



Kernenergie – technischer Stand und Rolle in der Dekarbonisierung

Annalisa Manera

Labor Nukleare Sicherheit und Mehrphaseströmungen
ETH-Zurich

WiN Schweiz – Baden – März 15, 2025

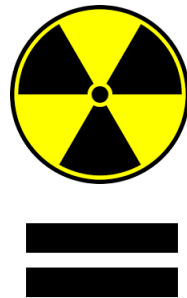
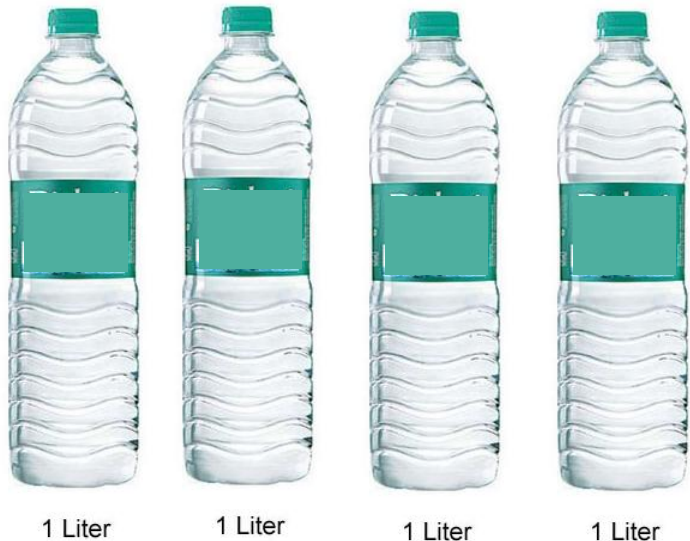
Inhalt

- Einige Kuriositäten über Kernenergie
- Kernenergie heute in der Schweiz
- Ist Kernenergie umweltfreundlich?
- Kosten
- Kann Kernenergie zur Dekarbonisierung beitragen?
- Kernenergie - Stand der Technik
- Auf dem Markt
- Bauzeit
- Rohstoffe
- Kosten
- Abfall

Japan will radioaktives Fukushima-Wasser ins Meer leiten

Durch einen Tunnel soll radioaktiv verseuchtes Kühlwasser im Meer entsorgt werden. Trotz letzter Inspektion misstrauen Fischer den japanischen Behörden und der Betreiberfirma des Atomkraftwerks Fukushima, Tepco.

Donnerstag, 29.06.2023, 12:23 Uhr



Das Trinken von 4L Fukushima-Wasser verursacht die gleiche Strahlendosis wie das Essen einer Banane



2L/Tag, jeden Tag für die nächsten 350 Jahre

News > World > Europe

Russian forces suffer radiation sickness after digging trenches and fishing in Chernobyl

Russian troops 'set up camp, fished and dug defensive positions six miles from power plant'

Emily Atkinson • Monday 01 May 2023 07:20 BST • Comments

Gemessene radioaktive Dosis für russische Soldaten:
12-mal weniger Strahlung als ein CT-Scan

World | Ukraine | Russia | Russian Military | Russian Soldiers | Chernobyl | Russia-Ukraine War | Ukraine Conflict

