



# Neue Technologien für Kernkraftwerke: Potentiale und Perspektiven

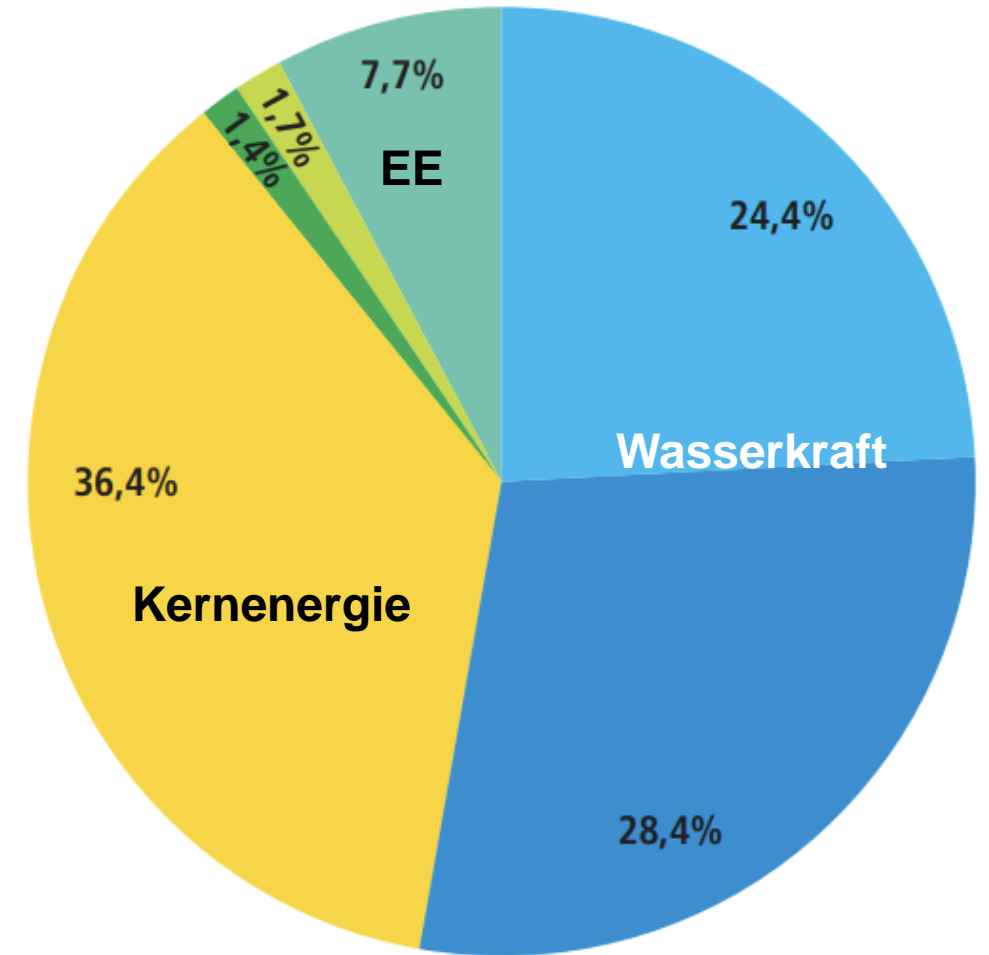
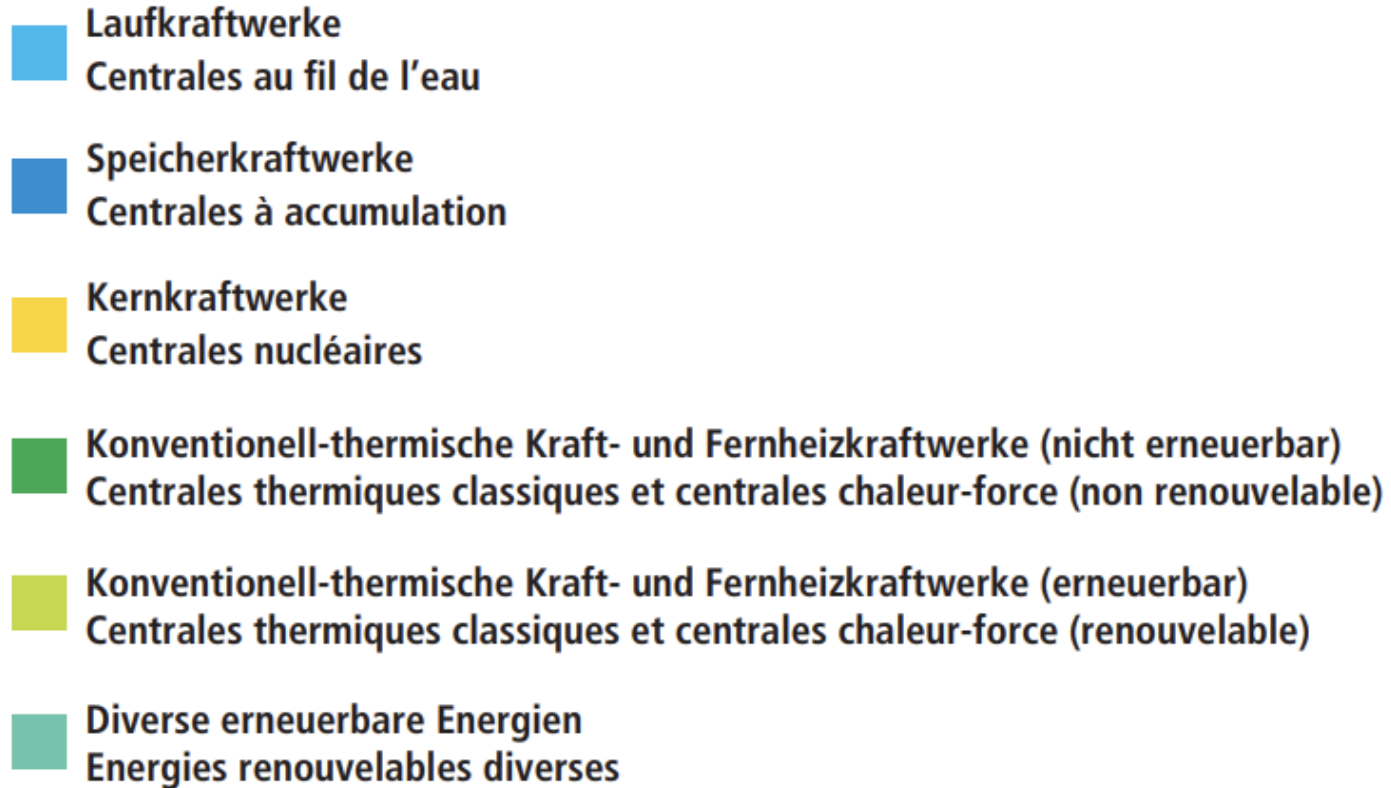
Annalisa Manera  
Laboratory of Nuclear Safety and Multiphase Flows

Net Zero 2024  
ETHZ Symposium – Jan 31, 2024



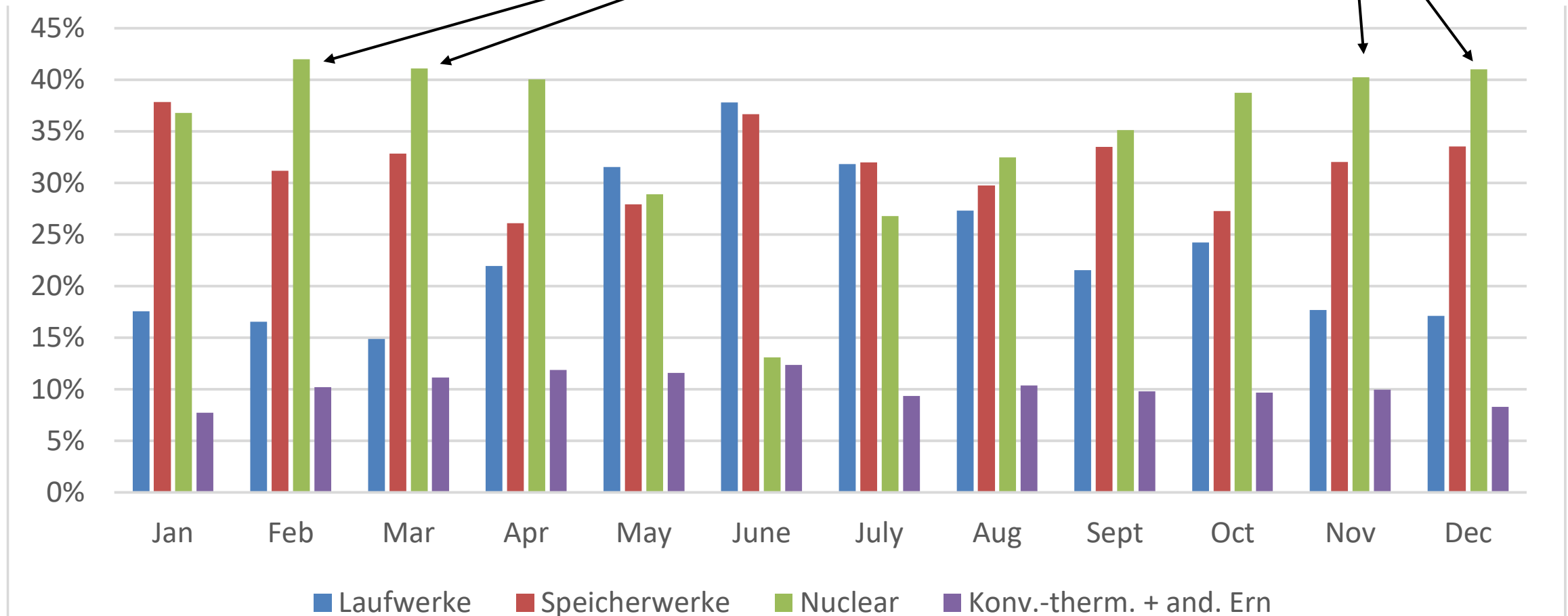
# Nettostromerzeugung in der Schweiz 2022

Beitrag der Kernenergie zur Stromproduktion  
in der Schweiz: mehr als 36%



# Anteil der Stromerzeugung nach Quelle - Schweiz 2022

In den Wintermonaten produziert die Kernenergie in der Schweiz über 40% Strom



Source: data from BFE

# Die Stromproduktion in der Schweiz ist bereits CO2-arm

Länder in Europa mit ~ CO2-freier Stromproduktion nutzen Kernenergie

Ausnahme: Norwegen mit > 88 % Wasserkraft; Island: 70 % Wasserkraft, 30 % Geothermie

| Country     | gCO <sub>2</sub> -equiv/kWh | Hydro % | Wind % | Solar % | Biomass % | Nuclear % | Oil % | Gas % | Coal % |
|-------------|-----------------------------|---------|--------|---------|-----------|-----------|-------|-------|--------|
| Norway      | 29                          | 88.3    | 10.4   | 0.1     | 0.1       | 0.0       | 0.5   | 0.5   | 0.0    |
| Sweden      | 45                          | 40.3    | 19.4   | 1.4     | 7.4       | 29.8      | 1.6   | 0.2   | <0.01  |
| Switzerland | 46                          | 54.8    | 0.1    | 4.3     | 0.2       | 37.0      | 3.6   | 0.0   | 0.0    |
| France      | 85                          | 9.8     | 8.2    | 4.3     | 2.1       | 63.3      | 2.1   | 9.2   | 0.9    |
| Finland     | 131                         | 18.8    | 16.6   | 0.4     | 19.1      | 34.3      | 4.9   | 1.8   | 4.1    |
| Austria     | 158                         | 55.8    | 10.7   | 4.2     | 5.6       | 0.0       | 5.3   | 18.2  | 0.2    |
| Spain       | 217                         | 6.6     | 21.7   | 11.5    | 2.4       | 20.5      | 4.0   | 30.6  | 2.7    |
| Netherlands | 356                         | 0.1     | 17.9   | 13.9    | 8.0       | 3.4       | 5.0   | 39.6  | 12.1   |
| USA         | 367                         | 6.0     | 10.1   | 4.8     | 1.2       | 18.0      | 0.9   | 39.3  | 19.3   |
| Italy       | 372                         | 10.7    | 7.1    | 9.9     | 6.6       | 0.0       | 5.3   | 50.7  | 7.6    |
| Germany     | 385                         | 3.0     | 21.7   | 10.1    | 8.1       | 6.3       | 3.2   | 16.5  | 31.1   |
| Japan       | 483                         | 7.6     | 1.0    | 10.2    | 4.5       | 5.4       | 3.9   | 34.2  | 32.9   |
| Poland      | 635                         | 1.2     | 11.0   | 4.6     | 4.3       | 0.0       | 2.7   | 7.0   | 69.2   |
| World       | 436                         | 15.2    | 7.5    | 4.5     | 2.4       | 9.2       | 3.1   | 22.1  | 35.7   |

Data: [ourworldindata.org/electricity-mix](https://ourworldindata.org/electricity-mix)

# Die Stromproduktion in der Schweiz ist bereits CO2-arm

Länder in Europa mit ~ CO2-freier Stromproduktion nutzen Kernenergie

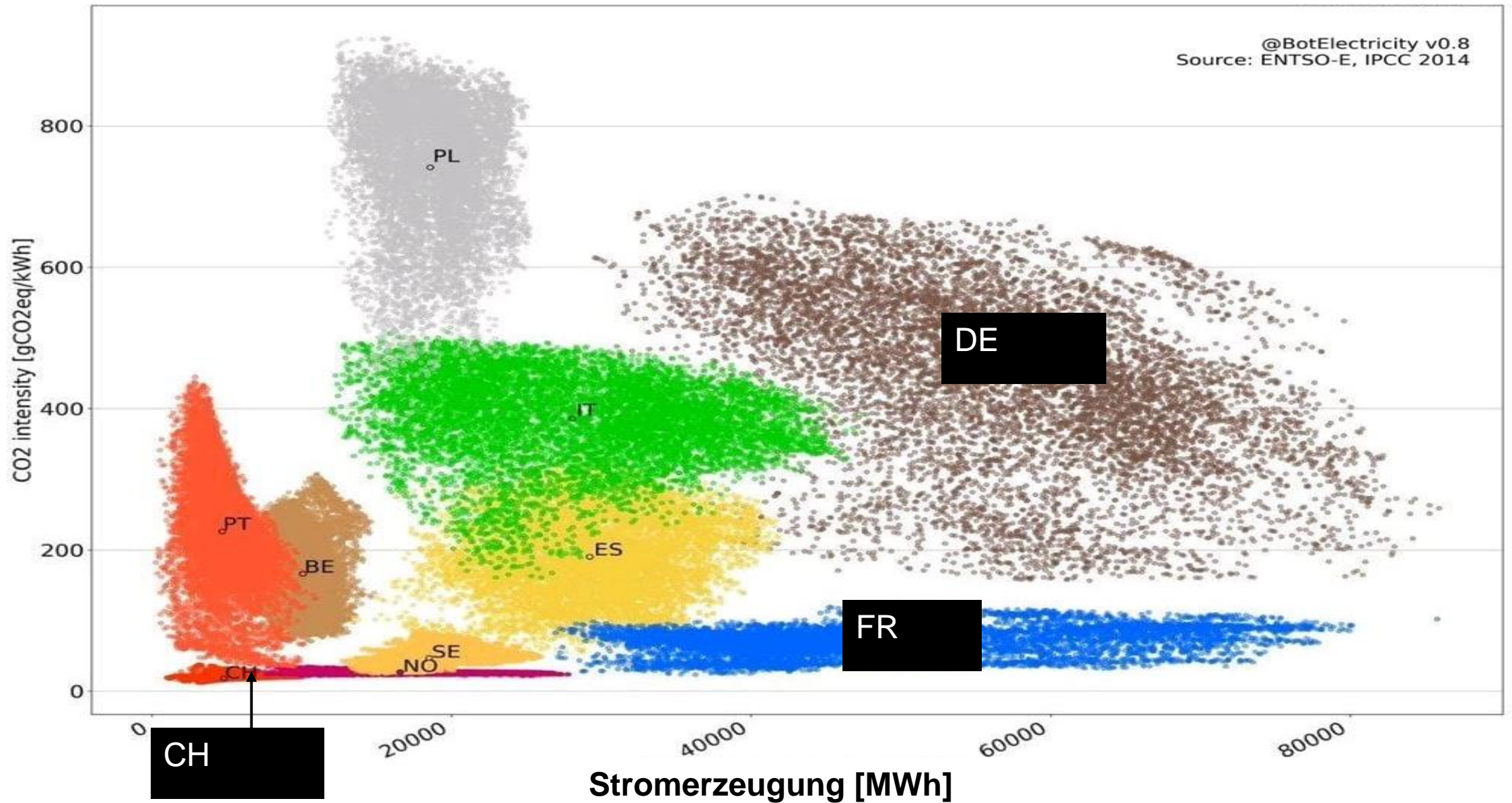
Ausnahme: Norwegen mit > 88 % Wasserkraft; Island: 70 % Wasserkraft, 30 % Geothermie

