

# Neue Entwicklungen der Kerntechnik

Prof. Annalisa Manera

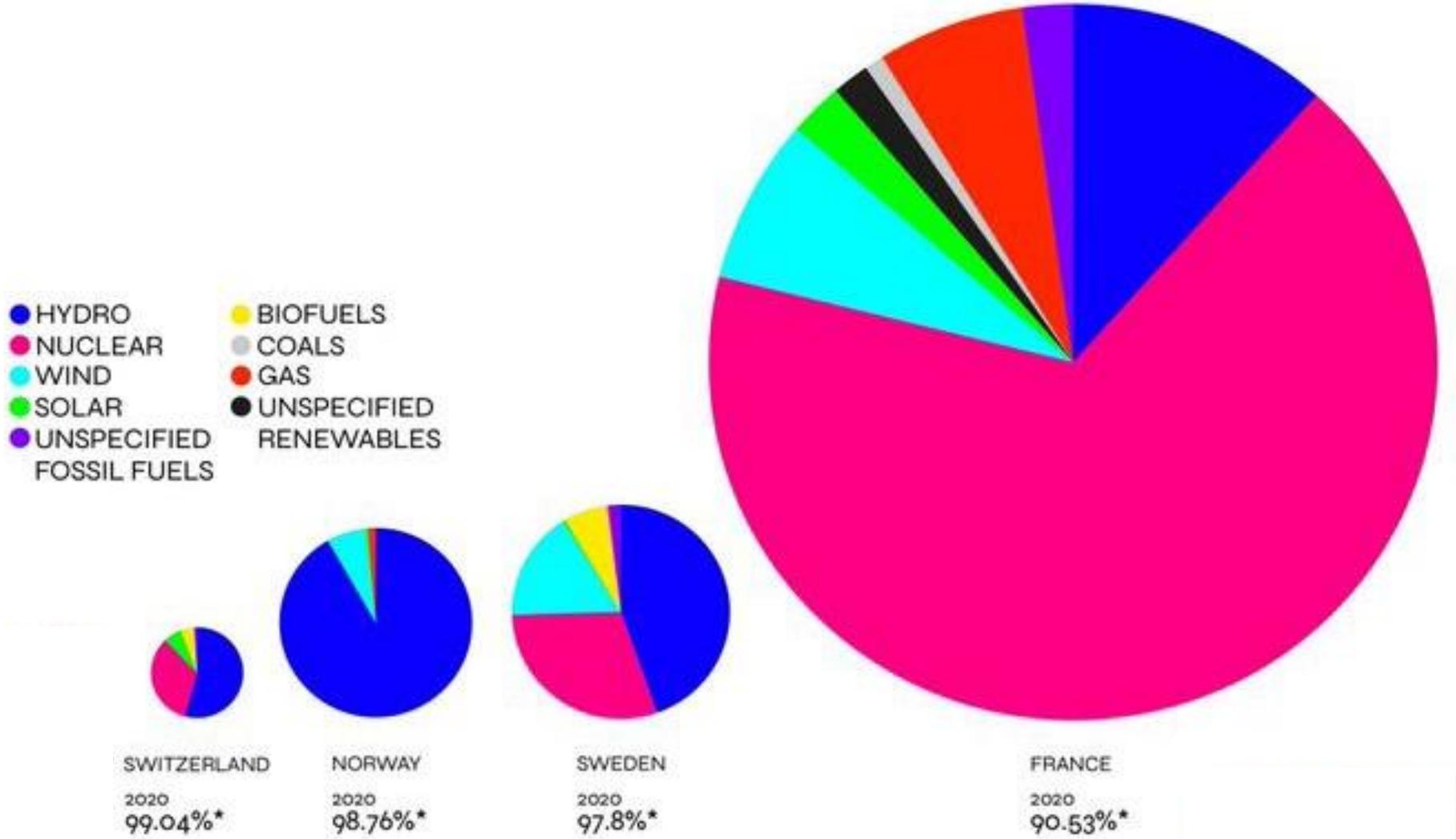
Laboratory for Nuclear Systems and Multiphase Flows

ETH-Zurich

Axpo, 21.06.2023

# Die Stromproduktion in der Schweiz ist bereits CO2-frei

Länder in Europa mit ~ CO2-frei Stromerzeugung nutzen Kernenergie  
Ausnahme: Norwegen mit mehr als 98 % Wasserkraft



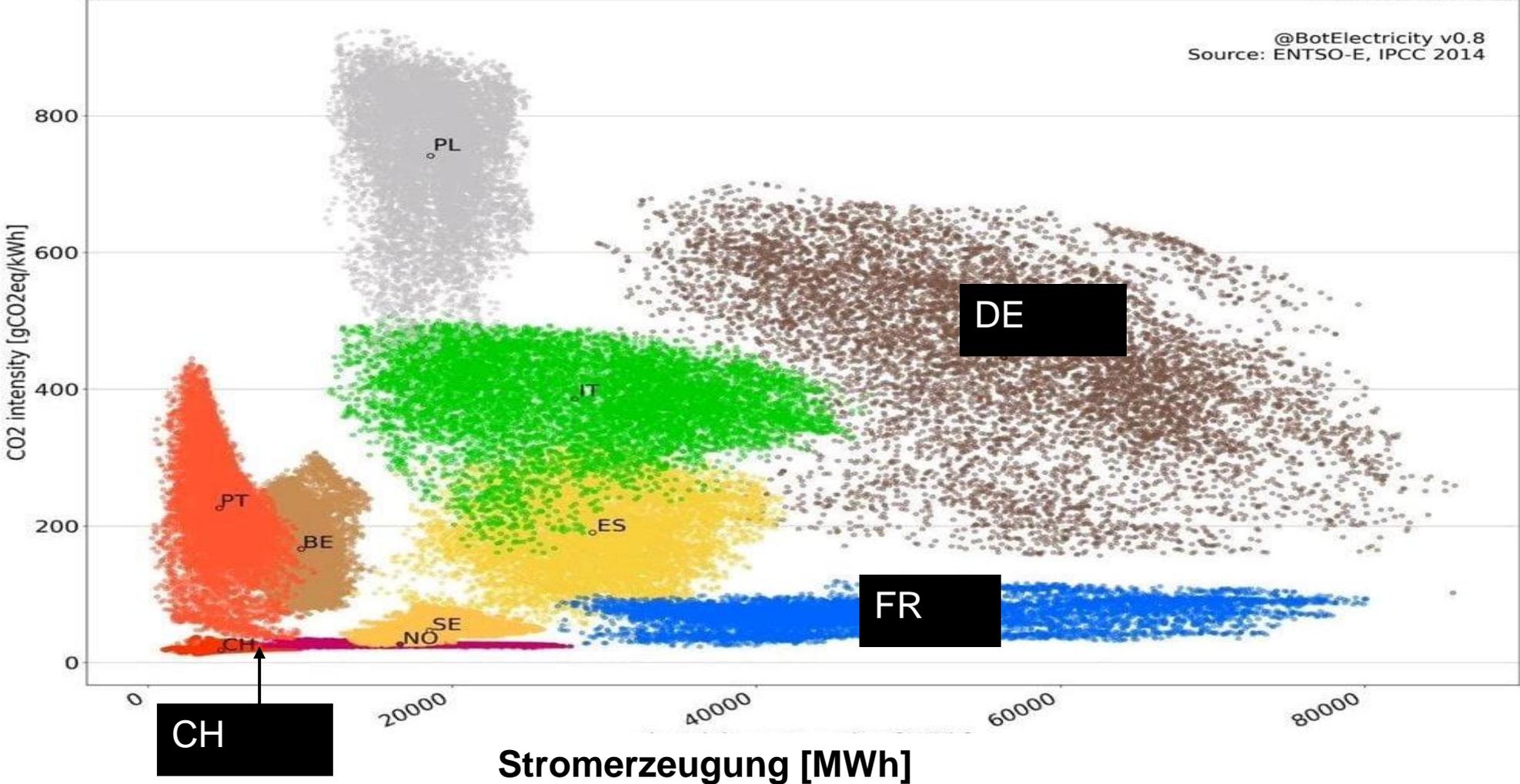
\*Low carbon electricity

Source: <https://lowcarbonpower.org/>

# Die Stromproduktion in der Schweiz ist bereits CO2-frei

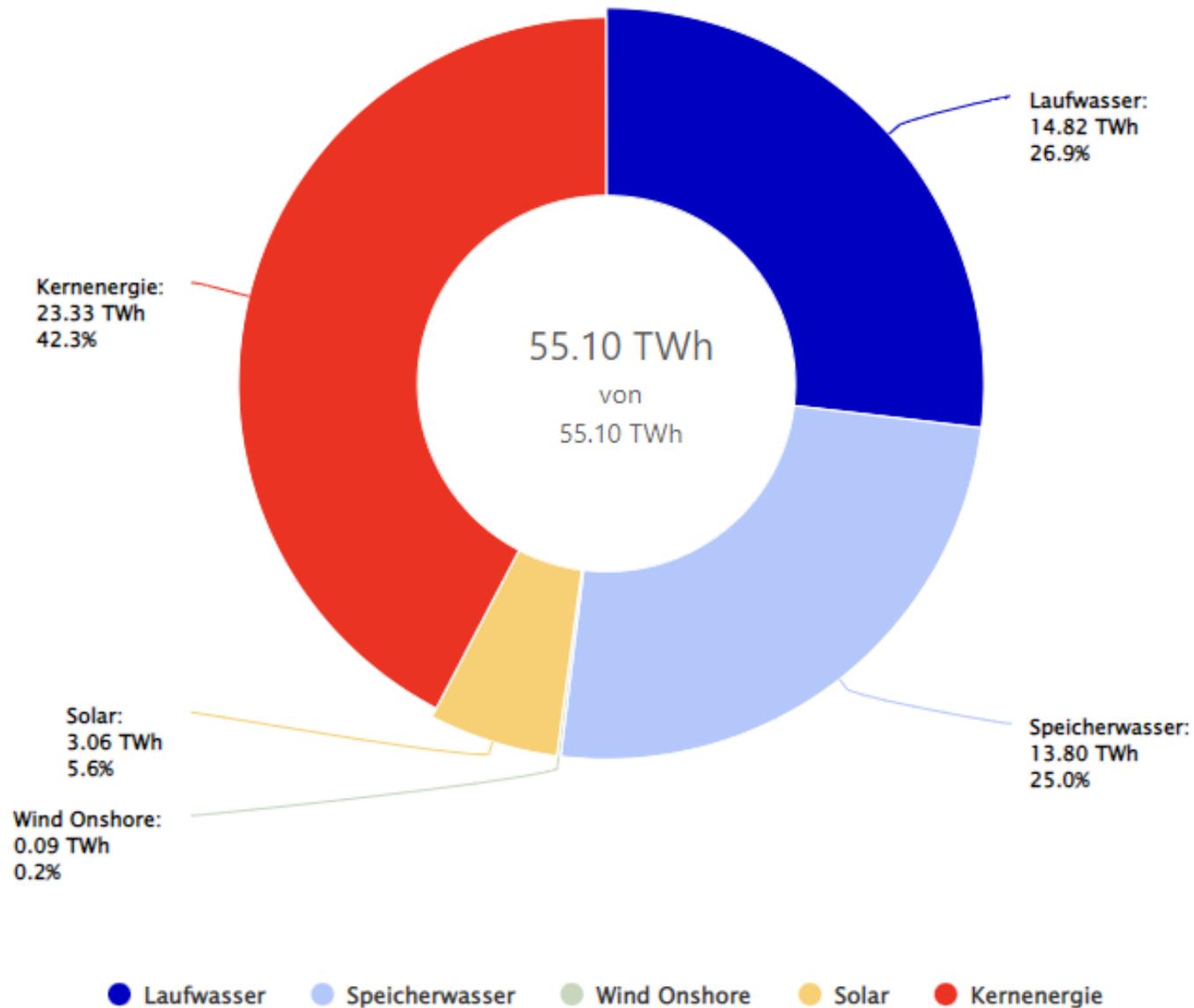
Länder in Europa mit ~ CO2-frei Stromerzeugung nutzen Kernenergie  
Ausnahme: Norwegen mit mehr als 98 % Wasserkraft

CO2eq/kWh – Jahr 2022



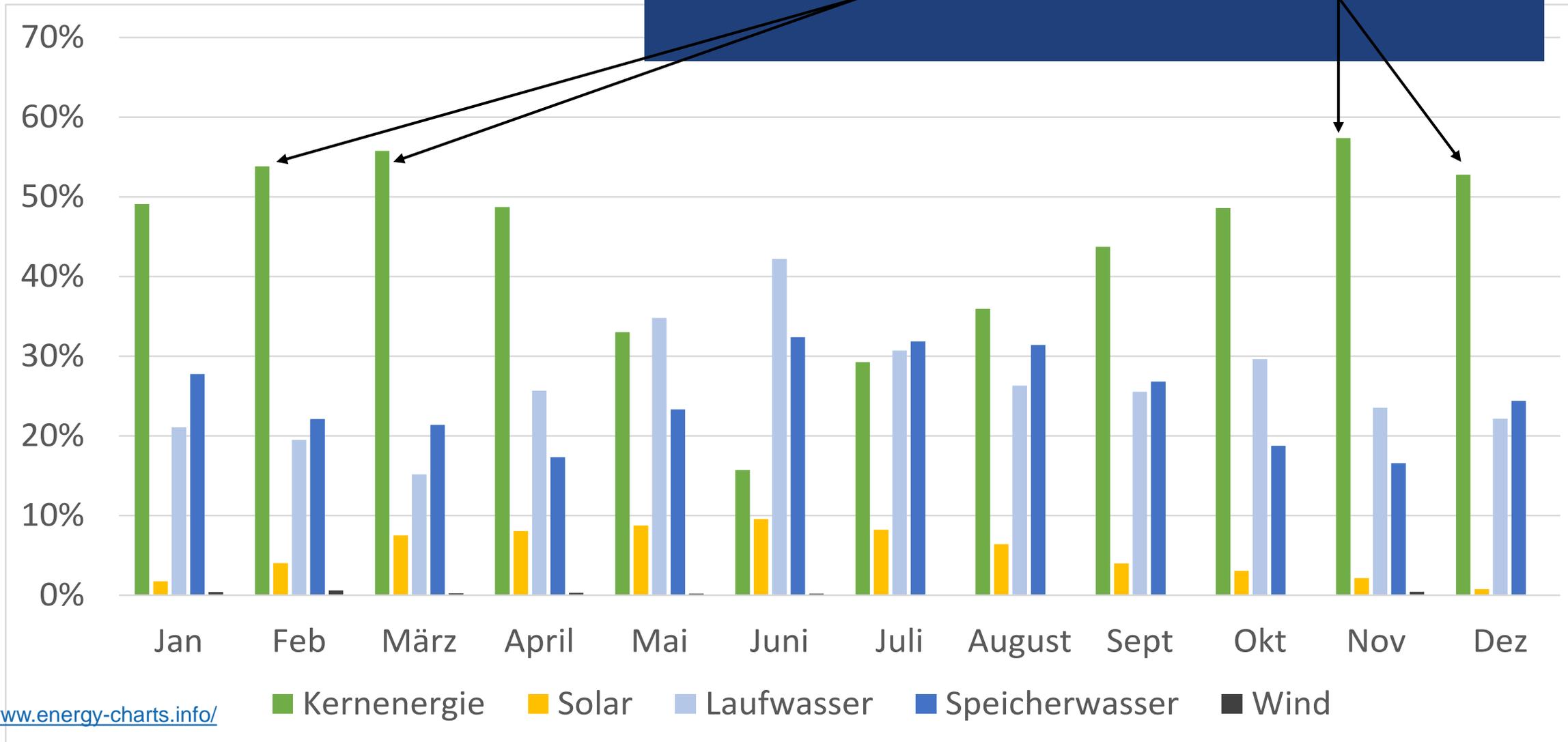
# Nettostromerzeugung in der Schweiz 2022

Beitrag der Kernenergie zur Stromproduktion in der Schweiz: mehr als 42%



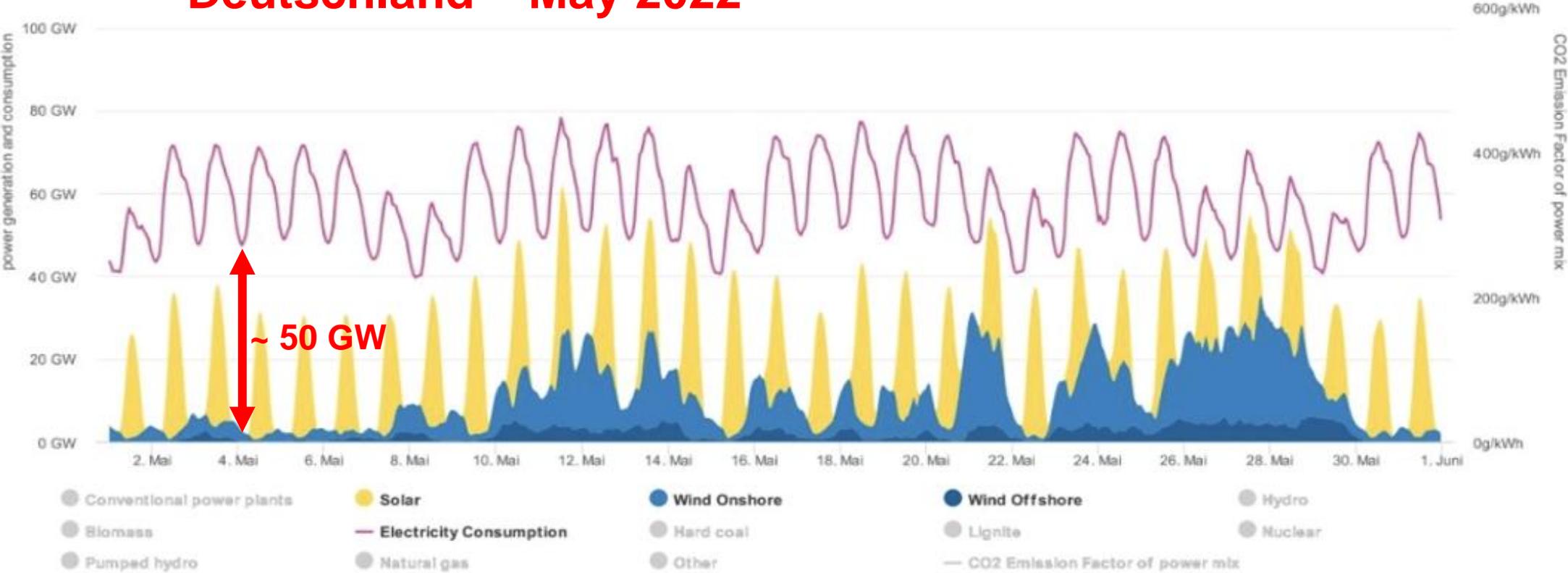
# Nettostromerzeugung in der Schweiz 2022

In den Wintermonaten produziert die Kernenergie in der Schweiz über 50% Strom



# Beispiel Deutschland – Ersatz von KKW durch Erneuerbare

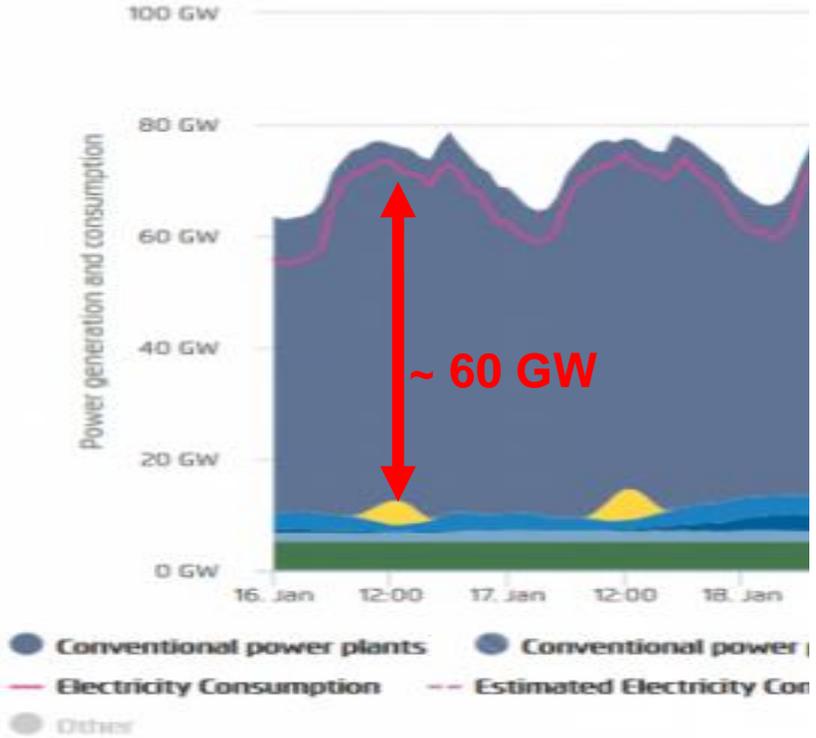
## Deutschland – May 2022



Die Grundlastproduktion ist entscheidend!