Russian Soldiers Struck With Radiation Sickness After Digging by Chernobyl

Published May 01, 2023 at 12:16 PM EDT


$$= \frac{1}{12} \text{ (Radiation Symbol)}$$

CT Scan
Computed Tomography



Cleveland Clinic ©2023

Ukraine-Krieg: Russen leiden nach Tschernobyl an Strahlenkrankheit

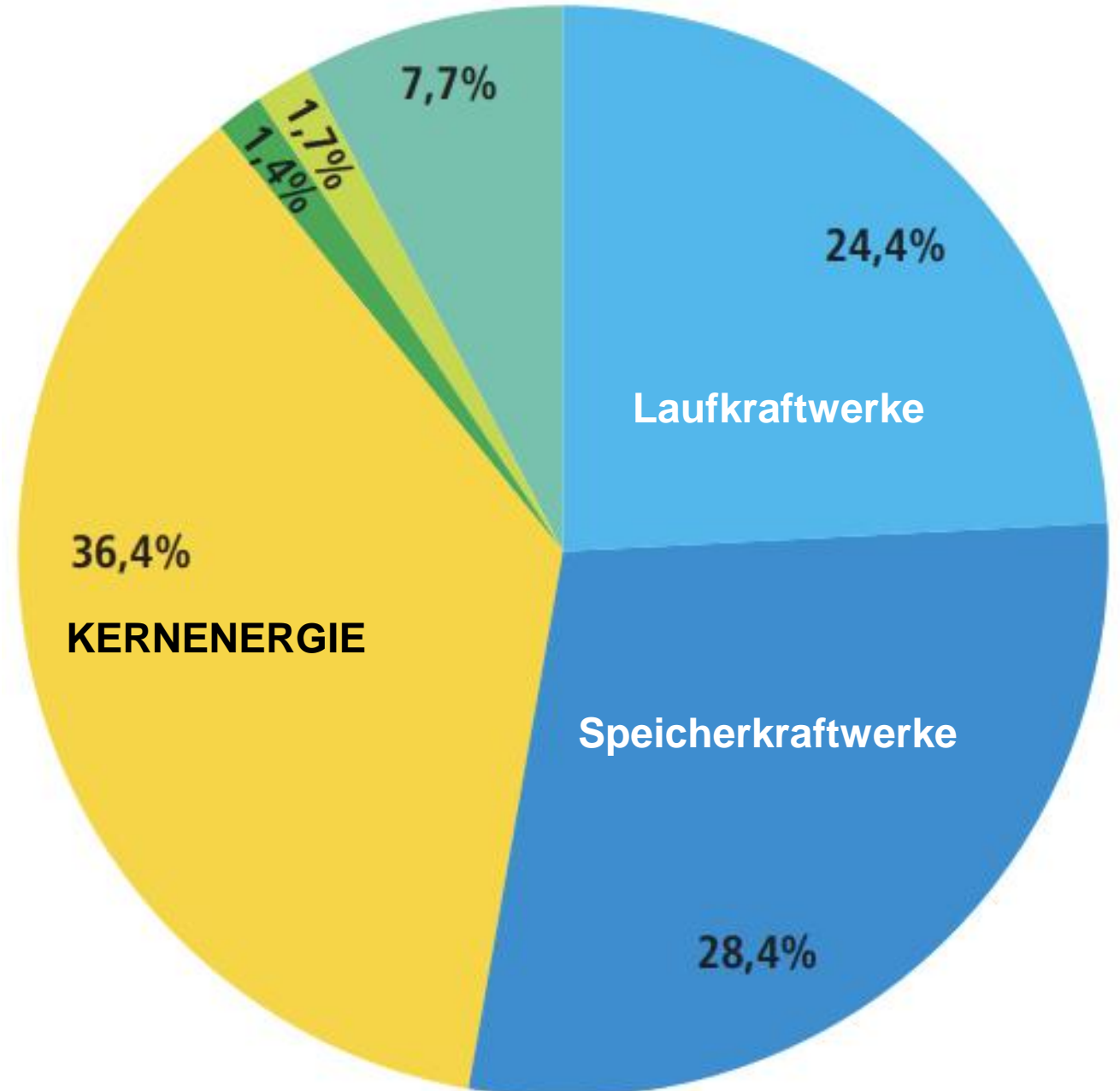
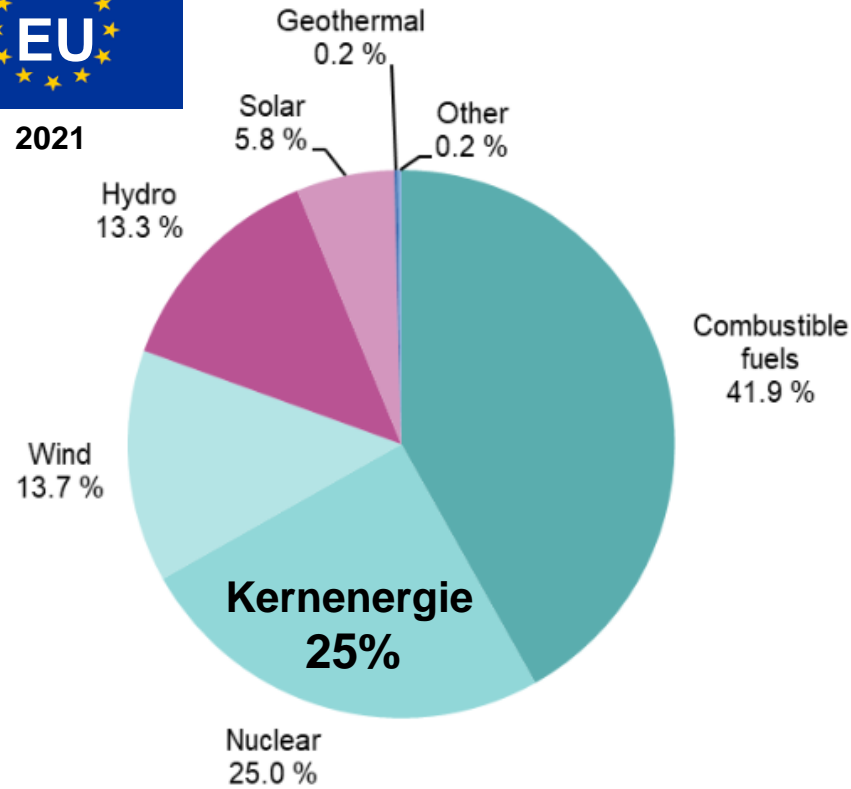
 [Anna-Lena Burkard](#)
[Ukraine](#), 30.04.2023 - 19:44

