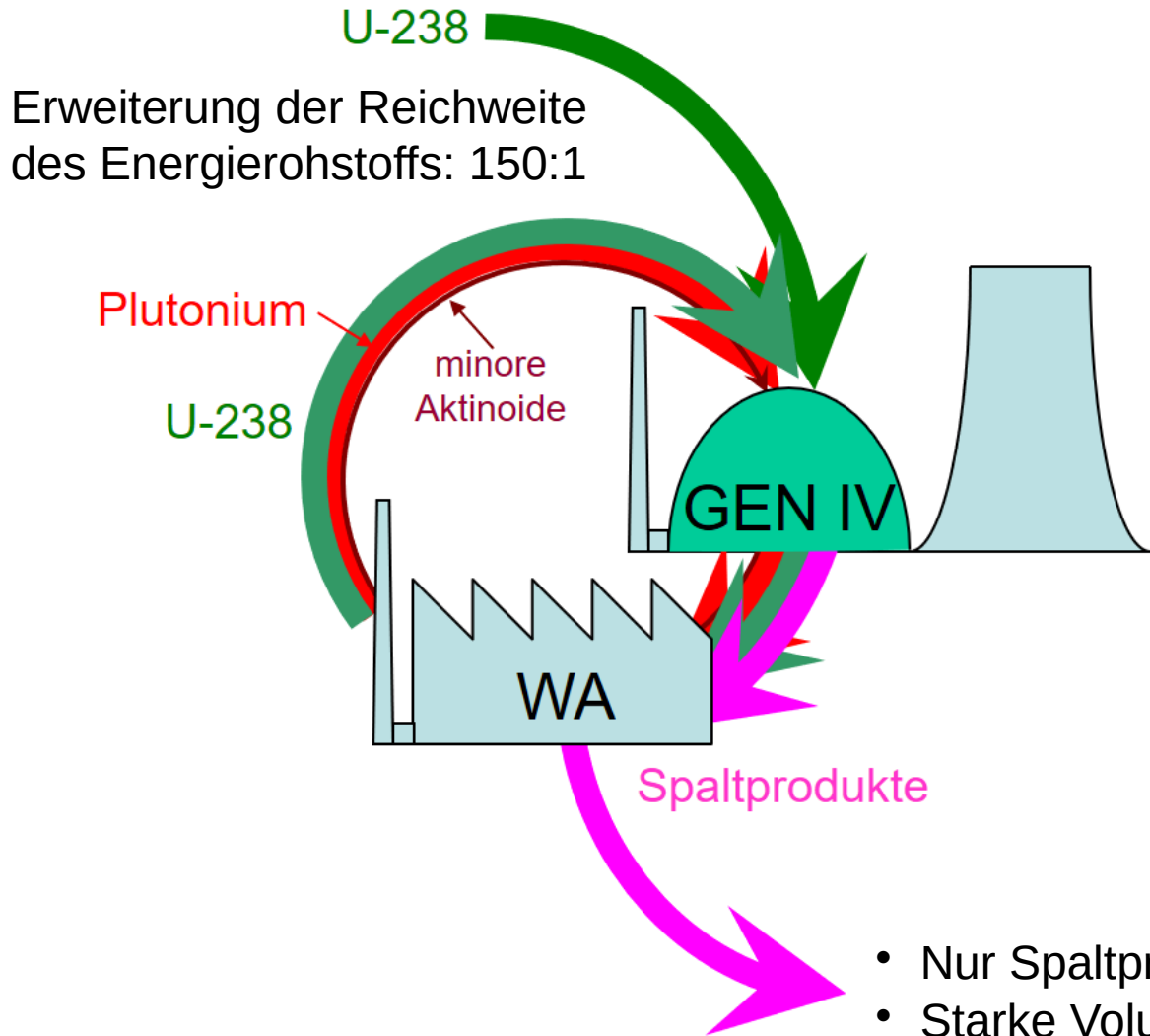
Direkte Tiefenlagerung der Brennelemente



Kanister (min. 15 cm Stahl)

Bild aus: NAGRA: Technical report 01-04

Innovation GenIV: Geschlossener Brennstoffzyklus



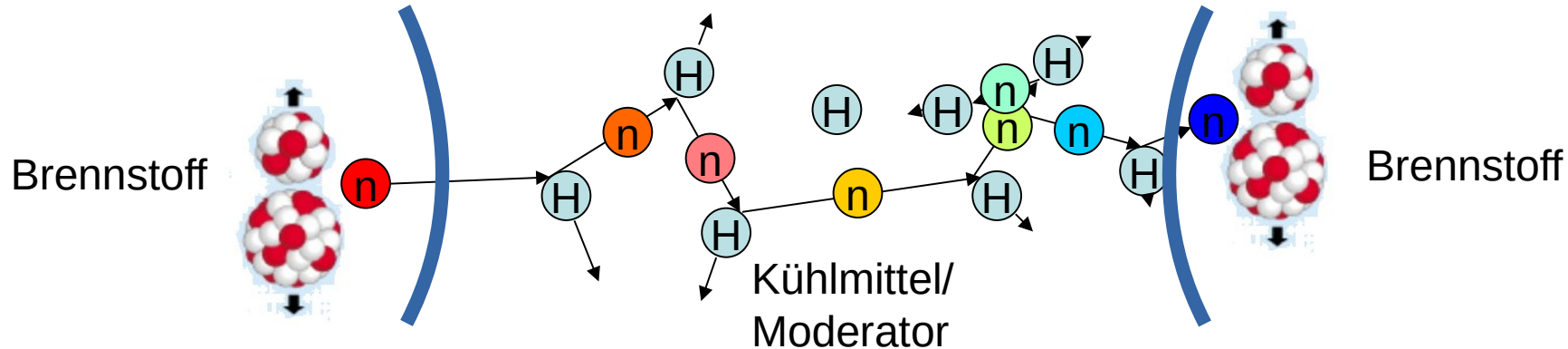
Voraussetzungen:

- 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 alphanotoxischer 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

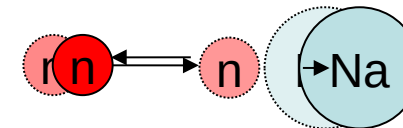
Kernmasse = Neutronenmasse



Maximaler Energieverlust 100%
guter Moderator

Reaktor mit schnellen Neutronen

Kernmasse \gg Neutronenmasse

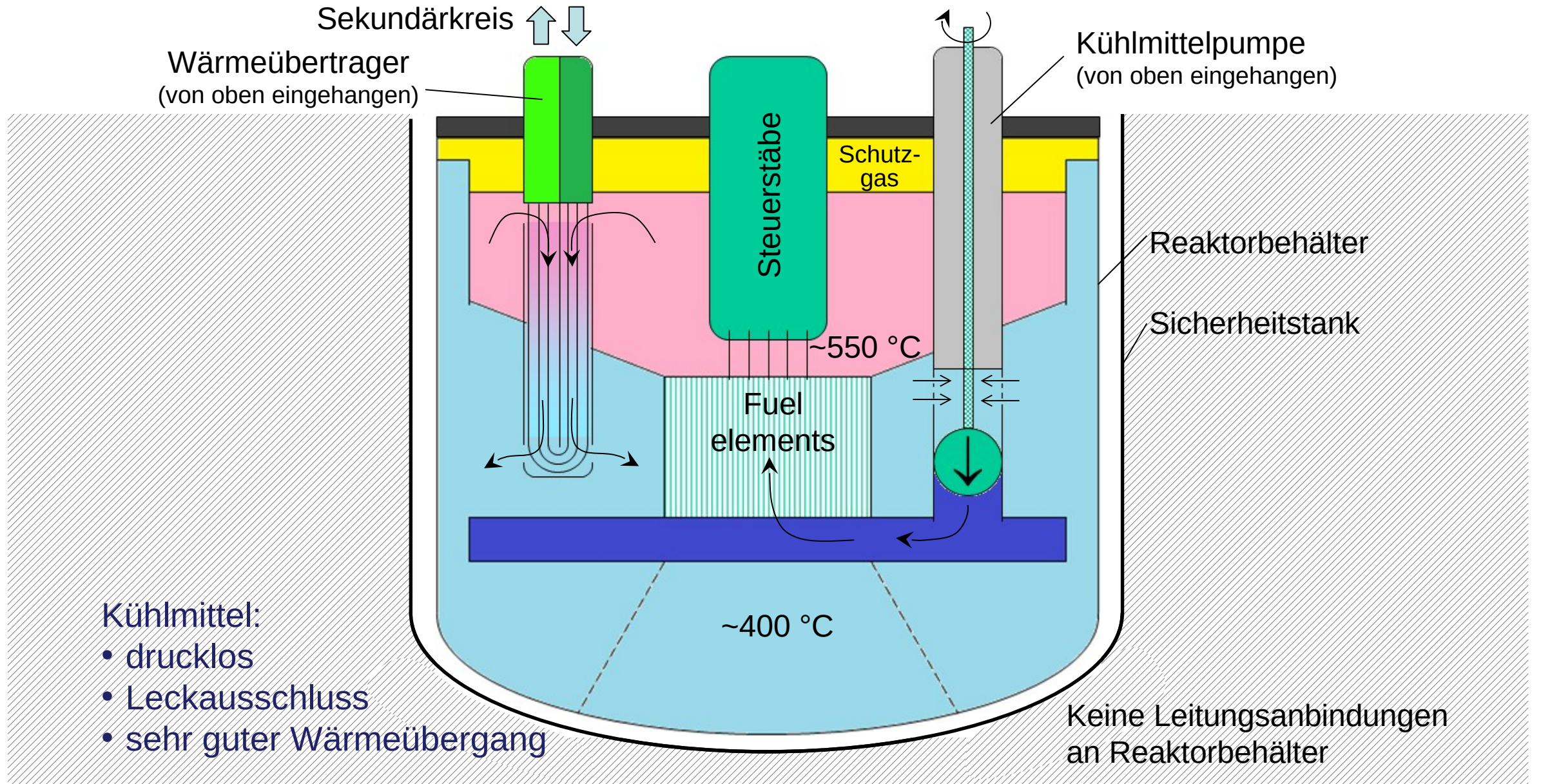


Maximaler Energieverlust klein
schlechter Moderator

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