| Country     | gCO <sub>2</sub> -equiv/kWh | Hydro % | Wind % | Solar % | Biomass % | Nuclear % | Oil % | Gas % | Coal % | Wind, solar, biomass % | Nuclear + fossile % |
|-------------|-----------------------------|---------|--------|---------|-----------|-----------|-------|-------|--------|------------------------|---------------------|
| Norway      | 29                          | 88.3    | 10.4   | 0.1     | 0.1       | 0.0       | 0.5   | 0.5   | 0.0    | 10.7                   | 1.0                 |
| Sweden      | 45                          | 40.3    | 19.4   | 1.4     | 7.4       | 29.8      | 1.6   | 0.2   | <0.01  | 28.1                   | 31.6                |
| Switzerland | 46                          | 54.8    | 0.1    | 4.3     | 0.2       | 37.0      | 3.6   | 0.0   | 0.0    | 4.6                    | 40.6                |
| France      | 85                          | 9.8     | 8.2    | 4.3     | 2.1       | 63.3      | 2.1   | 9.2   | 0.9    | 14.6                   | 75.5                |
| Finland     | 131                         | 18.8    | 16.6   | 0.4     | 19.1      | 34.3      | 4.9   | 1.8   | 4.1    | 36.1                   | 45.1                |
| Austria     | 158                         | 55.8    | 10.7   | 4.2     | 5.6       | 0.0       | 5.3   | 18.2  | 0.2    | 20.5                   | 23.7                |
| Spain       | 217                         | 6.6     | 21.7   | 11.5    | 2.4       | 20.5      | 4.0   | 30.6  | 2.7    | 35.6                   | 57.8                |
| Netherlands | 356                         | 0.1     | 17.9   | 13.9    | 8.0       | 3.4       | 5.0   | 39.6  | 12.1   | 39.8                   | 60.1                |
| USA         | 367                         | 6.0     | 10.1   | 4.8     | 1.2       | 18.0      | 0.9   | 39.3  | 19.3   | 16.1                   | 77.5                |
| Italy       | 372                         | 10.7    | 7.1    | 9.9     | 6.6       | 0.0       | 5.3   | 50.7  | 7.6    | 23.7                   | 63.6                |
| Germany     | 385                         | 3.0     | 21.7   | 10.1    | 8.1       | 6.3       | 3.2   | 16.5  | 31.1   | 39.9                   | 57.1                |
| Japan       | 483                         | 7.6     | 1.0    | 10.2    | 4.5       | 5.4       | 3.9   | 34.2  | 32.9   | 15.7                   | 76.4                |
| Poland      | 635                         | 1.2     | 11.0   | 4.6     | 4.3       | 0.0       | 2.7   | 7.0   | 69.2   | 19.9                   | 79.0                |
| World       | 436                         | 15.2    | 7.5    | 4.5     | 2.4       | 9.2       | 3.1   | 22.1  | 35.7   | 14.4                   | 70.1                |

Data: [ourworldindata.org/electricity-mix](https://ourworldindata.org/electricity-mix)

# CO2-Emissionen bei der Stromerzeugung – Europa

CO2eq/kWh – Jahr 2022





# Ein Blick auf die Zahlen... enorme Herausforderung

Taicun Village Solar (China) ~ Gondosolar

## Switzerland Gondosolar

23,3 GWh/Jahr

42 MCHF

100,000 m<sup>2</sup>

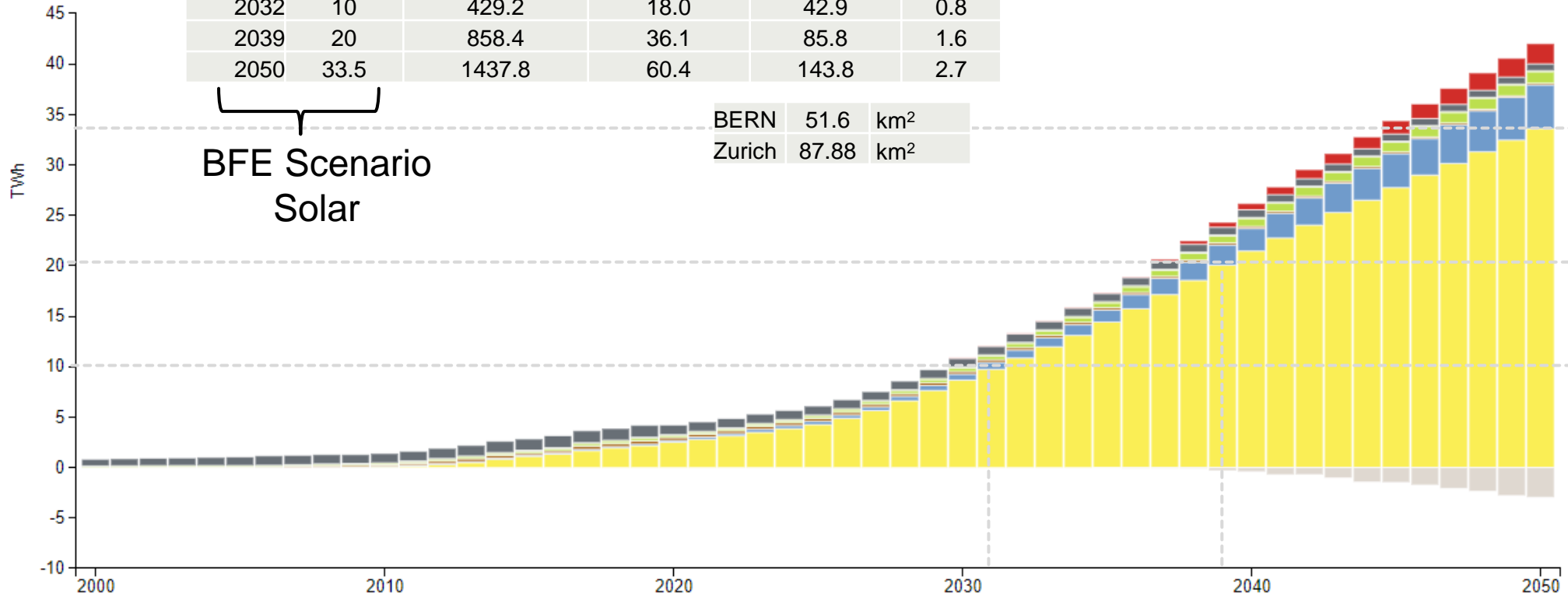


# Ein Blick auf die Zahlen...

Um das BFE-Szenario zu realisieren, benötigen wir das Äquivalent von 1438 Gondolar

|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 23,3 GWh               | <b>Gondosolar data</b> |
| 42 MCHF                |                        |
| 100,000 m <sup>2</sup> |                        |

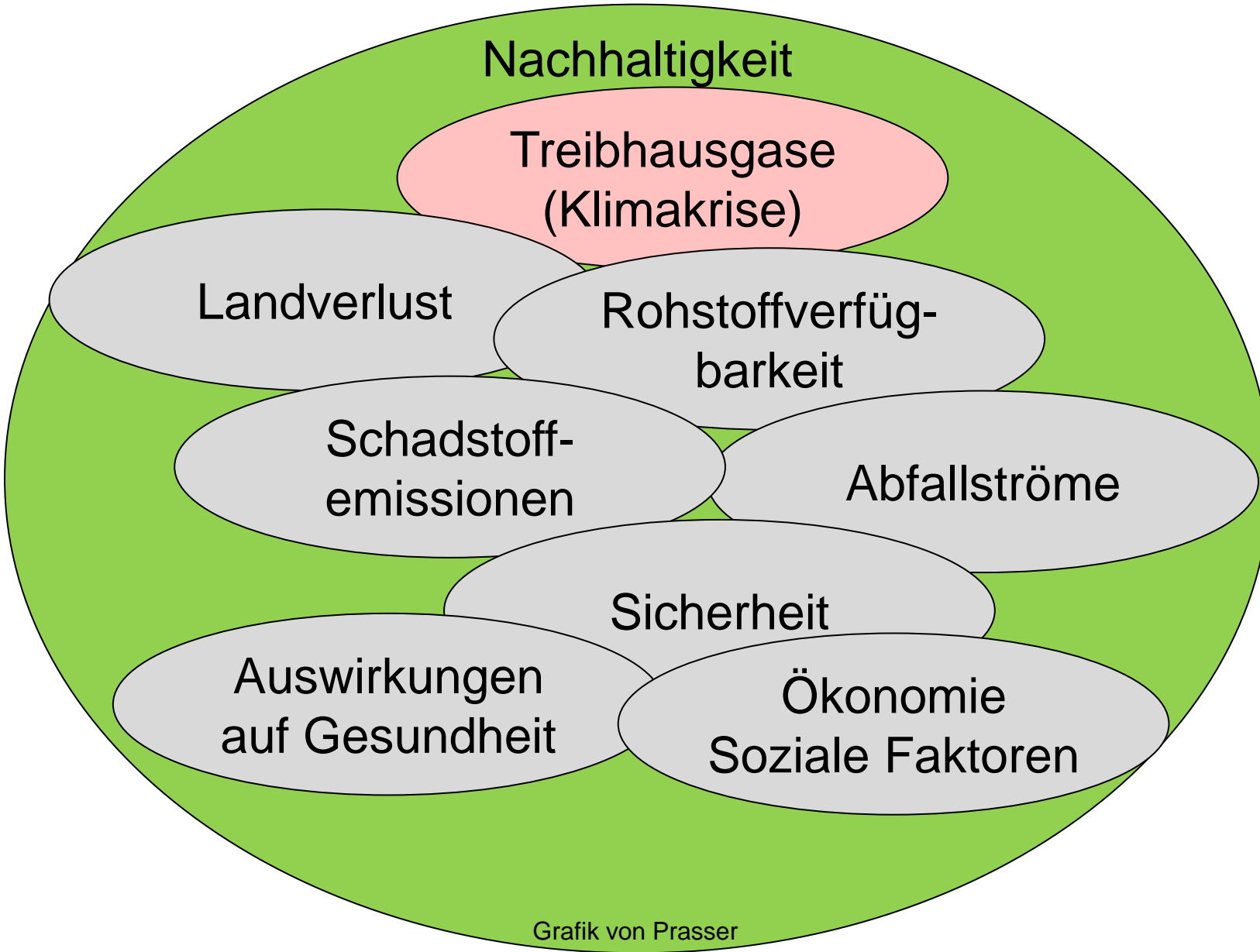
| YEAR | TWh  | Units Gondosolar Equivalent | Price [Miliarden CHF] | km2   | # of EPRs |
|------|------|-----------------------------|-----------------------|-------|-----------|
| 2032 | 10   | 429.2                       | 18.0                  | 42.9  | 0.8       |
| 2039 | 20   | 858.4                       | 36.1                  | 85.8  | 1.6       |
| 2050 | 33.5 | 1437.8                      | 60.4                  | 143.8 | 2.7       |



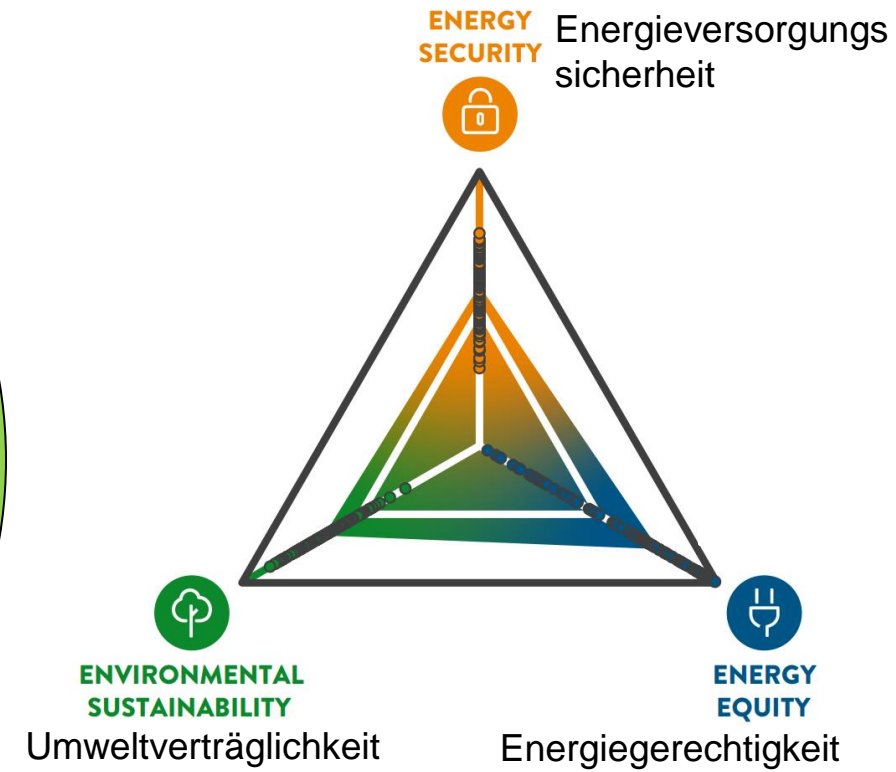
- Photovoltaik
- Windenergie
- Biomasse (Holz)
- Biogas
- ARA
- KVA (EE-Anteil)
- Geothermie
- EE-Abregelung



# Warum Interesse an Kernenergie? Nachhaltigkeit und Energie-Trilemma



## Energy trilemma



Source: World Energy Council



Eine Kernreaktion erzeugt > 1,000,000 mal mehr Energie als eine chemische Reaktion