Kernenergie heute in der Schweiz

Nettostromerzeugung in der Schweiz – Jahr 2022



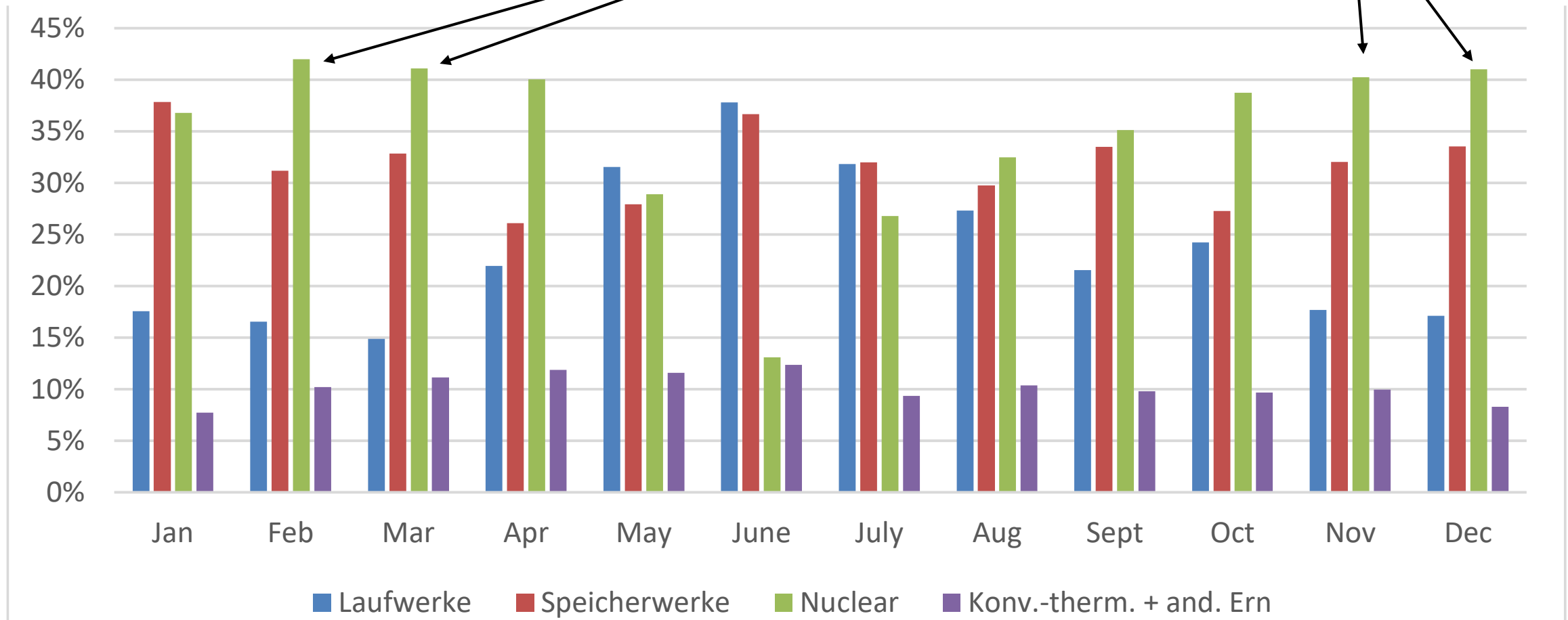
2021



Source: Eurostat (online data code: nrg_ind_peh)