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

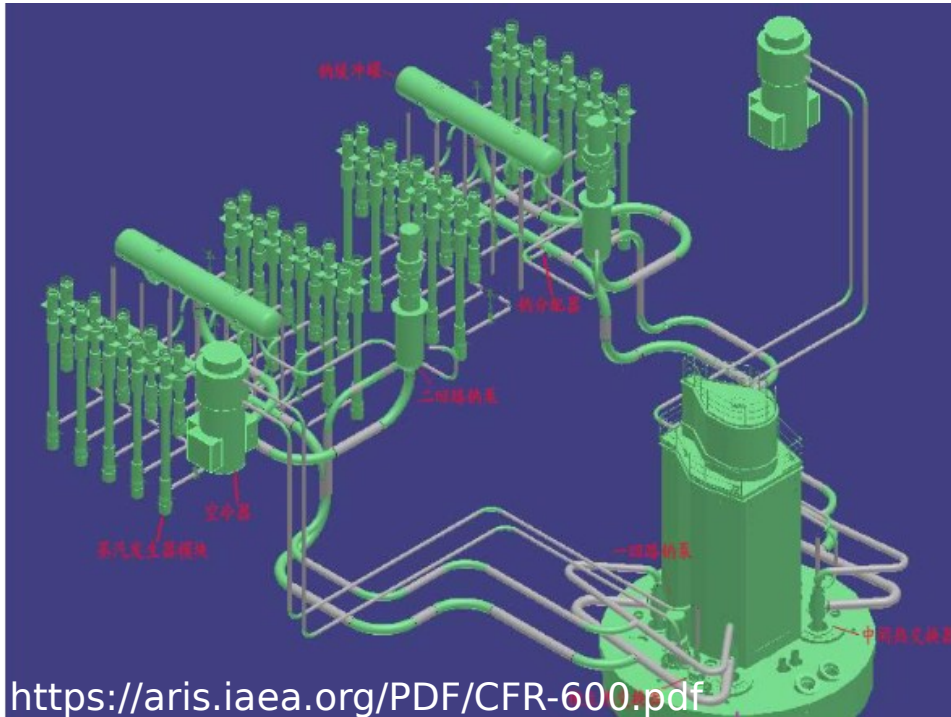
Natriumgekühlte Reaktoren - Leckausschluss durch Poolbauweise



Kühlmittel:

- drucklos
- Leckausschluss
- sehr guter Wärmeübergang

Kurz vor Inbetriebnahme: Der Natriumgekühlte Brüter in Xiapu, China



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



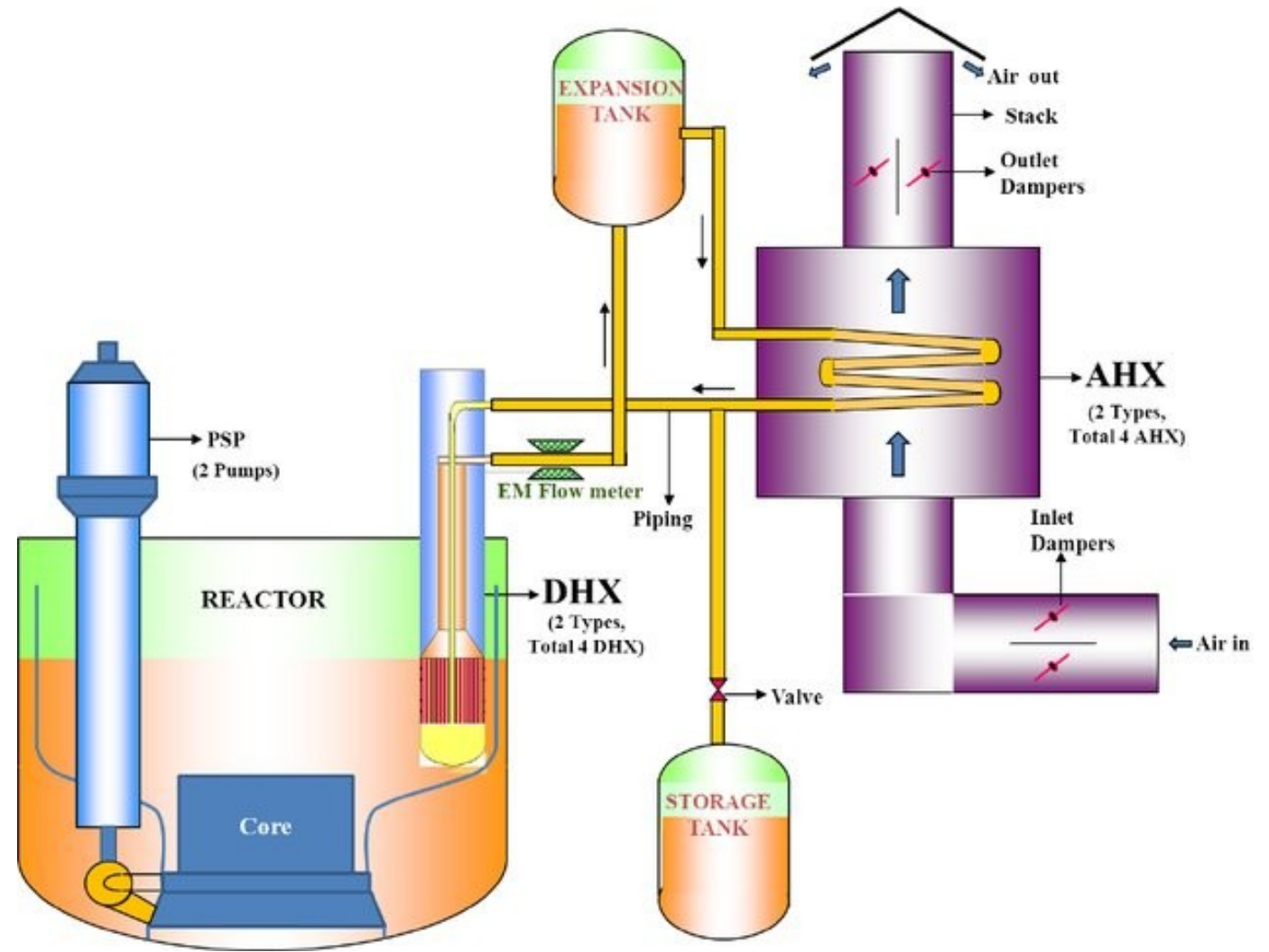
Pool-Reaktor mit Sekundärschleifen und Dampferzeugern ROSATOM liefert Erstbeladung und erste Umladung