# Beispiel Deutschland

## Deutschland – Jan 2021



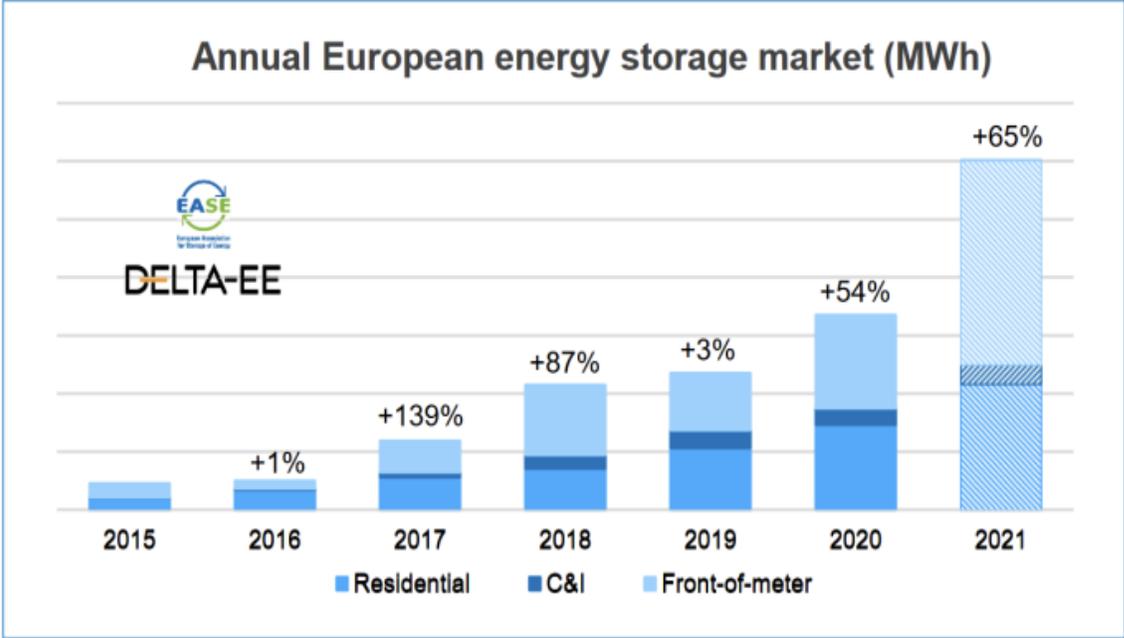
8.3 GWh  
2021

↑

0.6 GWh  
2015

Cumulative installed base

Annual European energy storage market (MWh)  
By 2030, 10 times more



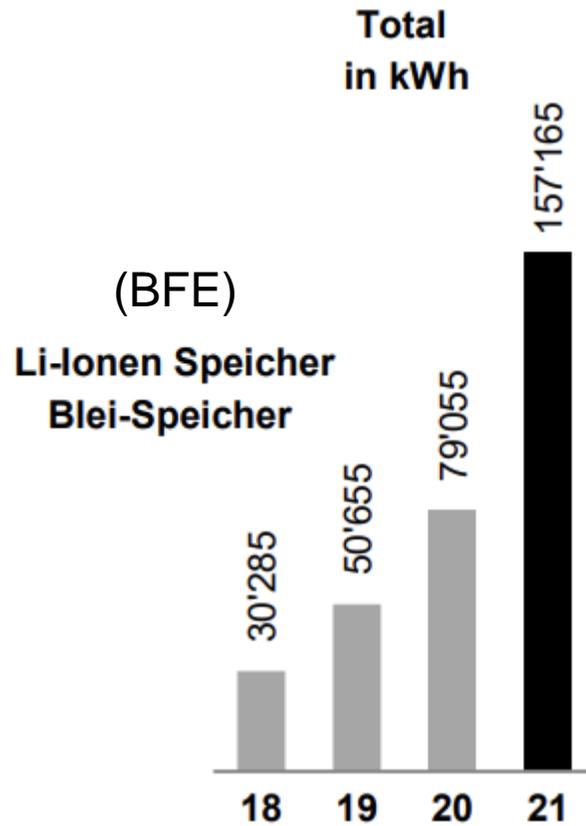
Source: EASE, EMMES 5.0 market data and forecasts - electrical energy storage, 2021. Vertical gradient/horizontal division of the graph on the right is of 0.5 GWh of annual storage deployment

Agora Energiewende; Current to: 23.01.20

**Alle Batterien in der EU würden 60 GW für 8,3 Minuten liefern**

# Ein Blick auf die Zahlen...(Potenzial von Batterien sehr begrenzt)

Entwicklung gesamthaft installierter Kapazitäten von Speichersystemen



~ 7 min KKW Leibstadt

Gesamtmenge an Elektrobatterien in der Schweiz: weniger als 160.000 kWh (was KKL in ~7 Minuten Betrieb produziert)

## Cottingham: Europe's biggest battery storage system switched on

5 days ago

BBC



NEWS

196 MWh

~ 10 min 1300 MWe KKW



HARMONY ENERGY

The battery energy storage system in Cottingham can hold enough electricity to power 300,000 homes for two hours

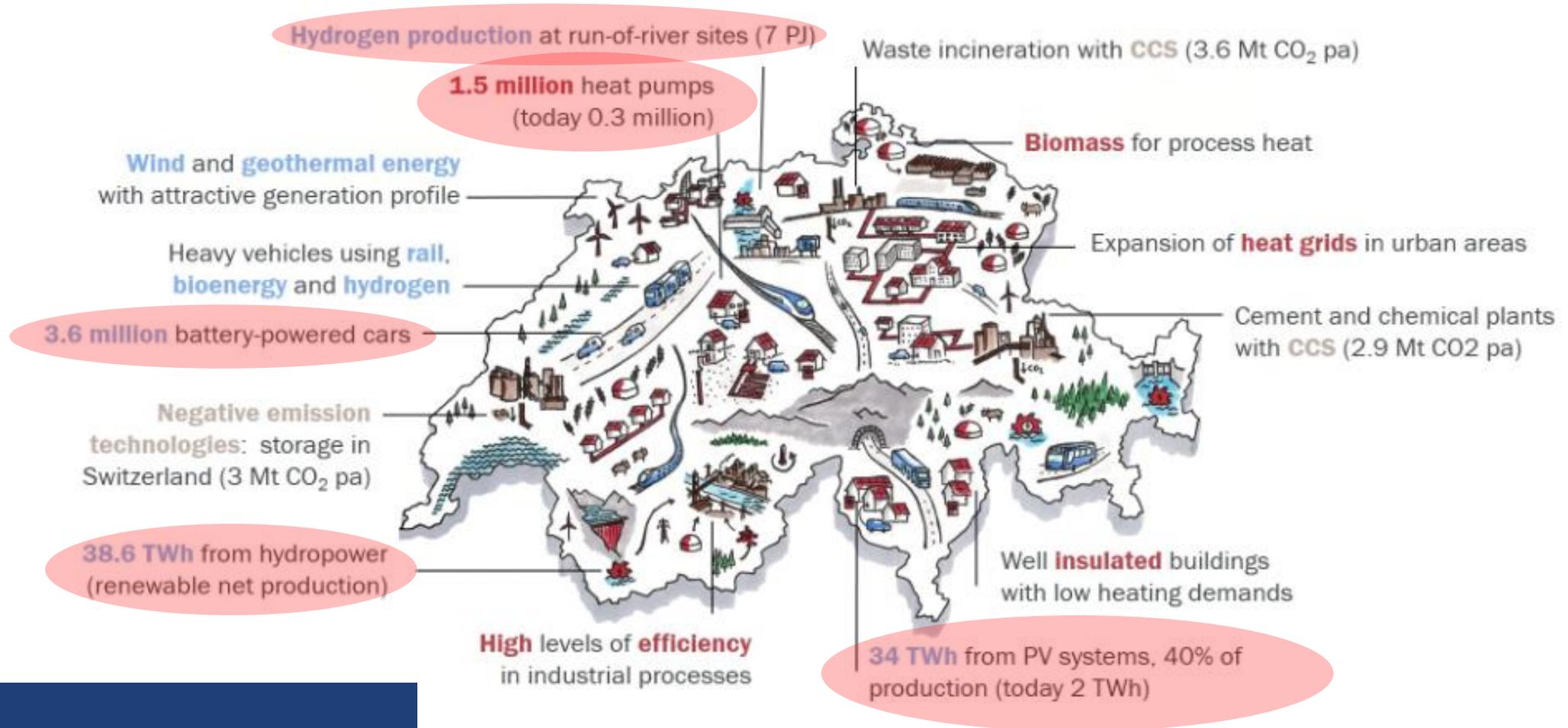
Der größte Batteriepark Europas kann etwa 10 Minuten der Energie speichern, die ein typisches KKW erzeugt.

# **BACKGROUND INFO**

## **BFE SCENARIO – SCHWEIZ 2050**

# Ziele CH-2050 Realität oder Sci-Fi?

## Objectives for a climate-neutral Switzerland by 2050



### Bis 2050

- 25 TWh KKW Ersatz
- 25 TWh zusätzliche Verbrauch (Heizung, Transport/Mobility, enz.)

Labor für Energiesystemanalysen, PSI und SCCER Joint Activity *Scenarios and Modelling*

**Investitionen:** 150–300 Mia. CHF (2020–2050)  
5–10 Mia. CHF/Jahr (0.7–1.4 % des BIP)

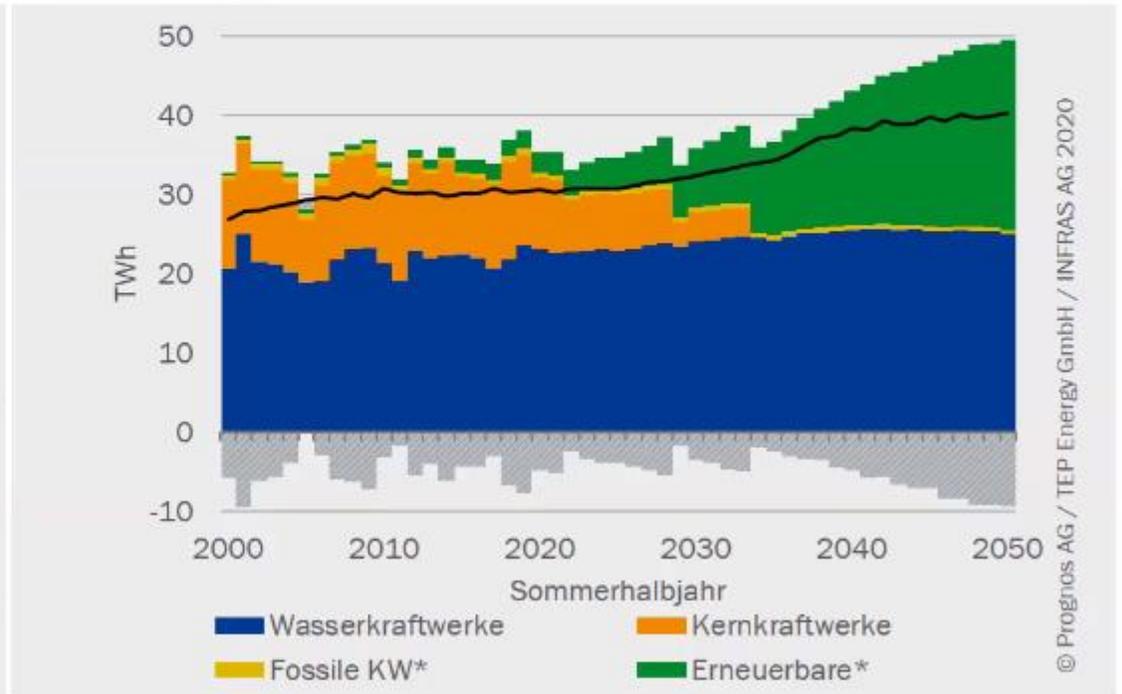
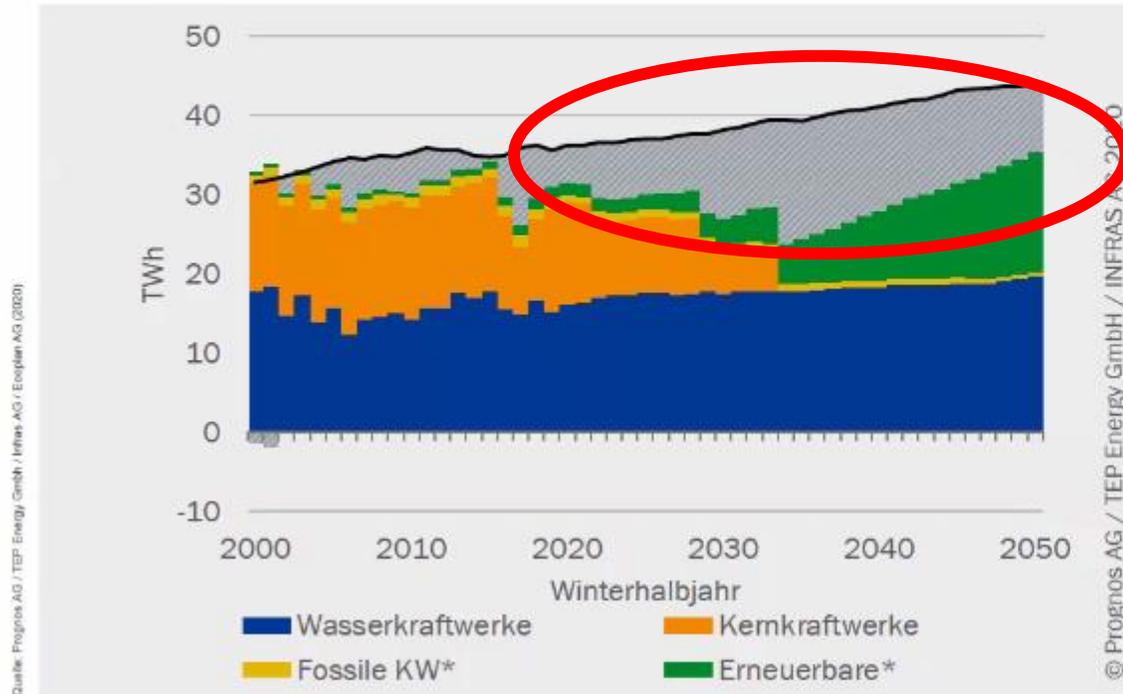
Studie der Bankiervereinigung und Boston Consulting Group  
347 Mia. CHF (2020–2050)

z. B. NZZ 18. August 2021

# BFE - Szenario ZERO Basis Schweiz

**Winterhalbjahr:** Steigende Winteranteile von PV und Wind, in 2050 verbleibt Importsaldo im Winter.

**Sommerhalbjahr:** Exportsaldo im Sommer verbleibt bis 2050 insb. aufgrund hoher PV-Erzeugung.



Szenario ZERO Basis, Strategievvariante «ausgeglichene Jahresbilanz 2050», KKW-Laufzeit 50 Jahre

\*) gekoppelt und ungekoppelt

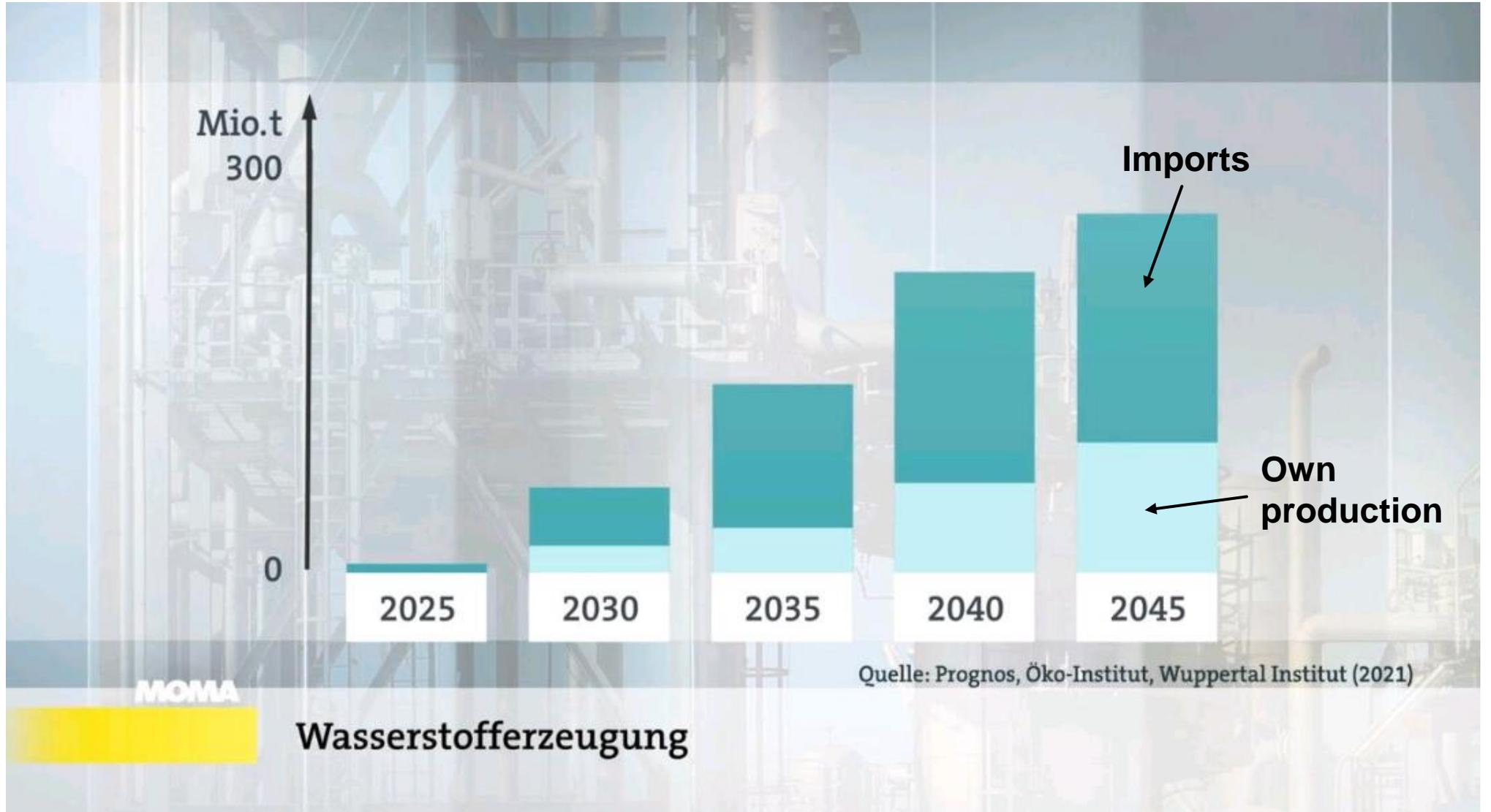
BFE: Energieperspektiven 2050+

## Annahmen:

- Starker Anstieg der Stromimporte im Winter!
- Wasserstoff/synthetische Brennstoffe Importe! (aus welchem Land??)

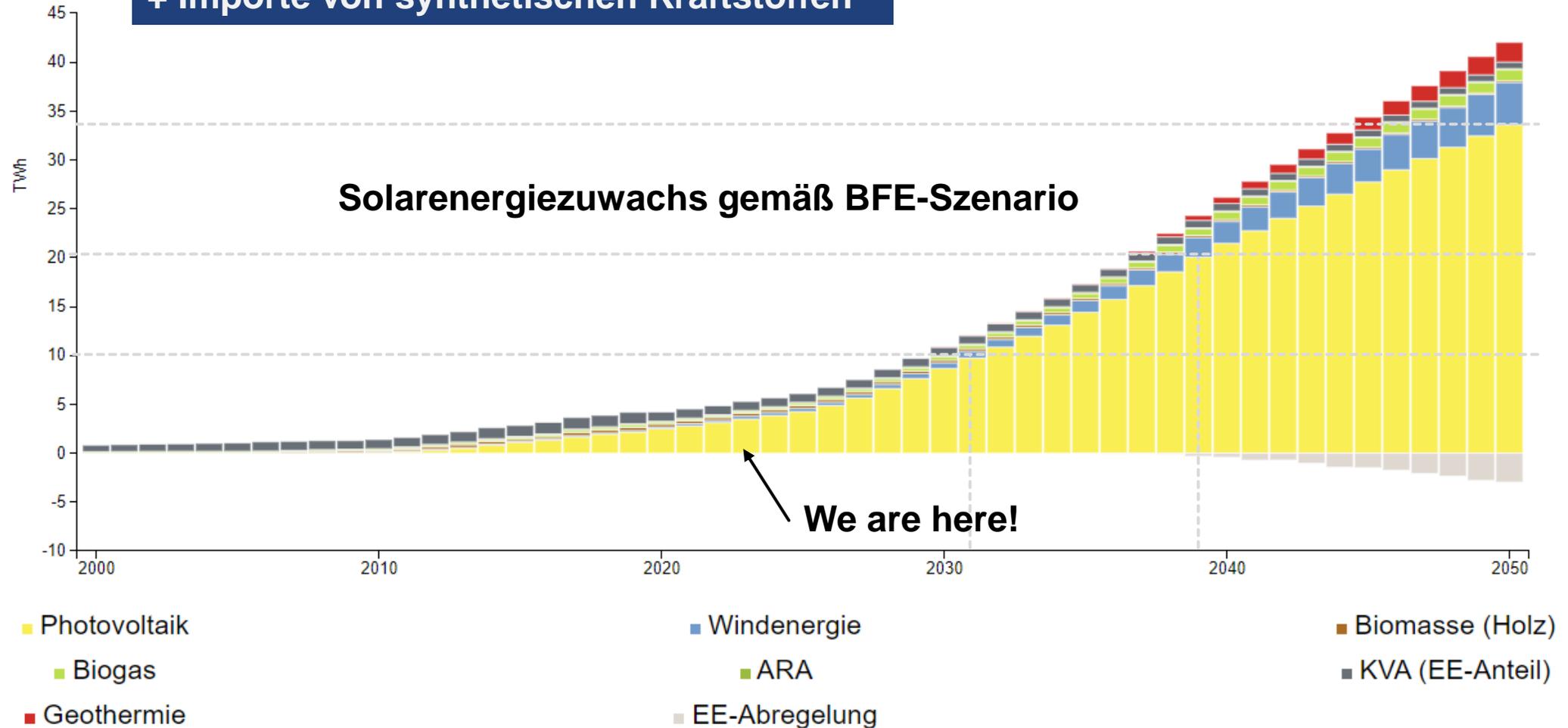
# Ein Blick auf die Zahlen...

## Deutschland Bedarf an H2



# Ein Blick auf die Zahlen...

Zusätzliche Annahmen (wie realistisch?)  
+ Anstieg der Stromimporte im Winter  
+ Importe von synthetischen Kraftstoffen



# Ein Blick auf die Zahlen...

Taicun Village Solar (China) ~ Gondosolar

## Switzerland Gondosolar

23,3 GWh/Jahr

42 MCHF

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

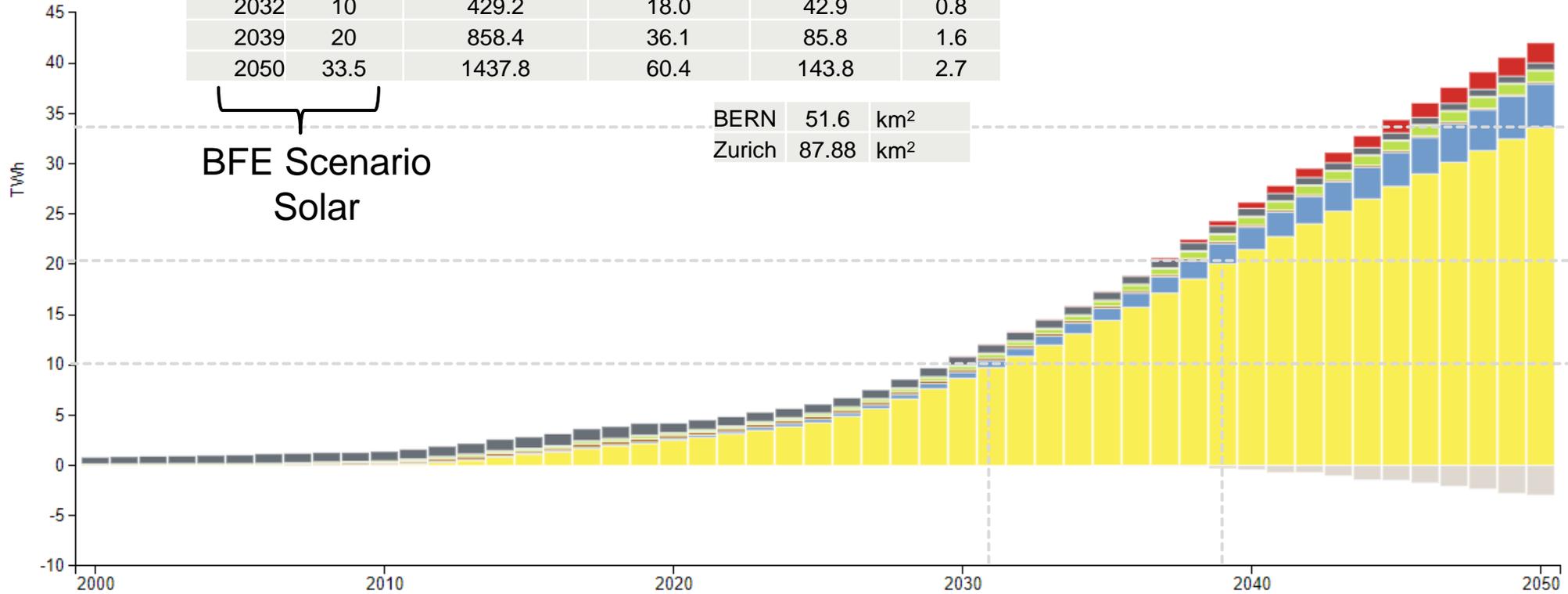


# Ein Blick auf die Zahlen...

Um das BFE-Szenario zu realisieren, benötigen wir das Äquivalent von 1438 Gondolar (oder 2,7 KKWs wie EPR).

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

## Das Projekt in Zahlen

0.38 MW

2,2 MWp

Megawatt  
Leistung

4872

Solarmodule  
Anzahl

50

Prozent  
Winterstrom

3,3

Gigawattstunden  
Energie

CHF7.9 Mio.

10,000 m<sup>2</sup>

AlpinSolar

# 25 TWh (nur für Strom)

- 7576 Alpinsolar
- 36,909,090 Solarmodulen
- CHF 59,848 Mio.



# Ein Blick auf die Zahlen...

Axpo Plan - bis 2030 1.2 GW installierte Leistung Solar

Anlagenkosten: CHF 1.5 Milliarden

Energie Produktion: 1.5 TWh/Jahr

## BFE Scenario

Jahr	TWh
2032	10
2039	20
2050	33.5



Blick auf die Baustelle von «Alpin Solar» in Linthal. Der Stromkonzern Axpo baut an der Muttsee-Staumauer die grösste alpine Solaranlage der Schweiz.

