

Kernenergie - Wann steigt Deutschland wieder ein? - 26. Oktober 2023, Frankfurt am Main

Potenziale moderner Kernenergie

Wie weiter mit "Atommüll" und CO₂-freier Stromerzeugung?

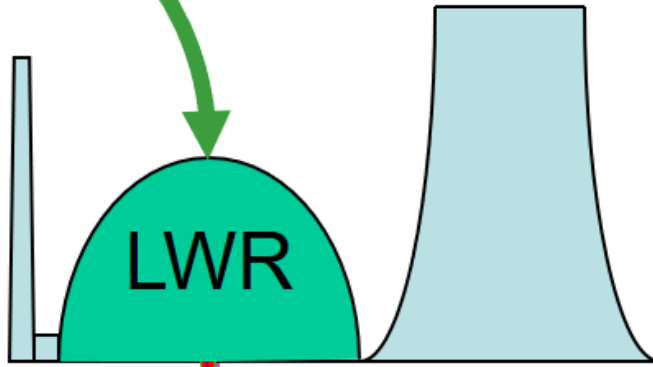
Horst-Michael Prasser

Inhalt

- «Atommüll» und Innovationspotential
- Nukleare Sicherheit
- Technologische Hauptlinien
- Potentiale und Neubaudynamik

Entsorgung des hochaktiven Abfalls (Beispiel Schweiz)

U-238 + U-235



LWR

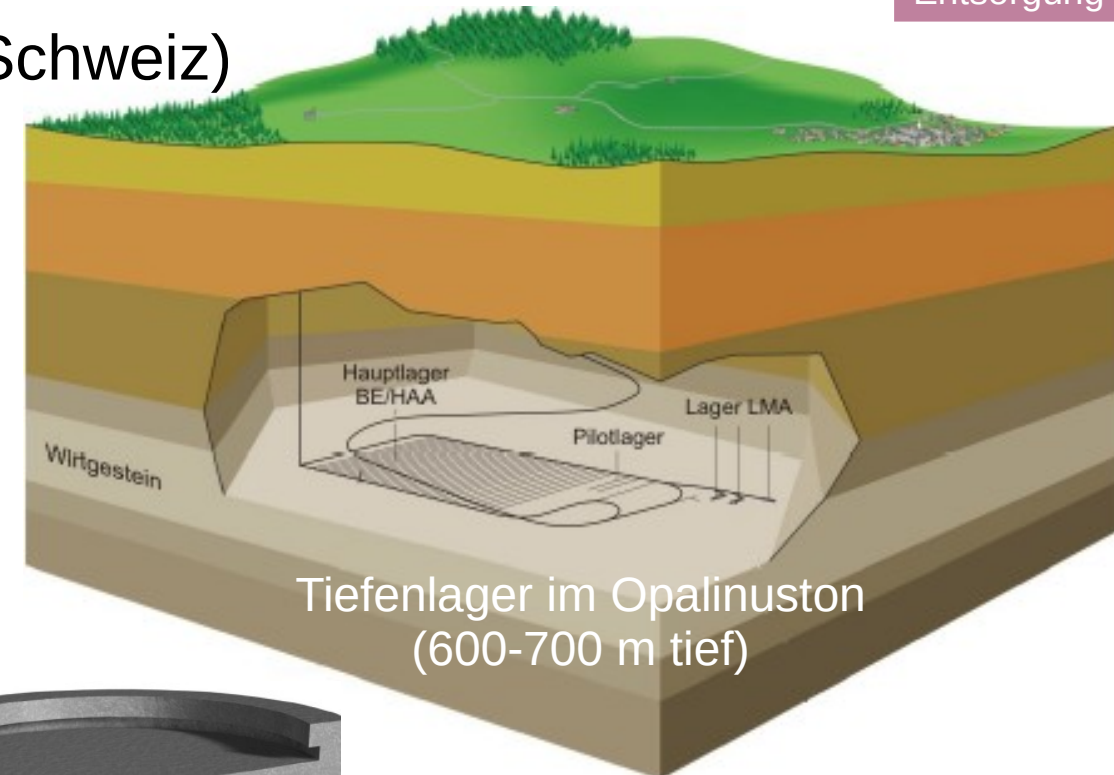
Minore Aktinoide

Plutonium

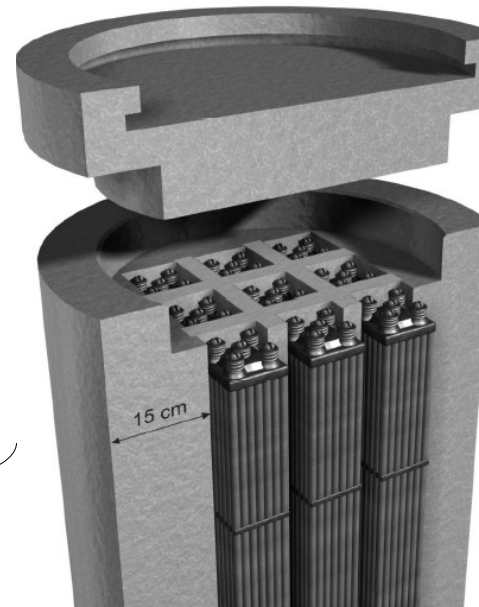
U-238 + etwas U-235

Spaltprodukte

Direkte Tiefenlagerung
der Brennelemente



Tiefenlager im Opalinuston
(600-700 m tief)

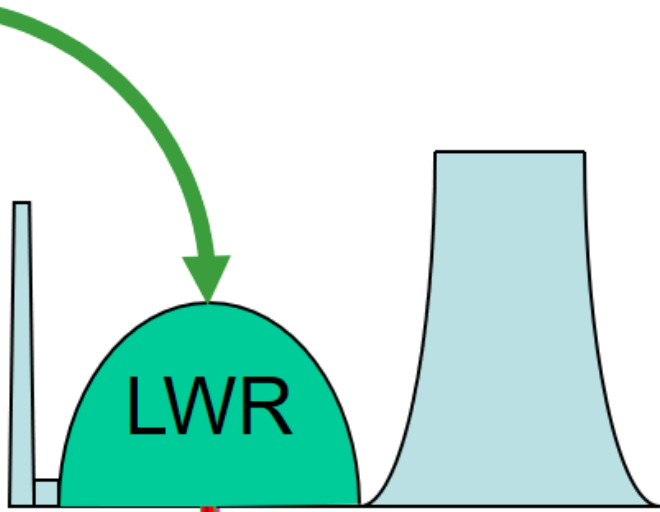


Kanister (min. 15 cm Stahl)

Bild aus: NAGRA: Technical report 01-04

Auf Abfallkomponenten zugeschnittene Barrieren

U-238 + U-235



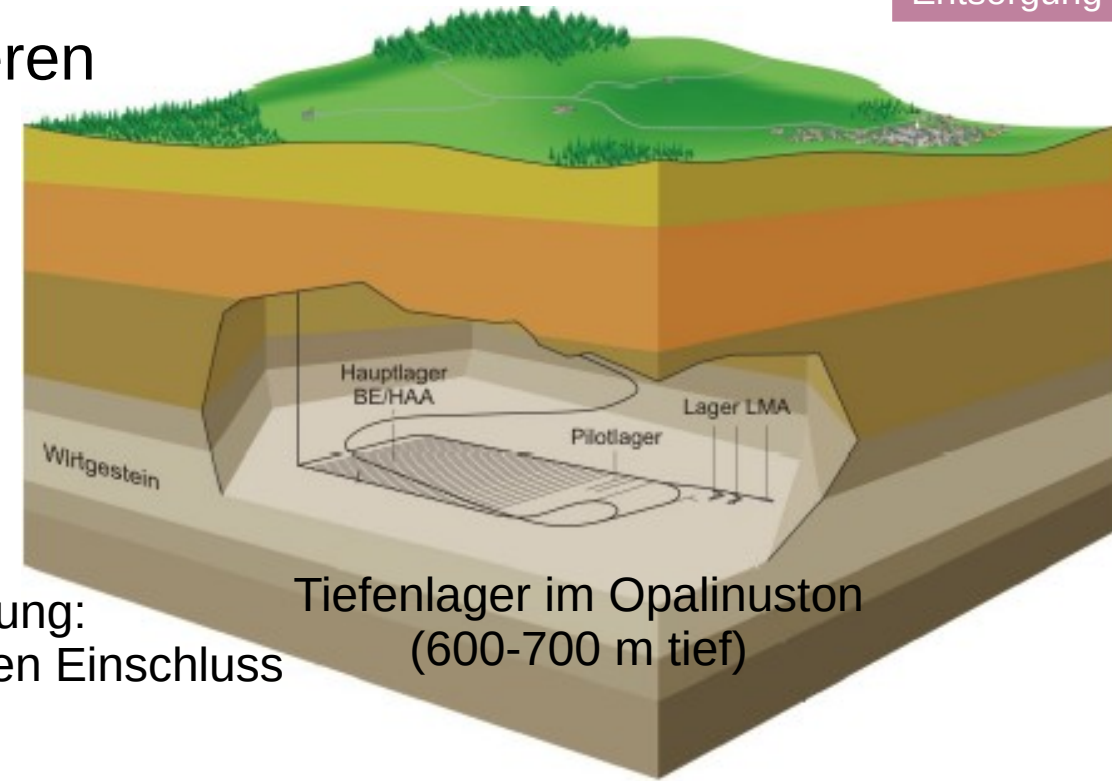
- Minore Aktinoide
- Plutonium
- U-238 + etwas U-235
- Spaltprodukte