- 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>

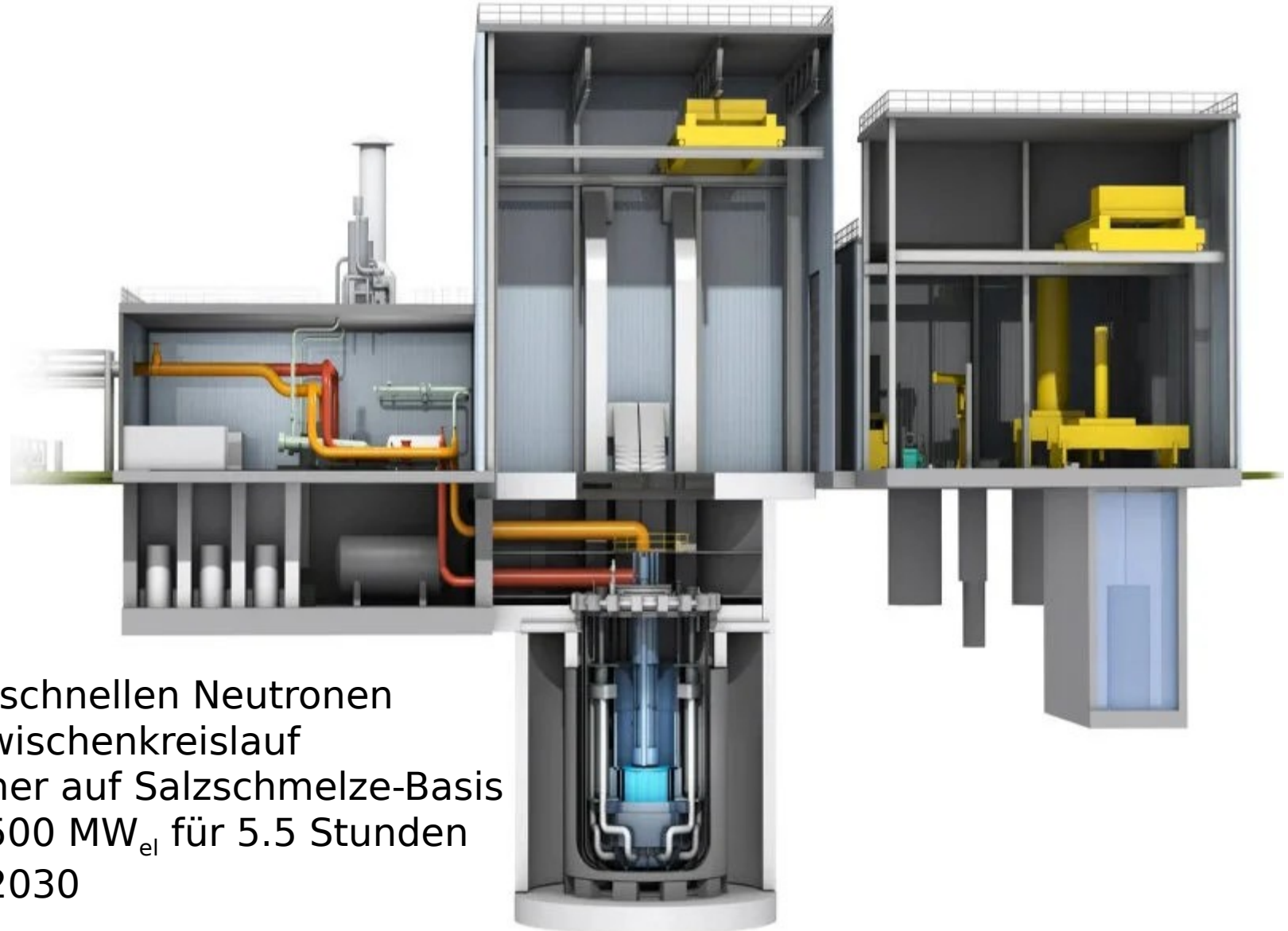
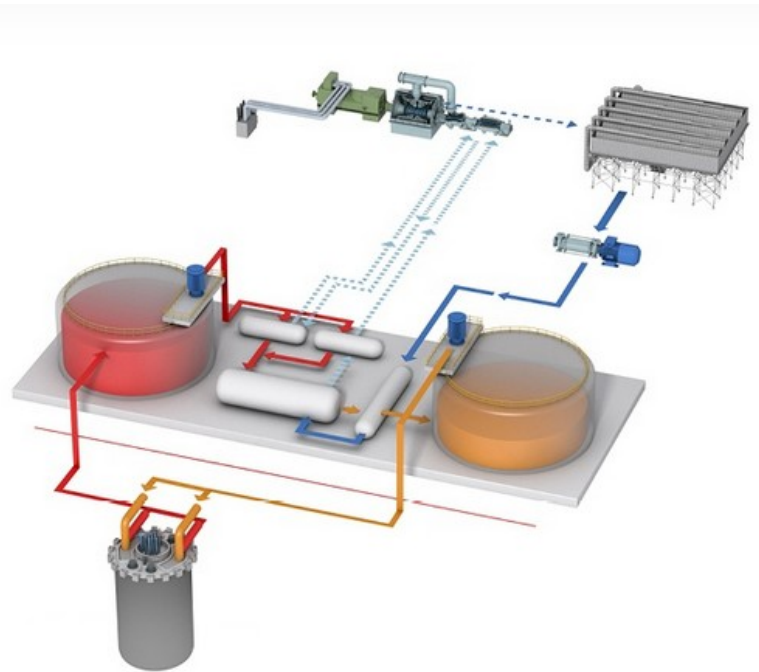
Indien: PFBR = Prototype Fast Breeder Reactor, Kalpakkam, Brennstoffbeladung hat begonnen