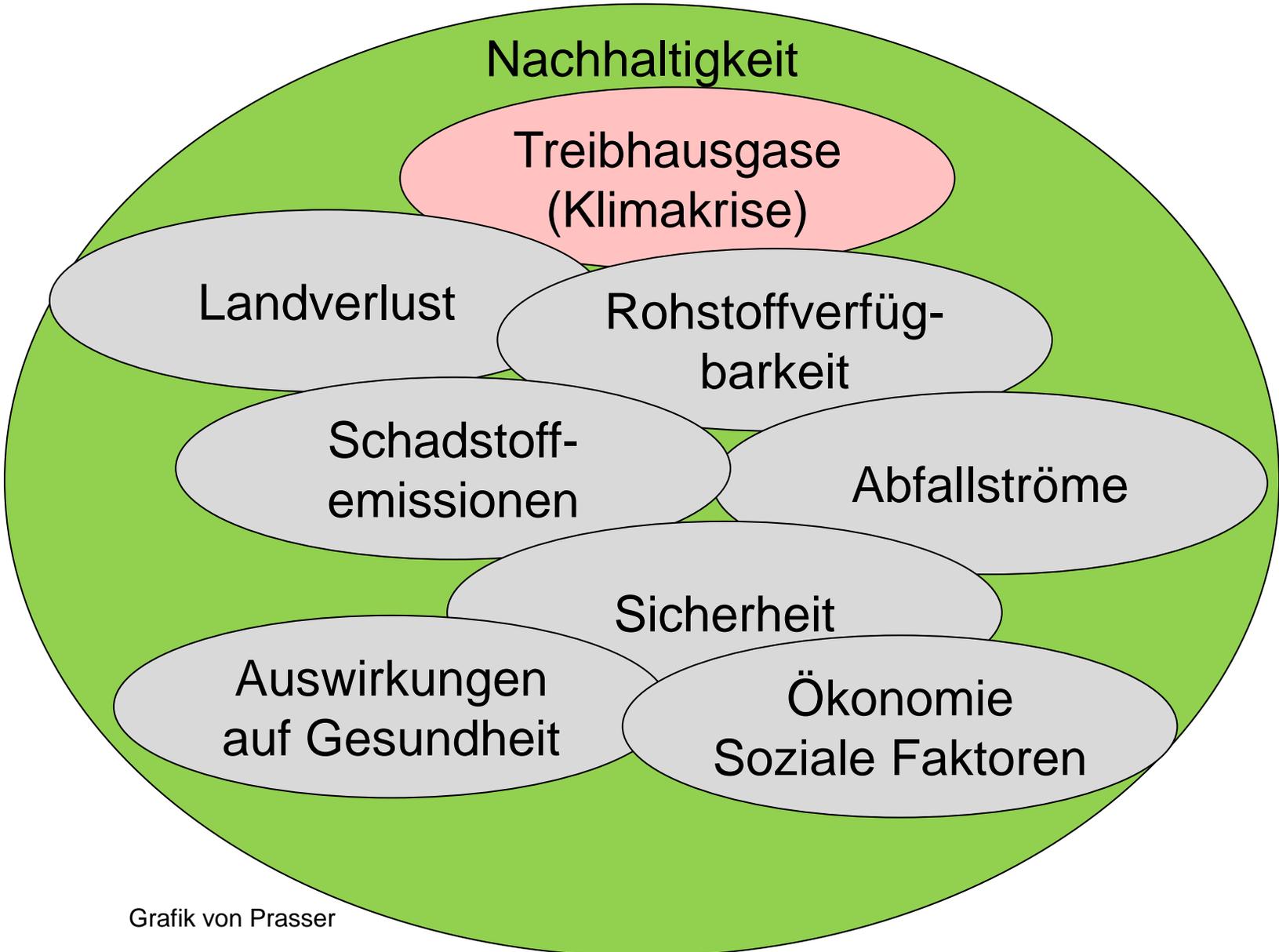
KEYSTONE/Gian Ehrenzeller

[Audio & Podcasts >](#)

[Rendez-vous >](#)

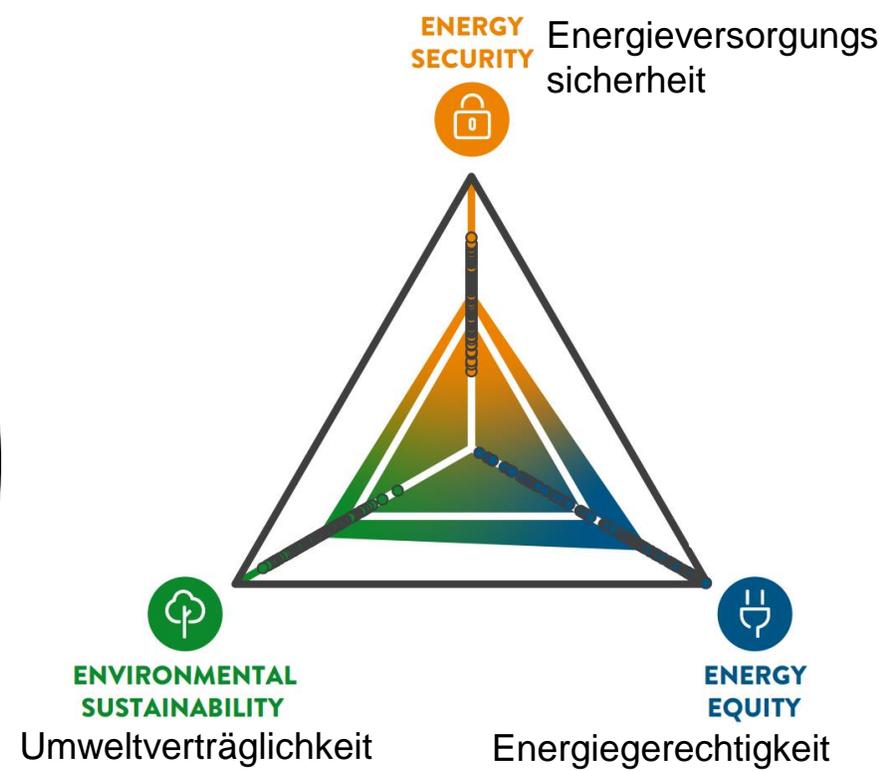
## Axpo will 1.5 Milliarden Franken in Solaranlagen investieren

# Warum Interesse an Kernenergie? Nachhaltigkeit und Energie-Trilemma



Grafik von Prasser

## Energy trilemma



Source: World Energy Council

# Was ist das Besondere an Kernbrennstoff?

## Energie Äquivalenz

1 Uranium Brennstoff-Pellet



1 Tonne Kohle



480 Kubikmeter Gas



454 Liter Öl

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

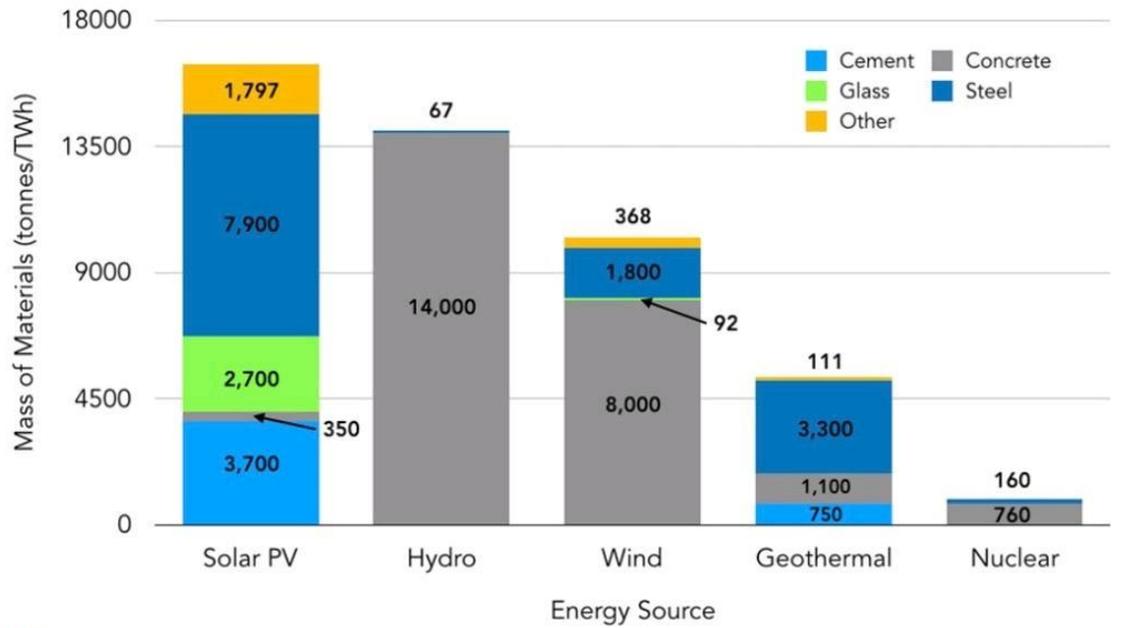
Brennelemente: Vier- bis fünfjährigem Einsatz im Reaktor

Hohe Energiedichte → 

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

# Ist Kernenergie umweltfreundlich?

Materials throughput by type of energy source

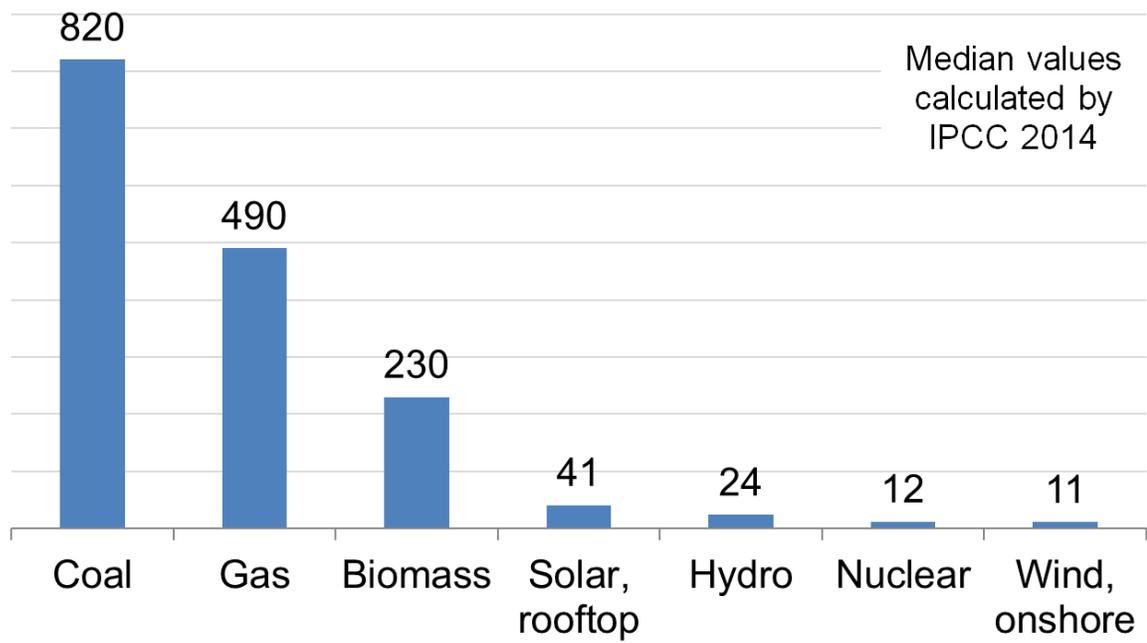


 "Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities," Table 10. September 2015. United States Department of Energy. Nuclear and hydro require 10 tonnes/TWh and 1 tonne/TWh of other materials, respectively, but are unable to be labeled on the graph.

## Landbedarf

- Kernenergie 10,000 W/m<sup>2</sup>
- Solar-PV 5 W/m<sup>2</sup> (ohne Speicherung)
- Wind 2 W/m<sup>2</sup> (ohne Speicherung)

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



## Kernenergie hat die kleinste:

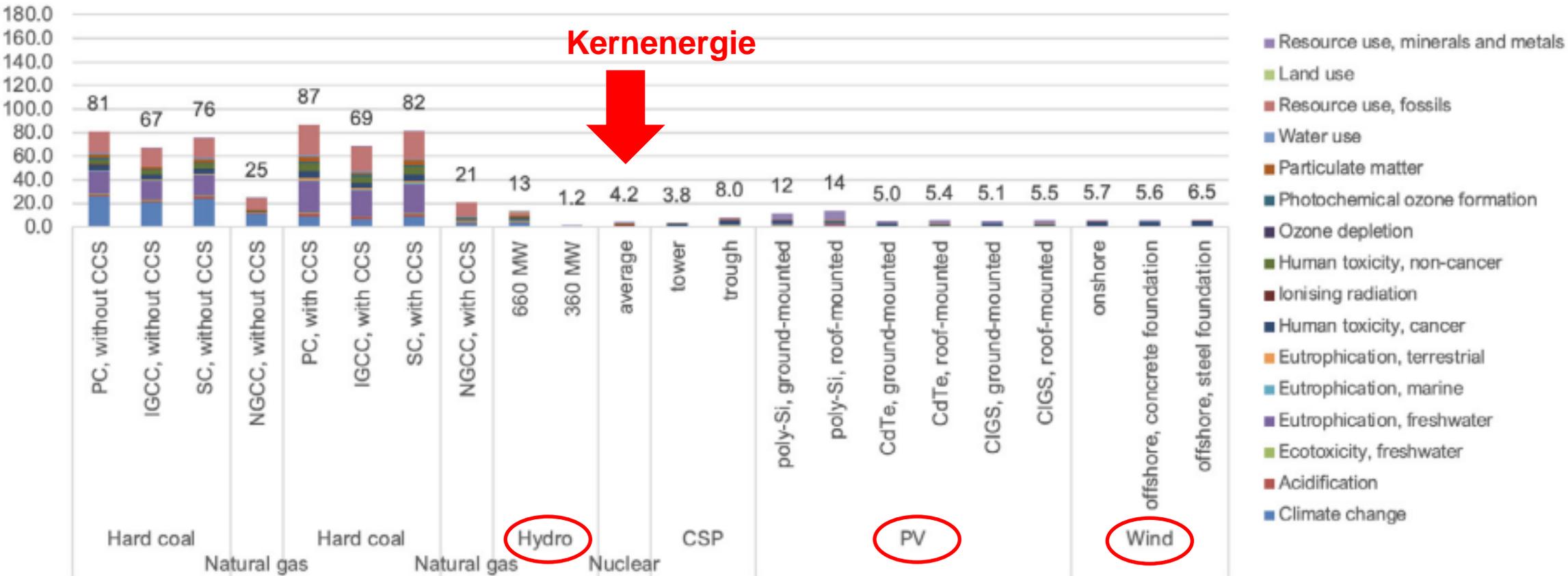
- CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Stoffströme
- Landbedarf

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

# Ist Kernenergie unweltfreundlich?

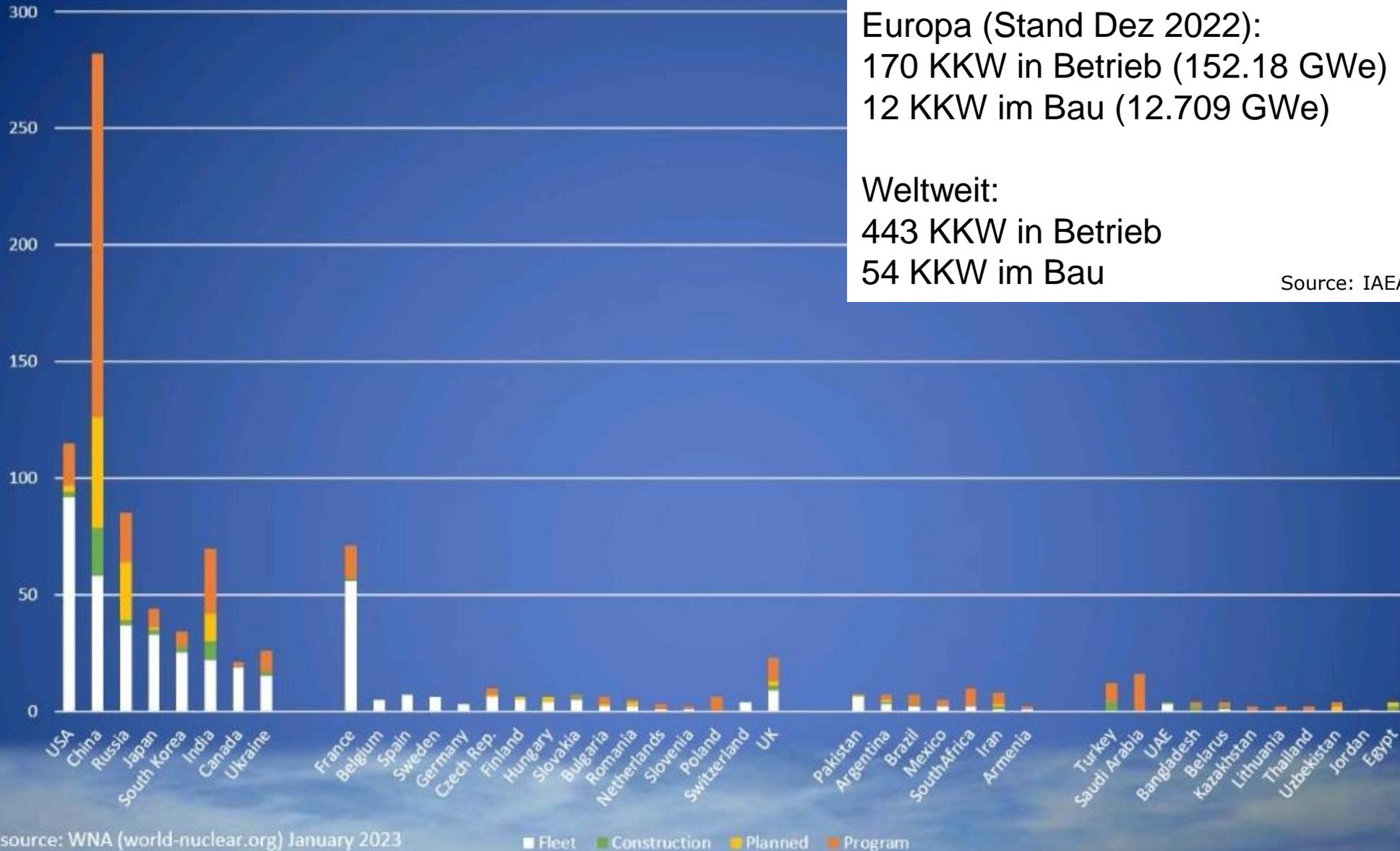
United Nations Economic Commission for Europe  
 Carbon Neutrality in the UNECE Region:  
 Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources, 2022

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



# **Fortschritte in der Kernenergie**

# Kernenergie Weltweit



Europa (Stand Dez 2022):  
 170 KKW in Betrieb (152.18 GWe)  
 12 KKW im Bau (12.709 GWe)

Weltweit:  
 443 KKW in Betrieb  
 54 KKW im Bau

Source: IAEA

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

■ Fleet ■ Construction ■ Planned ■ Program

# Kernenergie Weltweit (Europa)

2022 Kernenergie in EU-Taxonomie aufgenommen um Dekarbonisierung zu unterstützen

2022 **Poland:** Plan für 6 neue KKW (Westinghouse/AP1000) um Abhängigkeit von Kohle zu reduzieren. Ab Jahr 2026 beginnen. Erste Reaktor ab Jahr 2033 in Betrieb. Nachfolgende Einheiten werden alle 2-3 Jahre implementiert + Plan 1 KKW mit S. Korea

2022 **Deutschland:** Laufzeitverlängerung 3 verbleibende Kernkraftwerke  
Seit dem Ukraine-Konflikt 440 Milliarden Euro für Maßnahmen zur Vermeidung von Stromausfällen und zur Erschließung neuer Energiequellen.

2022 **Niederlande:** Plan für 2 neue KKW mit Betrieb ab 2035. Von Regierung 5 Milliarden Euro Beitrag (von einem Gesamtfonds von 35 Milliarden Euro, der für die Finanzierung der Energiewende vorgesehen ist).

2022 **Tschechien:** Ausschreibung für neues KKW (+ 3 weitere geplant). Bau ab 2024.

2022 **Frankreich:** Pläne für 6 bis 14 neue große KKW sowie SMR (zusätzliche 25 GW bis 2050; > 186 TWh/Jahr )

2023 **Frankreich:** Gesetz zur Senkung des Kernenergieanteils auf 50 % wurde abgeschafft  
Senat (239 gegen 16) stimmt für beschleunigten Bau von bis zu 14 neuen KKW

2022 **Rumänien:** Bau 2 KKW (US Finanzierung von 3 Milliarden US-Dollar) bis 2030 abgeschlossen.

2022 (Dez) **UK:** Regierung genehmigt neue KKW (Sizewell C). 2 weitere KKW im Bau (Hinkley Point).

2023 **Belgien:** Verlängerung der KKW-Lebensdauer um 10 Jahre

2023 **Sweden:** Änderungen am Gesetz vorgeschlagen, um nukleare Neubauten zu ermöglichen

# Kernenergie Weltweit

**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.

Aufbau einer integrierten europäischen Nuklearindustrie, die bis 2050 eine Kernkraftkapazität von 150 GW im EU-Strommix erreicht.

2022 (Dez) **Japan**: Pläne für neues KKW im Dezember 2022 von der Regierung veröffentlicht

2022 (Dez) **Saudi-Arabien**: Ausschreibung für KKW-Neubau + Plan für SMR (Südkorea)

2023 **UAE**: 4 KKW in Betrieb, 5.3 GWe (KEPCO/Südkorea) [mehr strom aus KE als aus Solar]

2023 **Südkorea**: bis 2036 Kernenergie von 27.4% (Heute) zu 34,6 % der Stromerzeugung.

2023 **USA**: Net-zero nicht möglich ohne Kernenergie. Neue KKW in Betrieb seit 2016.

2 neue KKW im 2022 fertiggestellt, mehrere SMR geplant.