Direkte Tiefenlagerung der Brennelemente

Gesetzliche Anforderung:
Nachweis des sicheren Einschluss
für 1 Mio. Jahre

- Zerfall: 10'000 Jahre → gute Rückhaltung im Tongestein
- Zerfall: 300'000 Jahre → gute Rückhaltung im Tongestein
- Zerfall: 4.5 Mrd. Jahre → In der Natur ohnehin vorhanden
- Zerfall: 500 Jahre → sicherer Einschluss im Kanister für 100'000 Jahre

(in Sicherheitsbetrachtungen werden 10'000 Jahre unterstellt
→ Sicherheitsfaktor 10)

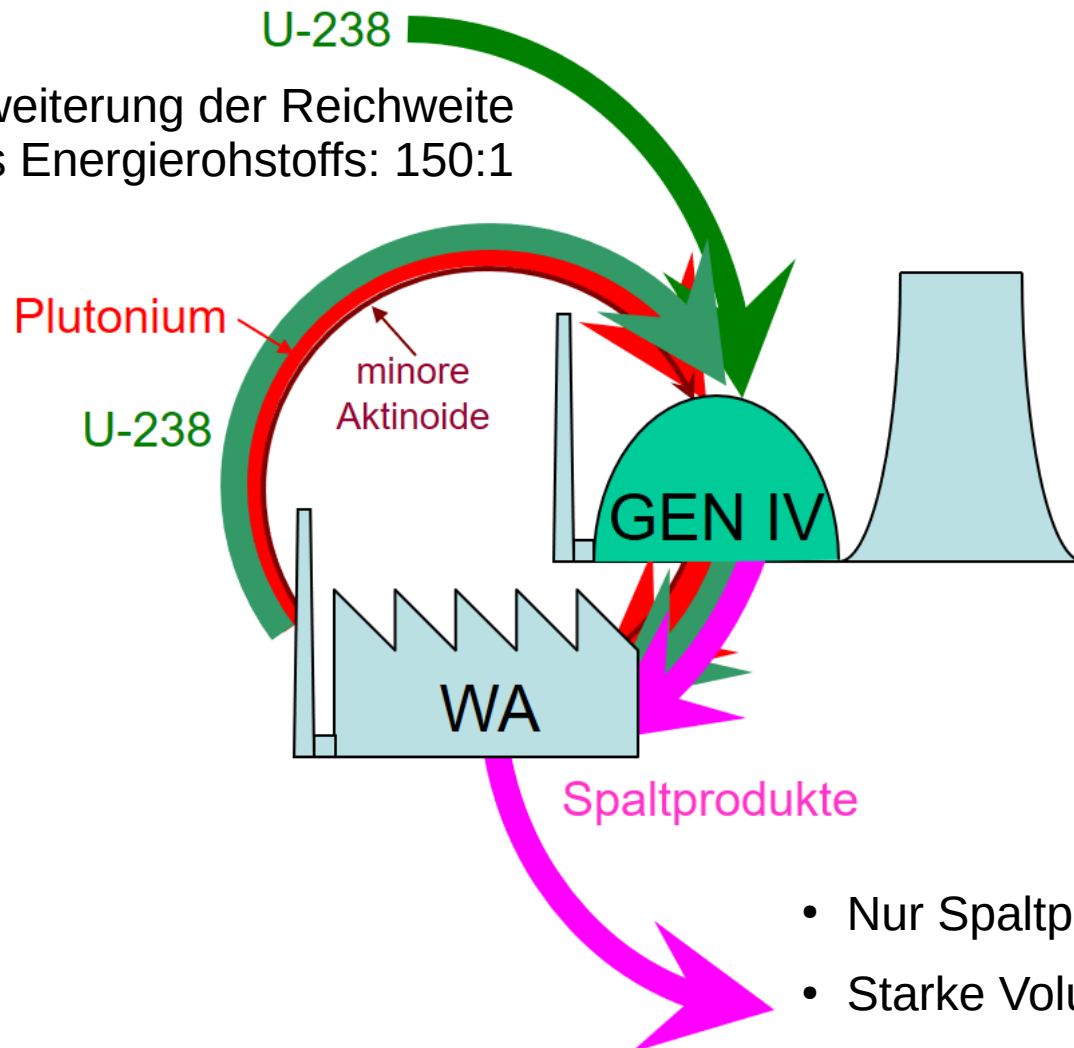


Tiefenlager im Opalinuston
(600-700 m tief)

Innovation: Geschlossener Brennstoffzyklus

Voraussetzungen:

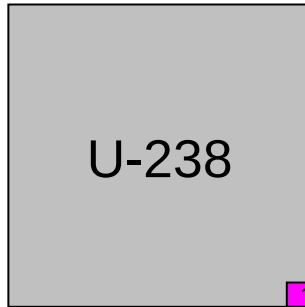
- Reaktoren mit schnellen Neutronen (Gen-IV)
 - Brüten
 - Transmutation
- Spezialfall: Thorium
- Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente
 - Partitioning = erweitert um Abtrennung der minoren Aktinoide
- Tiefenlager weiterhin erforderlich
- Akzeptanz der Anhäufung alphatoxischer Aktinoide in den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

Brüten mit Uran und Thorium

Natururan:

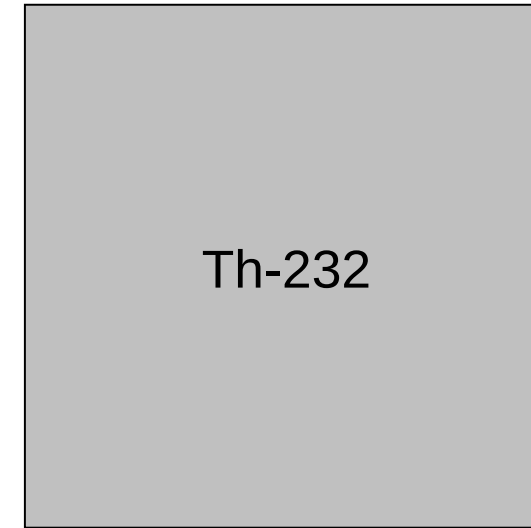


U-238

U-235, 70'000 kWh_{el}/kg U-nat

Es gibt ~150 mal mehr U-238
als U-235 in der Natur

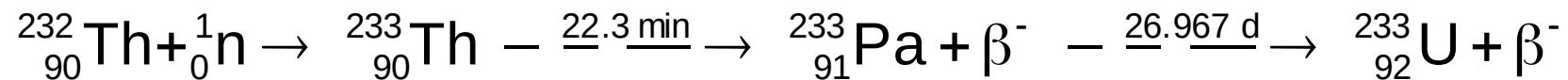
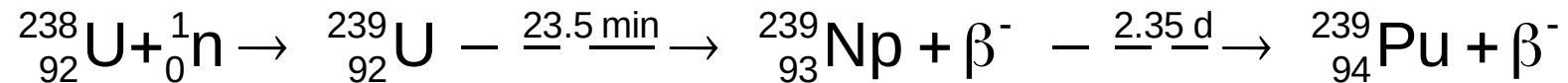
Thorium:



Th-232

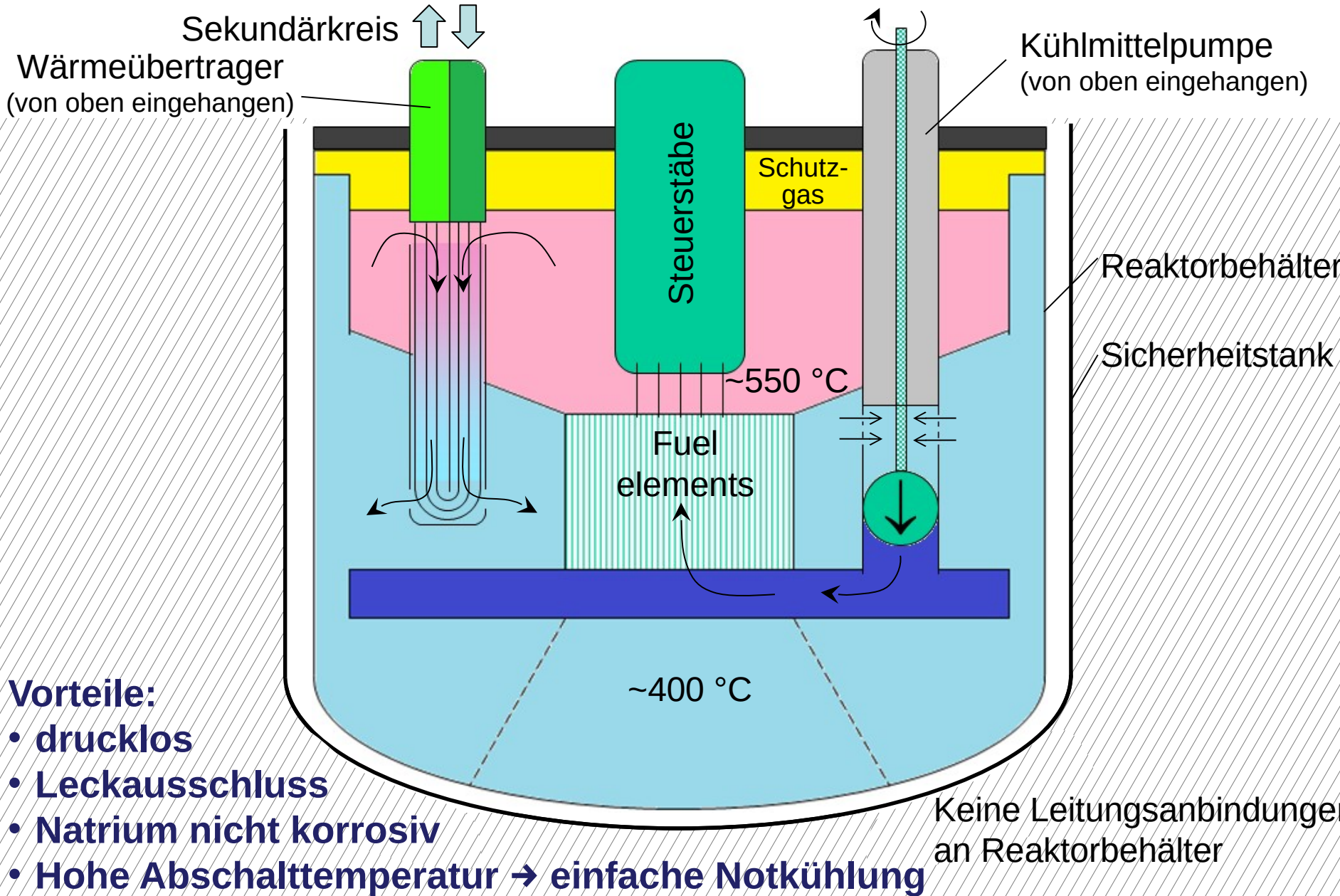
Es gibt ~3 mal mehr Th-232
als U-238 in der Natur

Attraktive Konversionsprozesse:



Neues Spaltmaterial

Natriumgekühlte Reactoren - Leckausschluss durch Poolbauweise



Vorteile:

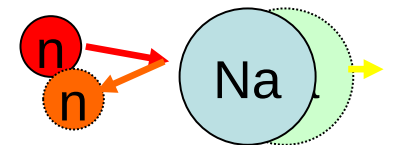
- **drucklos**
- **Leckausschluss**
- **Natrium nicht korrosiv**
- **Hohe Abschalttemperatur → einfache Notkühlung**

Wasserstoff: A=1
starker Moderator



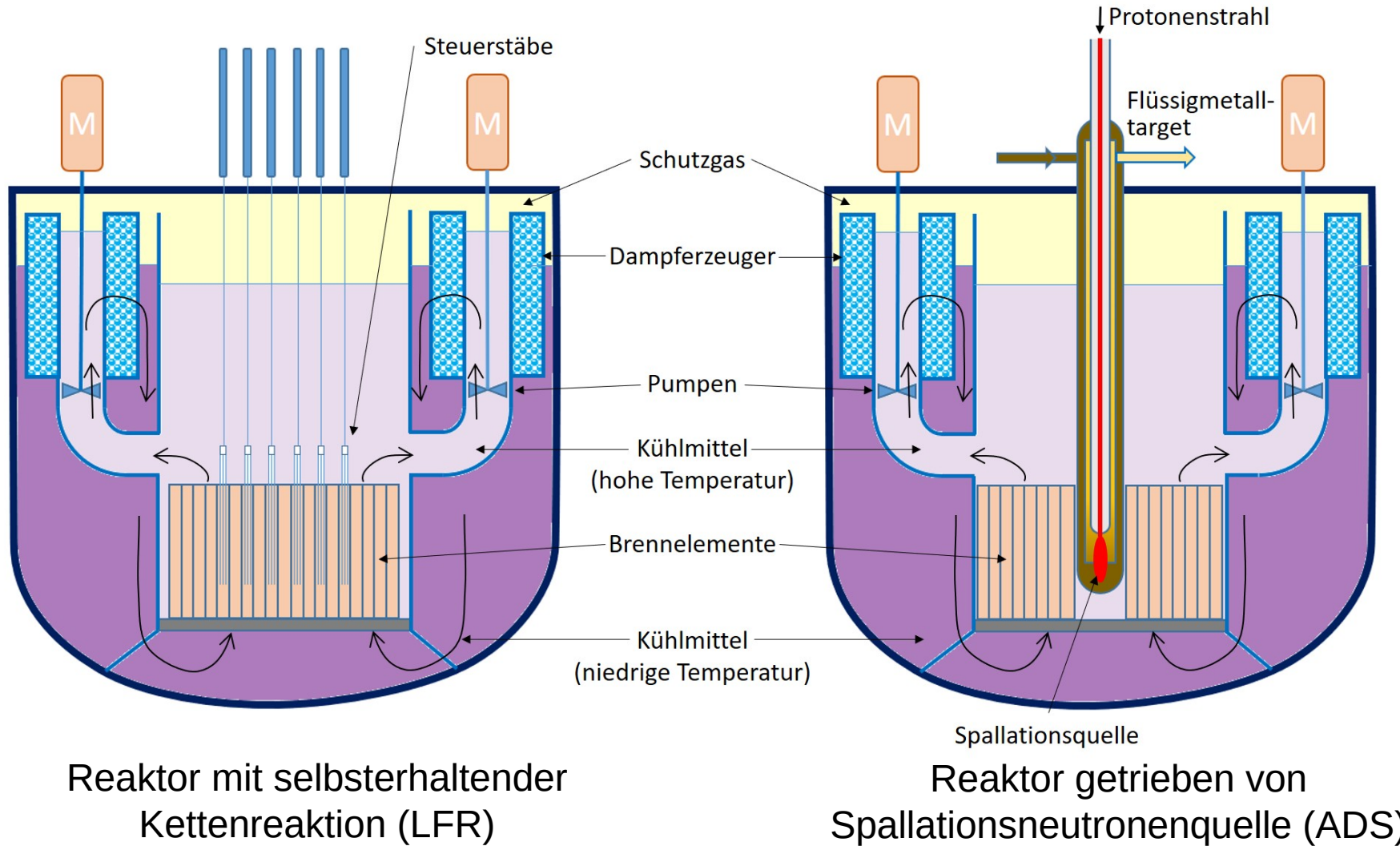
Neutron übergibt viel Impuls an Moderator-kern