- 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



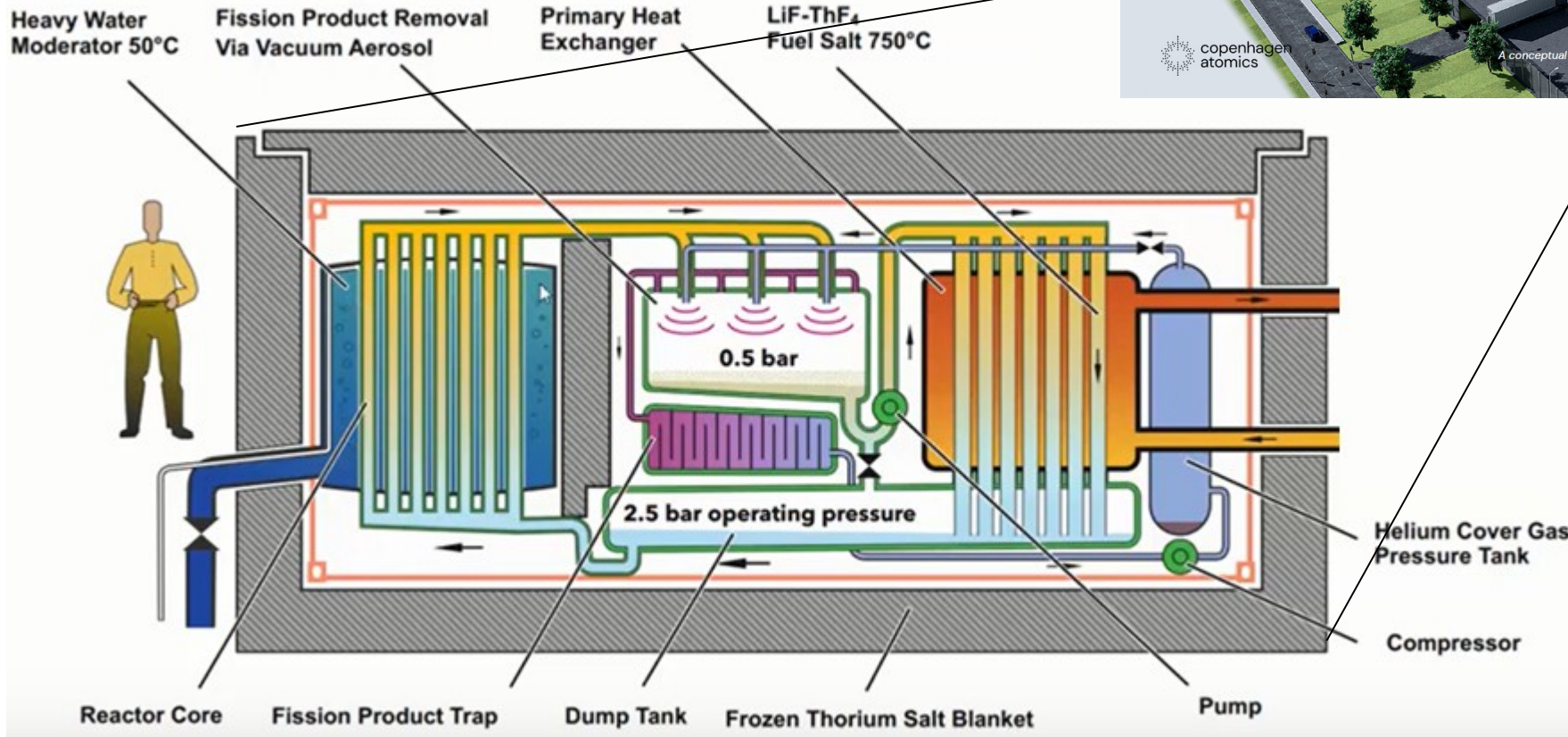
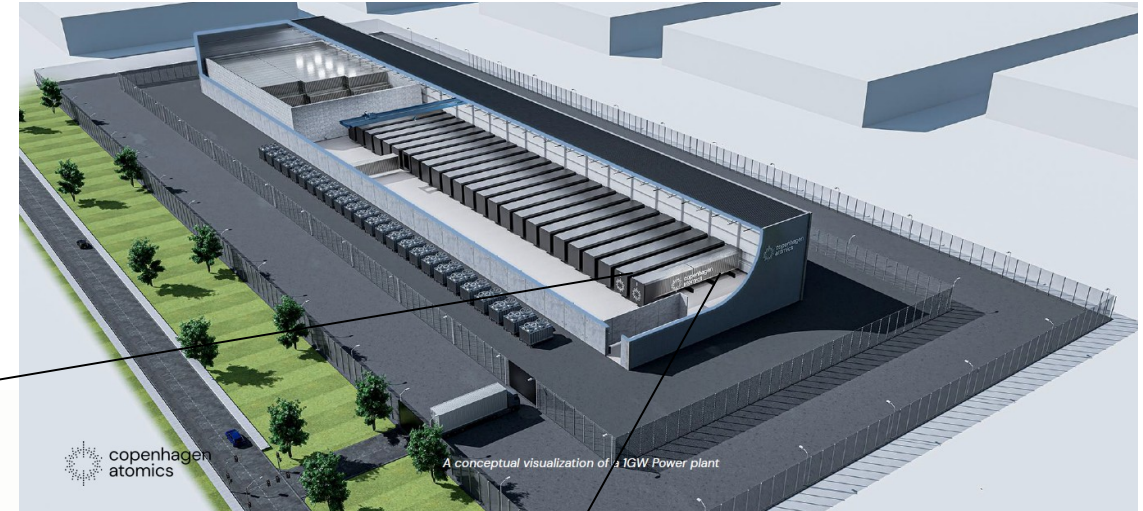
- Natriumgekühlter Reaktor mit schnellen Neutronen
- Pool-Bauweise mit Natrium- Zwischenkreislauf
- Hochtemperatur-Energiespeicher auf Salzschnmelze-Basis
- 345 MW_{el} mit Spitzenlast von 500 MW_{el} für 5.5 Stunden
- In Planung in Wyoming, USA, 2030