Studie über die **Umwandlung von Kohlekraftwerksstandorten in KKW-Standorte**

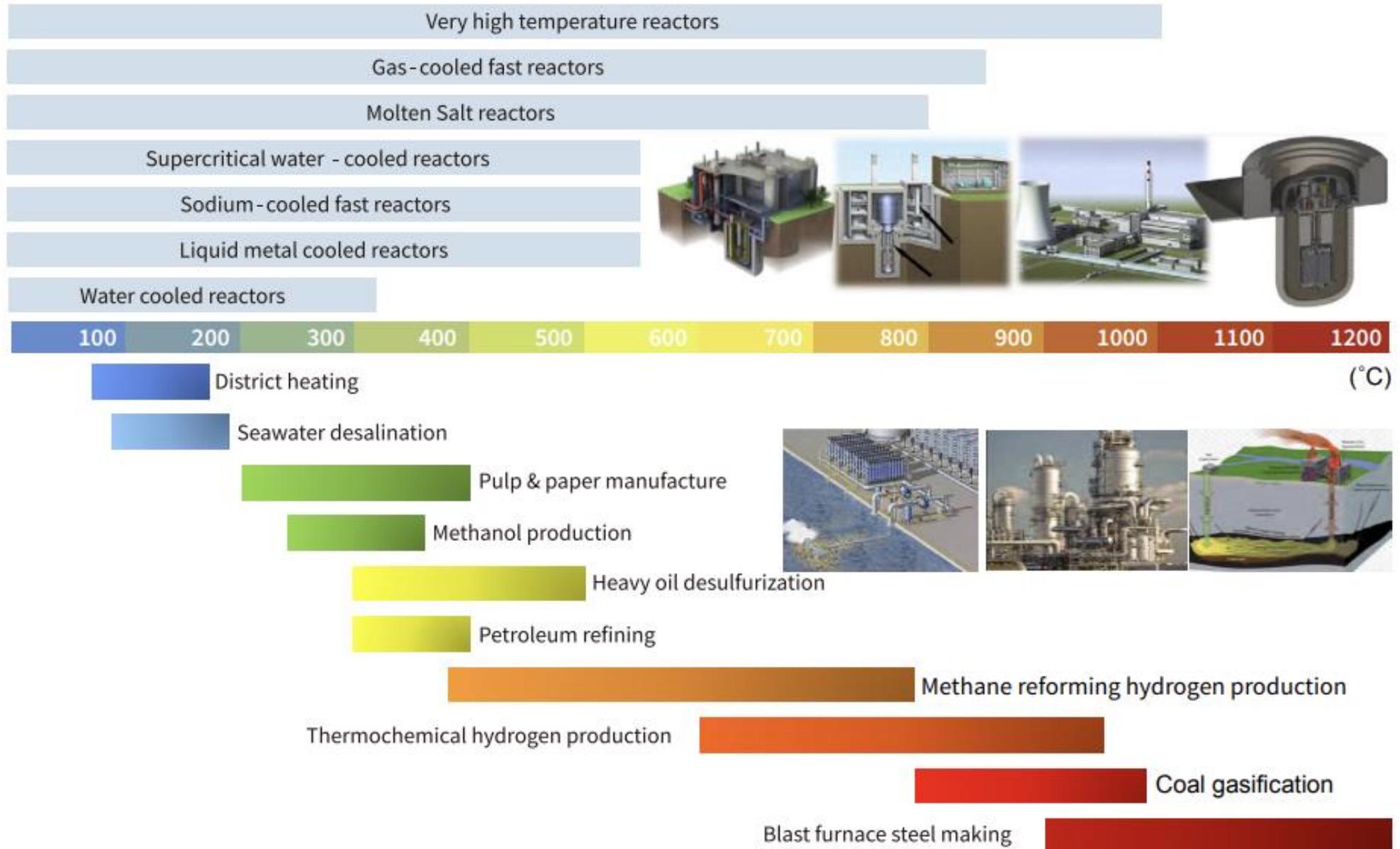
**Pilotanlage - Produktion von Wasserstoff aus 1.25 MW von Nine Mile Point KKW (NY, USA)**

2023 **China**: 55 KKW in Betrieb, 22 KKW in Bau, 43 KKW geplant

2022 (Oct) **Canada**: Regierung sagt Teilfinanzierung von SMR in Ontario zu

2023 **Indien**: Standort ausgewählt. Regierungsgenehmigung für 10 KKW. Plan für 20 KKW bis 2031

# Nicht nur für die Stromproduktion



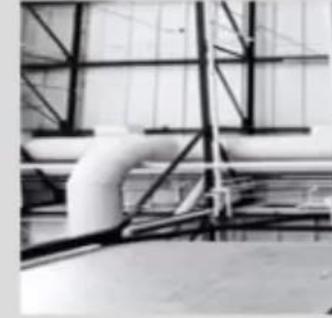
# Nicht nur für die Stromproduktion



Remote mining operations



Industrial process heat



District heating



Remote communities



Hydrogen Generation



Marine Shipping



Critical Infrastructure Installations

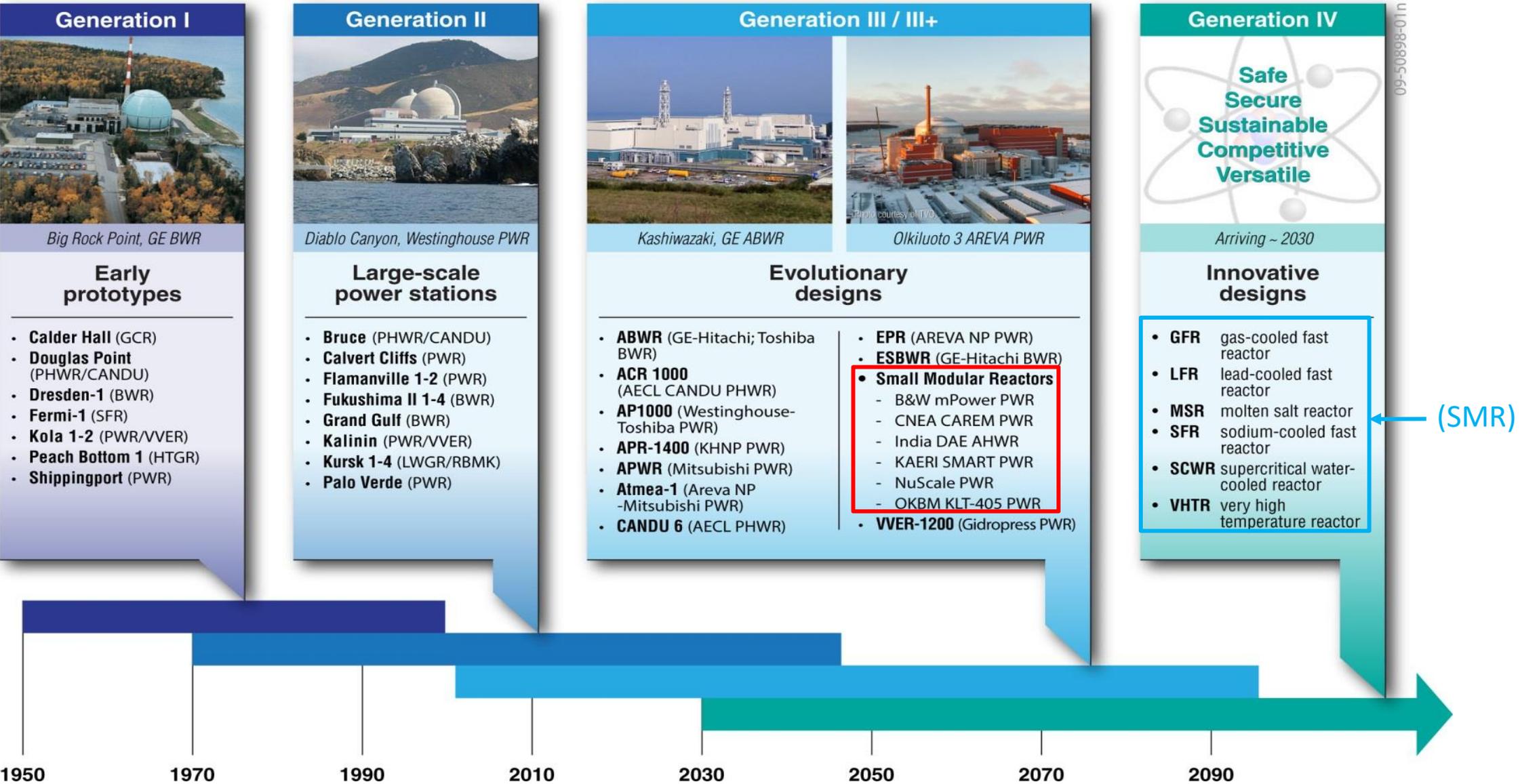


Disaster relief



Research Reactors

# Neue Entwicklungen im Reaktordesign



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

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

- 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)

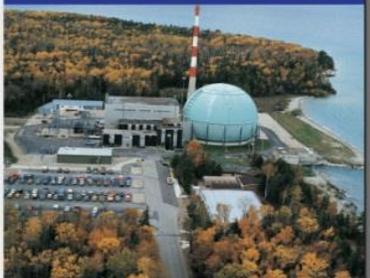
- GFR gas-cooled fast reactor
- LFR lead-cooled fast reactor
- MSR molten salt reactor
- SFR sodium-cooled fast reactor
- SCWR supercritical water-cooled reactor
- VHTR very high temperature reactor

(SMR)

**KKW in der Schweiz gehören zur Gen-II, wurden aber standing nachgerüstet**

# Neue Entwicklungen im Reaktordesign

**Generation I**



*Big Rock Point, GE BWR*

**Early prototypes**

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

**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

1950

2010



Heute

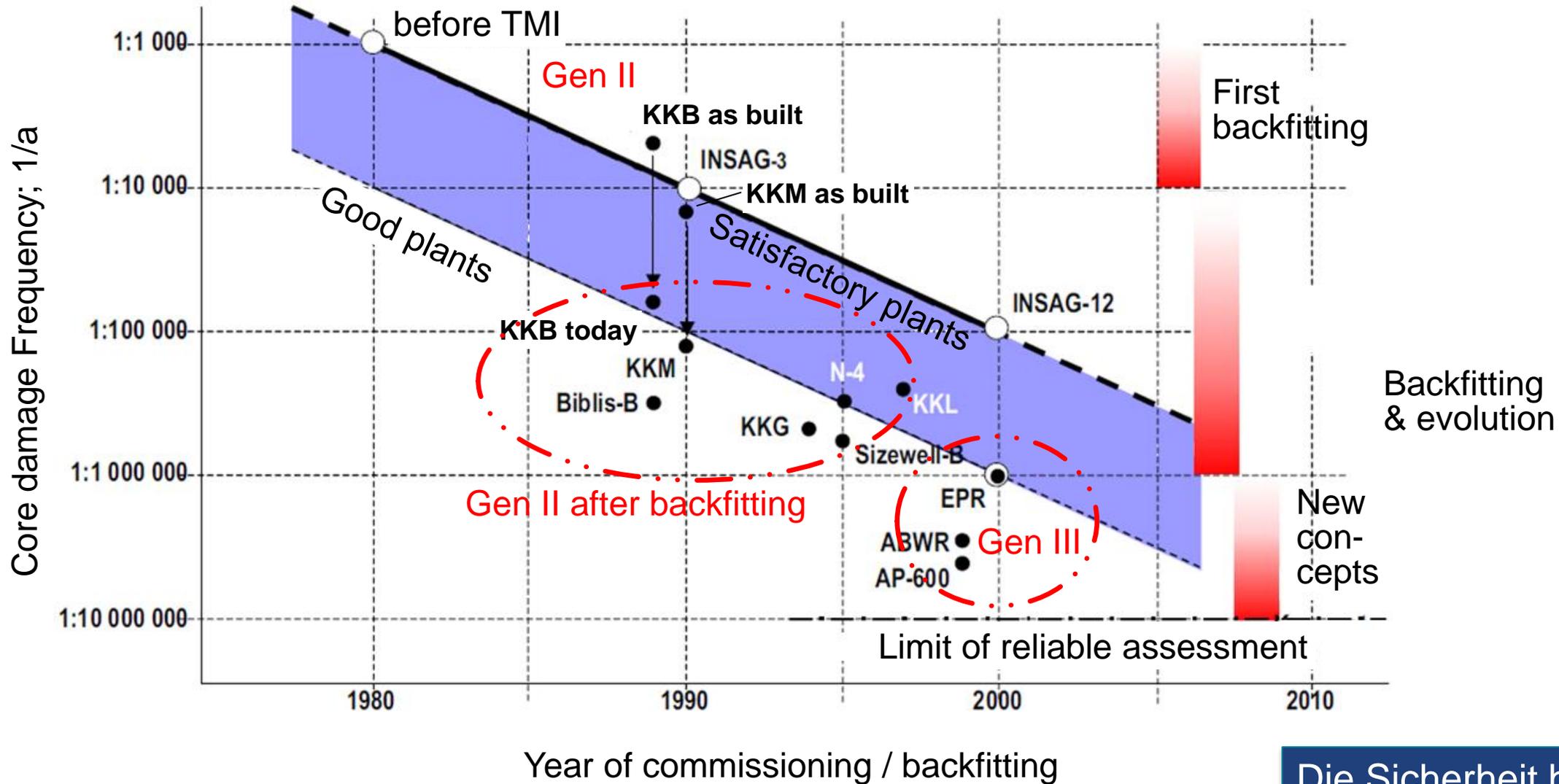
2090

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

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

09-50898-01in

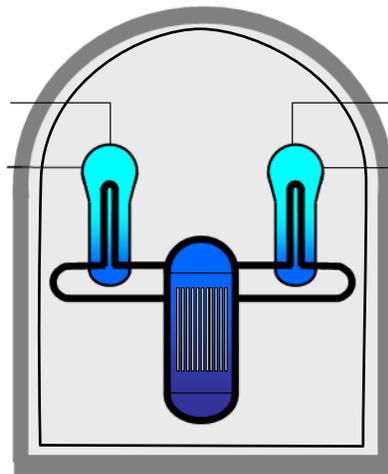
# Zuwachs des Sicherheit im Reaktor Design



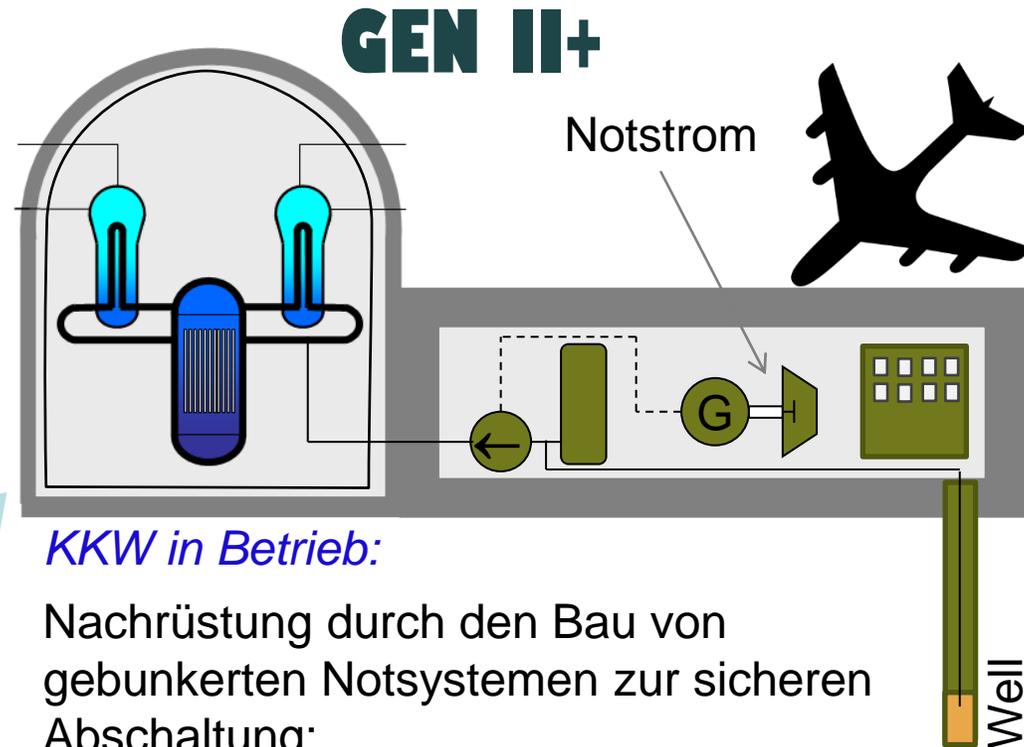
Die Sicherheit hat im Laufe der Jahre kontinuierlich und stark zugenommen

# Gen II: Nachrüstmaßnahmen (Schweiz)

...länger vor Fukushima (2011):



*KKW wie gebaut*  
**GEN II**



*KKW in Betrieb:*

Nachrüstung durch den Bau von gebunkerten Notsystemen zur sicheren Abschaltung:

- Flugzeugabsturz sicher
- Erdbebenfest
- Hochwasser geschützt

- + Gefilterte Containment-Entlüftungssysteme (FCVS)
- + Wasserstoffrekombinatoren
- + Injektionsdüsen für ambulante Pumpen
- + .....

# Neue Entwicklungen im Reaktordesign – GenIII/III+ Philosophie

Notwendigkeit externer Notfallmaßnahmen wird ausgeschlossen

Berücksichtigung von schweren Unfällen/Kernschmelzen direkt im Design => alles bleibt im Containment.

**GEN III**

Evolutionary Gen III

Revolutionary Gen III+

$\sim 10^{-6} - 10^{-7} \text{ 1/a}$

Die Kernschadenshäufigkeit wird durch Verstärkung der aktiven Sicherheitssysteme reduziert

**Kernschäden werden deterministisch ausgeschlossen (passive Sicherheitssysteme)**

**Radioaktiver Freisetzungen werden deterministisch ausgeschlossen**

Ausschluss oder Minderung der Folgen unwahrscheinlicher Kernschäden durch Containment

Beispiel: EPR  
• In Betrieb (Finland, China)  
• Im Bau in UK/FR

Beispiel: AP1000  
• In Betrieb (USA, China)  
• Im Bau in UK/FR

$\sim 10^{-8} - 10^{-9} \text{ 1/a}$

Wahrscheinlichkeit einer großen Veröffentlichung (LRF) *sehr klein* but  $\neq 0$

# Gen III: EPR (1600 MWe)

## Internes Containment:

- Stahlhülle
- Lecksicherheit bis 6.5 bar
- Ausschluss von H<sub>2</sub>-Explosion

## Externes Containment:

Flugzeugabsturzsicher

## Brennstoffnasslager:

geschützt gegen  
Flugzeugabsturz

## Sicherheitssysteme:

gebunkert gegen externe  
Einwirkungen, durchgängig 4-fach  
(2v4) redundant mit mehreren  
diversitären Sicherheitsebenen  
ausgelegt

Wahrscheinlichkeit eines  
Kernschmelzunfalls  $<10^{-6}$ /Jahr

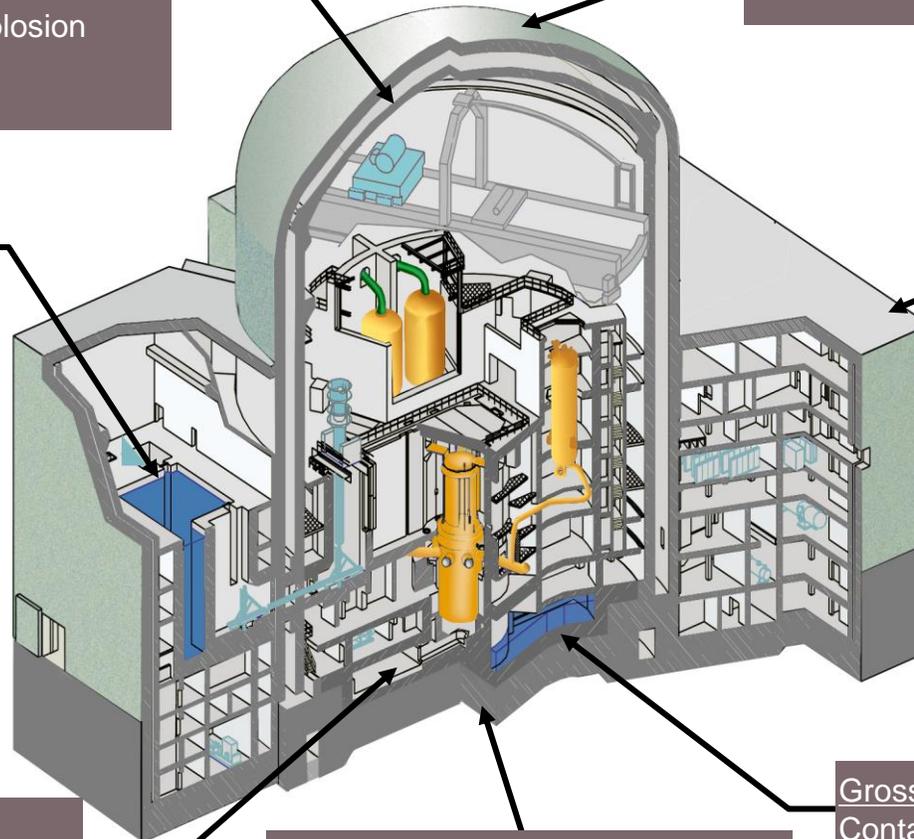
Wahrscheinlichkeit einer  
frühen Freisetzung  $<10^{-8}$ /Jahr

## Core Catcher:

Sicherer Einfang der Kernschmelze bei  
schweren Störfällen

Erdbebensicheres Design ausgelegt  
für 100'000-jähriges Erdbeben

Grosser geschützter Wasservorrat innerhalb des  
Containments für die Beherrschung schwerer  
Störfälle

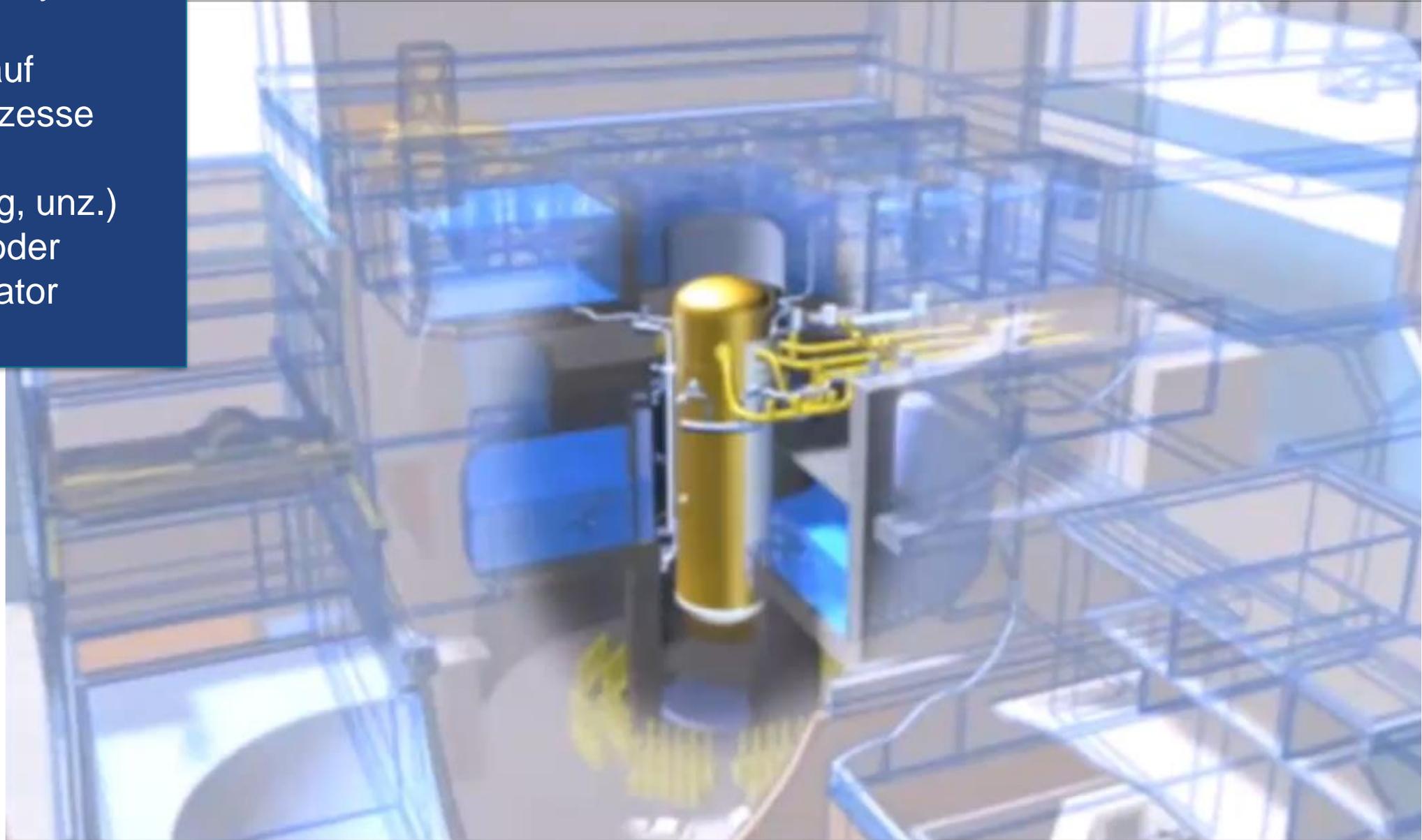


# Gen-III+: passive Sicherheitssysteme

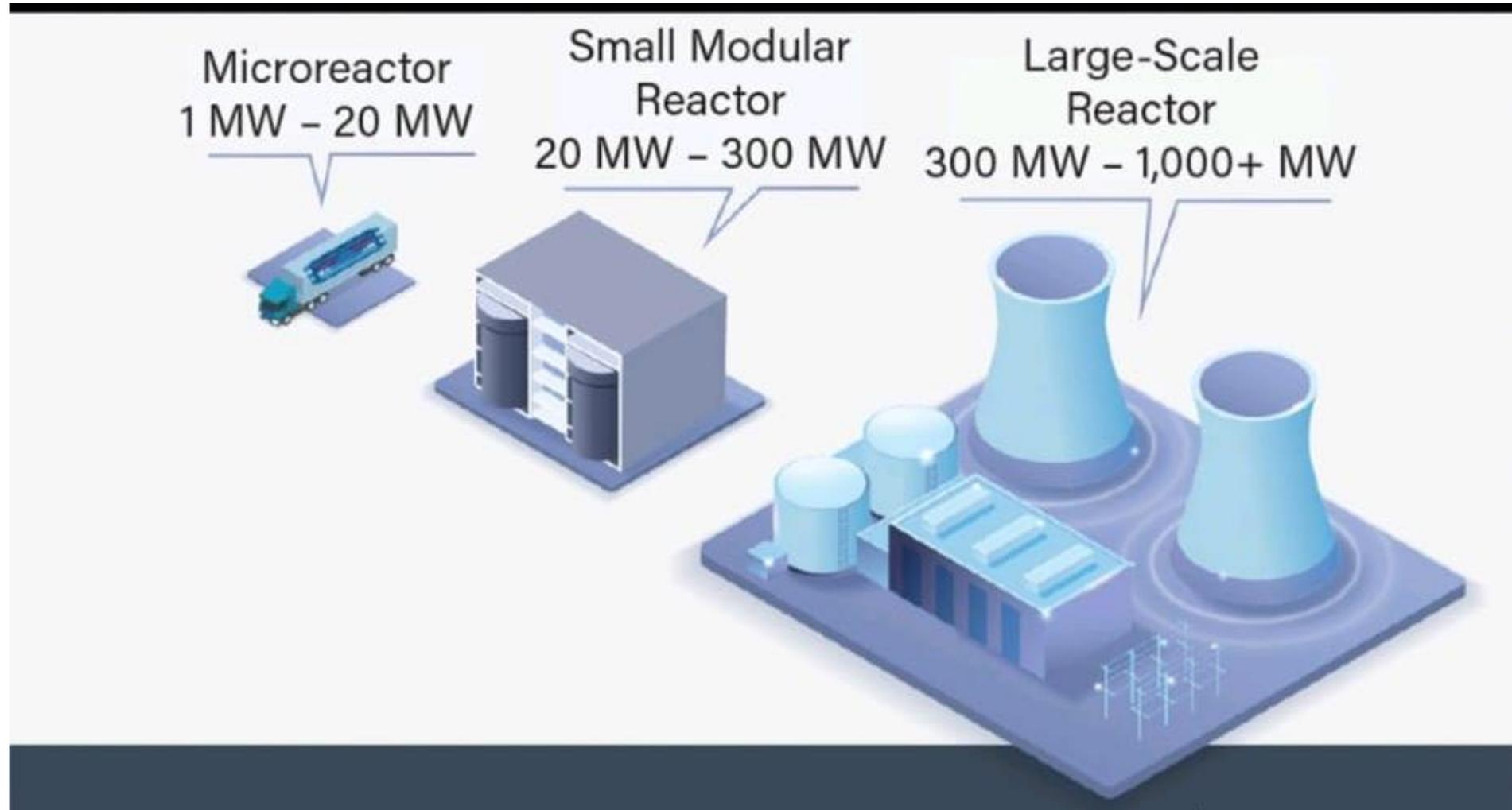
Passive Sicherheitssysteme:

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

General Electric ESBWR



# Neue Entwicklungen im Reaktordesign



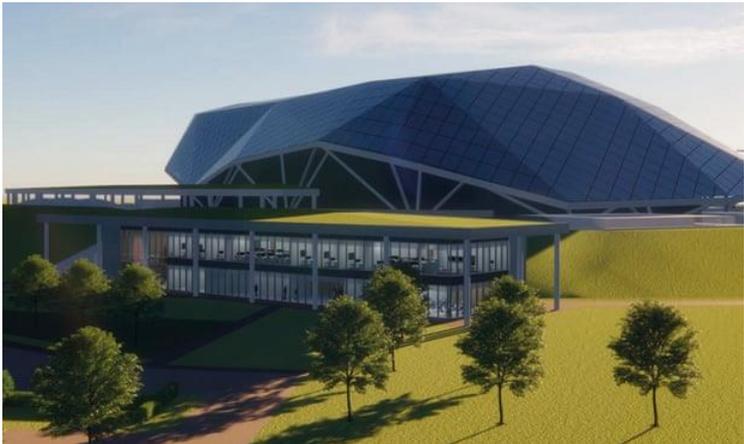
# Neue Entwicklungen im Reaktordesign – SMR (kleine modulare KKW)



NuSCALE (6x77 MW), für Utah, ab 2027



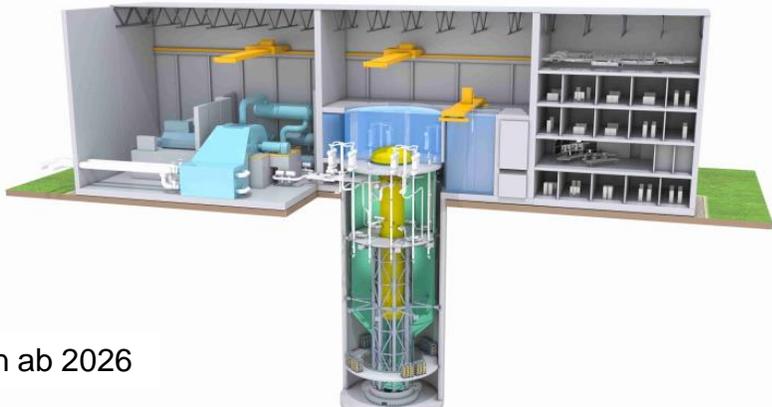
NUWARD (EdF/Technicatome), 170 MW, ab 2030



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



SMART (Korea), 100 MW, Betrieb in Saudi-Arabien ab 2026



BWRX-300 (GE/Hitachi) für Ontario Power, Betrieb ab 2028



RITM-200 (Russia), Betrieb in Kirgistan ab 2028

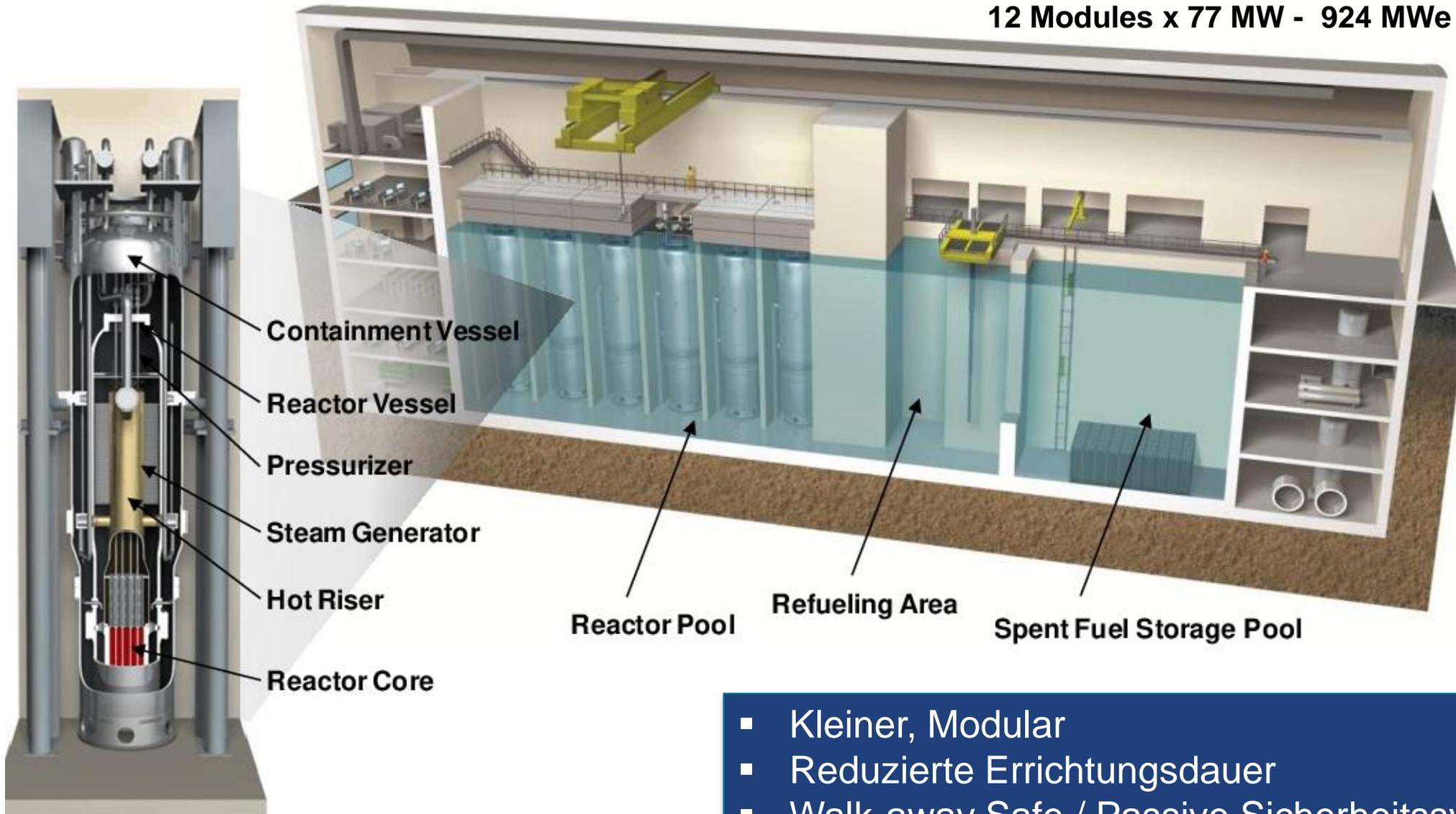
Mehrere SMR gehen bis 2030 in Betrieb / auf dem Markt

**US NRC Genehmigung:  
NUSCALE-Sperrzone: Umfang des KKW!**

# Neue Entwicklungen im Reaktordesign – Beispiel NUSCALE

NUSCALE

12 Modules x 77 MW - 924 MWe

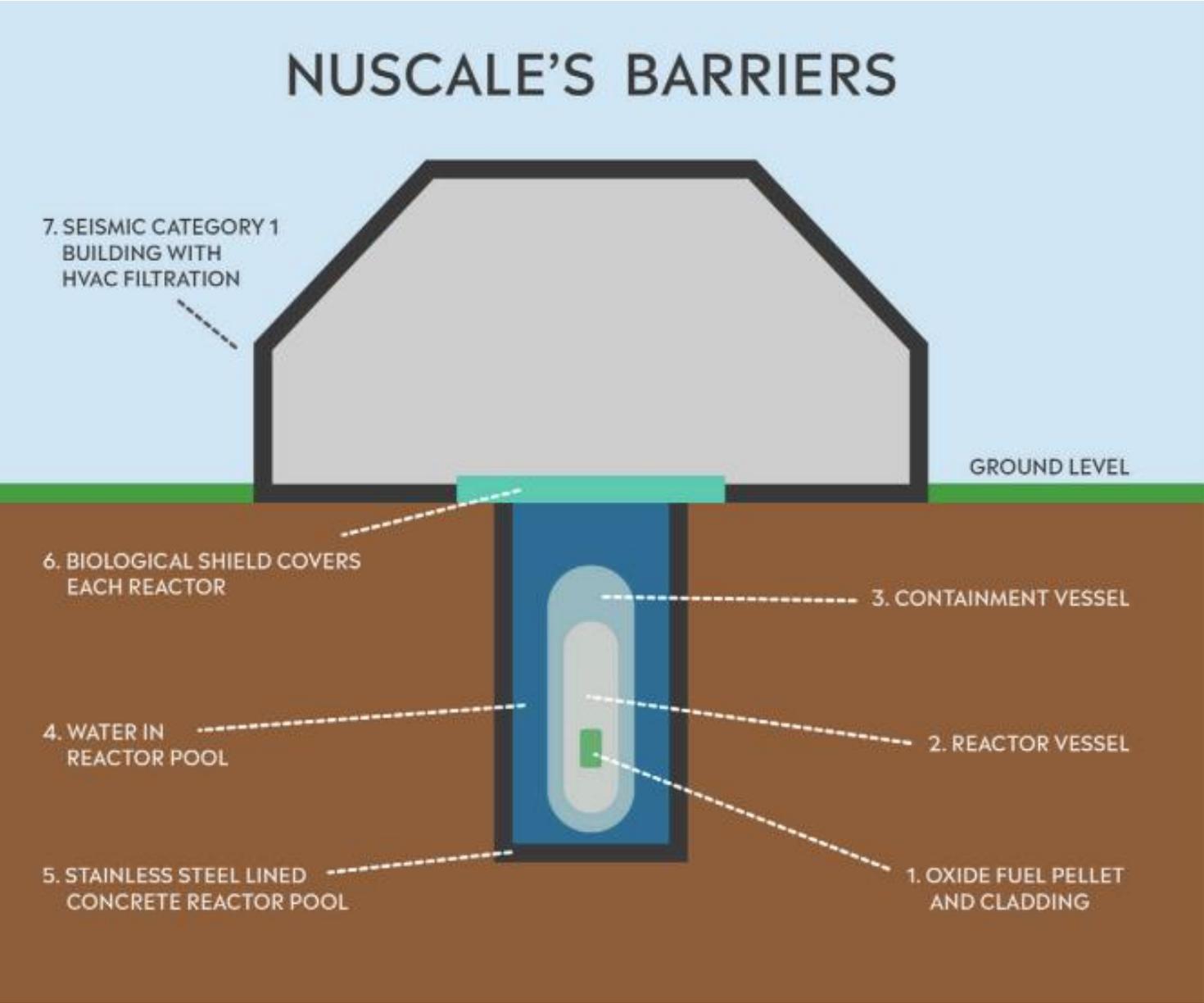


➤ US NRC  
Genehmigung  
seit Aug 2022

➤ In Utah ab  
2029

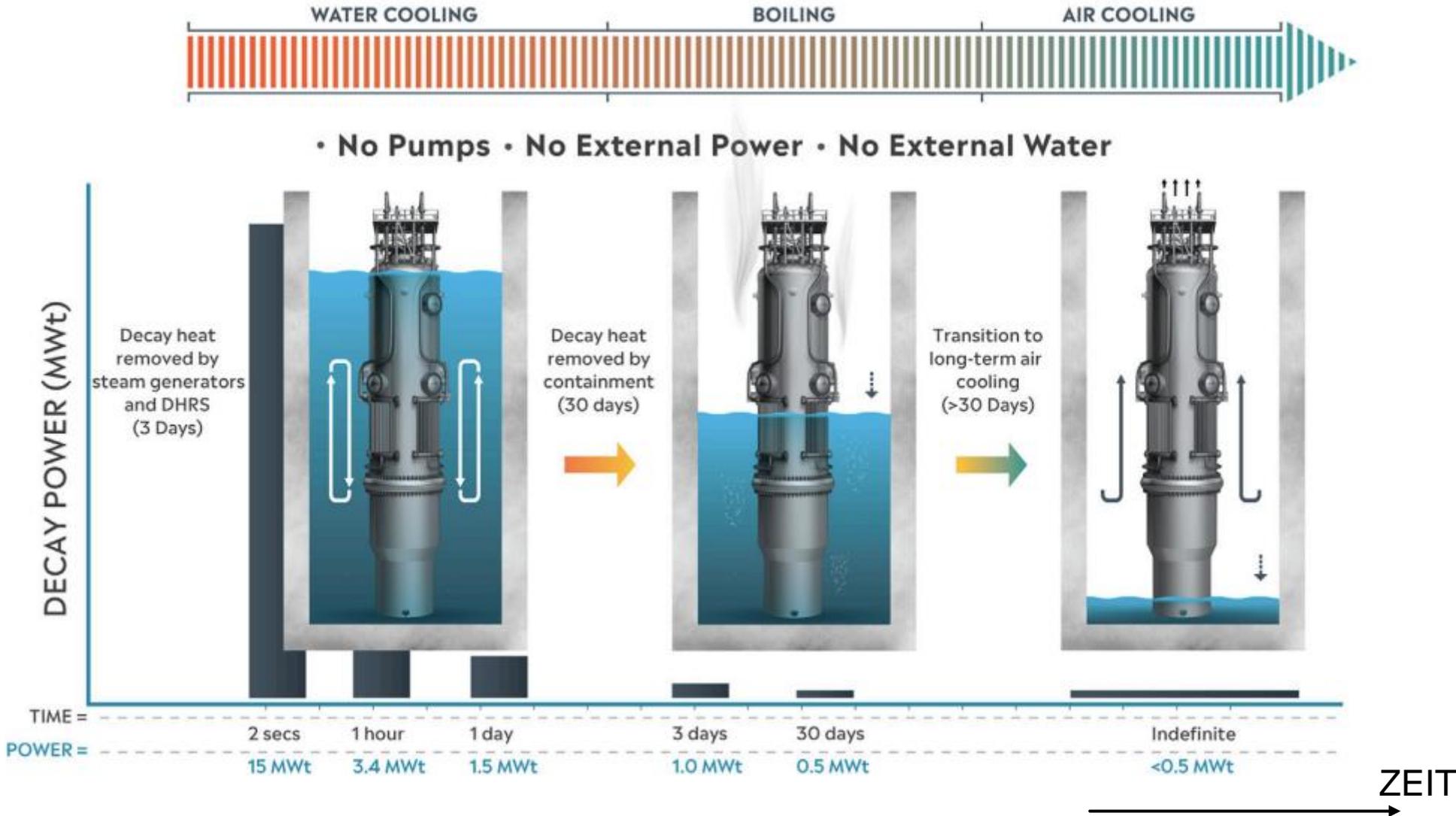
- Kleiner, Modular
- Reduzierte Errichtungsdauer
- Walk-away Safe / Passive Sicherheitssysteme

# Neue Entwicklungen im Reaktordesign – Beispiel NUSCALE



# Beispiel NUSCALE

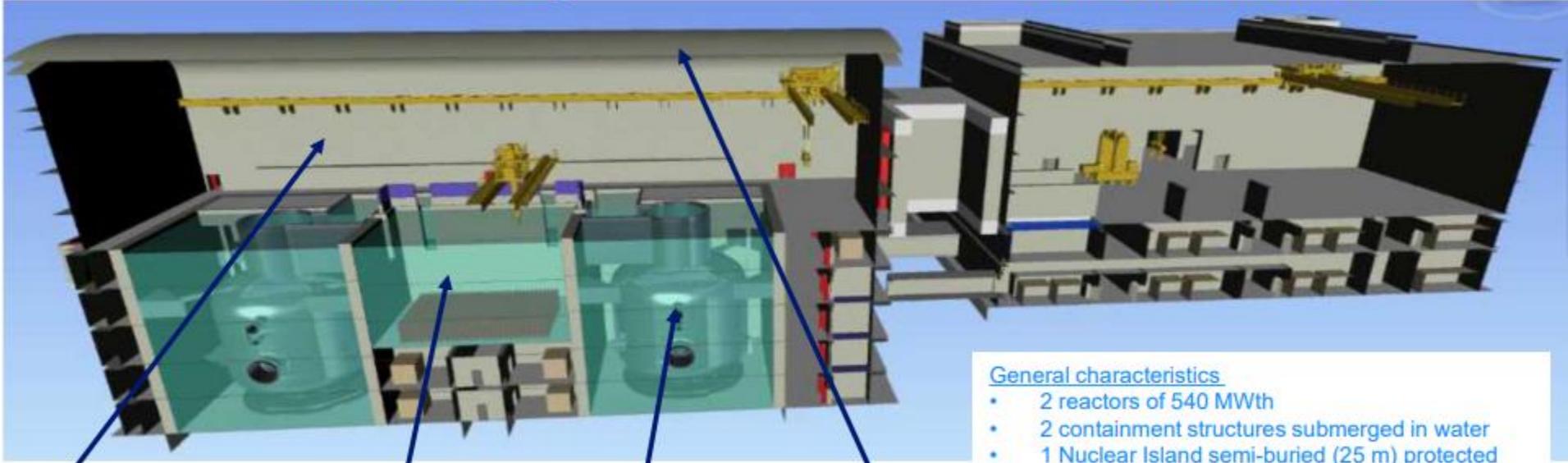
## Kühlung ohne externe Stromversorgung und ohne externes Wasser



# NUWARD™ Technology

Main Nuclear Building

Auxiliary Nuclear Building



Shared reactor hall  
1 refuelling machine  
1 polar crane

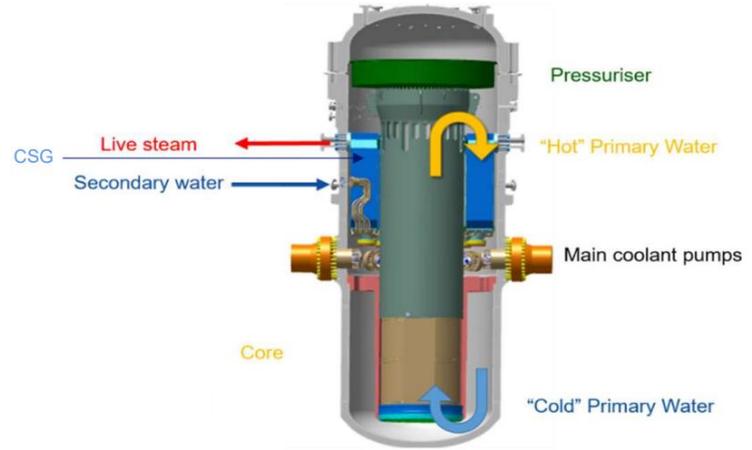
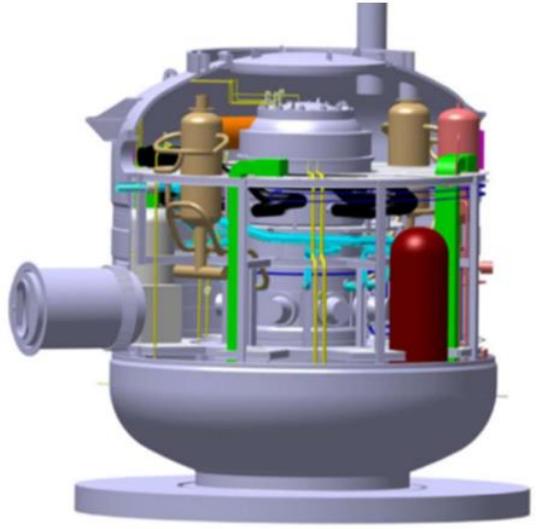
1 spent fuel pool  
Located between the reactors