Natrium: A=23
kaum Abbremsung



Neutron prallt ab

Bleigekühlte Reaktoren mit schnellen Neutronen



Vorteil:

- Maximale Beladung mit Transuranen

Nachteil:

- Grosser und teurer Beschleuniger nötig

Vorteile von Blei

- Wie Natrium, doch noch schnellere Neutronen

oder Blei-Wismut:

- Weniger chemisch reaktiv – **jedoch stark korrosiv gegenüber Stahl**

Salzschmelze-Reaktoren (Molten Salt Reactors = MSR)

Sehr viele Varianten:

- Fester / flüssiger Brennstoff
- Schnelle / thermische Neutronen
- Salzzusammensetzung

Vorteile von MSR (mit flüssigem Brennstoff):

- Kontinuierliche Brennstoff-Konditionierung
 - Keine Überschussreaktivität
 - Wenig parasitische Neutronenabsorber
 - Niedriges Inventar an flüchtigen Spaltprodukten
- Flexibles Brennstoffregime
- Einfacher Kernfänger – Drainagetank

Nachteile:

- Komplizierte Chemie der Salzschmelze
- Korrosivität

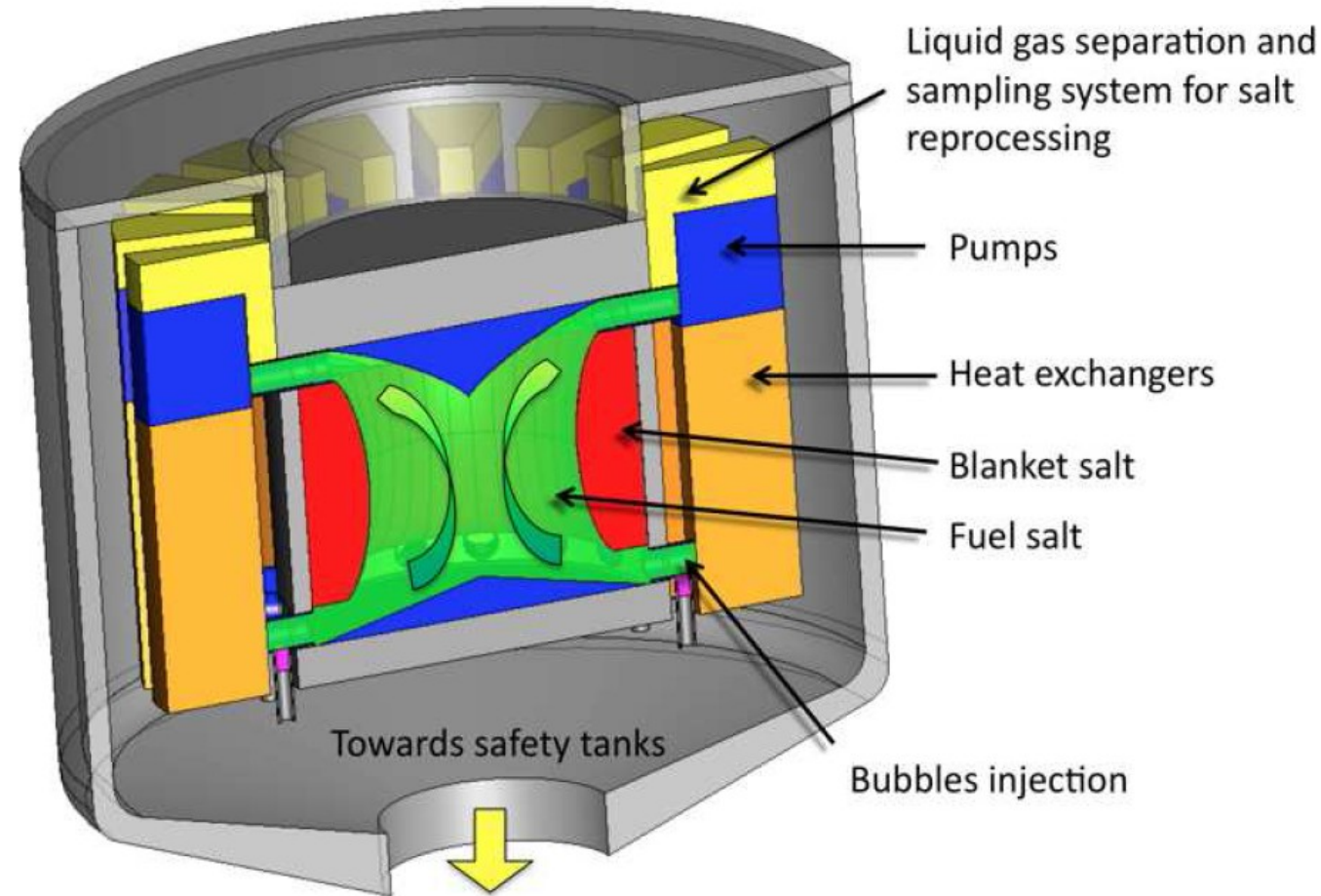
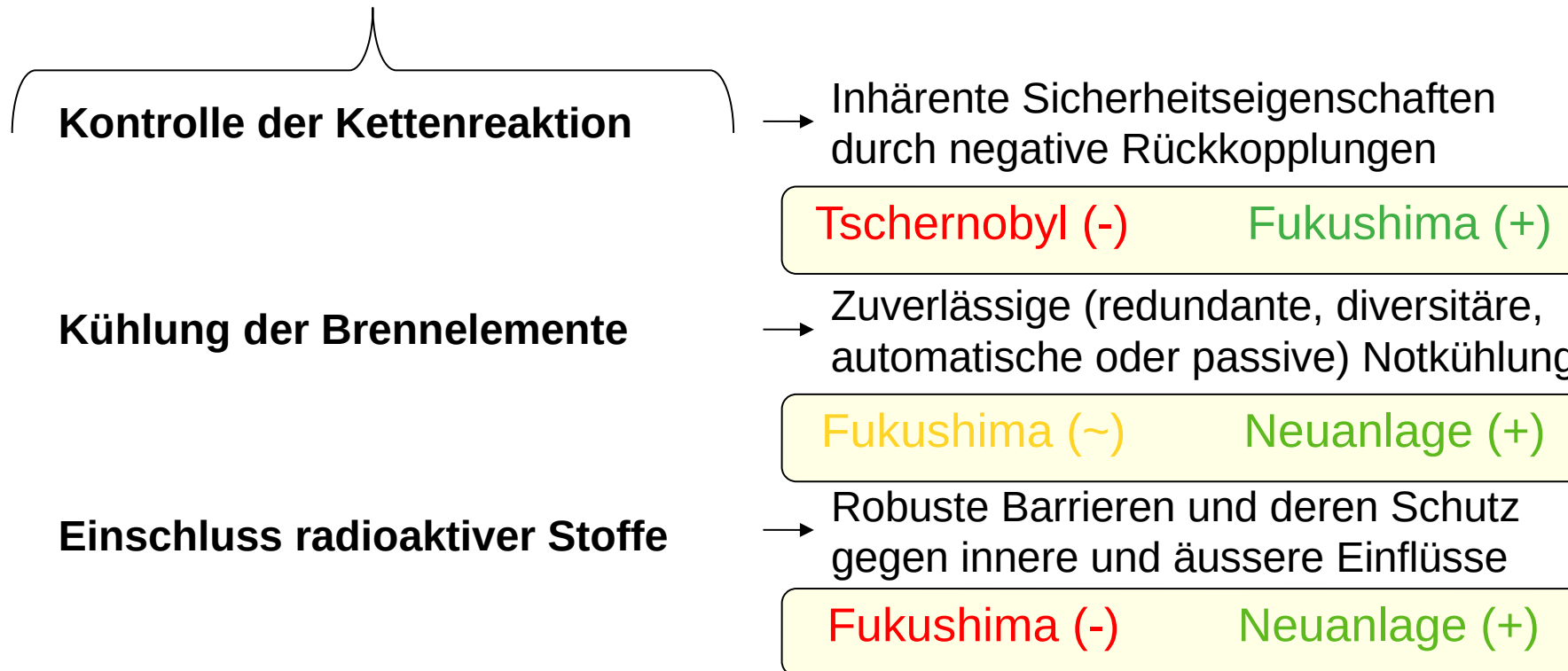