Hohe Energiedichte

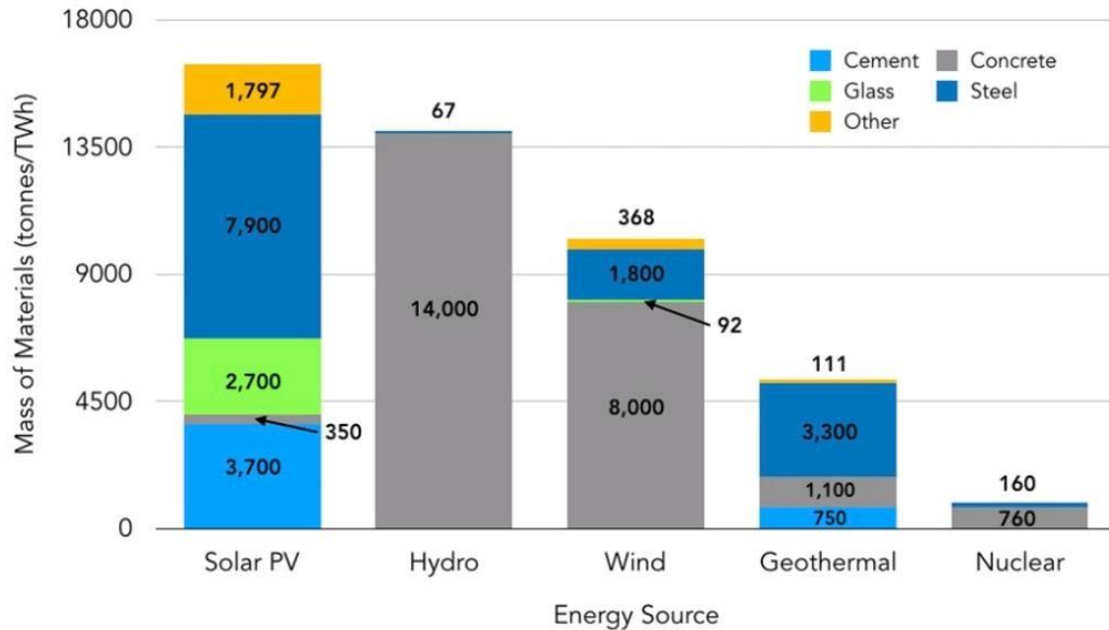


- Kleine Menge Brennstoff
- Kleiner Landbedarf
- Geringe Menge an Abfall



# Ist Kernenergie umweltfreundlich?

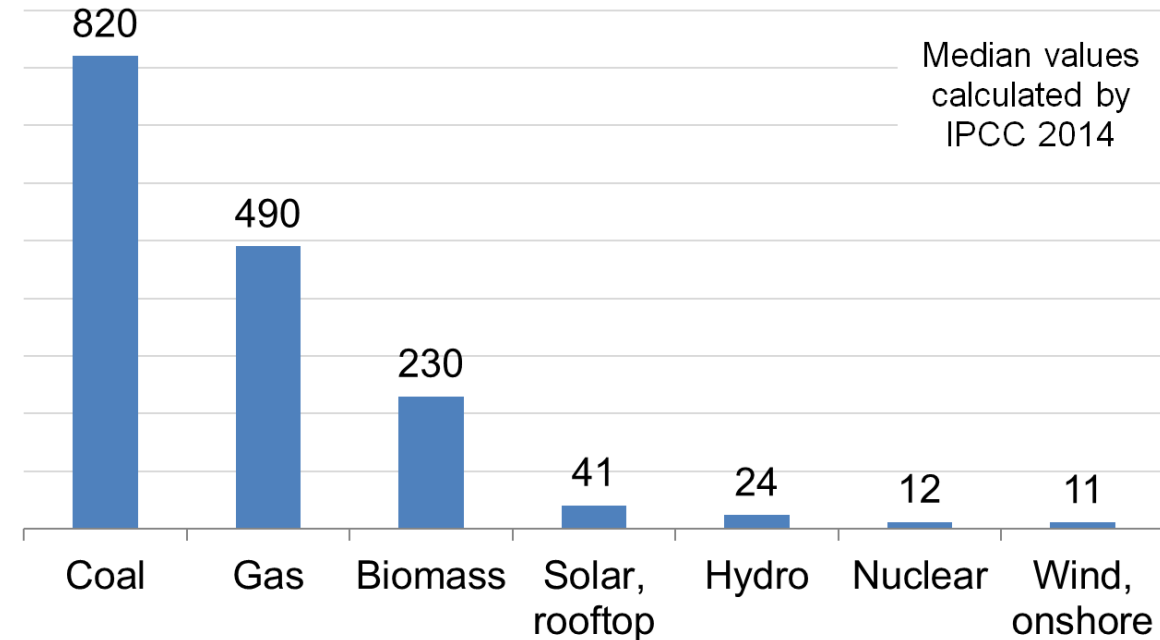
## Materials throughput by type of energy source



"Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities," Table 10. September 2015. United States Department of Energy. Nuclear and hydro require 10 tonnes/TWh and 1 tonne/TWh of other materials, respectively, but are unable to be labeled on the graph.



## Lifecycle CO<sub>2</sub>-equivalent emissions (g/kWh)



### Kernenergie hat die kleinste:

- CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Stoffströme
- Landbedarf

Es wird von allen internationalen Organisationen als eine der umweltfreundlichsten Energiequellen anerkannt



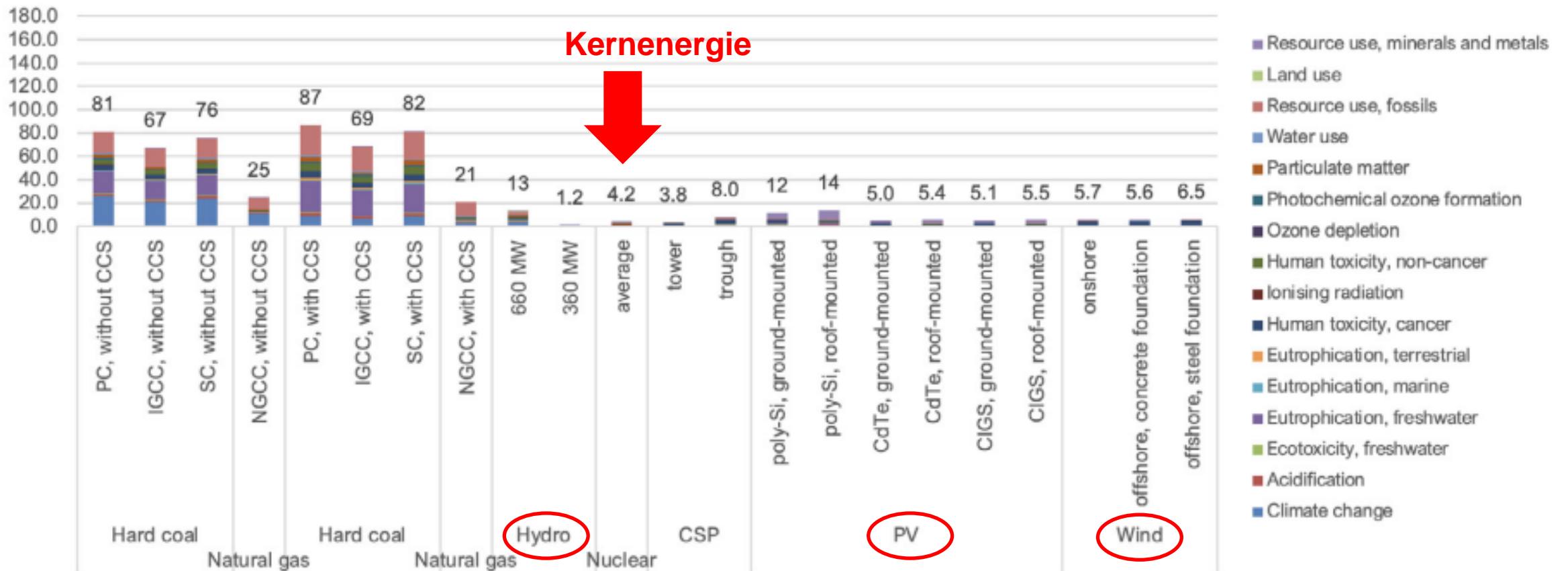
# Ist Kernenergie unweltfreundlich?

United Nations Economic Commission for Europe

Carbon Neutrality in the UNECE Region:

Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources, 2022

**Normalised lifecycle impacts, weighted, of the production of 1 TWh, per technology, Europe, 2020**

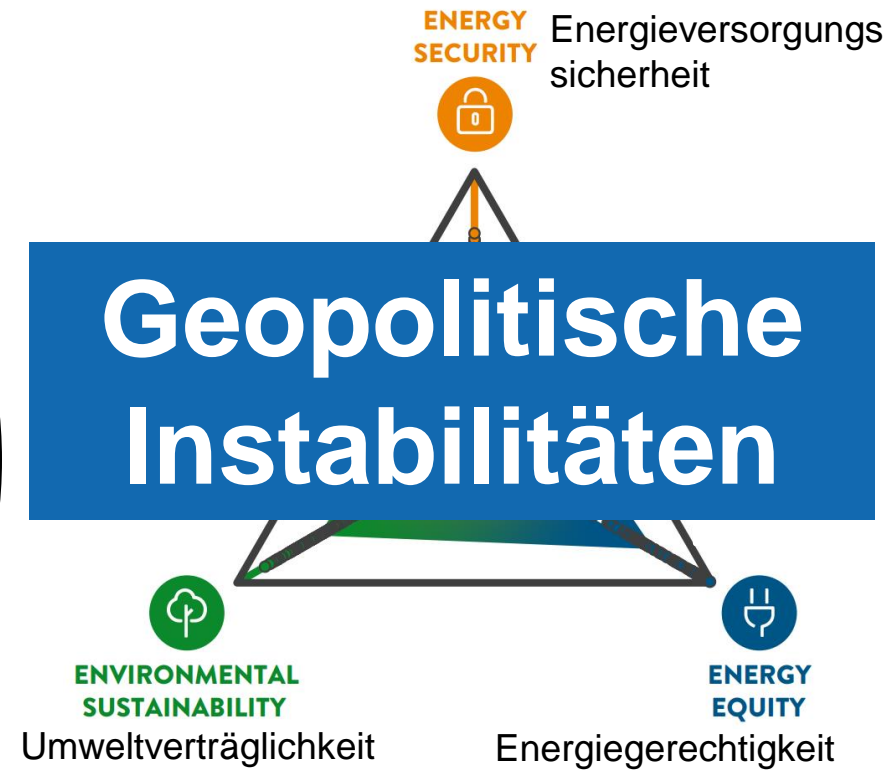


# Warum Interesse an Kernenergie? Nachhaltigkeit und Energie-Trilemma



Grafik von Prasser

## Energy trilemma



Source: World Energy Council

- Krieg in der Ukraine
  - Starker Anstieg der Gas- (und Strom-)Preise
  - Anerkannte Bedeutung der Energiesicherheit
- Kernenergie in EU-Taxonomie

- Massiv Ausbau der Kernenergie in China (auf Kurs für 150 GW in 15 Jahren)
- Japan - Dezember 2022: Kernenergie als wichtiger Teil des Regierungsplans der „grünen Transformation“. Wiederinbetriebnahme abgeschalteter KKW und Bau neuer Reaktoren
- USA, Canada, S. Korea

**EU NUCLEAR ALLIANCE** – 16 Länder: Frankreich, Belgien, Bulgarien, Kroatien, die Tschechische Republik, Finnland, Ungarn, die Niederlande, Polen, Rumänien, Slowenien, die Slowakei, Estland, Schweden, Italien, UK.

Ziel: Entwicklung einer integrierten europäischen Nuklearindustrie.  
150 GW Kernenergie im EU-Strommix bis 2050.

**COP 28** – 25 Länder: **USA**, Armenien, Bulgarien, **Kanada**, Kroatien, Tschechische Republik, Finnland, Frankreich, Ghana, Ungarn, Jamaika, **Japan**, **Republik Korea**, Moldawien, Mongolei, Marokko, Niederlande, Polen, Rumänien, Slowakei, Slowenien, Schweden, Ukraine, Vereinigte Arabische Emirate und UK

Ziel: Verdreifachung der Kernenergie bis 2050



# Entwicklungen in den letzten Jahren

- Krieg in der Ukraine
  - Starker Anstieg der Gas- (und Strom-)Preise
  - Anerkannte Bedeutung der Energie
- Kernenergie in EU-Taxonomie

- Massiv Ausbau der Kernenergie in China
- Japan - Dezember 2022: Kernenergie als „Transformation“. Wiederinbetriebnahme
- USA, Canada, S. Korea

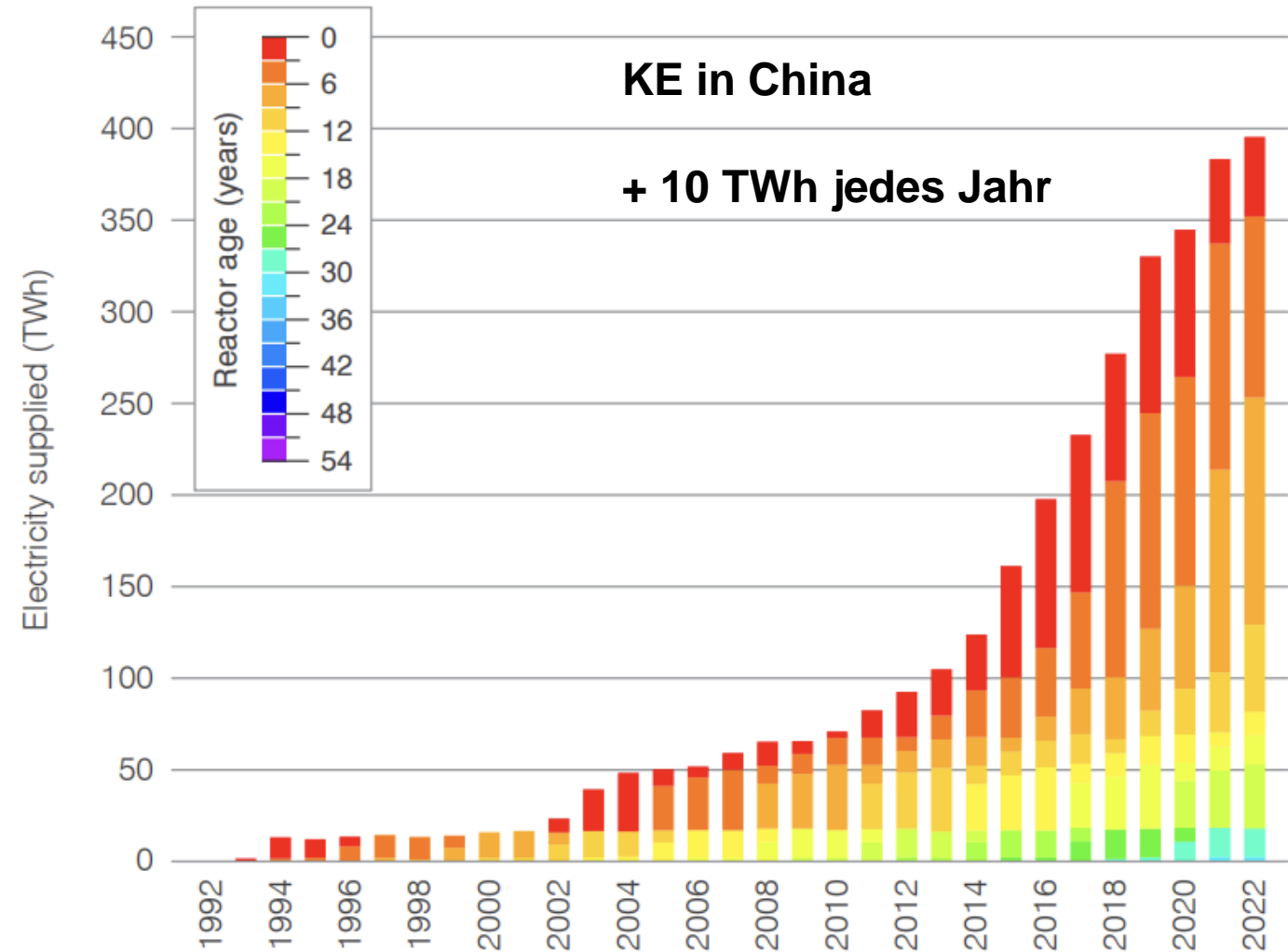
**EU NUCLEAR ALLIANCE** – 16 Länder: Frankreich, Finnland, Ungarn, die Niederlande, Polen, Rumänien