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

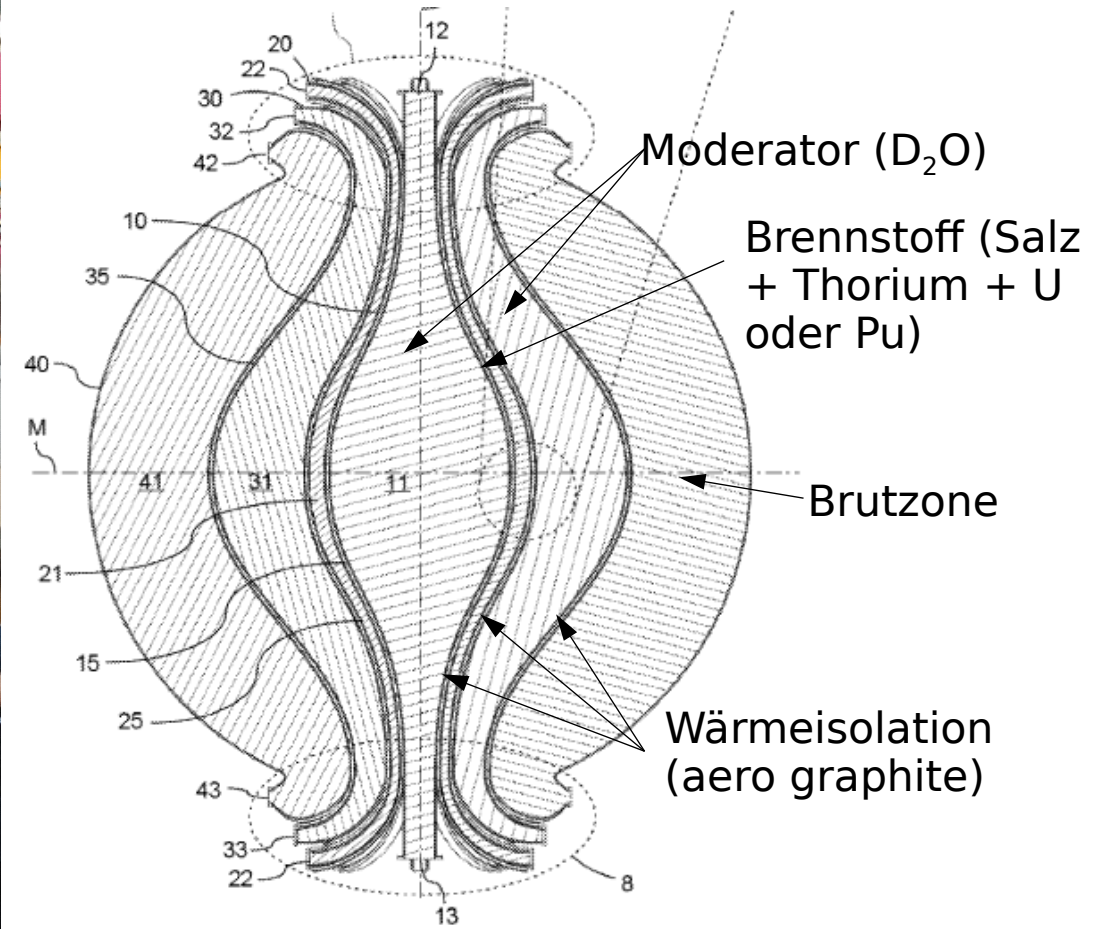
Bildquelle: Advances in Small Modular Reactor, Technology Developments, supplement to ARIS, IAEA, 2020