Nettostromerzeugung in der Schweiz nach Energiequellen - 2022

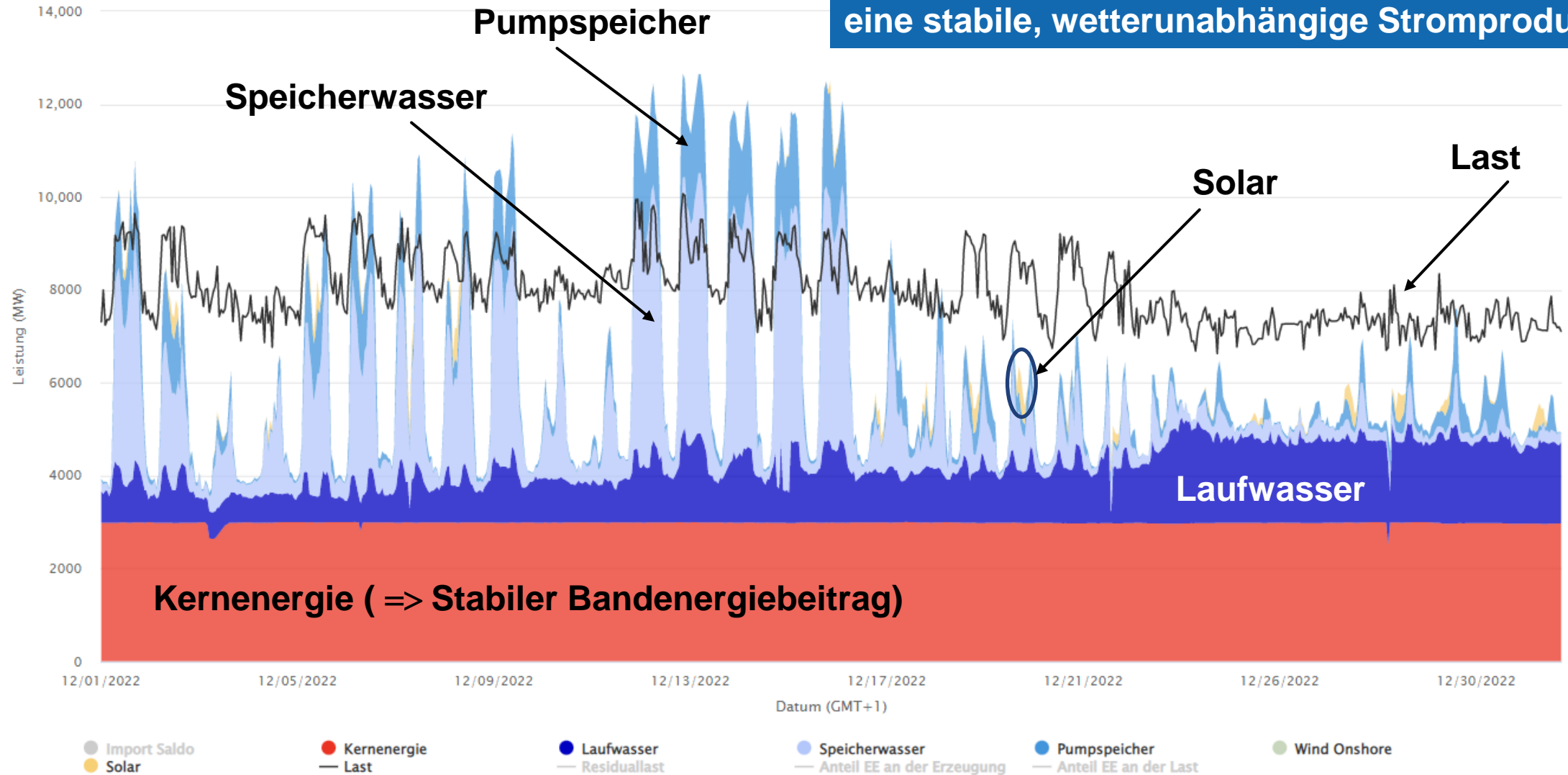
In den Wintermonaten trägt die Kernenergie mehr als 40% zur Stromproduktion in der Schweiz bei