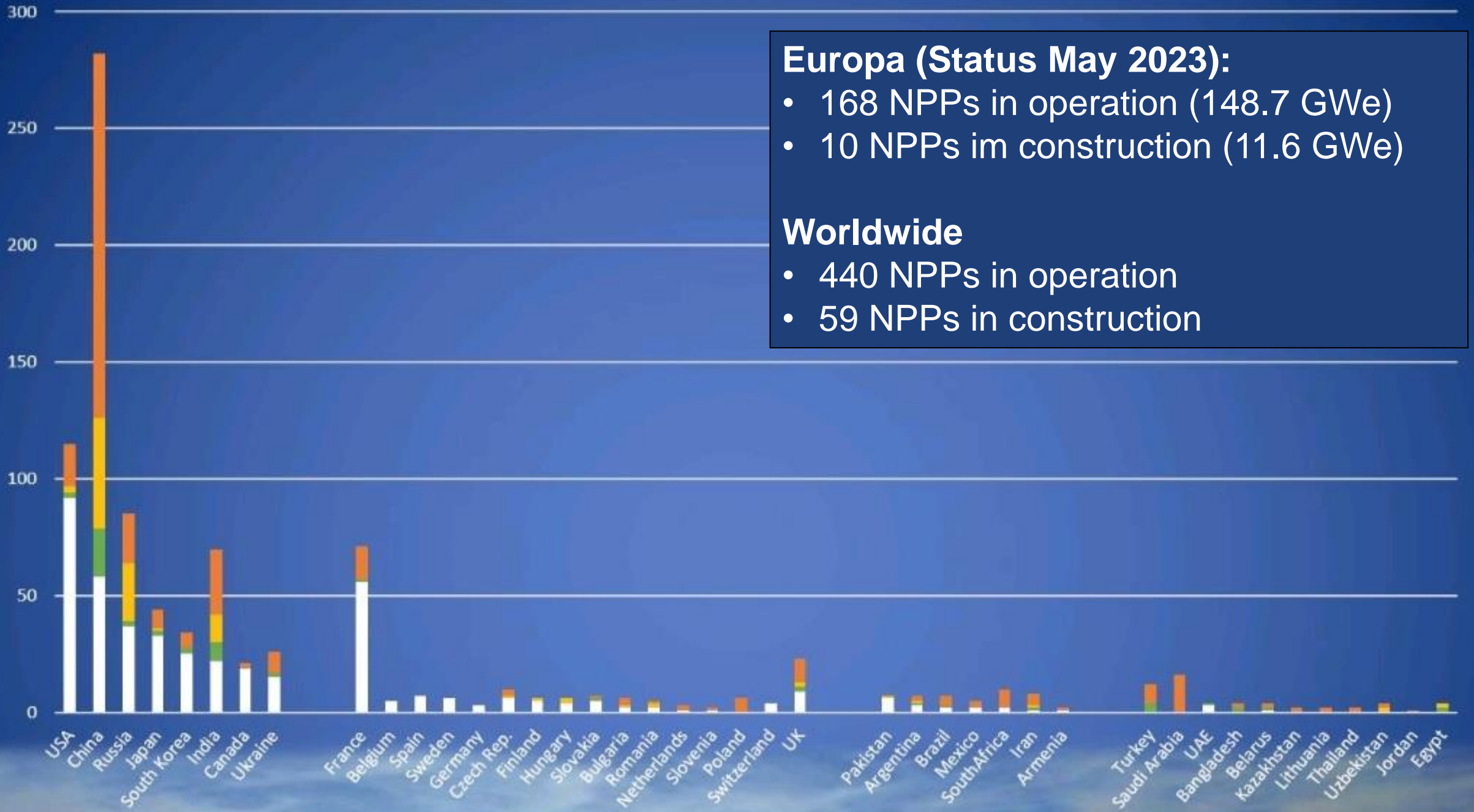
Ziel: Entwicklung einer 150 GW Kernenergie

**COP 28** – 25 Länder: **USA**, Armenien, Bulgarien, Frankreich, Ghana, Ungarn, Jamaika, **Japan**, Polen, Rumänien, Slowakei, Slowenien, Schweden

Ziel: Verdreifung

Nuclear electricity production





**Europa (Status May 2023):**

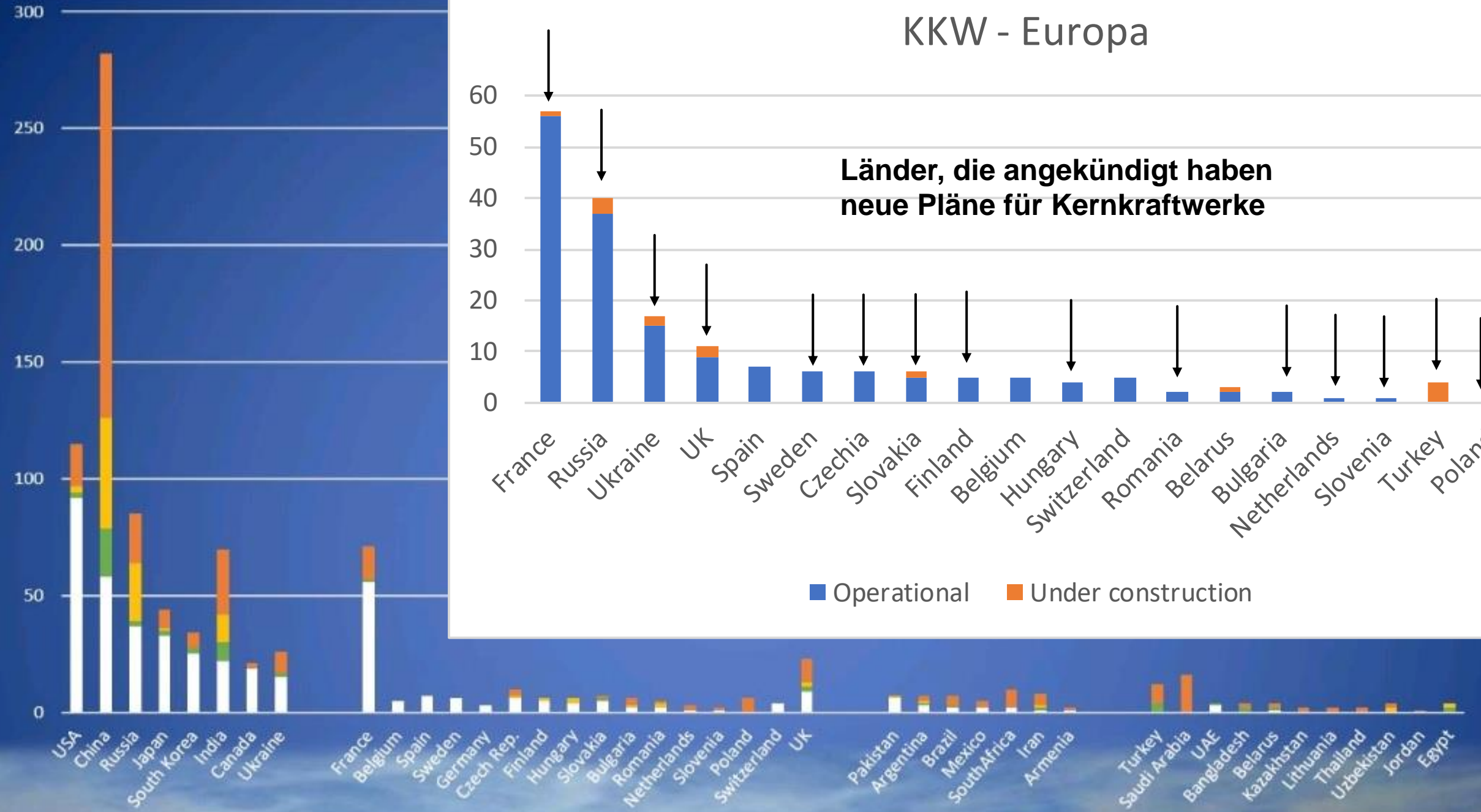
- 168 NPPs in operation (148.7 GWe)
- 10 NPPs im construction (11.6 GWe)

**Worldwide**

- 440 NPPs in operation
- 59 NPPs in construction

source: WNA (world-nuclear.org) January 2023

■ Fleet ■ Construction ■ Planned ■ Program



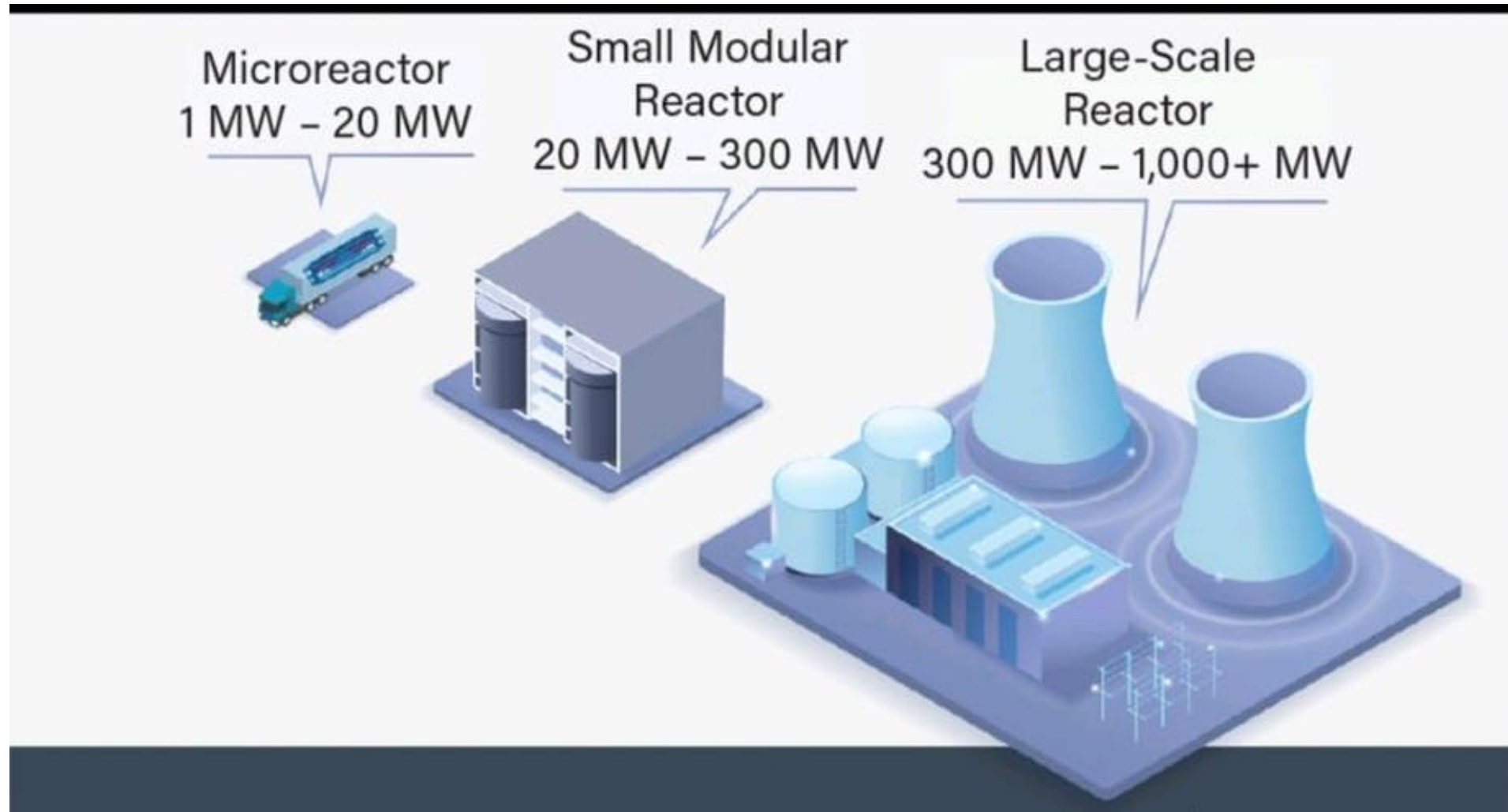
source: WNA (world-nuclear.org) January 2023

Fleet
  Construction
  Planned
  Program



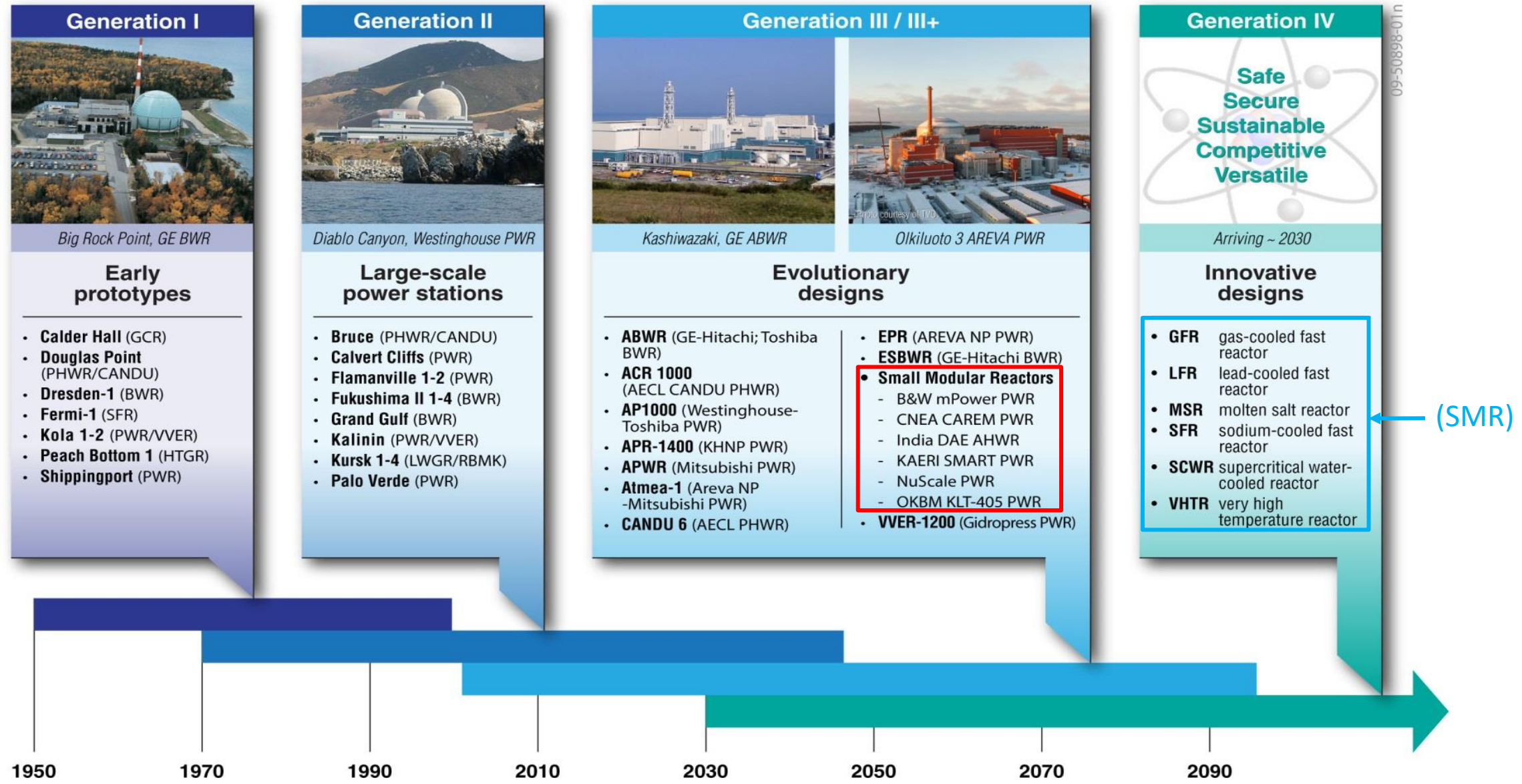
# Neue Entwicklungen im Reaktordesign

## KKW-GRÖSSENKLASSIFIZIERUNG



# Neue Entwicklungen im Reaktordesign

09-50898-01n



## Generation I



Big Rock Point, GE BWR

### Early prototypes

- Calder Hall (GCR)
- Douglas Point (PHWR/CANDU)
- Dresden-1 (BWR)
- Fermi-1 (SFR)
- Kola 1-2 (PWR/VVER)
- Peach Bottom 1 (HTGR)
- Shippingport (PWR)

## Generation II



Diablo Canyon, Westinghouse PWR

### Large-scale power stations

- Bruce (PHWR/CANDU)
- Calvert Cliffs (PWR)
- Flamenville 1-2 (PWR)
- Fukushima II 1-4 (BWR)
- Grand Gulf (BWR)
- Kalinin (PWR/VVER)
- Kursk 1-4 (LWGR/RBMK)
- Palo Verde (PWR)

## Generation III / III+



Kashiwazaki, GE ABWR



Olkiluoto 3 AREVA PWR

### Evolutionary designs

- ABWR (GE-Hitachi; Toshiba BWR)
- ACR 1000 (AECL CANDU PHWR)
- AP1000 (Westinghouse-Toshiba PWR)
- APR-1400 (KHNP PWR)
- APWR (Mitsubishi PWR)
- Atmea-1 (Areva NP -Mitsubishi PWR)
- CANDU 6 (AECL PHWR)
- EPR (AREVA NP PWR)
- ESBWR (GE-Hitachi BWR)
- **Small Modular Reactors**
  - B&W mPower PWR
  - CNEA CAREM PWR
  - India DAE AHWR
  - KAERI SMART PWR
  - NuScale PWR
  - OKBM KLT-405 PWR
- VVER-1200 (Gidropress PWR)