Containment

Aircraft crash protection

General characteristics

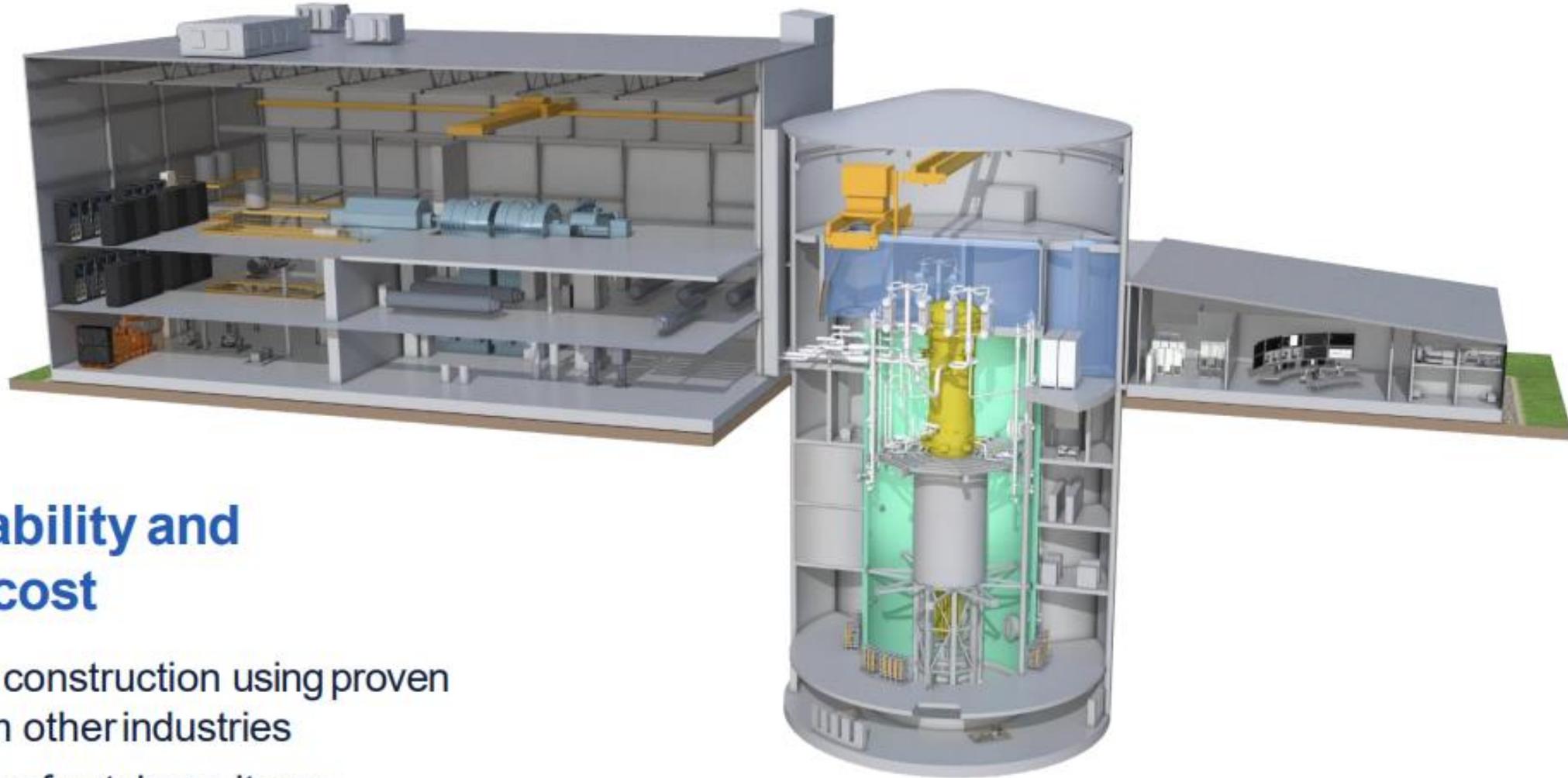
- 2 reactors of 540 MWth
- 2 containment structures submerged in water
- 1 Nuclear Island semi-buried (25 m) protected against aircraft crash
- 2 generation units of 170 MWe



*Commercialisation as early as 2025*

*First Concrete in France by 2030*

# GE-Hitachi BWRX-300



## Constructability and Design-to-cost

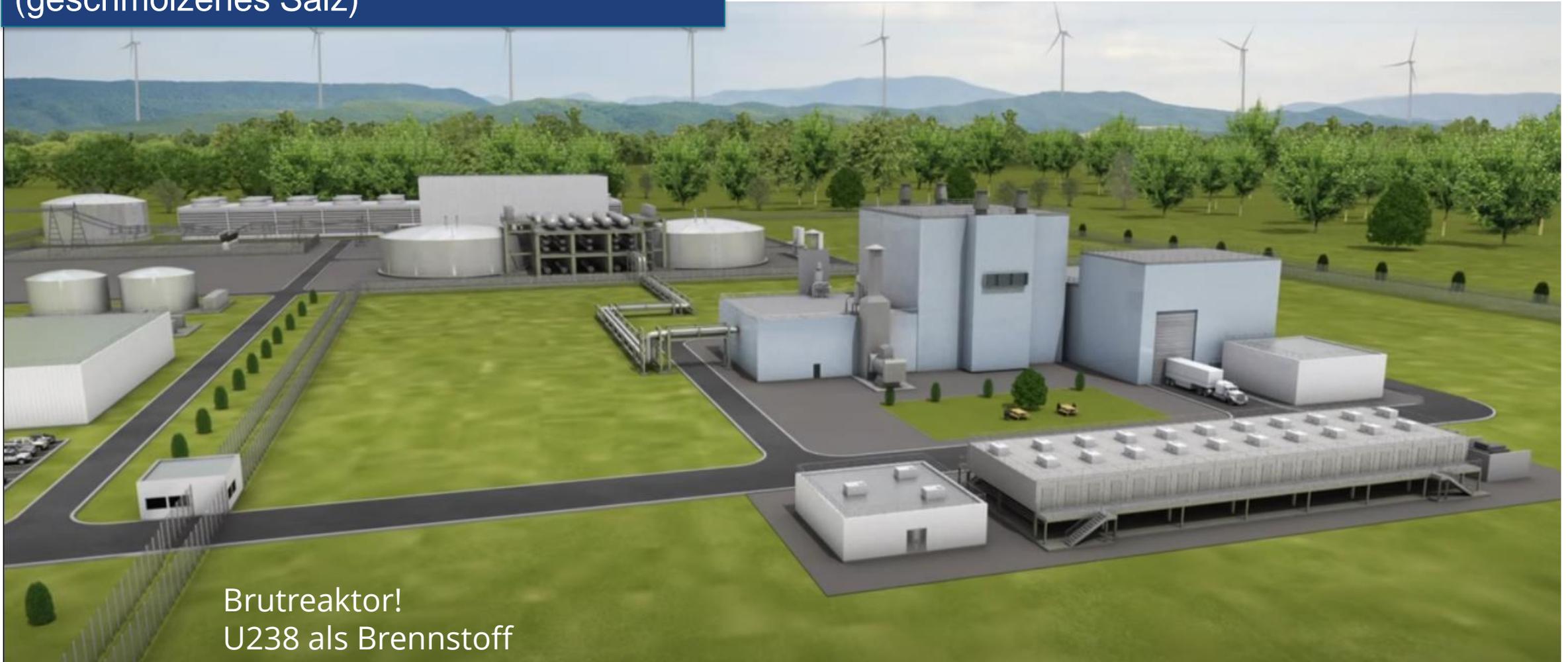
- Underground construction using proven methods from other industries
- Maximum use of catalogue items
- “Off the shelf” turbine/generator

# Neue Entwicklungen im Reaktordesign (Gen IV – Natrium)

Gen-IV reactor (Sodium-cooled)  
KKW mit integriertem Energiespeicher  
(geschmolzenes Salz)

Baugenehmigung soll 2023  
eingereicht werden (Wyoming)

TERRAPOWERT – 345 MWe  
1 GWh Energiespeicher

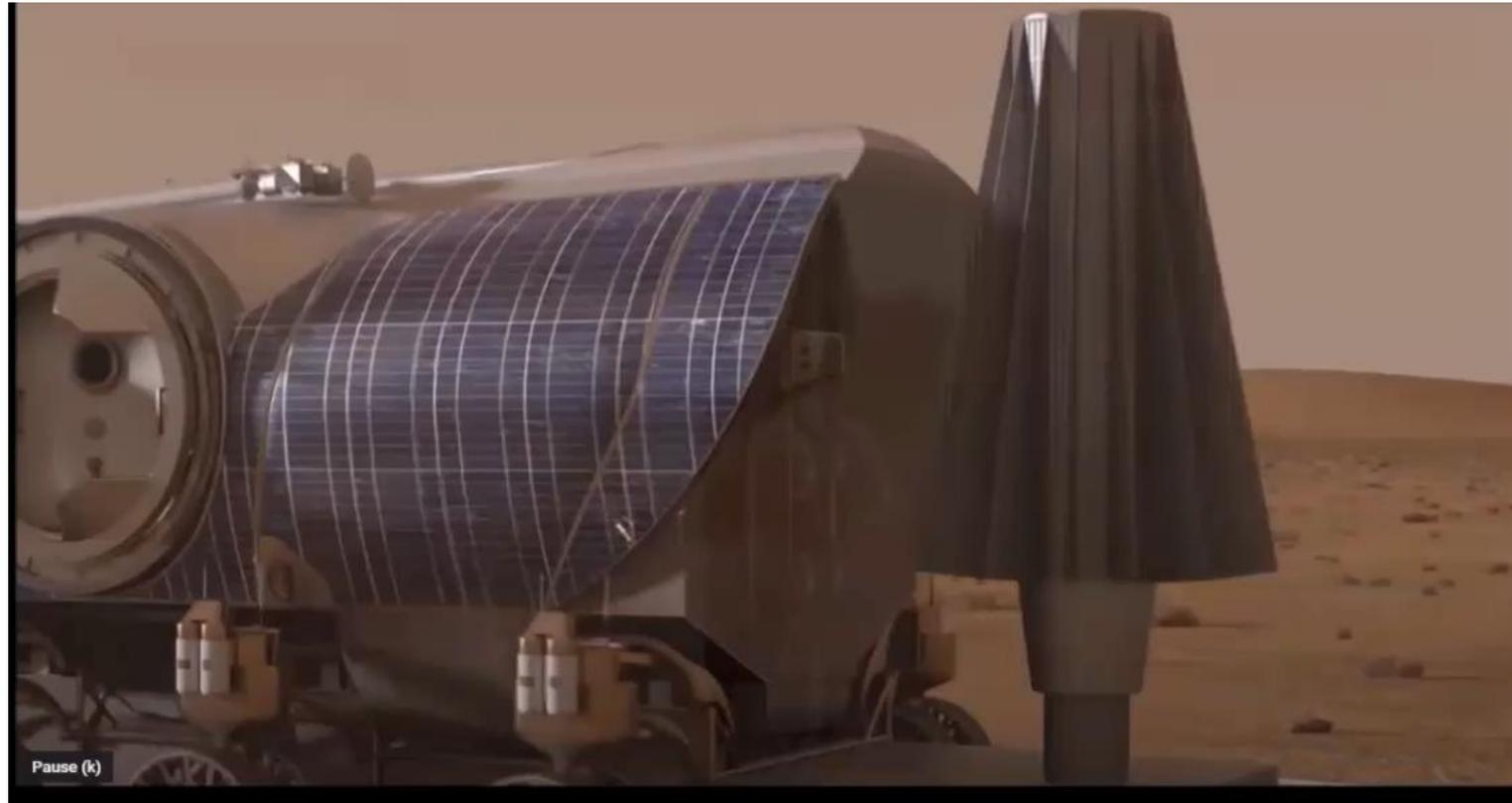


Brutreaktor!  
U238 als Brennstoff

# KILOPOWER REACTOR - NASA



Electricity production on Mars  
First tests on the moon



SPACE NUCLEAR PROPULSION  
for Human Mars Exploration

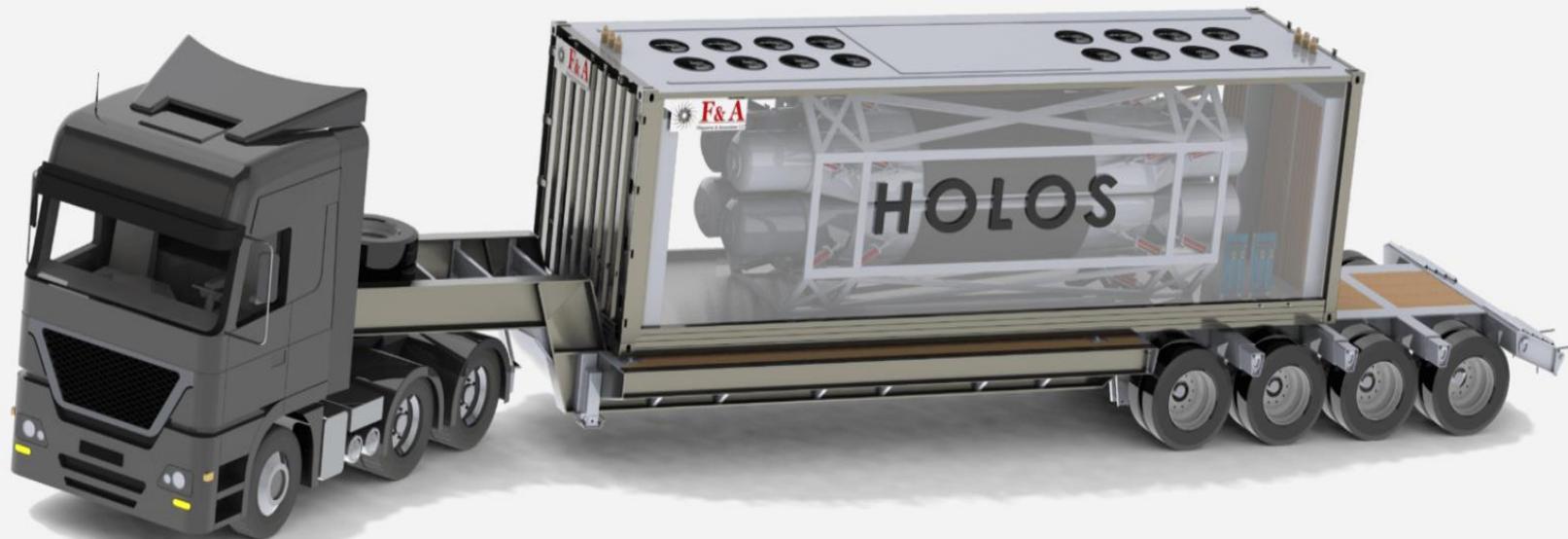
KILOPOWER – NASA/LANL

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

# Microreaktoren



Erster Mikroreaktor im Bau.  
Inbetriebnahme im Jahr 2024 in  
Idaho (USA)



# Von Weltraum zur Erde - Microreaktoren

eVinci Westinghouse



4.5 mal die Leistung von Gondosolar (100,000 m<sup>2</sup>)



- Walk-away safe
- Kann als Teil des Stromnetzes, unabhängig vom Stromnetz oder als Teil eines Microgrids betrieben werden
- Komplette in einer Fabrik gebaut, und in einem ISO-Container auf LKW transportierbar
- Bis zu 10-12 MWe zur Stromerzeugung und Bereitstellung von Wärme für industrielle Anwendungen
- Stromversorgung abgelegener, ländlicher Gemeinden, die auf Dieselgeneratoren angewiesen sind
- CO<sub>2</sub>-freie Energiequellen für Wasserentsalzung, Wasserstoffherzeugung und andere Industrien**

# Floating reactors



AKA  
Operat

React  
PWR

Refere  
32 MI

Constr  
15 Ap

First G  
19 De

ncern

Operator  
Joint Stock Company 'Concern  
Rosenergoatom'

Thermal Capacity  
150 MW<sub>t</sub>

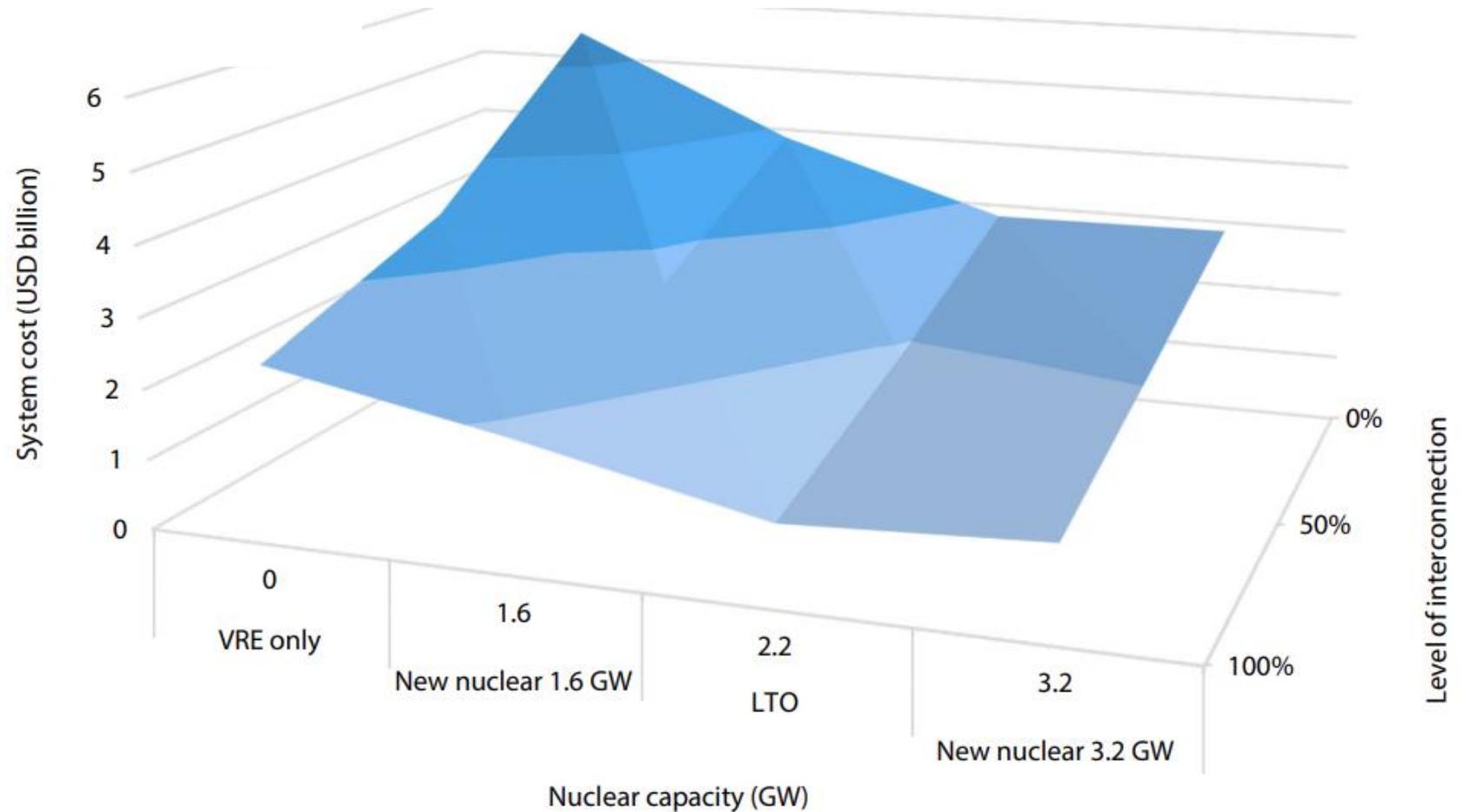
**KOSTEN**

# Achieving Net Zero Carbon Emissions in Switzerland in 2050

Ergebnisse Studie der OECD  
(Oktober 2022):

Ersatz des Schweizer KKW  
mit neue KKW führt zu einer  
billigeren Option und mehr  
Unabhängigkeit von Europa.

Alle Kosten inbegriffen



# Kernenergie – dauert zu lange und kostet zu viel (?)



APR-1400 (KEPCO) in UAE

Beginn: 2012

❑ 4 x APR-1400 (5.3 GWe) in 10 Jahre

❑ \$24 Milliarden Total Kosten

❑ 42 TWh/Jahr

Innerhalb von 10 Jahren hat KEPCO (Südkorea) 4 große KKW für insgesamt 5,3 GWe gebaut und \$24 Milliarden Total Kosten. => ~ 42 TWh/Jahr

Kernenergie in der Schweiz => 25 TWh/Jahr

# Kernenergie – dauert zu lange und kostet zu viel (?)



APR-1400 (KEPCO) in UAE

Beginn: 2012

❑ 4 x APR-1400 (5.3 GWe) in  
10 Jahre

❑ \$24 Milliarden Total Kosten

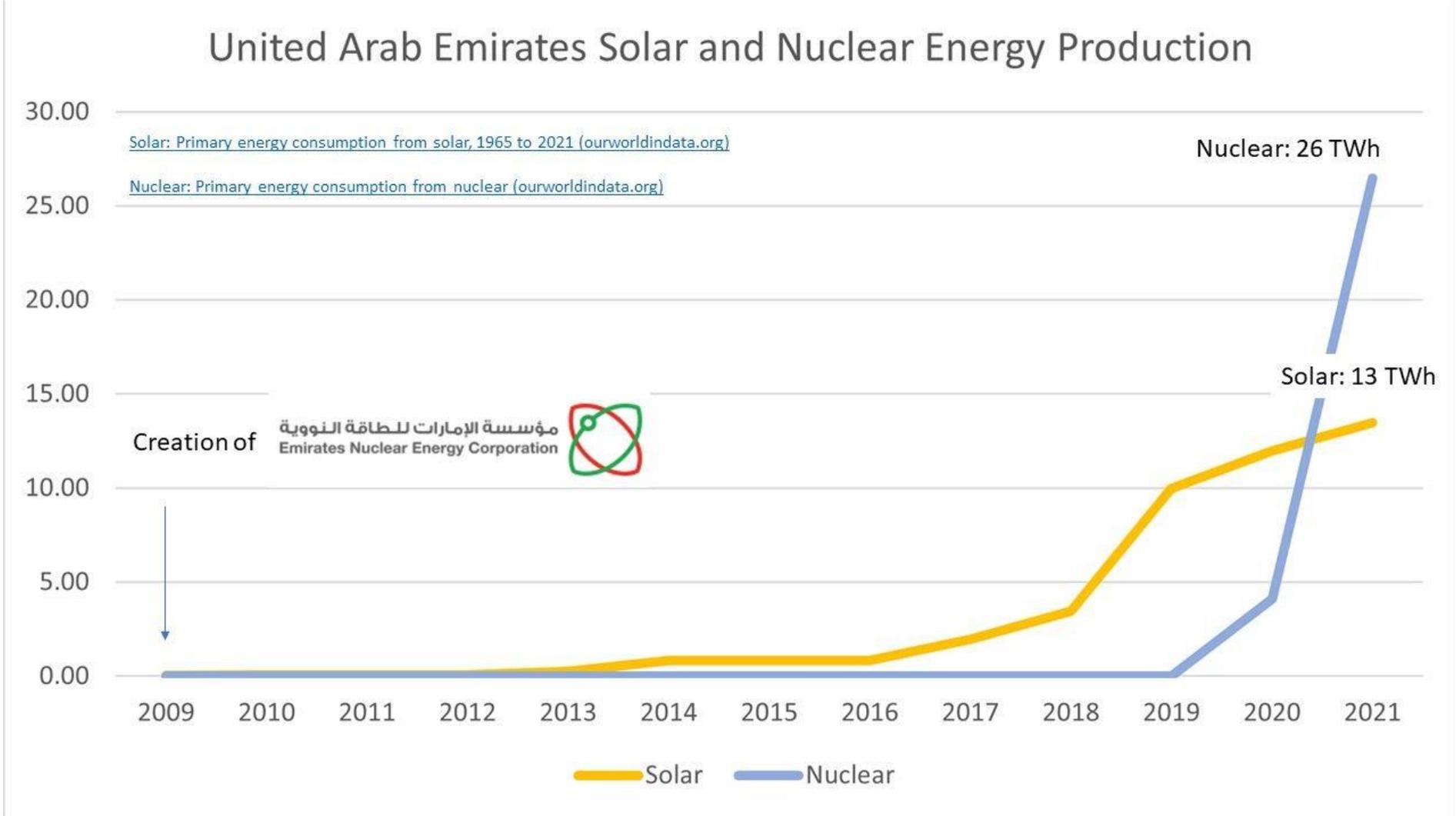
❑ 42 TWh/Jahr

**1 APR-1400 (\$6 Milliarden) = 457 Gondosolar  
20 Milliarden CHF (ohne Speicherung und Hochspannungsleitungen)**

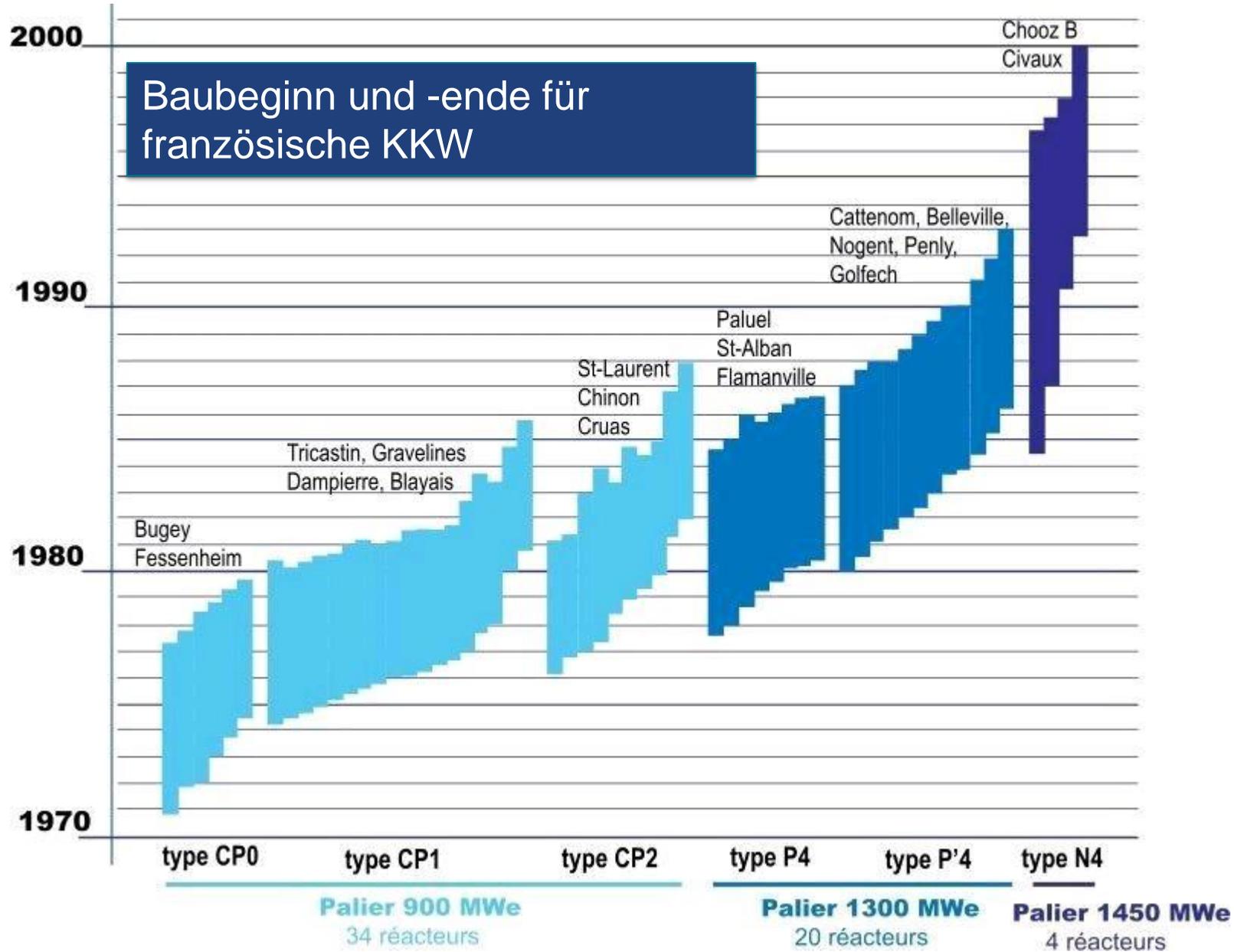
25 TWh/Jahr => 1000 Gondosolar  
Kosten: 45 Milliarden CHF (ohne Speicherung und Hochspannungsleitungen!)