Bild aus: <https://aris.iaea.org/PDF/MSFR.pdf>

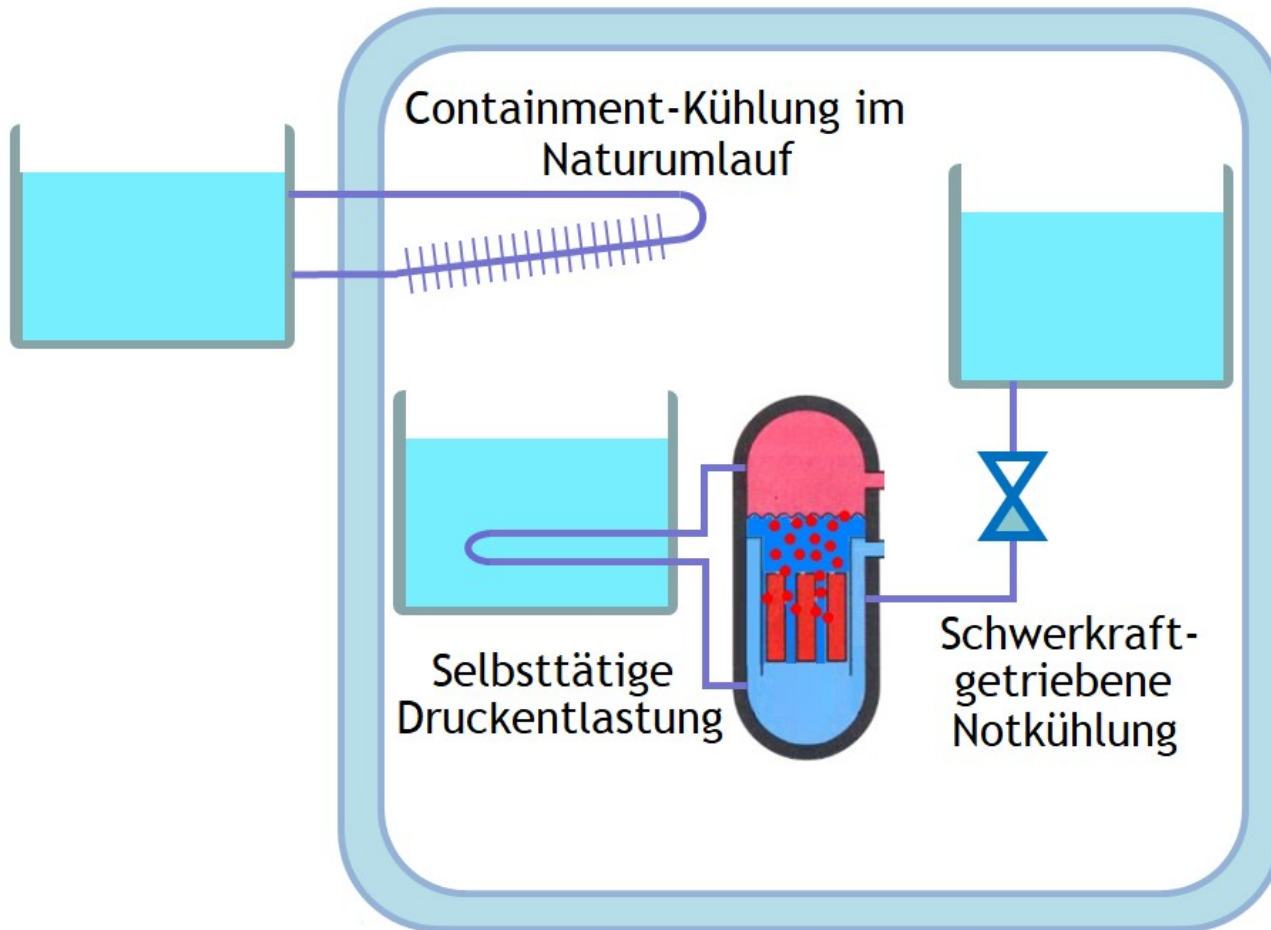
Schutzziele der Sicherheit von Kernanlagen

Begrenzung der Strahlenexposition



Ursache Wissenslücken? ... nein.

Passive Sicherheitssysteme (Gen III und Gen IV)