## Generation IV



Arriving ~ 2030

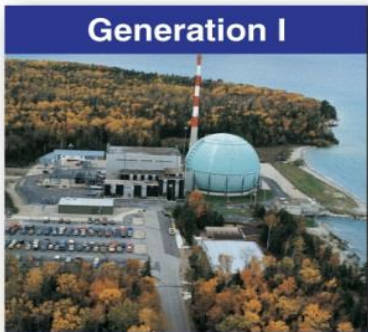
### Innovative designs

- GFR gas-cooled fast reactor
- LFR lead-cooled fast reactor
- MSR molten salt reactor
- SFR sodium-cooled fast reactor
- SCWR supercritical water-cooled reactor
- VHTR very high temperature reactor

(SMR)



# Neue Entwicklungen im Reaktordesign

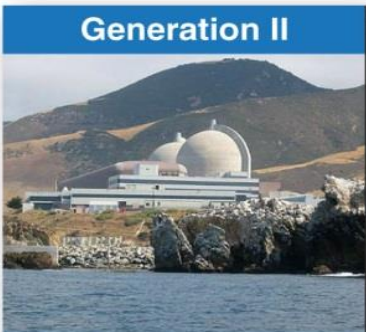


Generation I

Big Rock Point, GE BWR

**Early prototypes**

- Calder Hall (GCR)
- Douglas Point (PHWR/CANDU)
- Dresden
- Fermi
- Kolar
- Peach
- Shipping

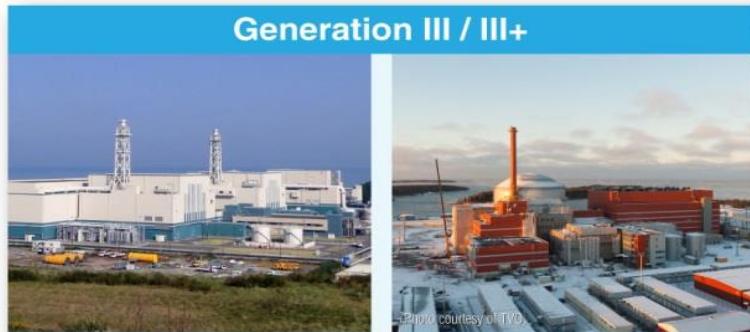


Generation II

Diablo Canyon, Westinghouse PWR

**Large-scale power stations**

- Bruce (PHWR/CANDU)
- Calvert Cliffs (PWR)
- Flamenville 1-2 (PWR)



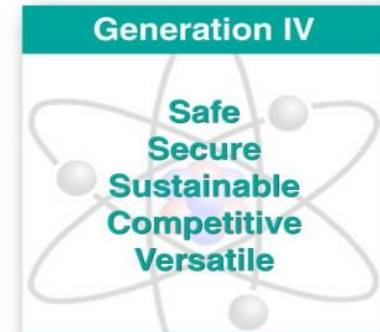
Generation III / III+

Kashiwazaki, GE ABWR

Olkiluoto 3 AREVA PWR

**Evolutionary designs**

- ABWR (GE-Hitachi; Toshiba BWR)
- ACR 1000 (AECL CANDU PHWR)
- EPR (AREVA NP PWR)
- ESBWR (GE-Hitachi BWR)
- Small Modular Reactors



Generation IV

Arriving ~ 2030

**Innovative designs**

- GFR gas-cooled fast reactor
- LFR lead-cooled fast reactor
- MSR molten salt reactor
- SFR sodium-cooled fast reactor
- SCWR supercritical water-cooled reactor
- VHTR very high temperature reactor



1969→1971 Mercedes-Benz 280 SE 3.5 Cabriolet



Heute

1950

2010

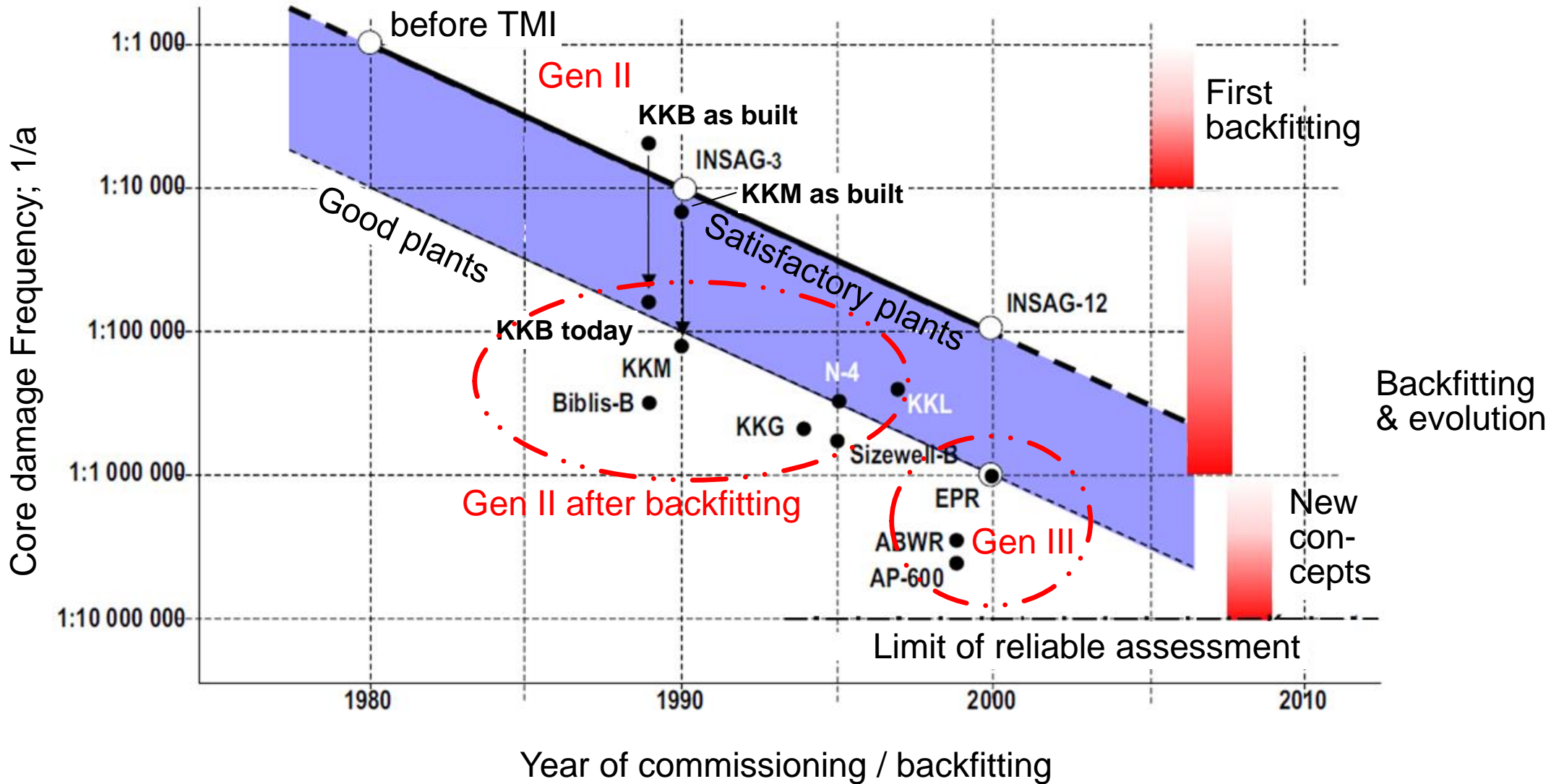
2090

**Fukushima Daichi (1971) wurde nicht nachgerüstet**

**Fukushima-Reaktor nicht mit derzeit auf dem Markt befindlichen KKW vergleichbar**

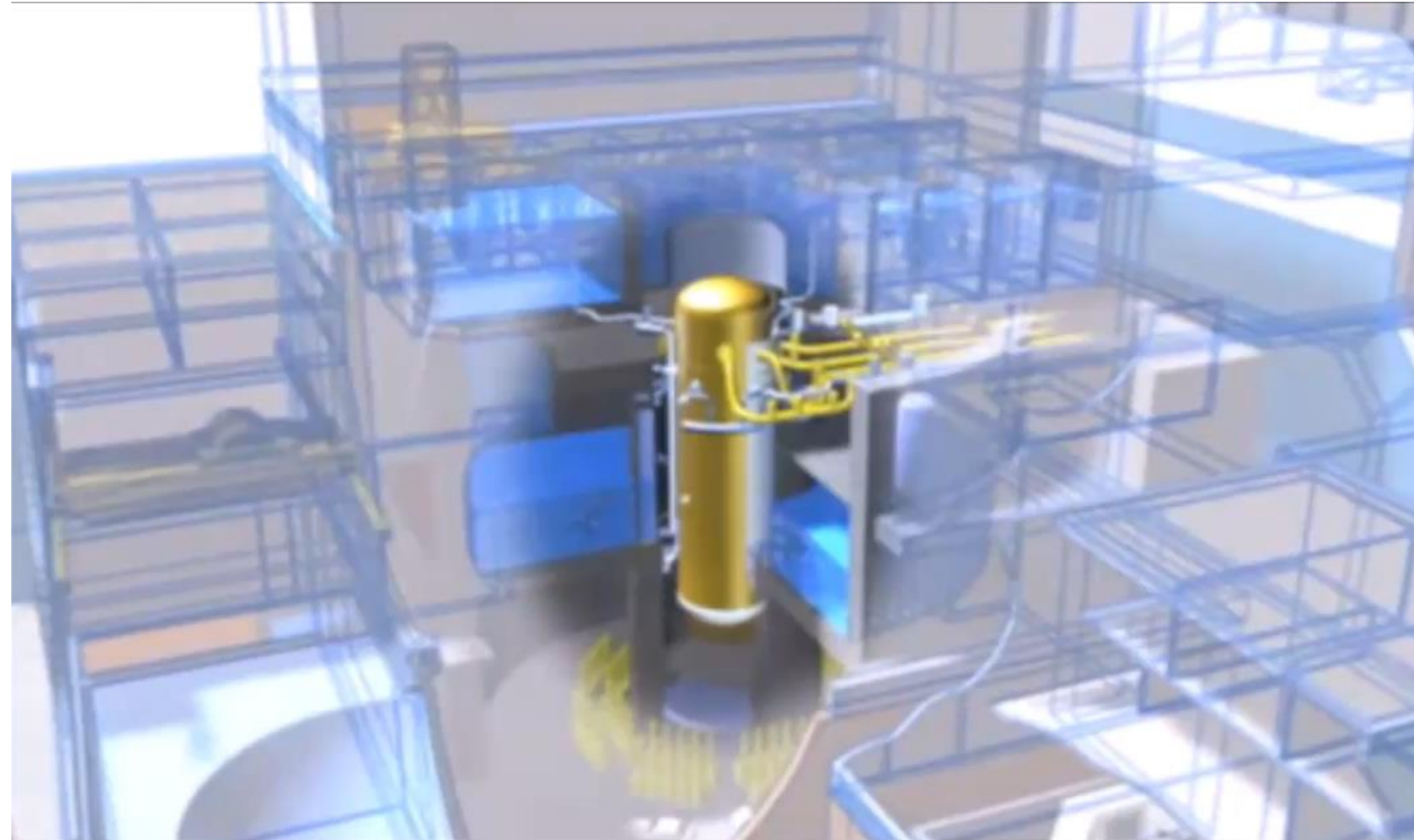
09-50898-01n

# Zuwachs des Sicherheit im Reaktor Design



Die Sicherheit hat im Laufe der Jahre kontinuierlich und stark zugenommen





## Passive Sicherheitssysteme:

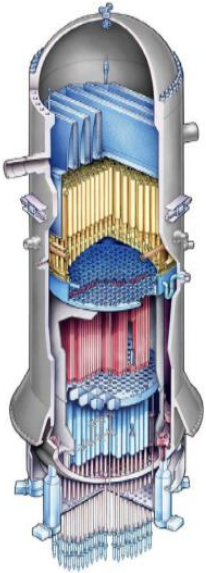
Sie funktionieren auf physikalischer Prozesse (Wärmeübertragung, Naturumlauf, unz.) ohne dass Strom oder Eingriffe von Operator erforderlich sind

## Die Kernschadenshäufigkeit ist nicht die ganze Geschichte

- „Grace period“ von 3-7 Tagen, bis ein menschliches Eingreifen erforderlich ist
- „Practical Elimination“ Storfälle die zum Freisetzung von Radioaktivität führen ( $<10^{-7}$ /Jahr)

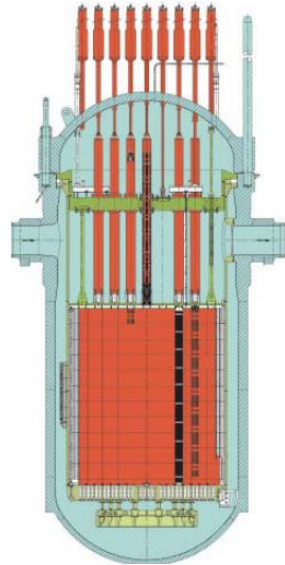
# Große KKW der Generation III/III+ auf dem Markt und bereits in Betrieb (Beispiele)

ABWR (Japan)



In Betrieb: 4 (Japan)  
Im Bau: 2 (Japan)

EPR (FR)



In Betrieb : 3 (China, Finland)  
Im Bau: 2 (UK)

AP1000 (USA)



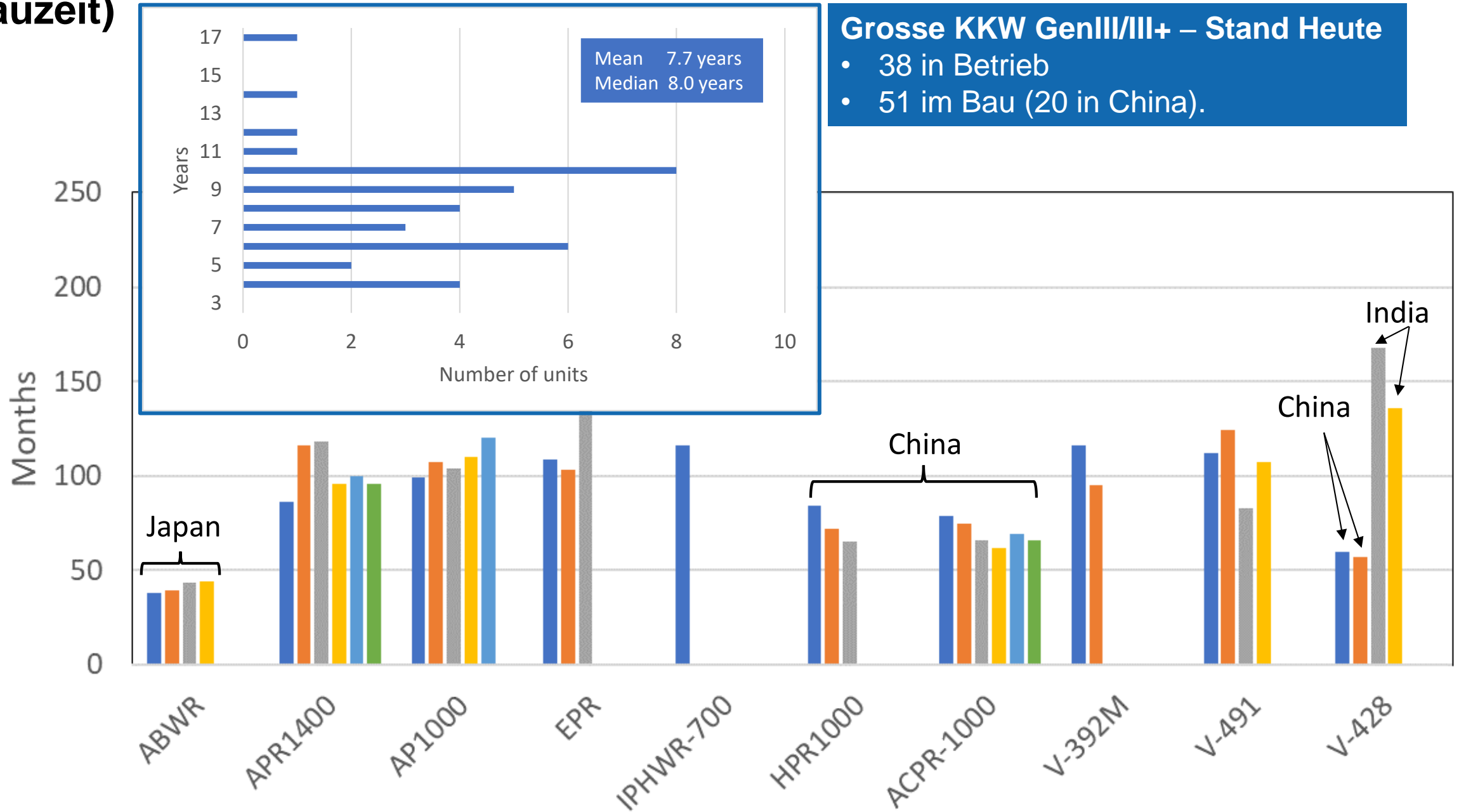
In Betrieb : 5 (China, USA)  
Im Bau: 1 (USA)