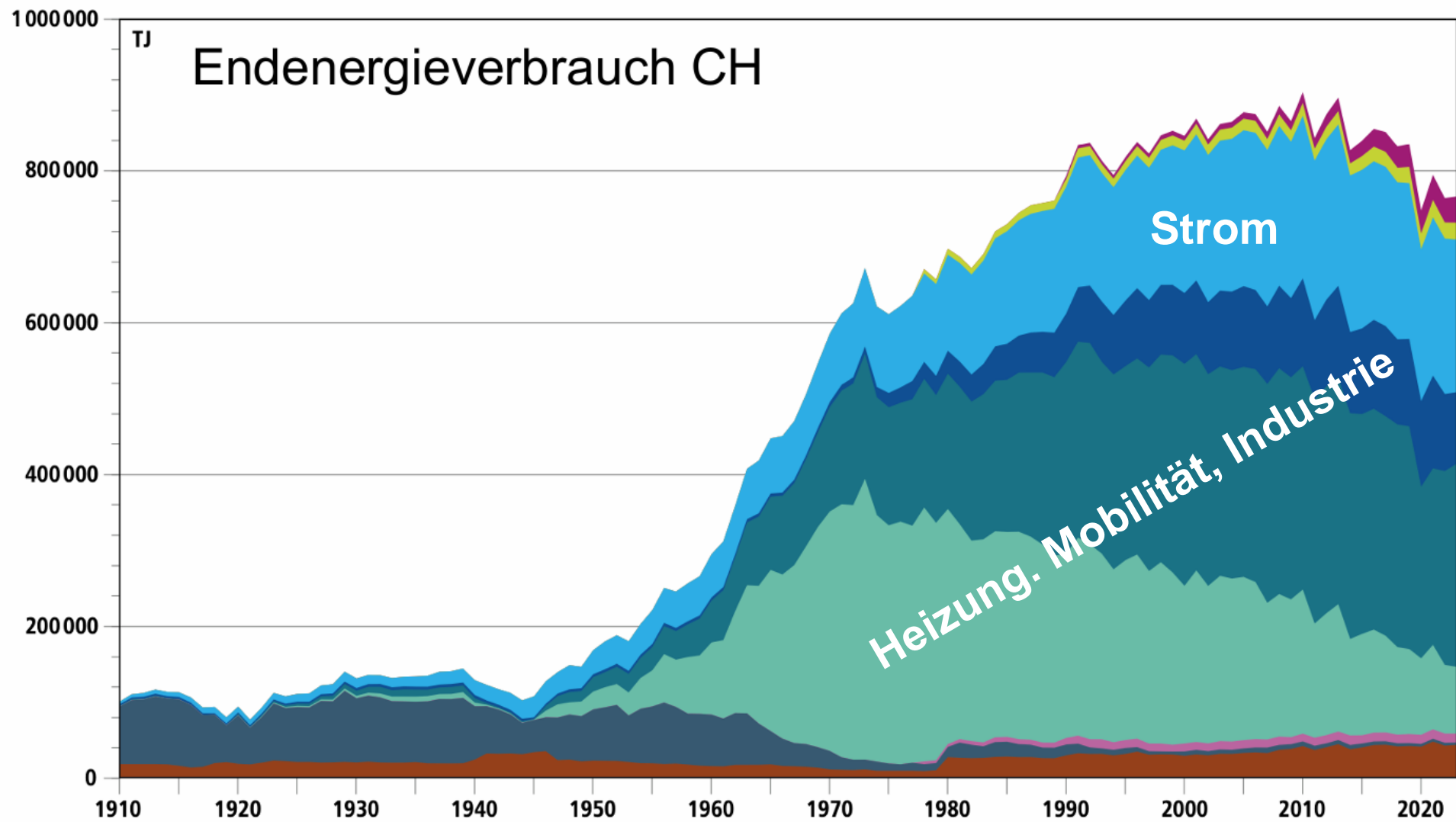


Source: data from BFE

Nettostromerzeugung in der Schweiz – Dezember 2022

Wichtiger Beitrag der Kernenergie im Winter für eine stabile, wetterunabhängige Stromproduktion