25.3 TWh/Jahr => 2 x EPR (1600 MW)  
Kosten: 26 Milliarden CHF (mit Verzögerung und Preiserhöhung)  
UK Hinkley Point C

# Bauzeit UAE



# Kernenergie – dauert zu lange (?)



# Kernenergie – dauert zu lange (?)

Verbesserungen in Rechenmodellen  
und Technologie



- Verlängerung Lebensdauer aktueller Reaktoren von 30-40 auf 60+ Jahre
- Leistungssteigerungen

## Beispiel KKL Schweiz

Ursprüngliche Leistung konnte um 30 % gesteigert werden => mehr als 2.3 TWh/Jahr  
Dies entspricht mehr als 100 Gondosolar Anlagen

Nachrüstungen von 2021 => +150 GWh/Jahr (mehr als 6 Gondosolar)



Notwendigkeit, die älteren KKW zu ersetzen, um mehr als 20 Jahre verzögert



Lieferkette muss neu aufgebaut werden

Änderungen der Sicherheitsanforderungen während der Planungs- und Bauphase (bsp Finnland und Frankreich)

# Zusammenfassung

Kernenergie hat sich in den letzten 30 Jahren technologisch stark entwickelt und kann einen wichtigen Beitrag leisten

- Passive Sicherheit
- Kleine Menge Brennstoff
- Kleiner Landbedarf
- Sehr geringe Menge an Abfall
- Stabile Stromproduktion (Strom produziert, wenn wir ihn brauchen)
- Wesentlicher Beitrag zur Versorgungssicherheit

Herausforderungen:

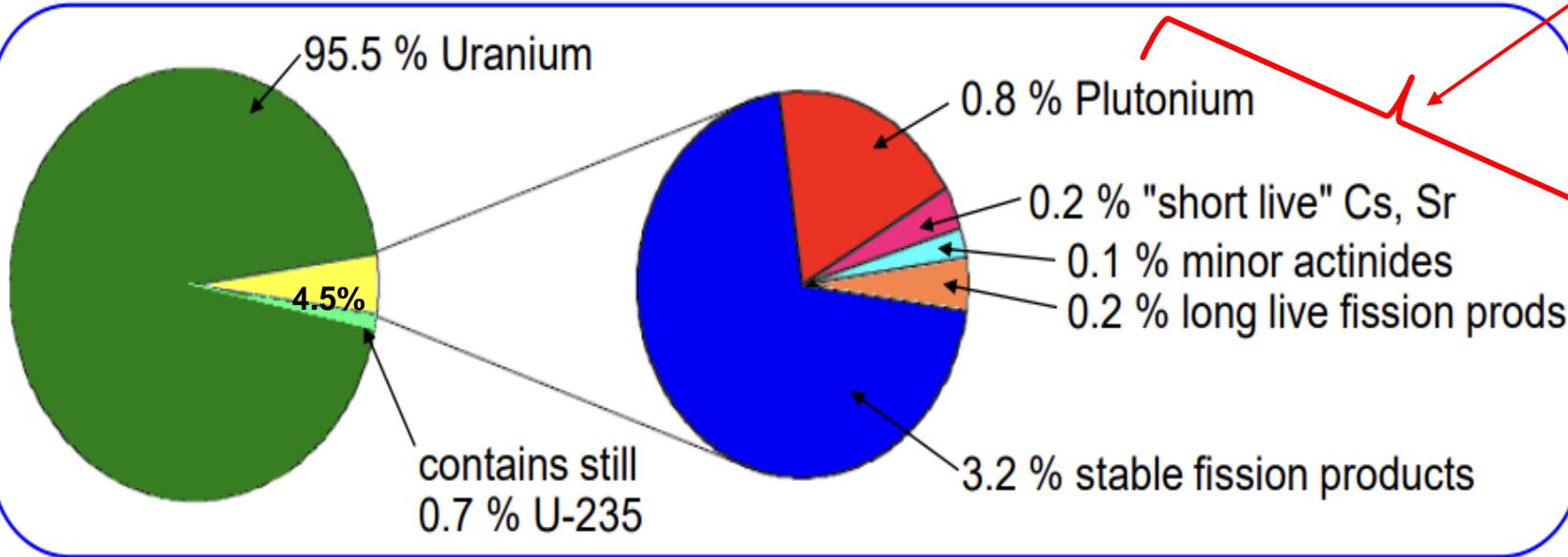
- Wiederherstellung Lieferkette in Europa (fortlaufend)
- Politische Rahmenbedingungen
- Schweizer Genehmigungsverfahren (in Kraft seit 1. Februar 2005)
  - Rahmenbewilligung, Baubewilligung, Betriebsbewilligung => bis ~ 12 Jahren

**ABFALL**

# Kernenergie / Abfall – zu gefährlich und keine Lösung (?)

Zusammensetzung abgebrannter Brennelemente

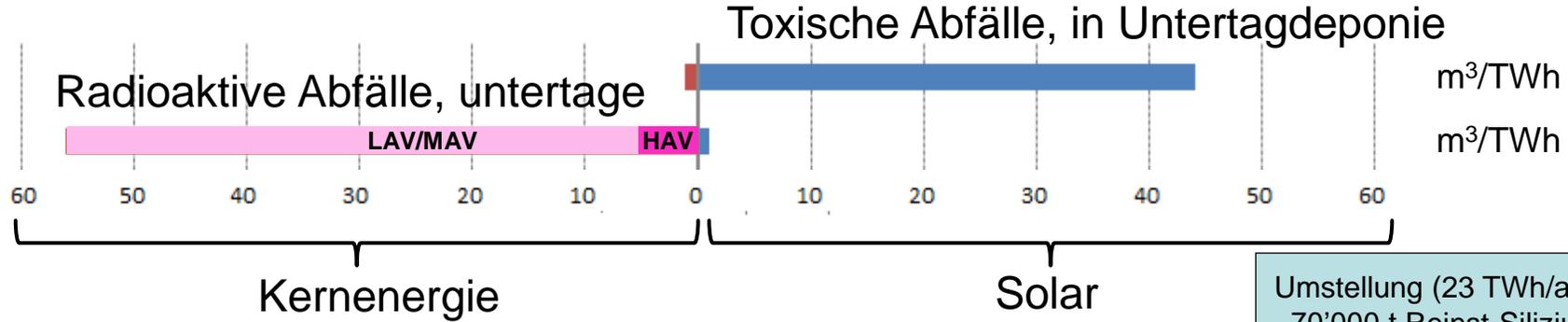
Nur 1,3% (!! ) des verbrauchten  
Brennstoffs sind hochradioaktiv



Schweiz: total von 1500 m<sup>3</sup> hochradioaktiver Abfall für alle KKW bis 60 Lebensjahre

# KE und Erneuerbare

Daten Schweiz: Hirschberg et al., Energiespiegel 20, PSI, 2010



Dünnschicht-Module: ca. 100 kg CdTe pro MWp, Si-Module: SiCl<sub>4</sub> bei der Fertigung

Achtung: Toxische Abfälle kommen vorrangig aus der Reinstsiliziumproduktion: SeH<sub>2</sub>, As(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Blei, HSiCl<sub>3</sub>

**Trichlorosilen**

BERNREUTER RESEARCH  
Polysilicon Market Reports

Polysilicon Solar Industry References About Us **Newsroom**



**POLYSILICON NEWS**  
The Latest on Suppliers, Market and Technology

**Report IEA-PVPS T12-19:2020**  
Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems

- 170g/m<sup>2</sup> in Unterirdischen Deponie
- 100,000 m<sup>2</sup> (Gondosolar) => 17 tons
- 1000 Gondosolar => 17,000 tons (to replace Swiss KKWs)

**Toxische Abfälle (Si-Zellen Erstellung)**

Home ▶ Newsroom ▶ **Im Falle einer Freisetzung (from Silicon plant) Evakuierung und shelter-in-place!**

After the explosion at GCL: Why a safety program is necessary

# KE und Solar

Report IEA-PVPS T12-19:2020  
Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of  
Photovoltaic Systems

- **170g/m<sup>2</sup>** in Unterirdischen Deponie
- 100,000 m<sup>2</sup> (Gondosolar) => 17 tons



**Toxische Abfälle (Si-Zellen Erstellung)**

## GONDOSOLAR

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

170g/m<sup>2</sup> => 17,000 kg of waste

Energy: 23.3 GWh/year, 30 years lifetime

=>  $23.3 * 30 = 699$  GWh total energy over 30 years

WASTE =>  $17,000\text{kg} / 699\text{GWh} = 24$  kg/GWh or **24 tons/TWh**

## KKW Gösgen

1 Fuel Assembly (FA) => 666 kg

33 FA exchanged per year

=>  $33 * 666\text{kg} = 21.98$  tons in a year

8 TWh produced in a year

SPENT FUEL WASTE =>  $21.98\text{tons} / 8\text{TWh} = 2.75$  tons/TWh

(+ Stilllegungsabfälle)

# Endlager

Deponie innerhalb 300 m  
Salzschicht.

**Herfa-Neurode, DE**  
Chemische Toxische Abfälle



## Abfall im Tiefenlager:

### Radioaktiv ↔ Chemisch-toxisch

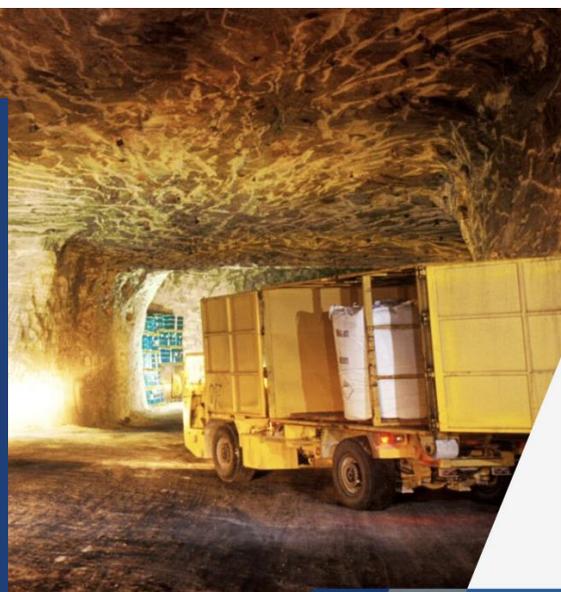
- Unterschiedliche Schädigungsmechanismen (chemisches Gift, interne Strahlenwirkung)
- Vergleichbare Wirkung im Organismus (akut giftig bzw. krebserregend)
- Identischer Ausbreitungs- und Expositionspfad (über Nahrungsketten und Trinkwasser)
- Toxizität fällt mit der Zeit ab
- Status: Starke Opposition in der Öffentlichkeit
- Toxizität bleibt konstant ( $T_{1/2} = \infty$ )
- Status: Mehrere Tiefendeponien in Betrieb

# Endlager

Deponie innerhalb 300 m Salzschieht.

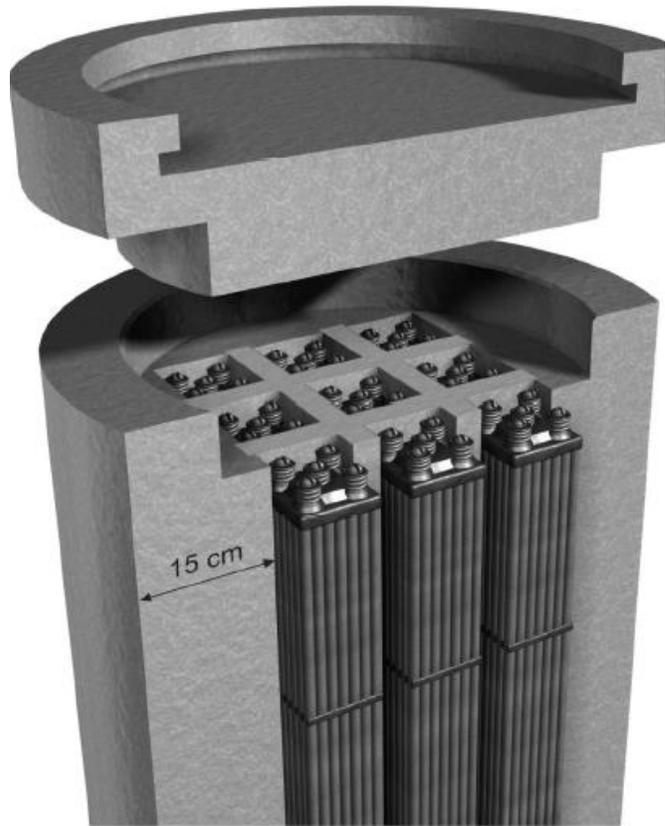
## Herfa-Neurode, DE

Chemische Toxische Abfälle



# Endlager

Hohe spezifische Wertschöpfung  
→ „komfortable“ Entsorgung



Aufgrund der hohen Energiemenge, die durch Kernbrennstoff erzeugt wird, und damit der hohen Einnahmen, können wir uns einen teureren (sichereren!) Entsorgungskanister für nukleare Abfälle im Vergleich zu chemischen Abfällen leisten.

Kanister für die Tiefenlagerung

von hochaktivem Abfall Bildquelle: Johnson et al., 2002.

Total von 1500 m<sup>3</sup> hochaktiver Abfall (Schweiz).  
Mit Kanister 9300 m<sup>3</sup>

Niedrige spezifische Wertschöpfung  
→ kostengünstige Lösung erforderlich



Gebinde mit chemisch-toxischem Abfall

Bildquelle: <https://www.kpluss.com>

3,2 Millionen Tonnen gefährliche Abfälle  
(Stand 2019, Herfa-Neurode)

- Dyoxin, Quecksilber, Zyanid, Arsen, unz.

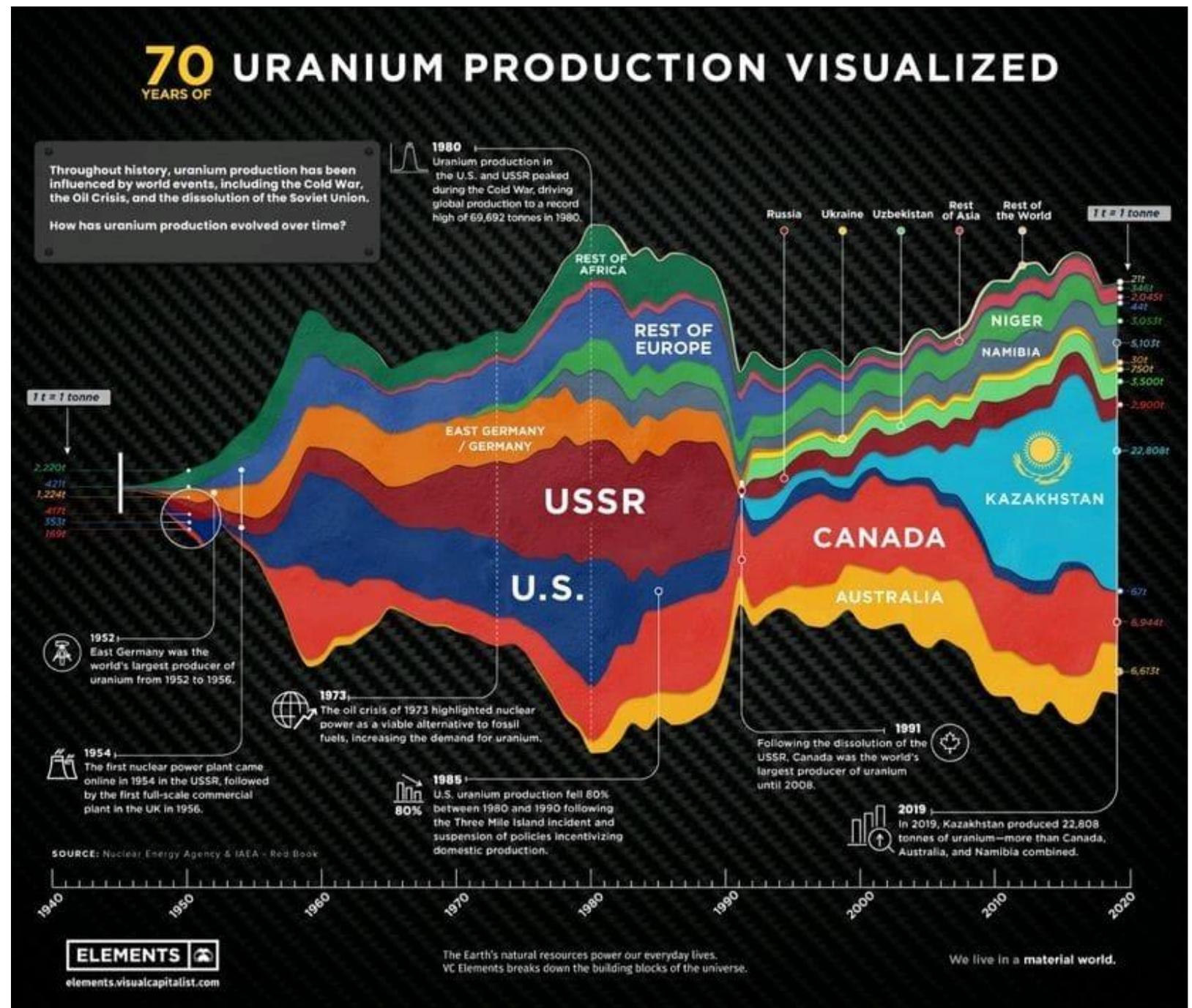
# Rohstoffe

# Uran Ressourcen

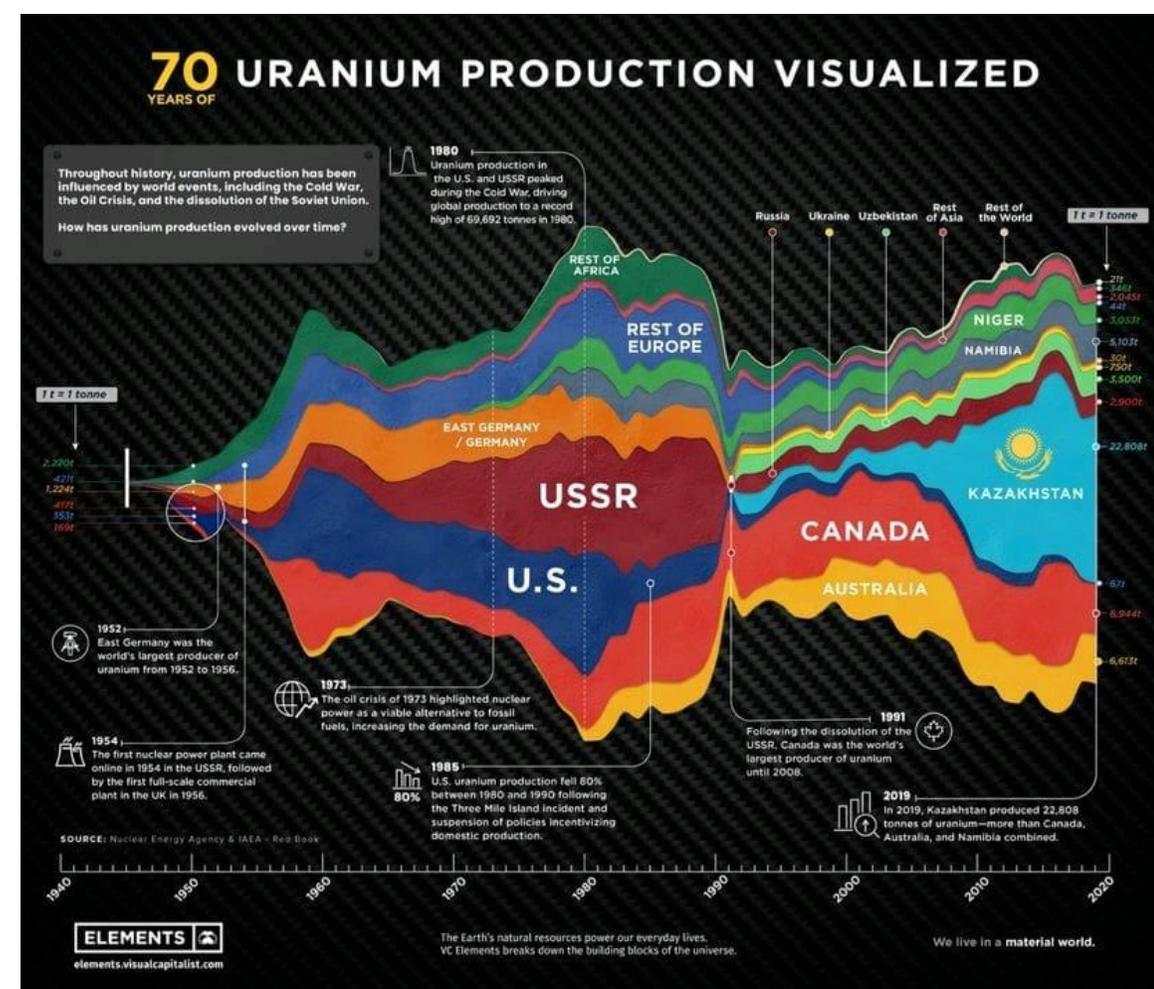
Die größten Uranproduzenten sind:

Kasachstan  
Kanada  
Australien

Russland liegt auf Platz #7



# Uran Ressourcen



## Anreicherungskapazität (2018)

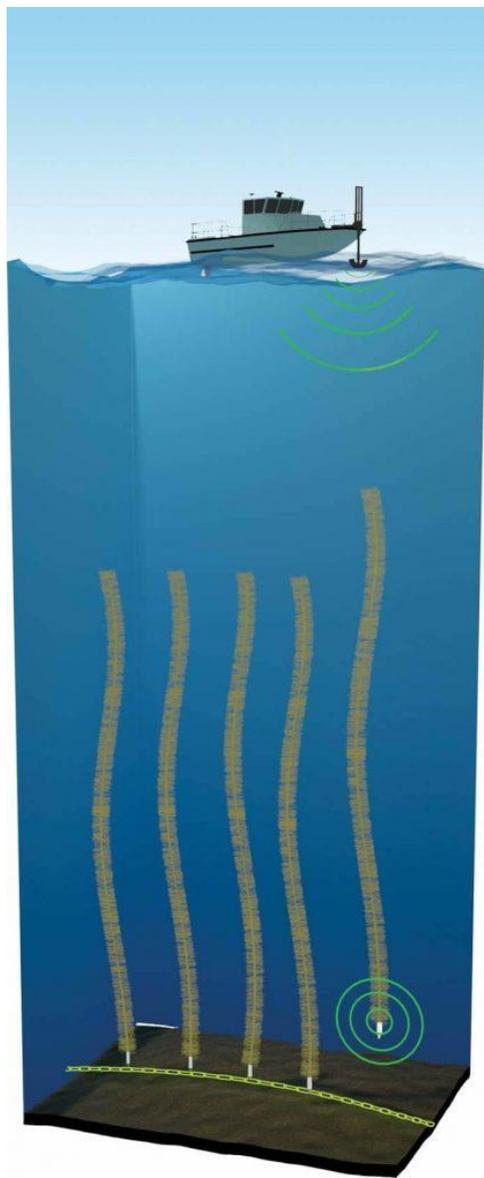
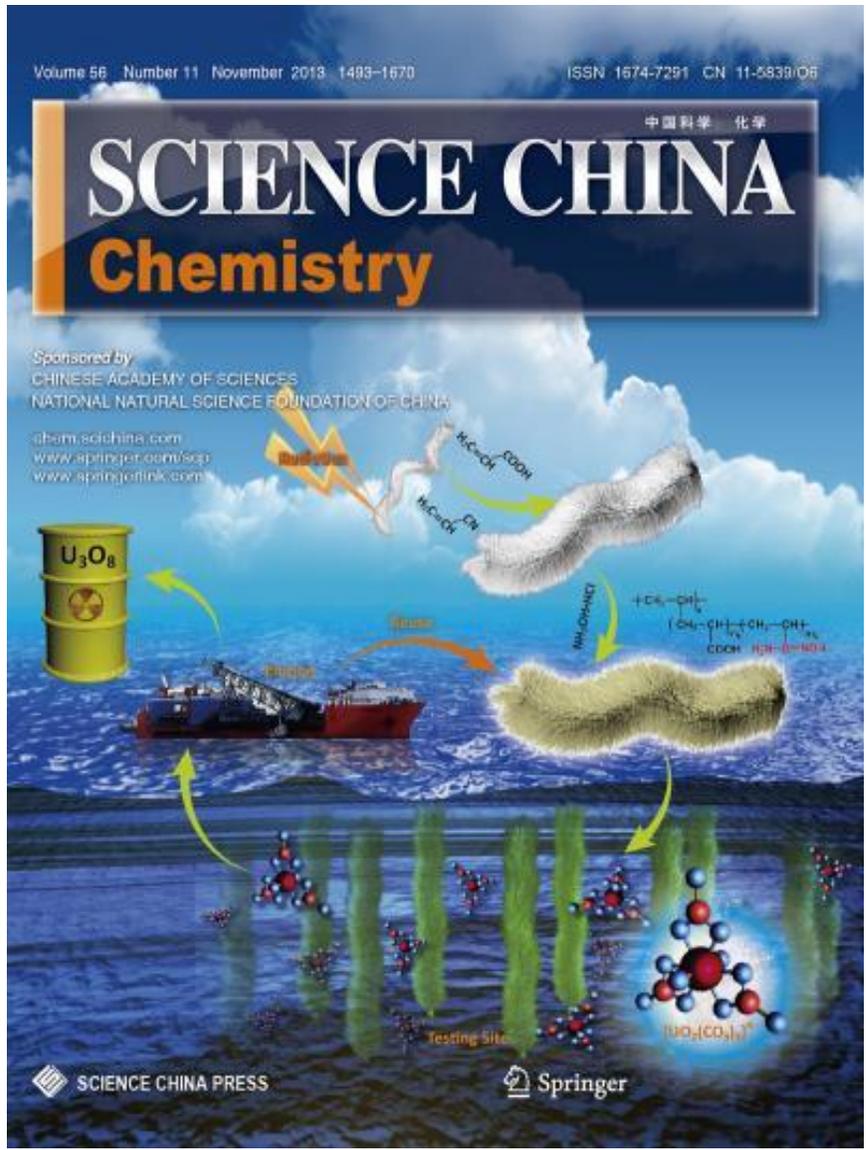
OPERATOR	REGION	CAPACITY (IN SWU, 2018)	MARKET SHARE
CNNC	China	6750	11%
Rosatom	Russia	28215	46%
Orano	France	7500	12%
Cameco	Canada	46	0.08%
Urenco	Netherlands, United Kingdom, Germany, United States	18600	30%

} 42.8%  
Derzeit werden die Kapazitäten erweitert

Source: World Nuclear Association [138].

# Ist Kernenergie erneuerbar?

Uran im Meerwasser ist erneuerbar

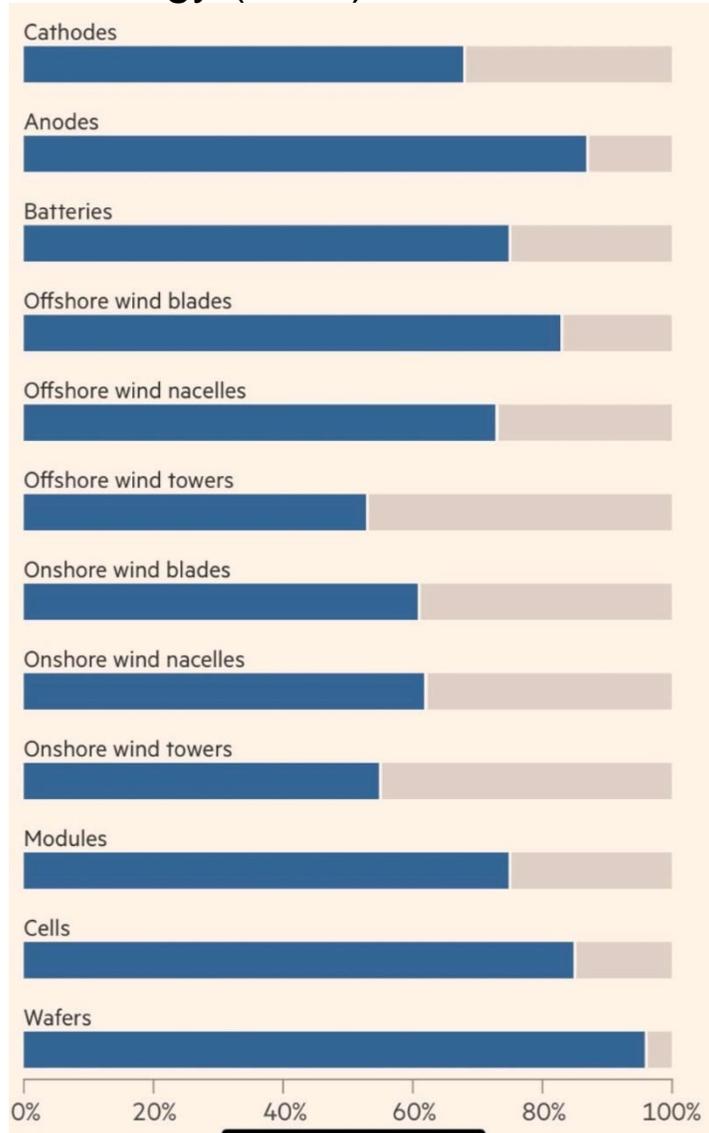


4,5 Milliarden Tonnen Uran im Meerwasser

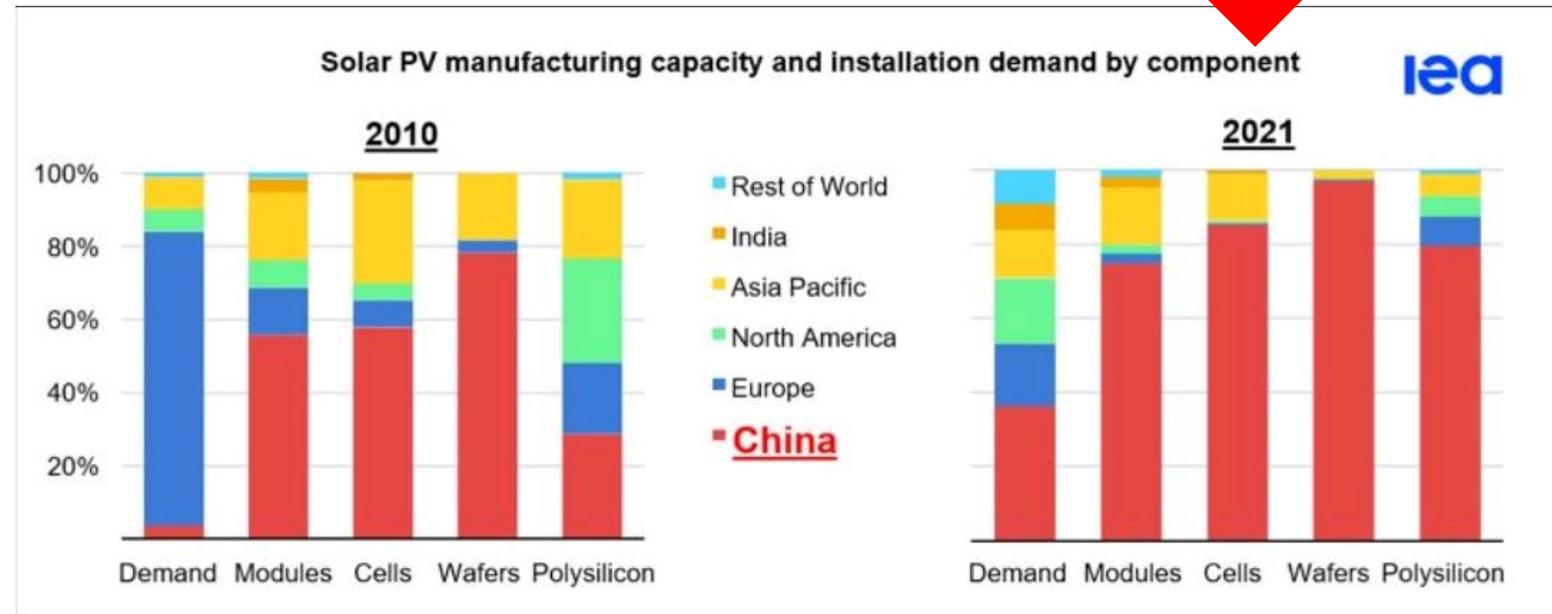
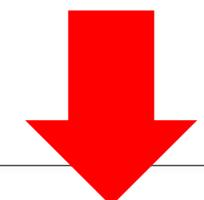
Uran im Meerwasser wird durch stationäre chemische Reaktionen zwischen dem Wasser und uranhaltigen Gesteinen kontrolliert, so dass immer dann, wenn Uran aus Meerwasser extrahiert wird, die gleiche Menge aus dem Gestein ersetzt wird.

# Rohstoffe – Wind/Solar

Share of manufacturing capacity by technology (2021)



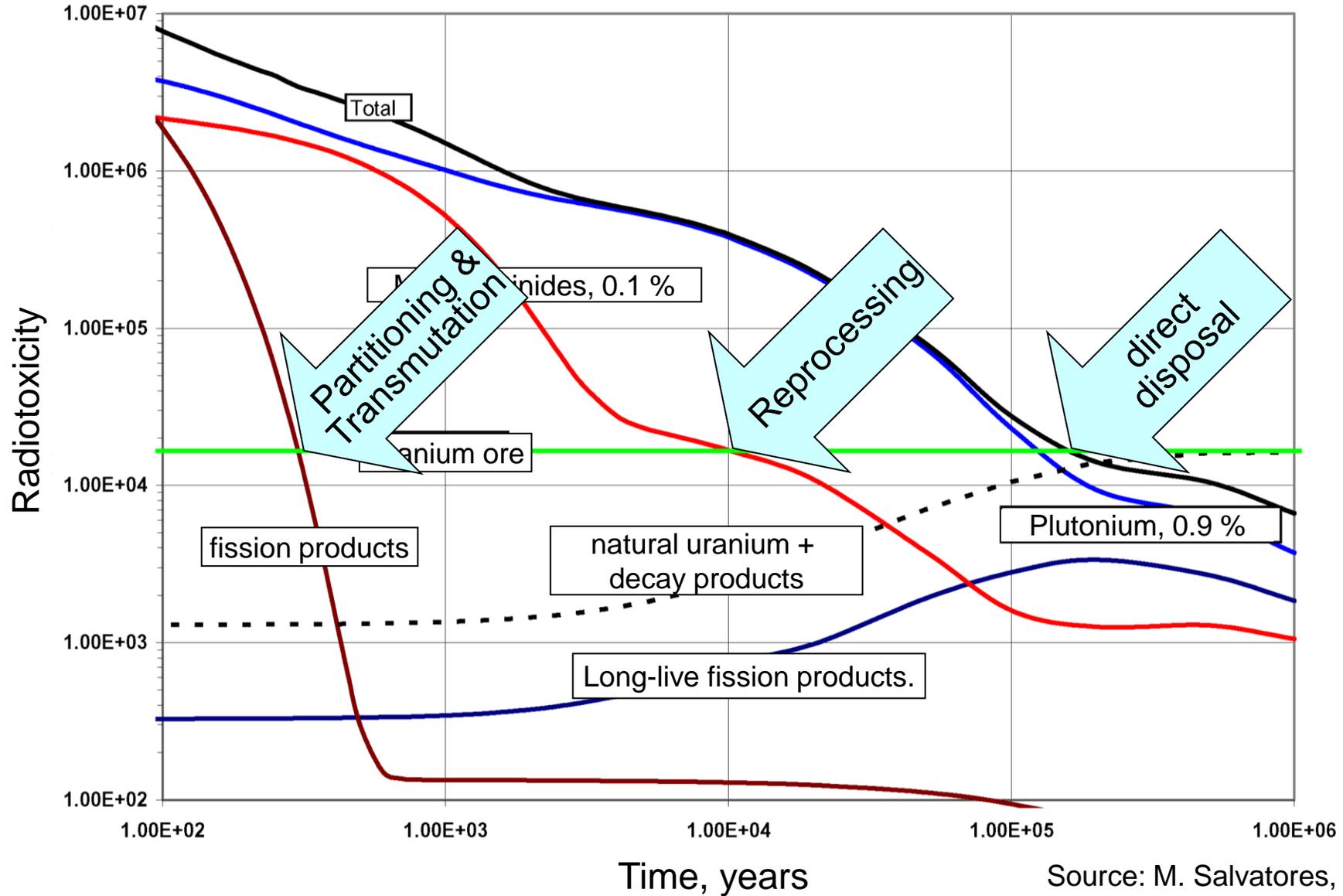
China  
Rest of the world



China dominiert die Materialverarbeitung, die für Windkraftanlagen, Sonnenkollektoren und Batterien benötigt wird!

# Transmutation

## Reduction of radiotoxicity in spent fuel

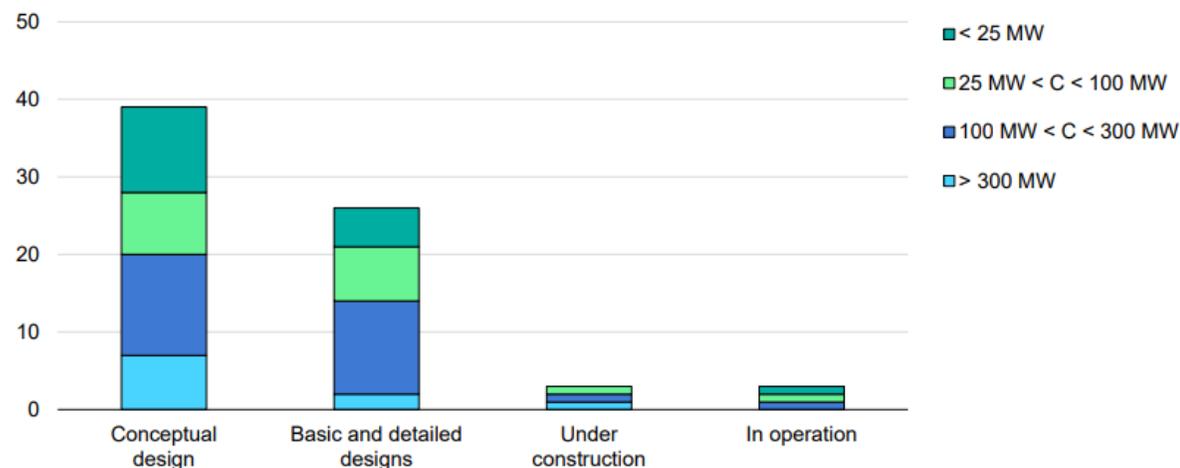


Source: M. Salvatores, CEA

Design	Net output per module	Type	Designer	Country	Status
<b>ARC-100</b>	100 MW electric	Sodium fast reactor	ARC Clean Energy	Canada	Demonstration project planned in New Brunswick
<b>CAREM</b>	25 MW electric	Pressurised water reactor	CNEA	Argentina	Under construction (Zárate)
<b>BWRX-300</b>	300 MW electric	Boiling water reactor	GE-Hitachi	United States / Canada	First commercial deployment announced with Ontario Power Generation (Darlington, Canada) and under discussion with Tennessee Valley Authority (Clinch River, United States)
<b>eVinci</b>	5 MW electric and up to 13MW thermal	Heat pipe	Westinghouse	United States / Canada	Pre-licensing application submitted in the United States in 2021
<b>Kairos Power FHR</b>	140 MW electric	Molten salt reactor	Kairos Power	United States	Under licensing with demonstration project planned with Oakridge National Laboratory
<b>Micro-Modular Reactor Project</b>	15 MW thermal	High temperature gas-cooled reactor	Global First Power / Ultra Safe Nuclear Corporation	Canada	Under licensing with demonstration project planned at Canada National Laboratories site (Chalk River)
<b>Stable Salt Reactor – Wasteburner (SSR-W)</b>	300 MW electric	Molten salt reactor	Moltex	Canada	Demonstration project planned in New Brunswick
<b>NuScale SMR</b>	50 MW electric (× 12)	Pressurised water reactor	NuScale Power	United States	Under licensing with demonstration project with Idaho National Laboratories and Utah Associated Municipal Power Systems
<b>Natrium</b>	345 MW electric	Sodium fast reactor	TerraPower / GE-Hitachi	United States	Demonstration project with preferred site identified at Kemmerer (Wyoming)
<b>NUWARD</b>	170 MW electric (x2)	Pressurised water reactor	EDF-led consortium	France	Demonstration project planned for 2030
<b>RITM-200</b>	55 MW electric	Pressurised water reactor	OKBM Afrikantov	Russia	First land-based version planned for 2028 in Yakutia

Design	Net output per module	Type	Designer	Country	Status
<b>UK SMR</b>	470 MW electric	Pressurised water reactor	Rolls-Royce led consortium	United Kingdom	Under licensing with Wylfa and Trawsfynydd identified as potential sites in the licence application
<b>Xe-100</b>	80 MW electric (x 4)	High Temperature gas-cooled reactor	X-energy	United States	Demonstration project with Energy Northwest (Washington)

Number of small modular reactor projects in the world by status of development



Notes: C = electrical capacity.

Source: IAEA 2022, All rights reserved.

## Grid-level system costs of selected generation technologies

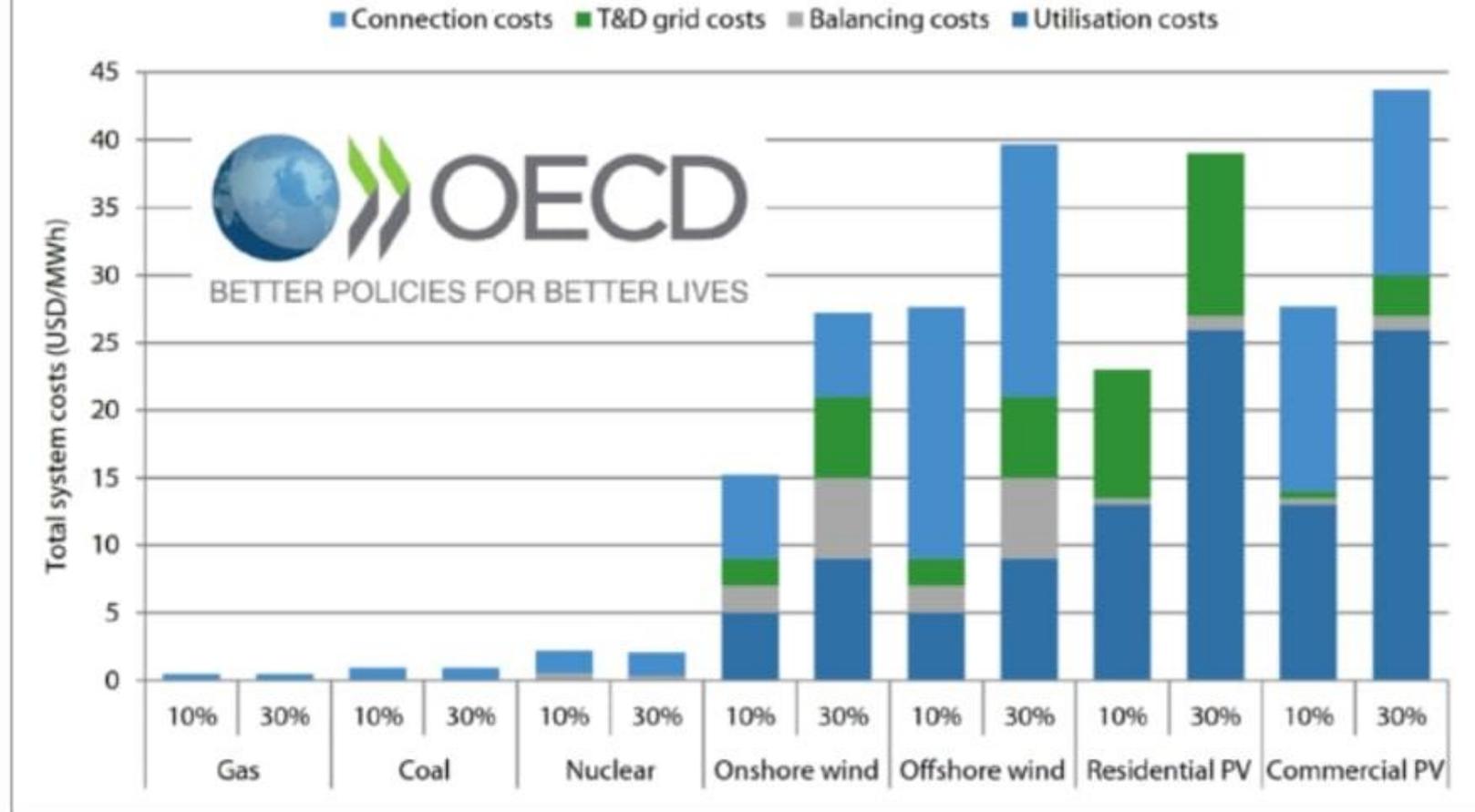


Abbildung 3: OECD Strom-Vollkosten-Analyse mit verschiedenen Technologien

Quelle: OECD: The Full Costs of Electricity Provision 2019, <https://www.oecd.org/publications/the-full-costs-of-electricity-provision-9789264303119-en.htm>, S. 18