Autonome Systeme ohne Notstrombedarf

❖ **Autarkie:**

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

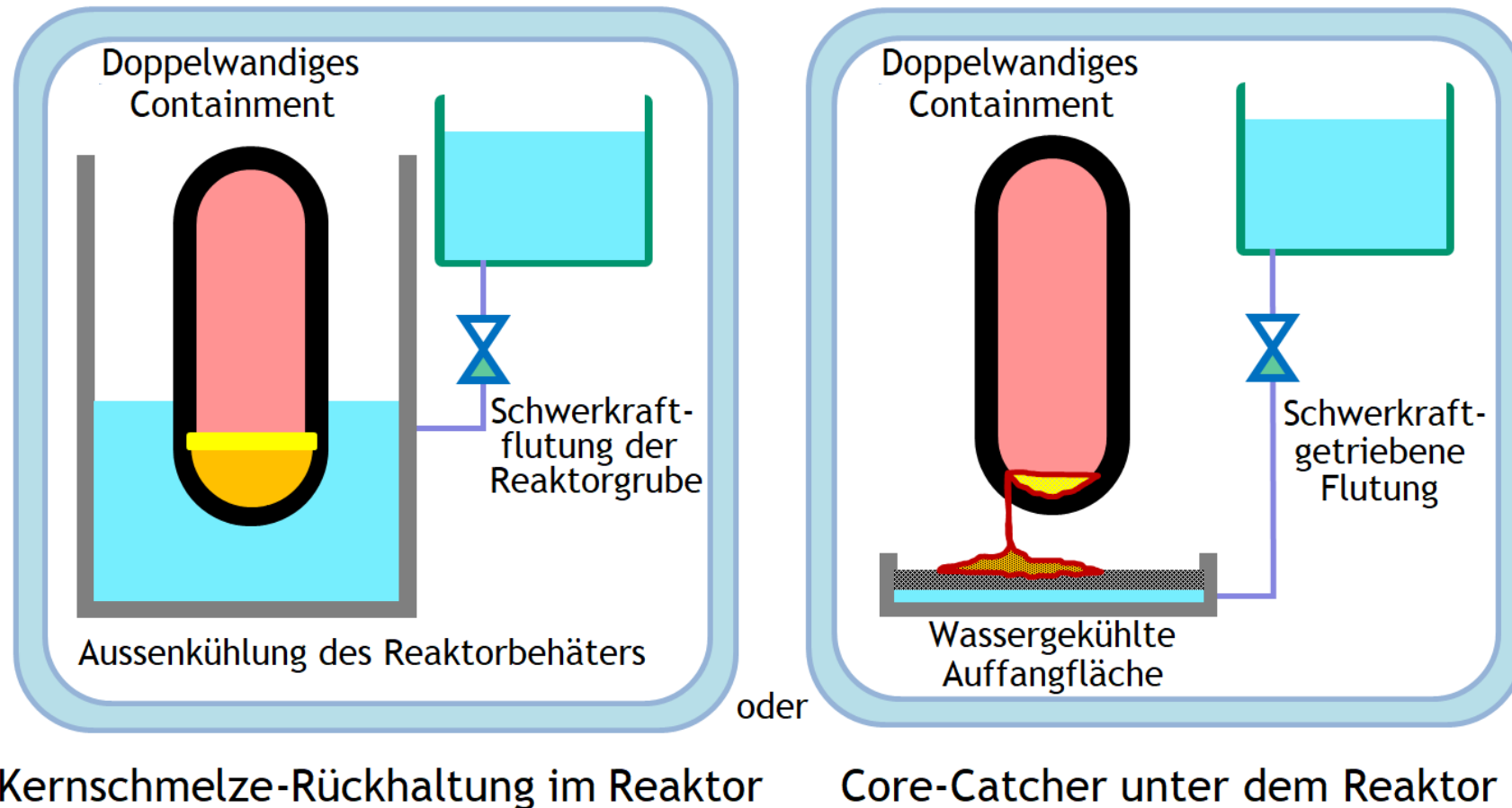
❖ **Autonomie:**

- Zurückdrängung des Faktors Mensch

❖ **Robustheit:**

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

Passive Sicherheitssysteme – Verstärkung der Containmentfunktion

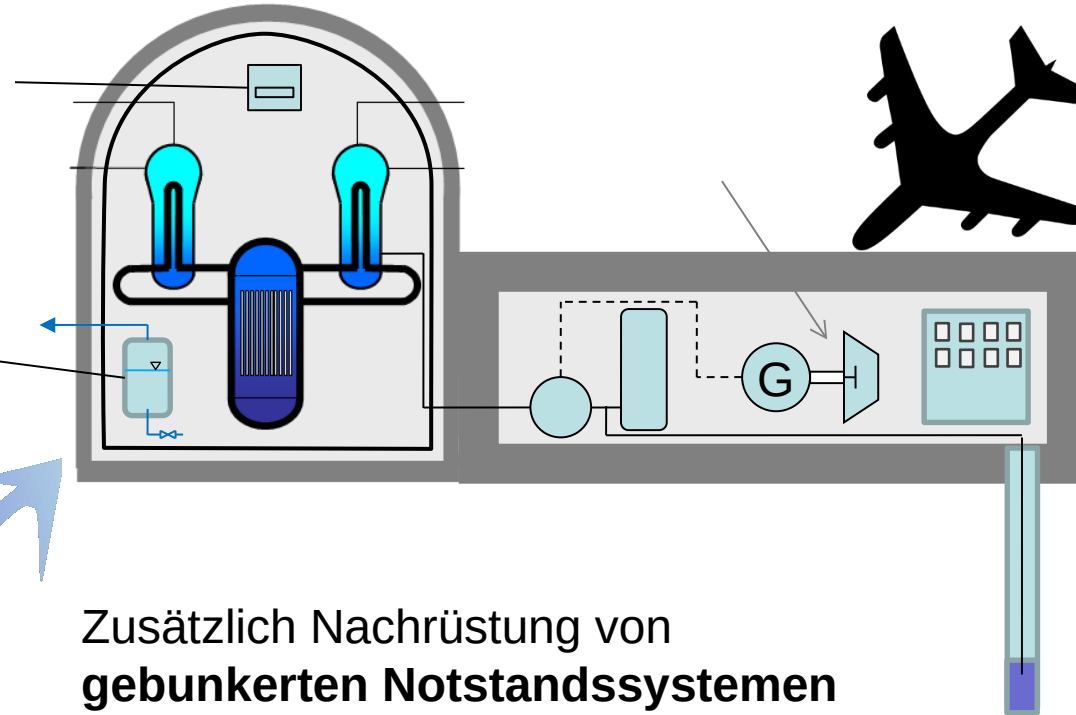
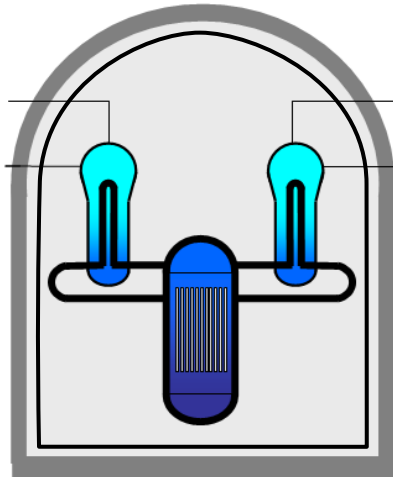


Verhinderung einer grosser Freisetzung radioaktiver Stoffe selbst bei einer Kernschmelze

Erweiterter Schutz bei bestehenden Anlagen

Wasserstoffrekombinatoren
(in D: 1999 - 2003)

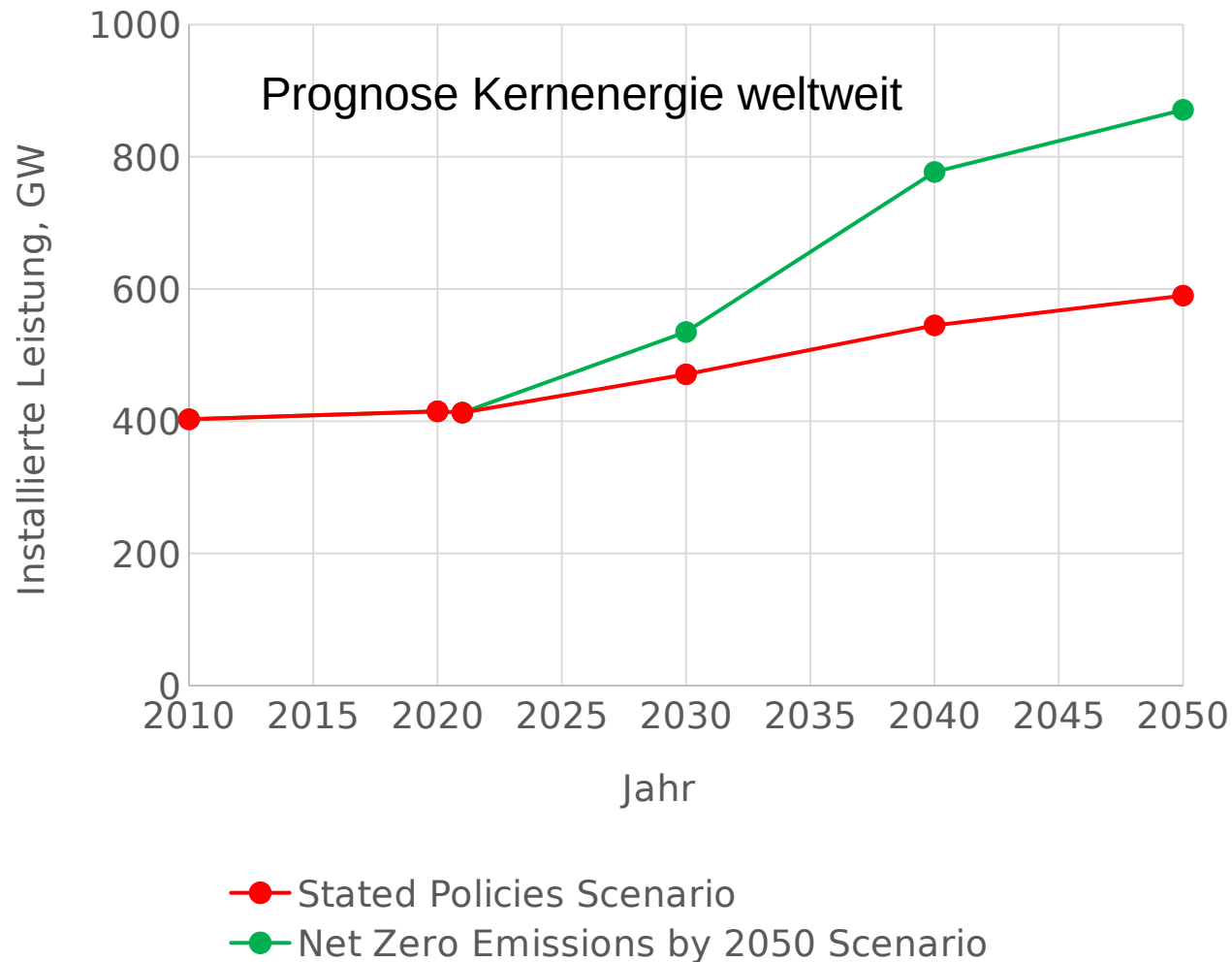
Gefilterte Druckentlastung
(in D: 1987 - 1992)



Zusätzlich Nachrüstung von
gebunkerten Notstandssystemen
(In D seit 1981 Auslegung - Notspeisegebäude)

- Doppelwandiges Containment
- Reaktorschutz (inhärent sichere Rückkopplungseffekte)
- Mehrsträngige Notkühlung
- Redundante Notstromversorgung