APR-1400 (S. Korea)



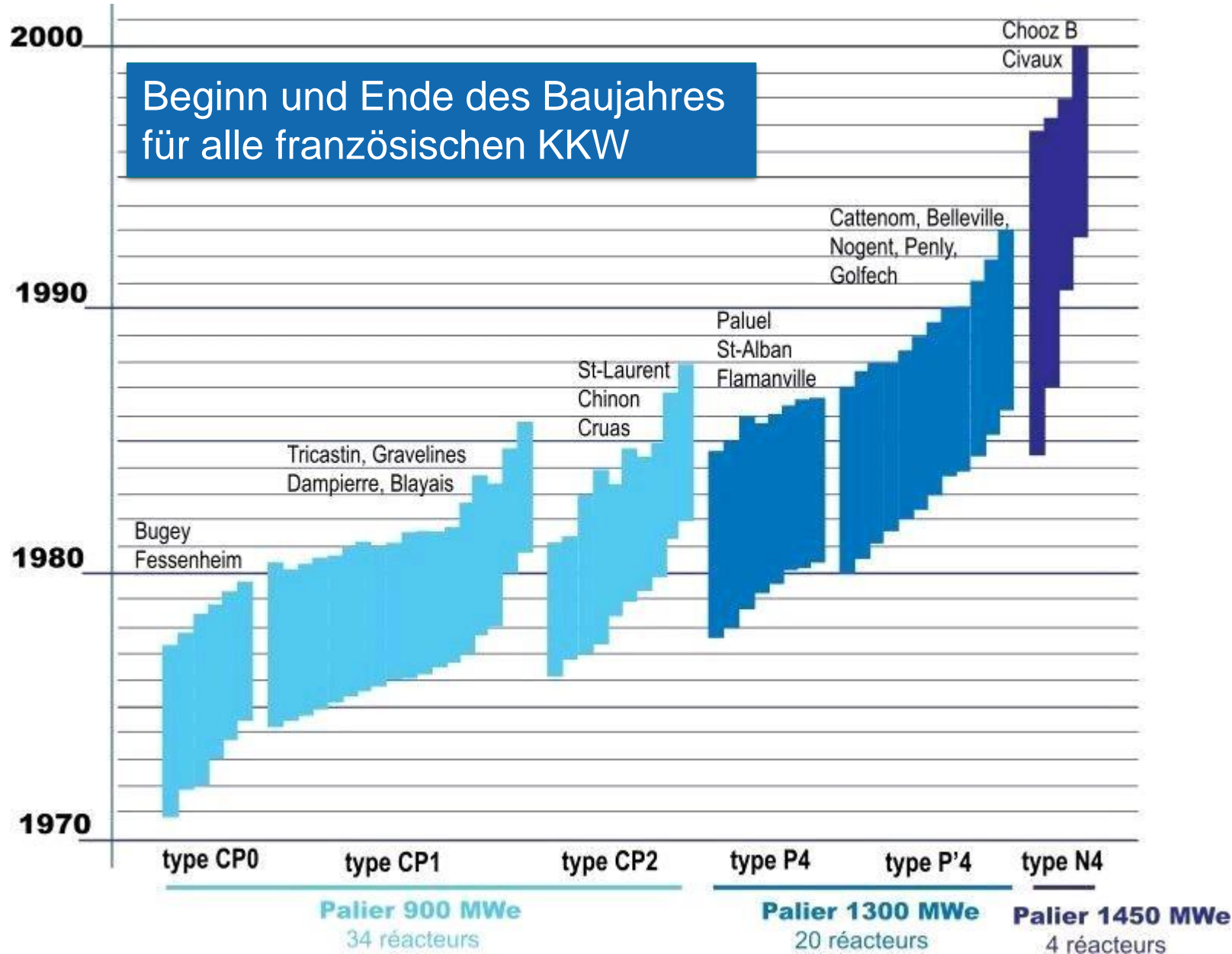
In Betrieb: 6 (S.Korea, UAE)  
Im Bau: 4 (S. Korea, UAE)

# Große KKW der Generation III/III+ auf dem Markt und bereits in Betrieb (Bauzeit)





# KKW Bauzeit – Frankreich



Die Lieferkette muss in Europa neu aufgebaut werden



# Grosse KKW - Herausforderungen

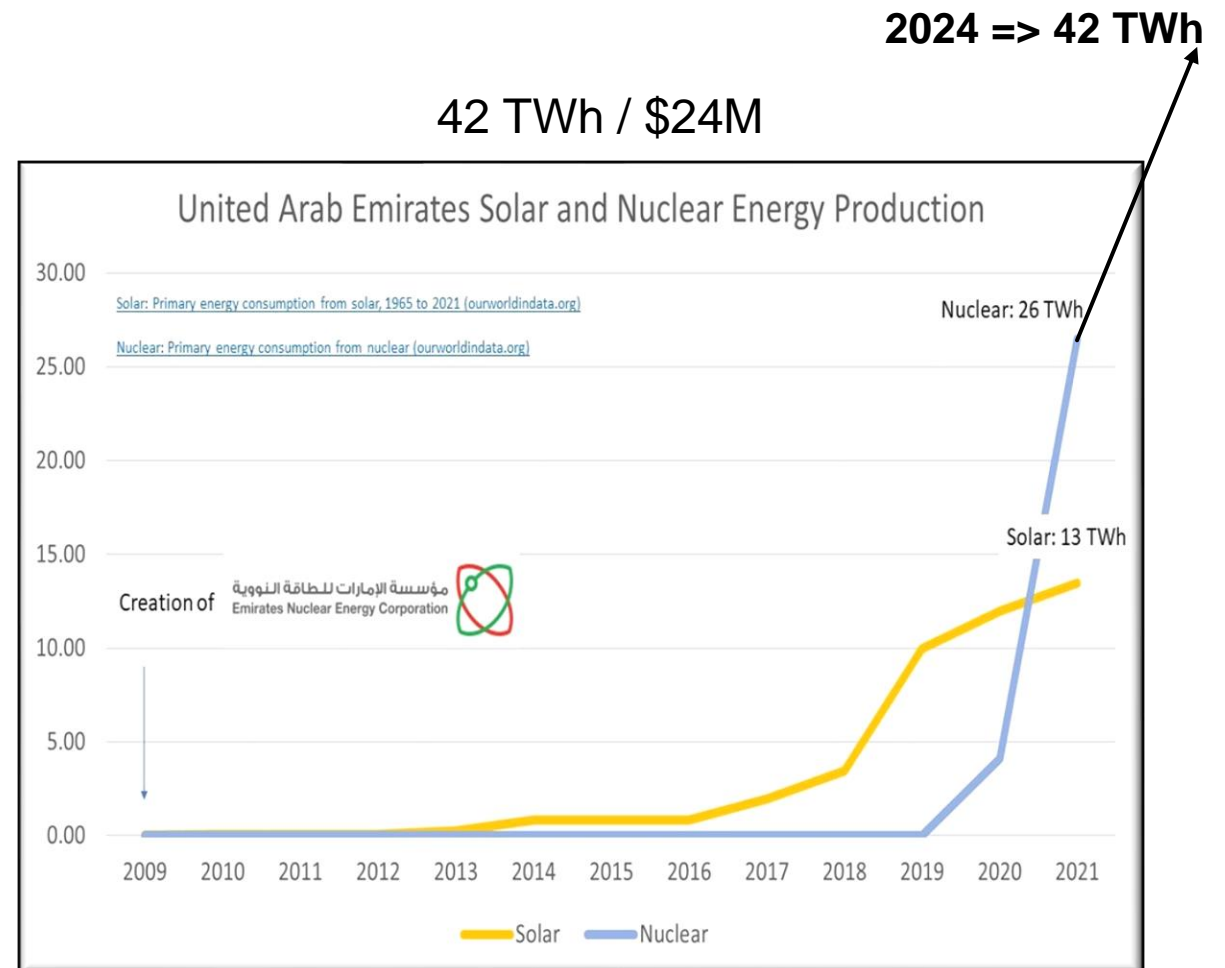
- Große, komplexe und ineffiziente Baustellen
- Hohe Kapitalkosten und langer Zeitraum bis zur Kapitalrendite (für private Unternehmen weniger attraktiv)



Erfolgreiches Beispiel: Südkorea hat in den Vereinigten Arabischen Emiraten innerhalb von 9 Jahren 4 große KKW der Generation III/III+ für insgesamt 24 Milliarden US-Dollar gebaut.

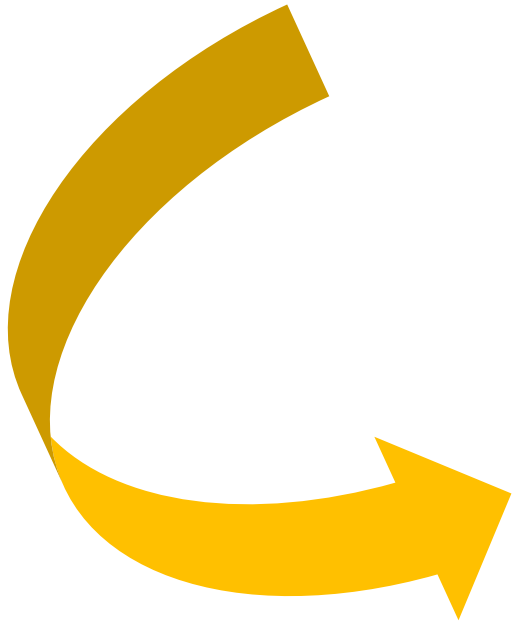
Um die gleiche Energie wie die 4 KKW (42 TWh) zu produzieren =>

- 1680 Gondosolaranlage
- Preis von 75,6 Milliarden CHF (ohne Berücksichtigung der Kosten für Backup, Speicherung und Stromleitungserweiterungen).



42 TWh / CHF 75.6 Milliarden, 1680 Gondosolar Anlage

- Grosse, komplexe und ineffiziente Baustellen
- Hohe Kapitalkosten und langer Zeitraum bis zur Kapitalrendite (für private Unternehmen weniger attraktiv)

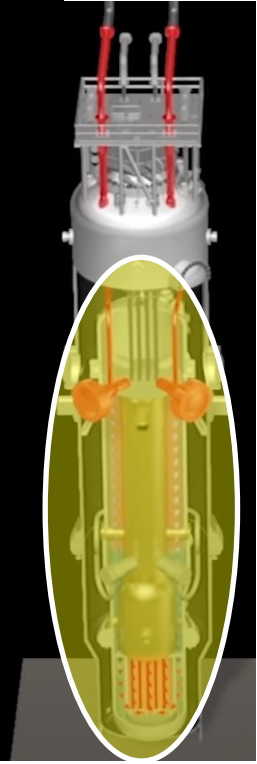
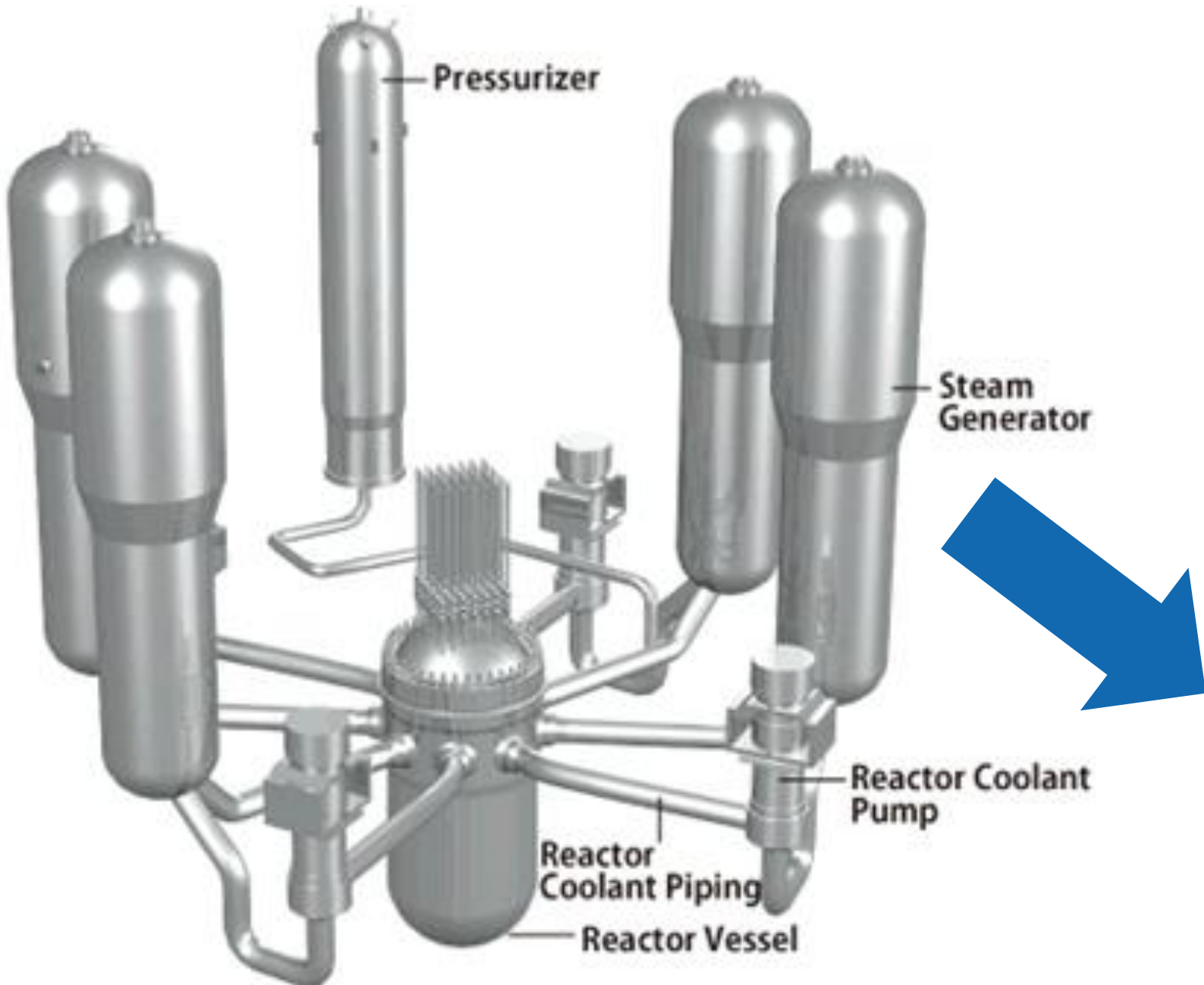


- Einfacheres Design
- Modular, Fabrikfertigung (effizienter und billiger)
- Geringere Kapitalkosten und kürzere Bauzeiten
- Mehr als nur Energie ins Netz einspeisen

- Leistung bis ~300 MWe
- Stark verkürzte Bauzeit für jedes einzelne Modul (1.5 – 2 Jahre als Ziel)
- Kompakte Bauweise eröffnet die Möglichkeit des Baus unter der Erde
- Passive Sicherheit
- „Walk-away“-sicher und daher stark reduzierte Größe der Notfallplanungszone (Notfallplanungszone begrenzt auf den Anlagenumfang)