Testanlage des «Copenhagen Waste Burners» mit Salzschnmelze



Photo: Copenhagen Atomics

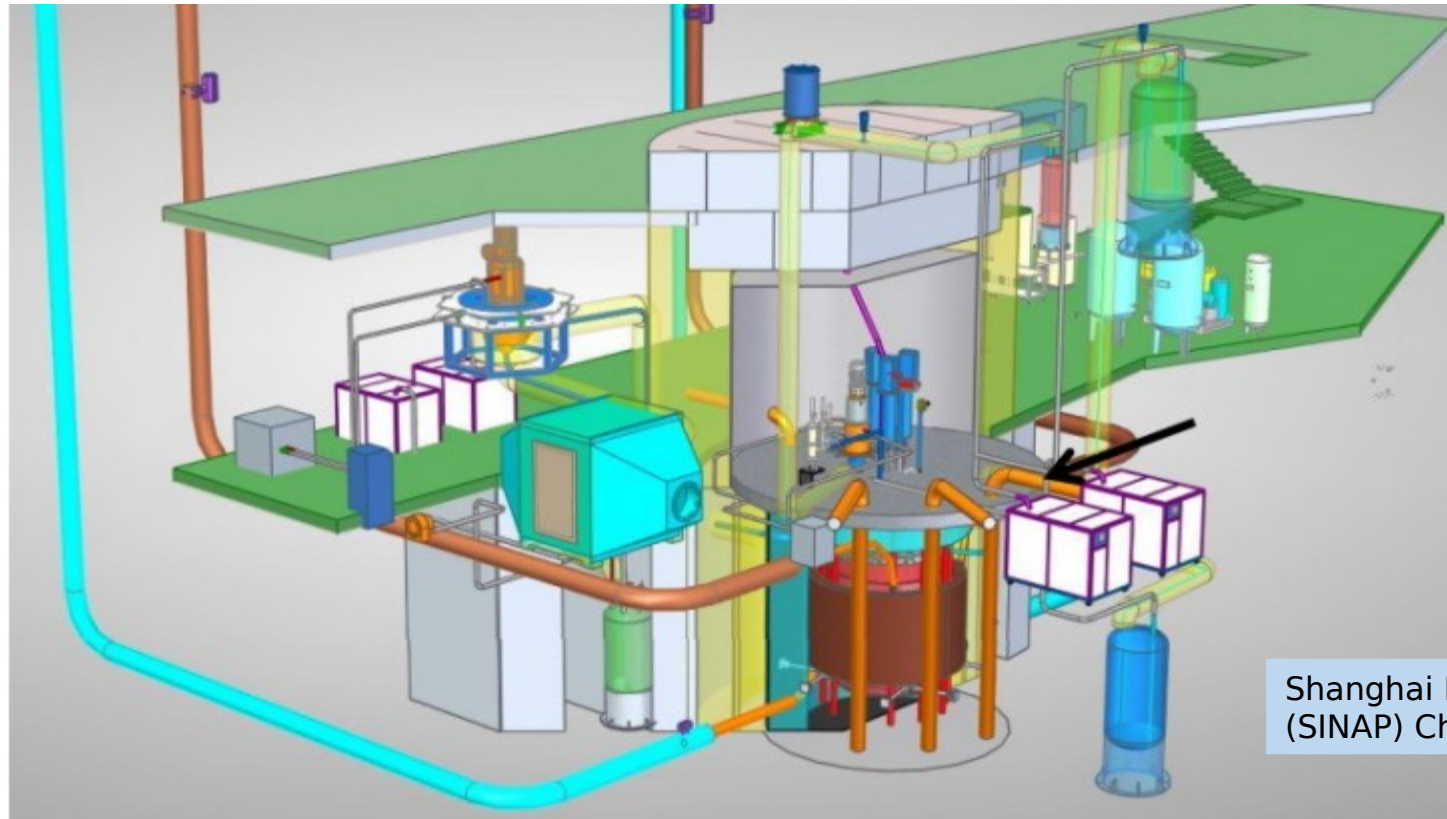
mit Elektroheizung, Salzschnmelze wird bei 560 °C zirkuliert



Aufbau des Reaktors

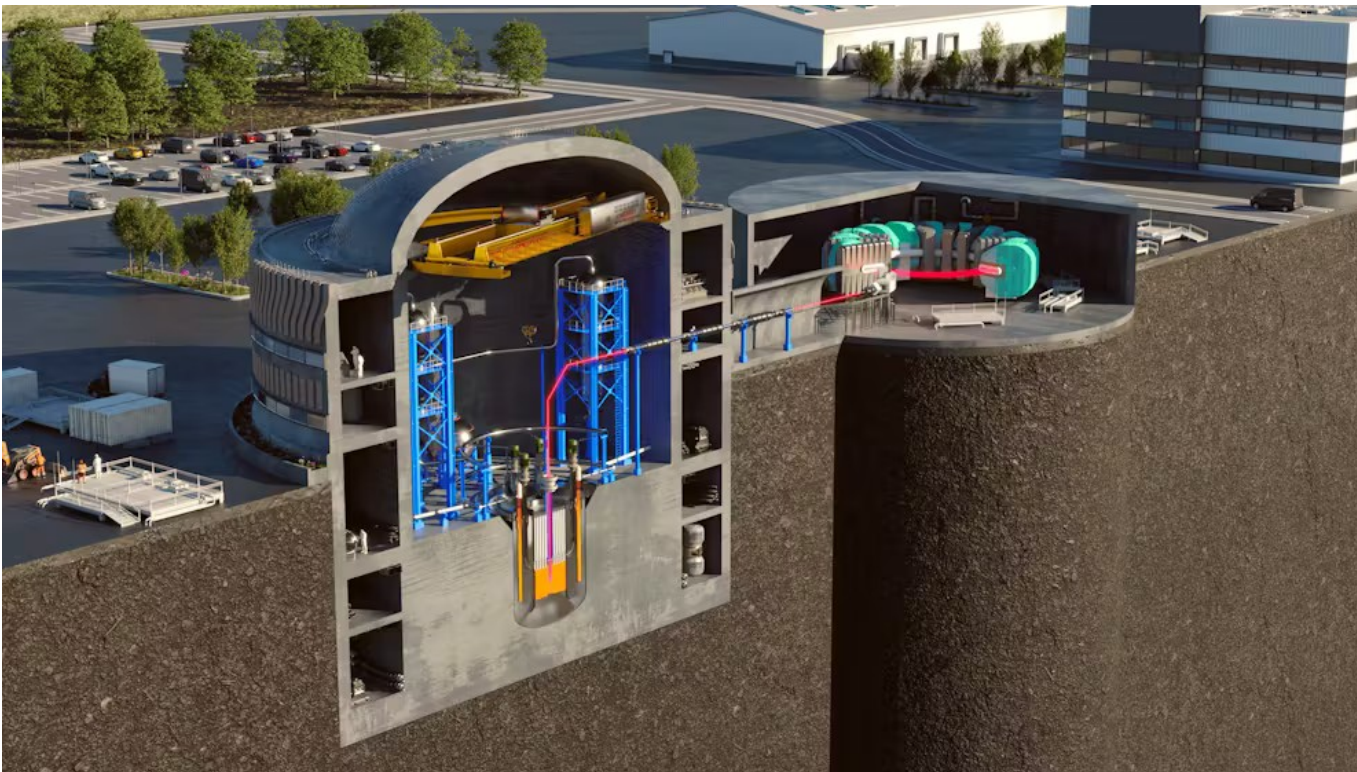
Bildquelle: Aslak et al., A method of operating a nuclear reactor core of a molten salt nuclear reactor, Patent DK202170281A1, 2021.