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

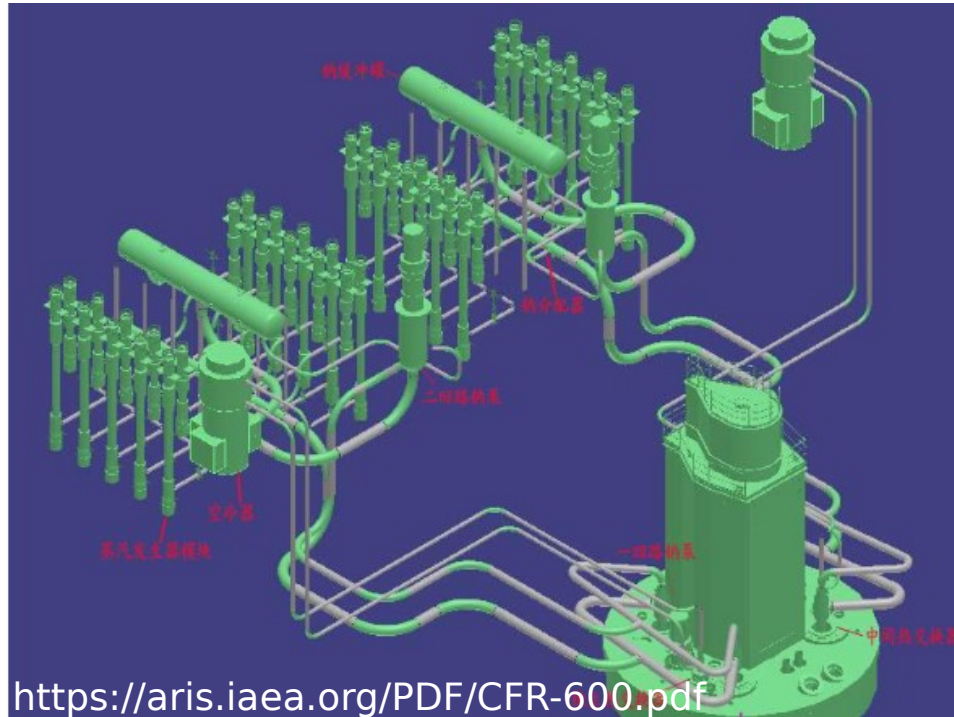
... und weniger Raum für 

**«Gelingen» heisst auch,
«umweltverträglich realisierbar sein»**

Neubau von GenIII-Anlagen weltweit

	Typ	Sicherheit	Nettoleistung*	Planung	Bau	Betrieb	Erstbetrieb
ABWR (Japan)	SWR	A	1350 MW	4	2	4**	2005
APR-1400 (Korea ^{***})	DWR	A	1340 MW	3	4	6	2016
AP1000 (USA ^{***})	DWR	P	1250 MW	10	1	5	2018
CAP1000 (China)	PWR	P	1100 MW	27	3	0	-
CAP1400 (China)	PWR	P	1400 MW	0	2	0	-
EPR (Frankreich ^{***})	DWR	A	1660 MW	12	3	3	2018
VVER-1200 (Russ. ^{***})	PWR	P + A	1300 MW	26	14	5	2018
Hualong One (China ^{***})	DWR	P + A	1126 MW	20	10	4	2021
* Leistung der stärksten Variante ** Derzeit ausser Betrieb, Wiederanfahren in Vorbereitung *** Bau für den Export				Summe	102	39	27

Kurz vor Inbetriebnahme: Der Natriumgekühlte Brüter in Xiapu, China



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

Pool-Reaktor mit Sekundärschleifen und Dampferzeugern

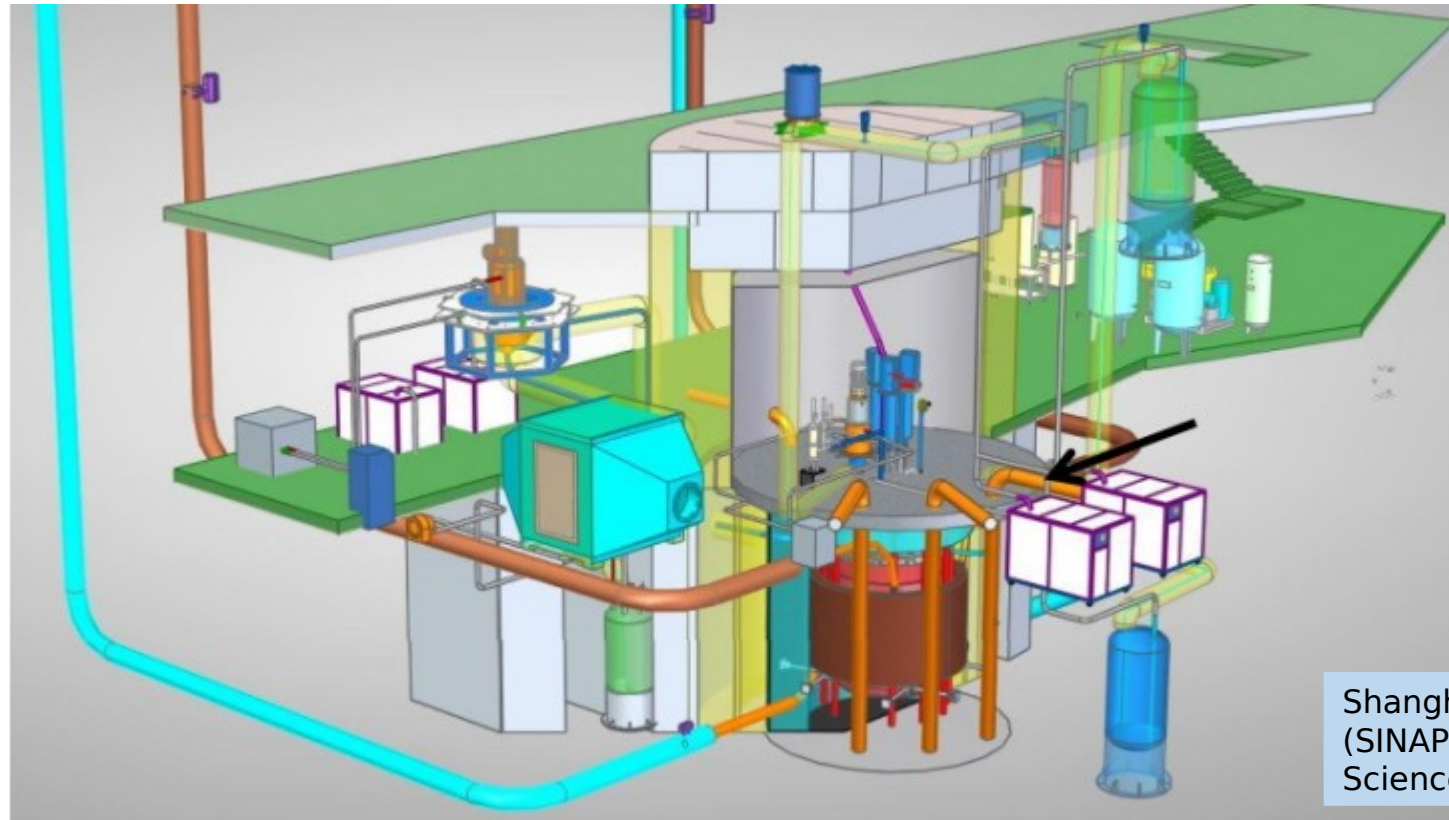


ROSATOM liefert Erstbeladung und erste Umladung

- 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

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

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)
- Reaktoraustrittstemperatur: $650 \text{ }^\circ\text{C}$, Kühlmitteltemperatur: $580 \text{ }^\circ\text{C}$
- Mit erbrütetem U-233 später Übergang zu reinem Th/U3