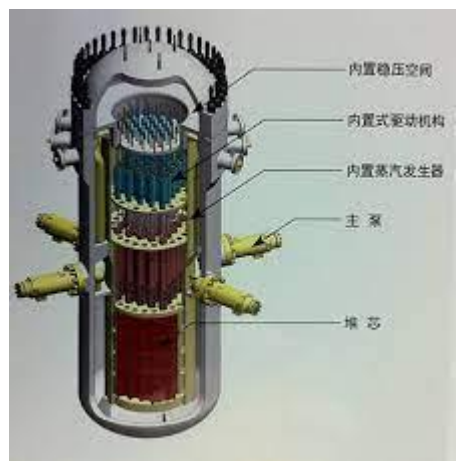
# SMRs – kleine modulare Reaktoren



# SMRs – kleine modulare Reaktoren



BWRX-300 (GE/Hitachi) für Ontario Power, operation by 2028



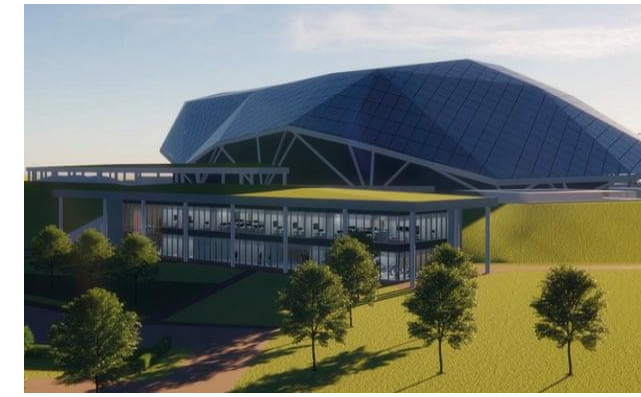
ACP 100, in Bau (China)



RITM-200 (Russland)



NUWARD (EdF/Technicatome) 170 MW, ab 2030



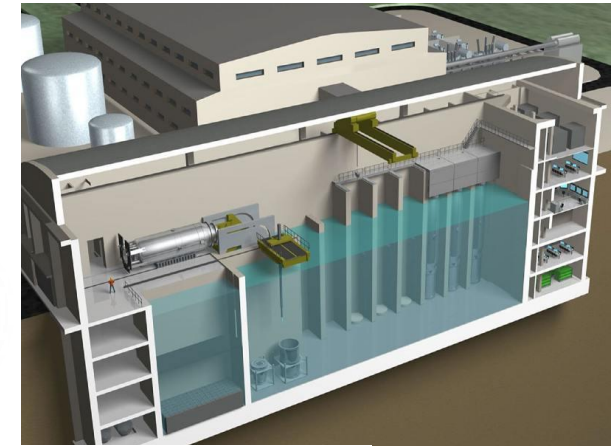
UK SMR (Rolls Royce), 443 MW, by 2030



SMART (Korea), 100 MW



X-energy (USA) DOW, Baubeginn für 2026 geplant

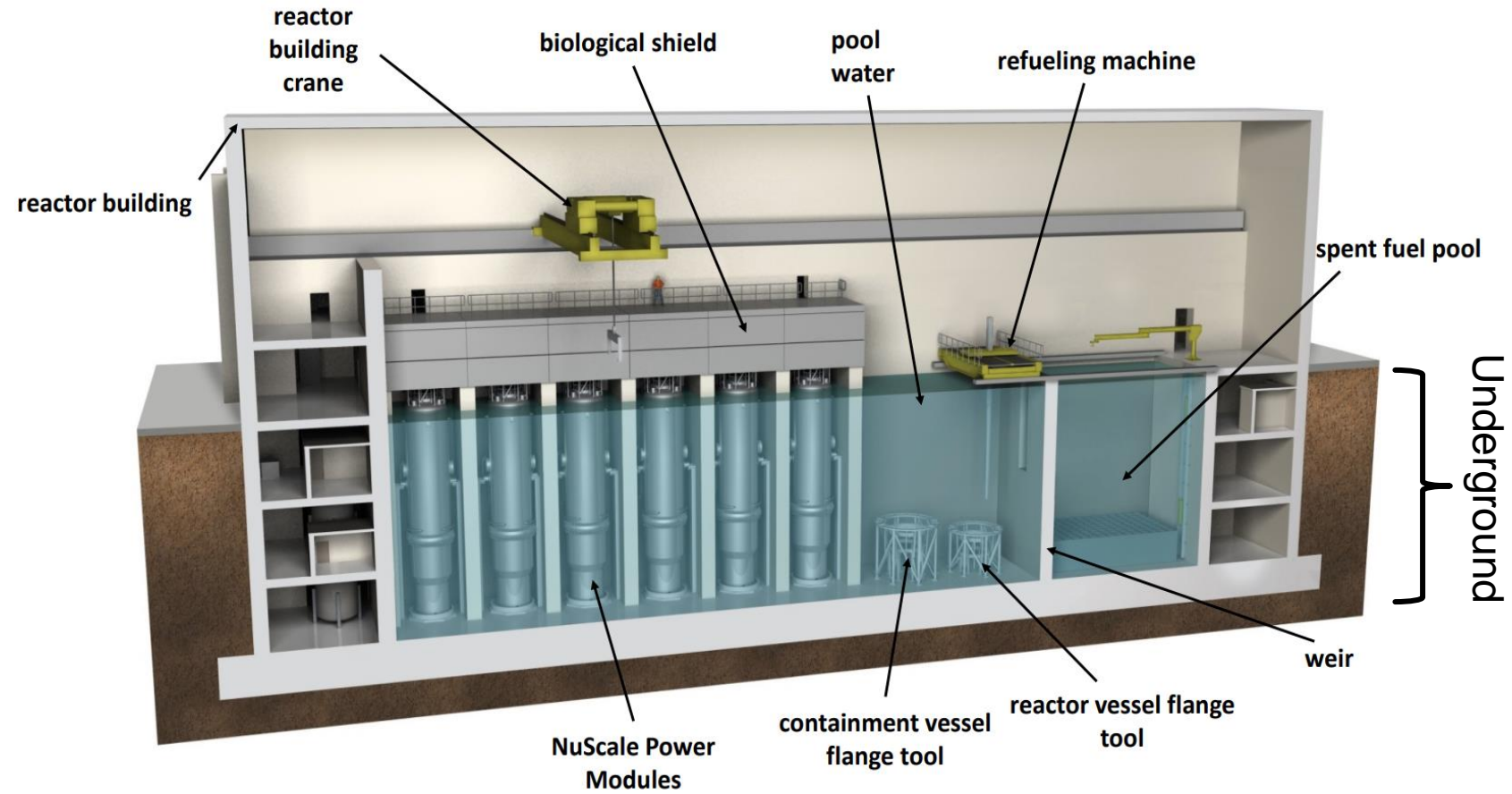
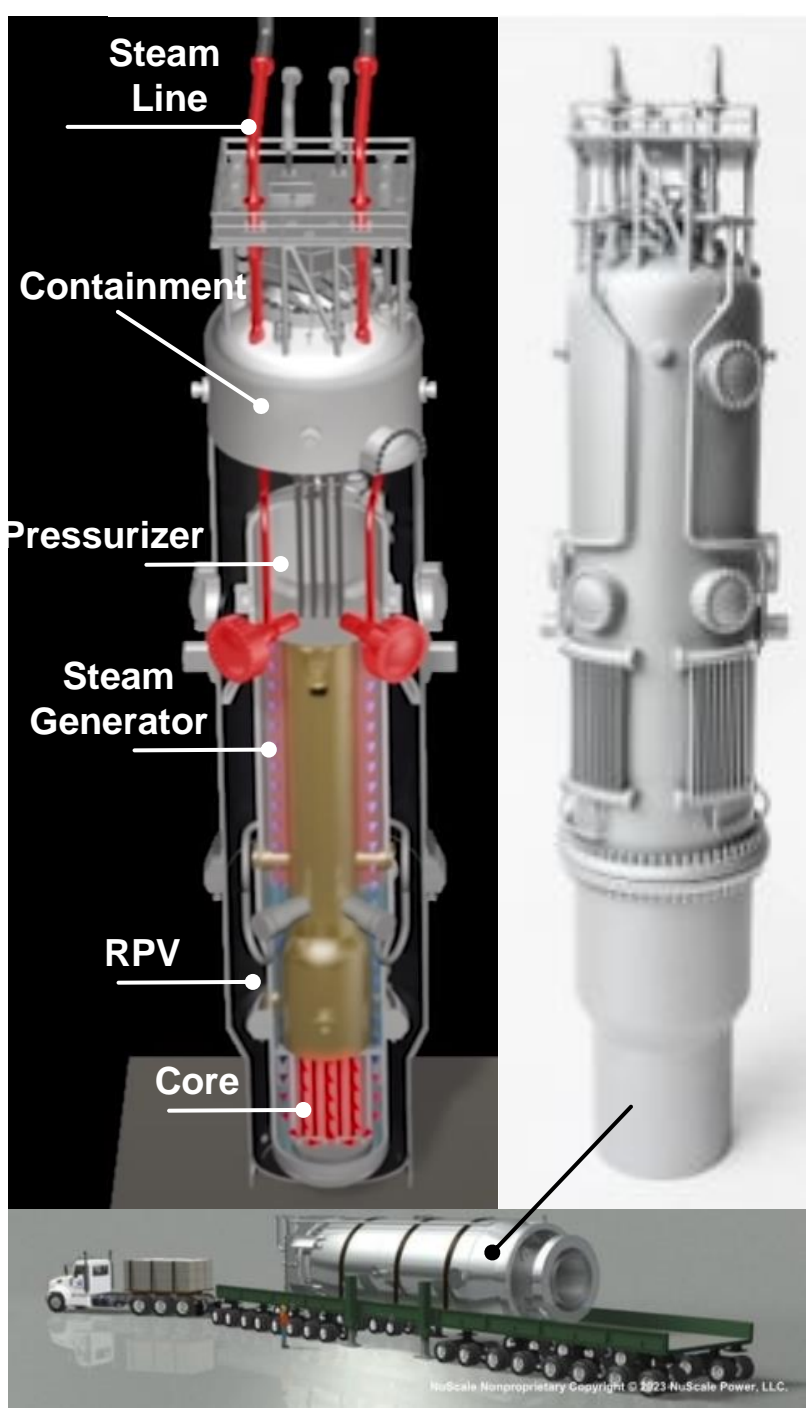


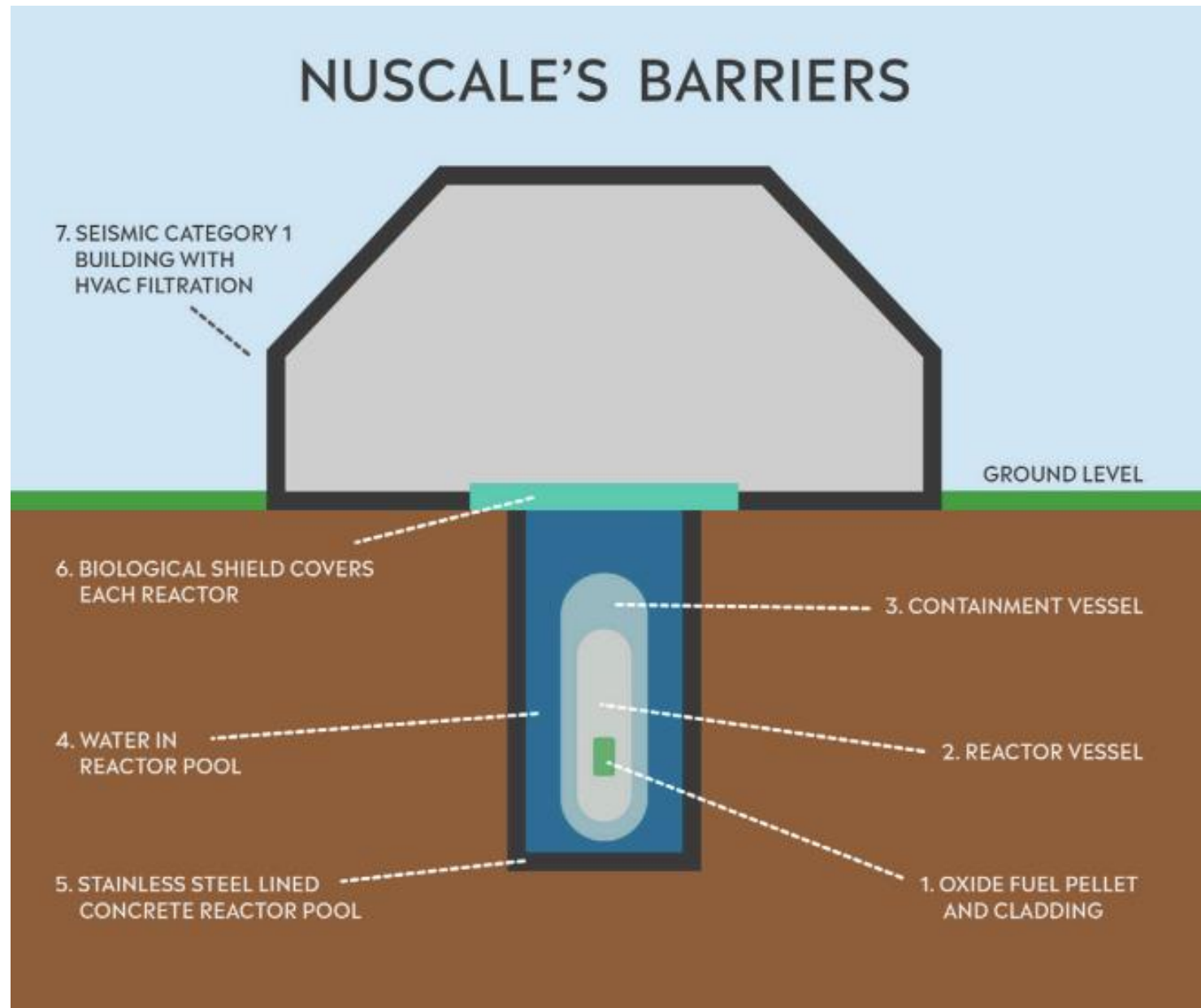
NuSCALE (6x77 MW)

**Russland:** 8 in Betrieb (LWR), mehrere geplant (LWR/SFR)  
**China:** 2 in Betrieb (HTGR), 1 in Bau (LWR), 2 in Bau (SFR)  
**Canada:** 4 bestellt, **Argentina:** in Bau  
**USA:** 1 in Bau ab 2024 (Kairos), mehrere geplant