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



- 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

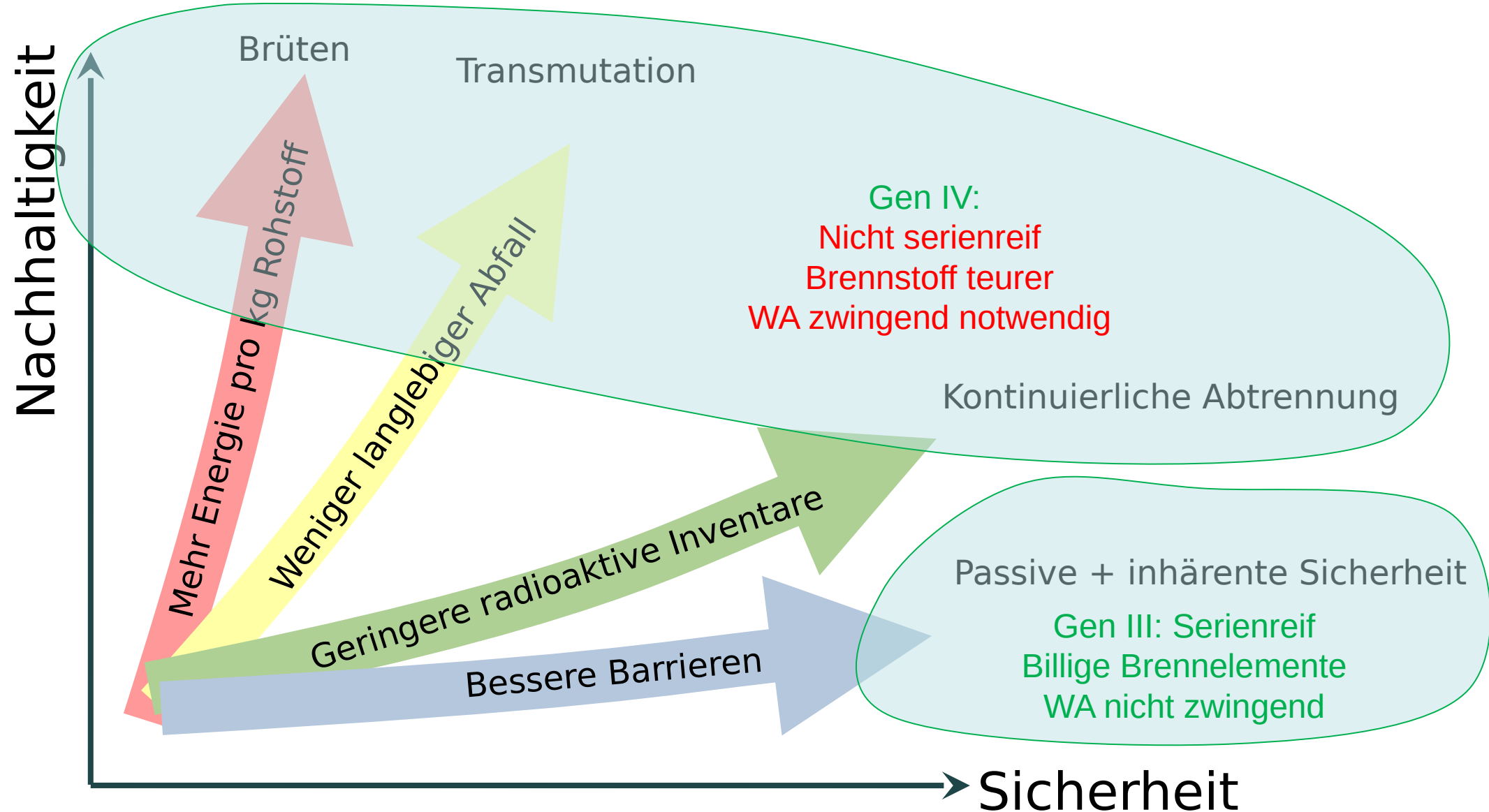
Transmutex - Subcritical Transmutation Accelerated Reactor using Thorium (TMX-START)



- 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