Philosophie der Kleinen Modularen Reaktoren

SMR = Small Modular Reactor

Starke Reduktion der Leistung des einzelnen Reaktors

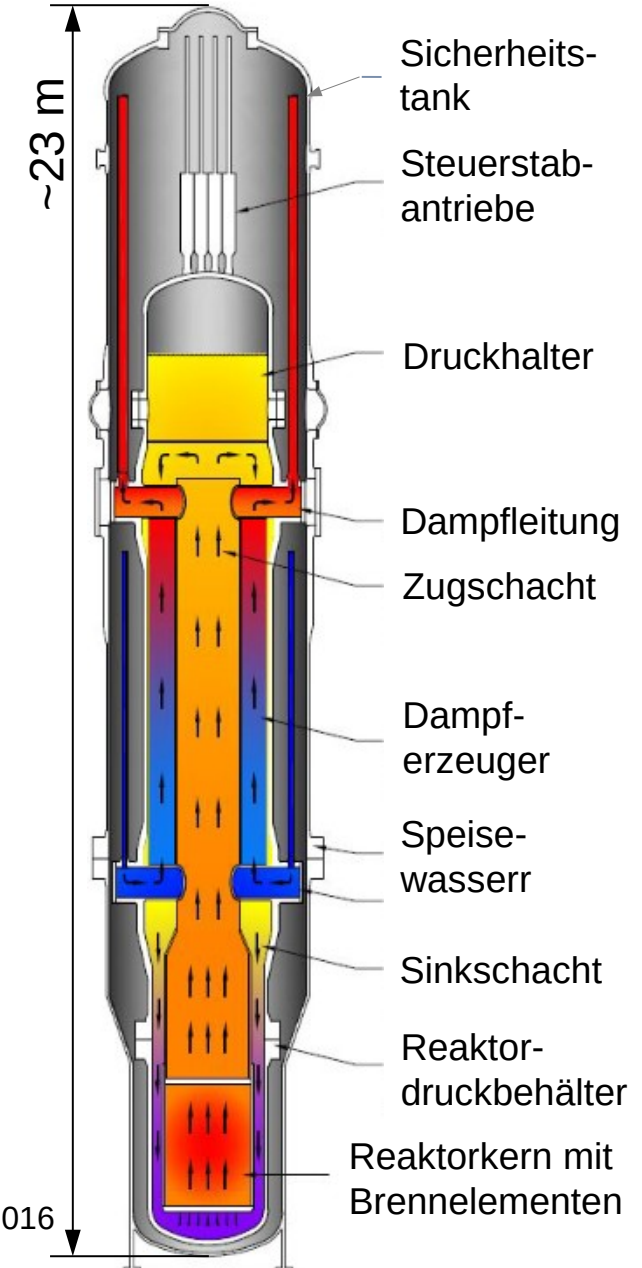
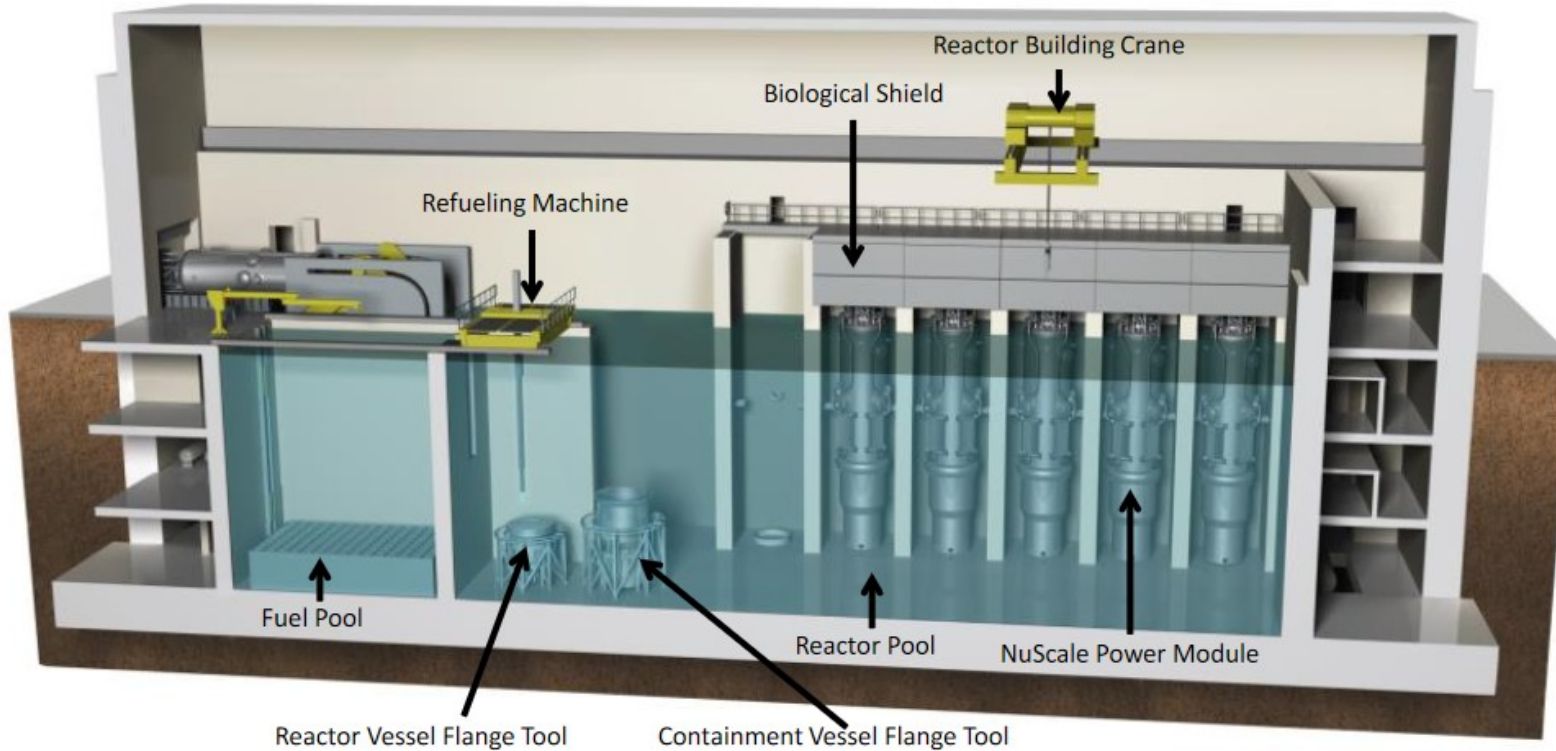
- Vereinfachung der Konstruktion
- Integration von ursprünglich externen Komponenten in den Reaktor
- Begrenzung der Abmessungen des Primärkreises → Werksfertigung und vormontierte Anlieferung
- Vereinfachung der Sicherheitssysteme, leichtere Erreichbarkeit von Passivität

Modularisierung

- Standardisierung von Komponenten
- Typzulassung einfacher zu erlangen
- Mehrere Reaktoren nutzen gemeinsame Systeme und Komponenten, z.B.
 - ❖ Reaktorgebäude (Containment)
 - ❖ Brennstoffversorgungssysteme, Abfallentsorgungssysteme
 - ❖ Sicherheitseinrichtungen
 - ❖ Nebensysteme (Ventilation, Abgassysteme, Wasser- / Kühlmittelaufbereitung)
 - ❖ Energieumwandlung (gemeinsame Turbine)
- Stufenweiser Ausbau → günstige Finanzierbarkeit
- Flexibler Betrieb, z.B. Brennstoffumladung während des Betriebs der übrigen Reaktoren

Beispiel für einen Kleinen Modulare Druckwasserreaktor

NuScale SMR Technology, Oregon, USA



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

?

J. Doyle et al, ICAPP 2016

Schlussbemerkungen:

Wir stehen vor einer neuen, beispiellosen Runde der Vernichtung von Naturräumen

- durch den weiteren exzessiven Ausbau von Windparks (DE), von Wasserkraft und alpinen Solaranlagen (CH)
- durch Minen zur Gewinnung grosser Mengen kritischer Rohstoffe (z.B. Lithium, Seltene Erden, Kupfer...)

Der Neubau von Kernkraftwerken könnte deutliche Entlastung bieten

...besonders im Bereich der Bandenergie für die Industrie

Kernkraftwerkstypen auf hohem Sicherheitsniveau und ausreichend Kernbrennstoff stehen zur Verfügung

Tiefenlagerung ermöglicht Entsorgung ohne Ewigkeitskosten

Neue Reaktortypen können sowohl Brennstoffversorgung als auch Abfallentsorgung nachhaltiger machen

Danke für die Aufmerksamkeit!