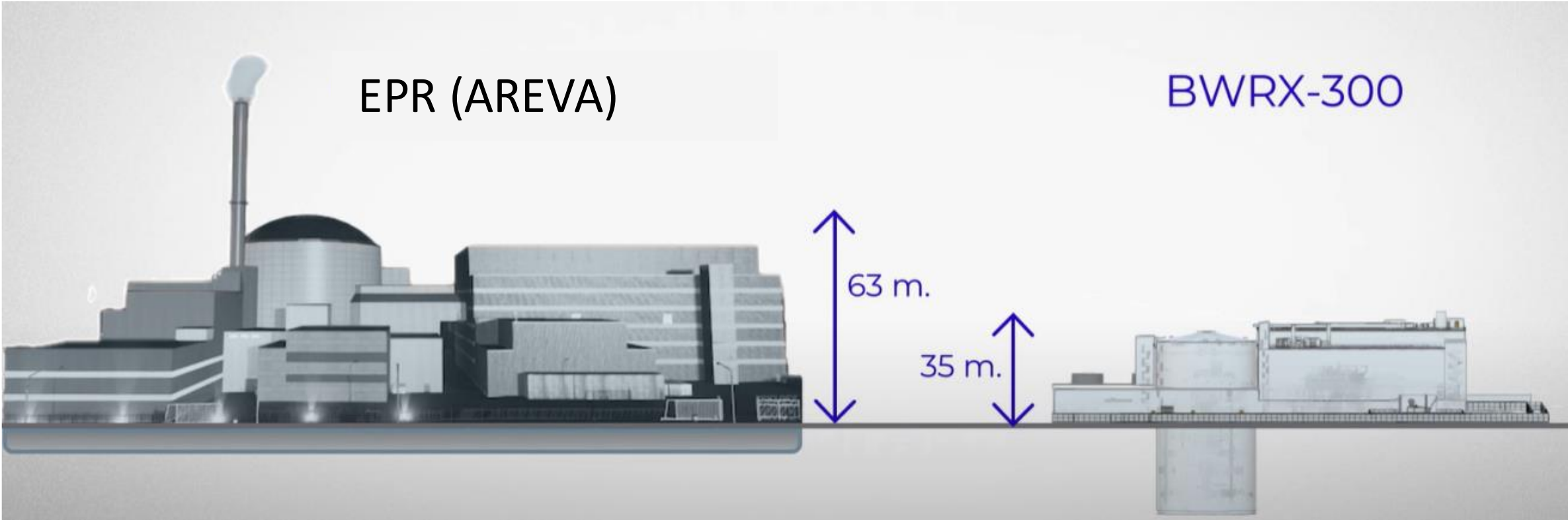
# SMRs – kleine modulare Reaktoren







# Grosse KKW vs SMR



# NUSCALE

## Kühlung ohne externe Stromversorgung und ohne externes Wasser



US NRC: Notfallplanungszone begrenzt auf den Anlagenumfang

# Nicht nur für die Stromproduktion



Remote  
mining  
operations



Industrial  
process  
heat



District  
heating



Remote  
communities



Hydrogen  
Generation



Marine  
Shipping



Critical  
Infrastructure  
Installations



Disaster  
relief

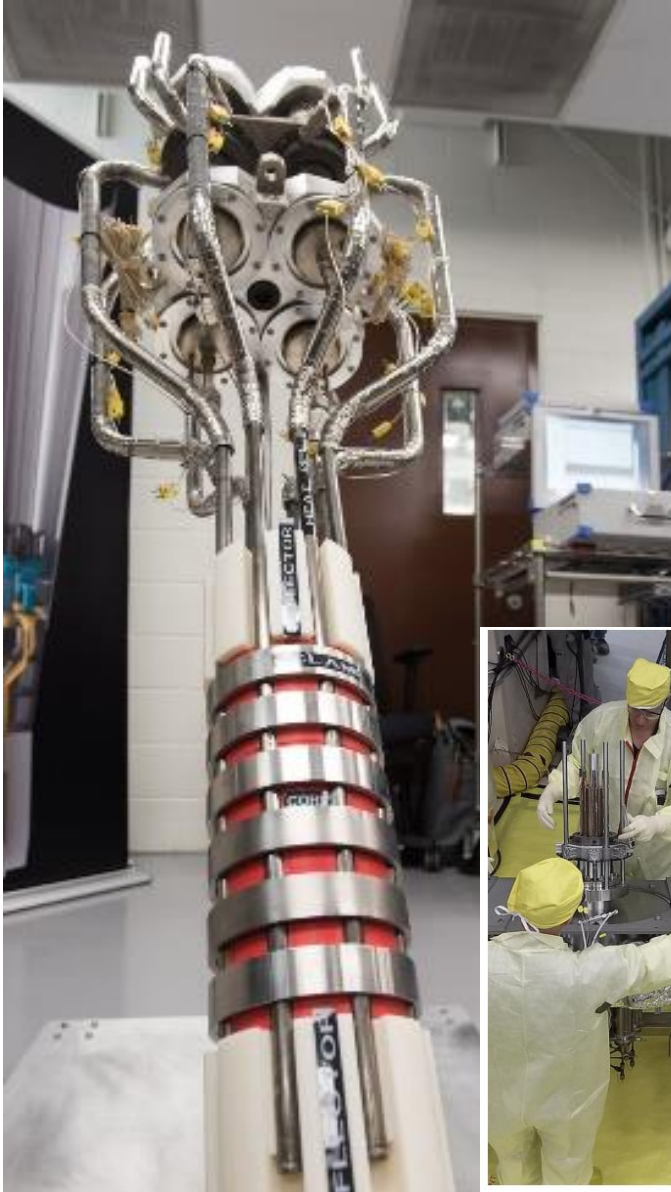


Research  
Reactors

**Pilotanlage - Produktion von Wasserstoff aus 1.25 MW von Nine Mile Point KKW (NY, USA)**



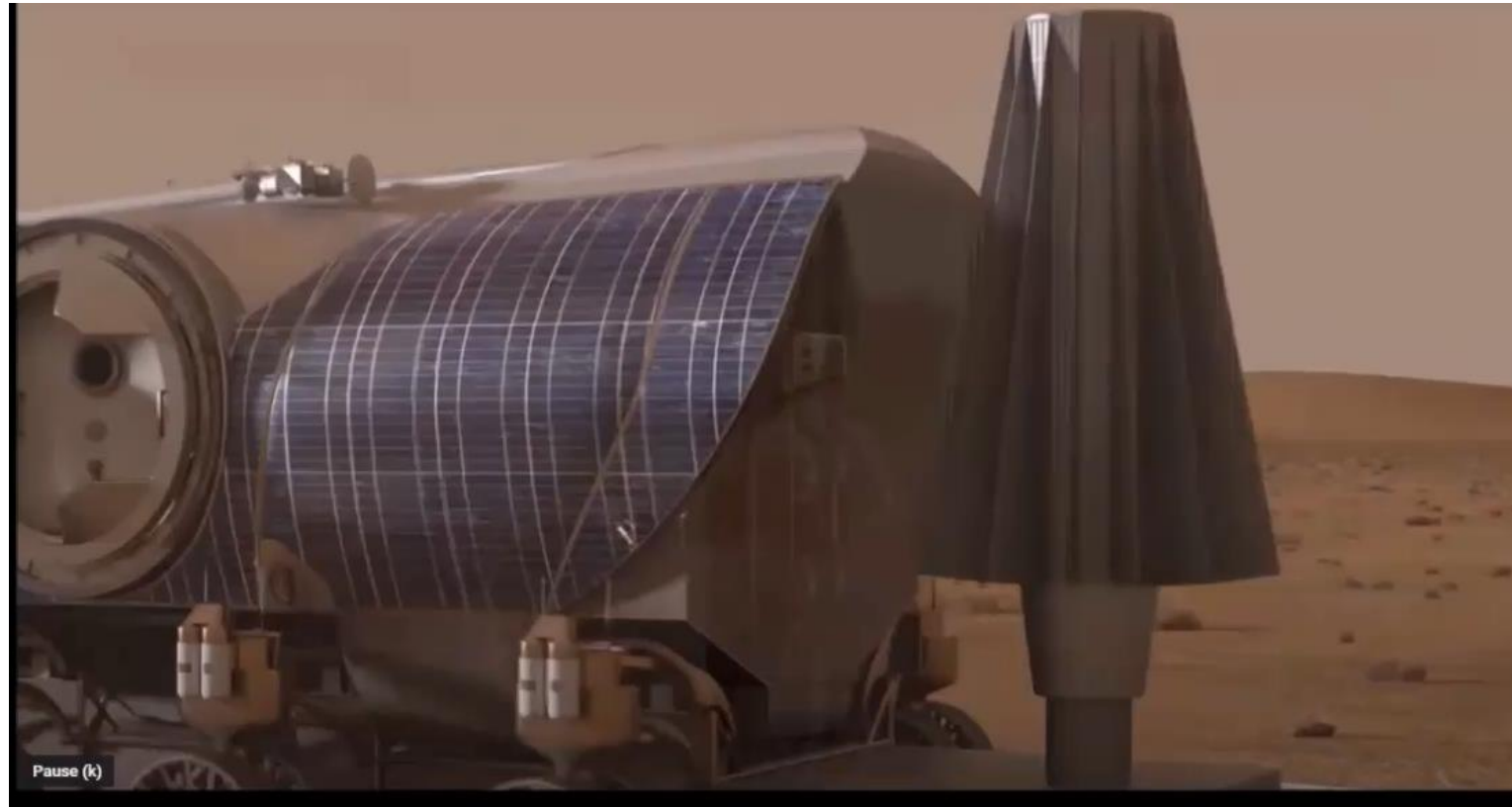
# KILOPOWER REACTOR – NASA / Microreaktoren



**KILOPOWER – NASA/LANL**  
Entwicklung und Tests: < \$20M, < 3 Jahren (2015 – 2018)

Mars Mission

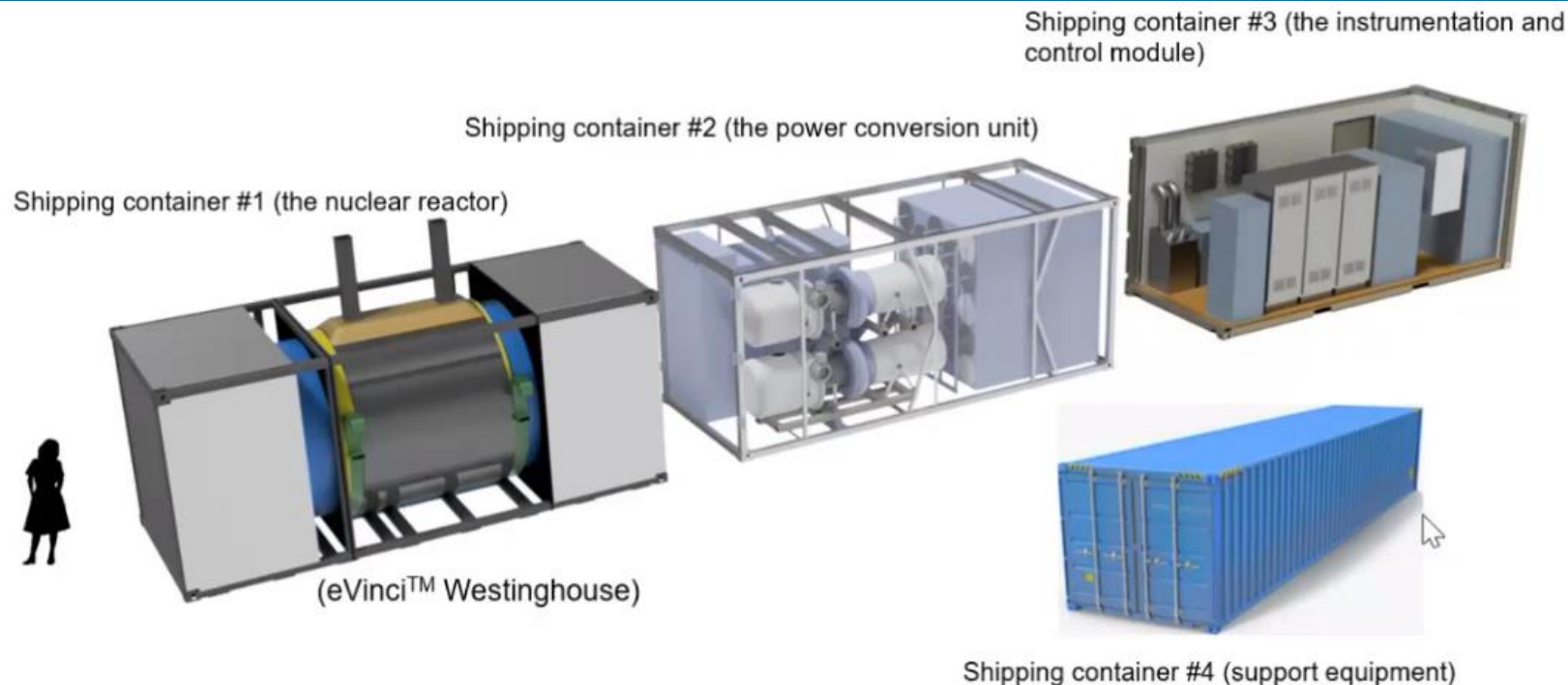
SPACE NUCLEAR PROPULSION  
for Human Mars Exploration



([youtube.com/watch?v=fugONNLb9JE](https://youtube.com/watch?v=fugONNLb9JE))



- ❑ Plug-and-Play-Verbindung (< 1 Monat)
- ❑ Reduzierter Platzbedarf (~15 m<sup>2</sup>), kleiner Anlagenstandort (< 2000 m<sup>2</sup>)
- ❑ Brennstoffwechsel alle 10 Jahre
- ❑ keine Abfalllagerung vor Ort, kein Wasser benötigt zum Kühlen
- ❑ Kann als Teil des Stromnetzes, unabhängig vom Stromnetz oder als Teil eines Microgrids betrieben werden
- ❑ Komplet in einer Fabrik gebaut, und in einem ISO-Container auf LKW transportierbar
- ❑ Wärme für industrielle Anwendungen
- ❑ Stromversorgung abgelegener, ländlicher Gemeinden, die auf Dieselgeneratoren angewiesen sind
- ❑ Walk-away safe
- ❑ **Für Wasserentsalzung, Wasserstoffherzeugung und andere Industrien**



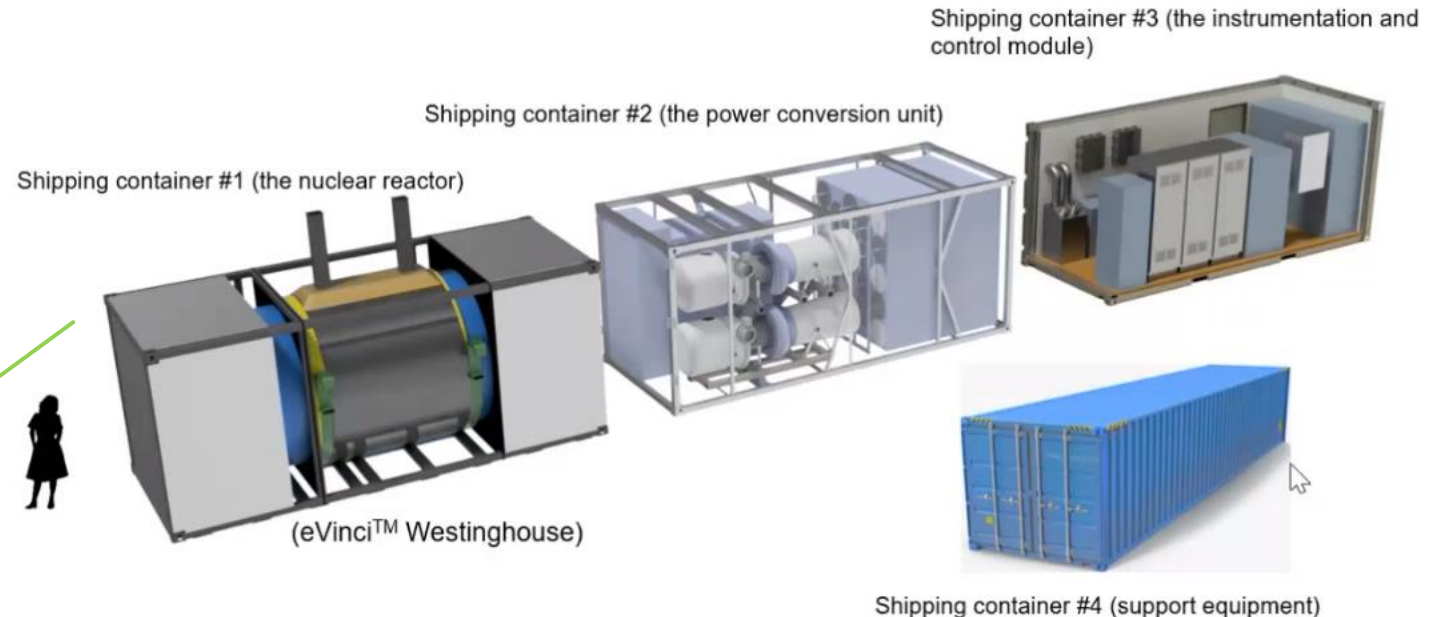


## PLAYERS (USA)

- MARVEL (INL, in Bau)
- Westinghouse (INL, 2026)
- BWRT (INL, 2025)
- Kairos (ORNL, 2026)
- X-Energy
- Ultra Safe Nucl. Corp.
- OKLO
- HOLOS



10 MW Vestas



# Gen IV / Natriumgekühlt SMR [Terrapower / Bill Gates]

- Gen-IV-Reaktor (natriumgekühlt) SMR
- mit integriertem Energiespeicher (geschmolzenes Salz)

Einreichung der Baugenehmigung  
2024 (Wyoming)

TERRAPOWER – 345 MWe  
1 GWh Energy Storage



Brutreaktor!  
U238 als Brennstoff

## Besondere Herausforderungen für neue KKW in der Schweiz:

- ❑ Fordurengen nur für einige Technologien (Bsp. Bis 60% der Kosten für Alpin Solar vom Staat übernommen)
- ❑ Möglichkeit, die Genehmigungsverfahren auch in der Phase der Betriebsgenehmigung anzufechten, wenn sich der Reaktor bereits im Bau befindet.



**THANK YOU FOR YOUR ATTENTION**