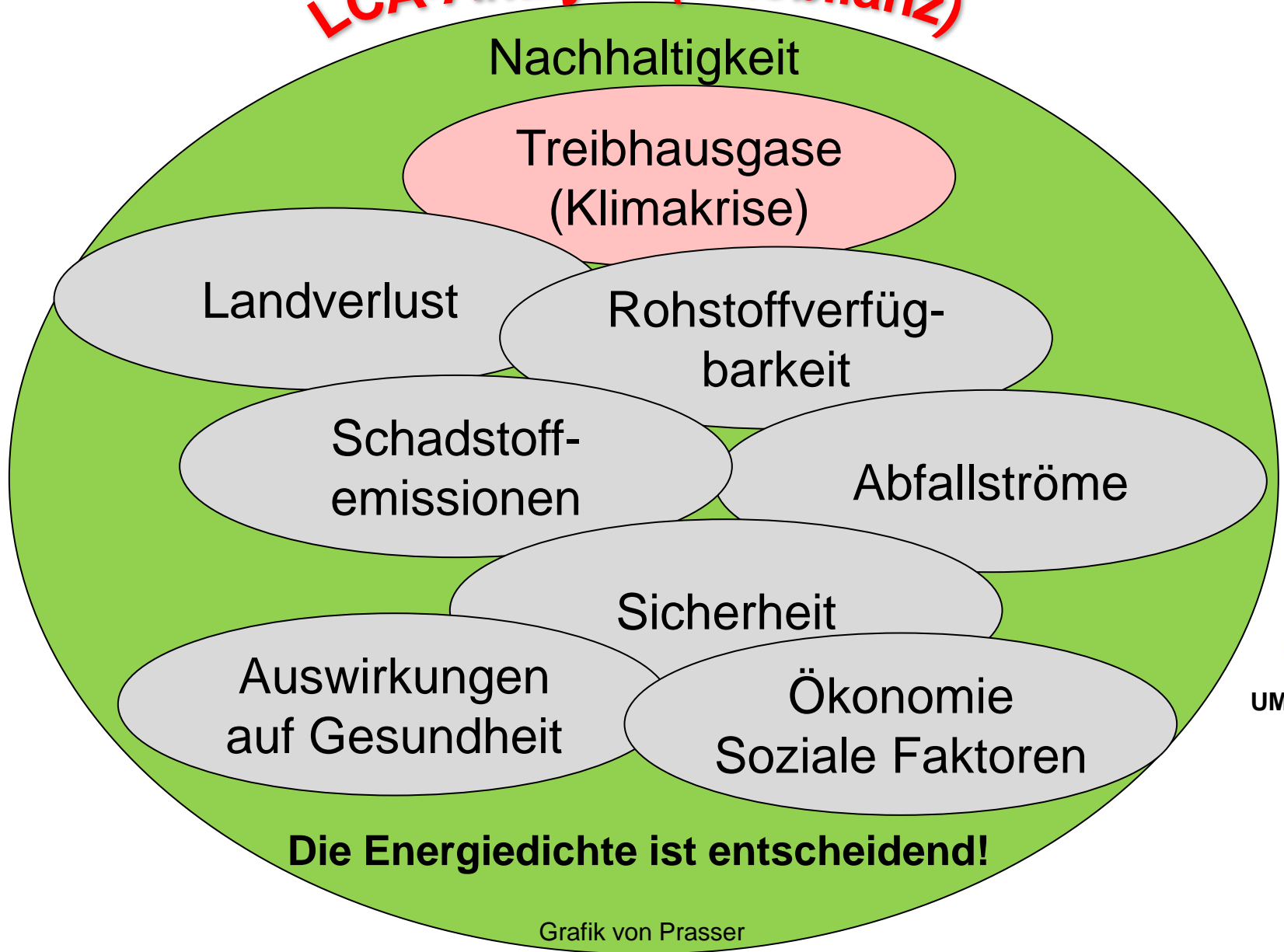


- | | | |
|--|---|---|
| ■ Übrige erneuerbare Energien
Autres énergies renouvelables | ■ Gas
Gaz | ■ Industrieabfälle
Déchets industriels |
| ■ Fernwärme
Chaleur à distance | ■ Treibstoffe
Carburants | ■ Kohle
Charbon |
| ■ Elektrizität
Electricité | ■ Erdölbrennstoffe
Combustibles pétroliers | ■ Holz
Bois |

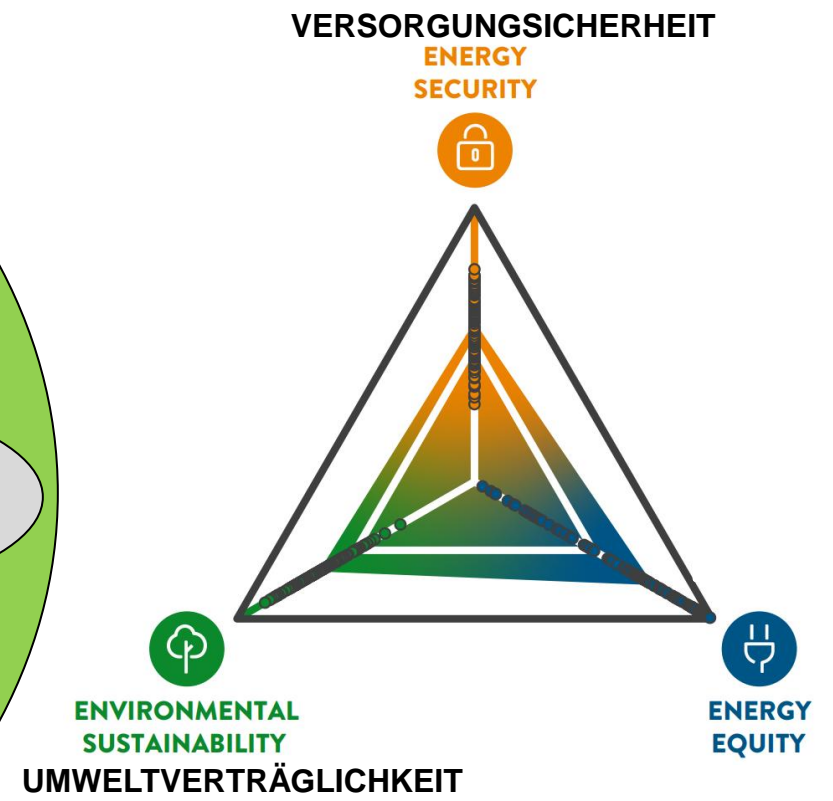
↑
Importiert
... und fossil...
↓

Ist Kernenergie umweltfreundlich?

LCA-Analyse (Ökobilanz)



Energie-Trilemma



Source: World Energy Council

Was ist das Besondere am Kernbrennstoff? Energie Äquivalenz (**Energiedichte**)

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

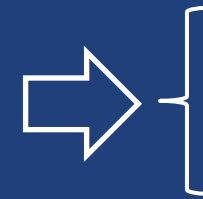


Energie Äquivalenz (Energiedichte)



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

Hohe Energiedichte



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



1 ton coal



454 liters oil
~ 3 oil barrels



480 m³
Gas

Wie viel Energie aus einem KKW?

535 X

(> 22 Milliarden CHF)

**Switzerland
Gondosolar**

23.3 GWh/year

42 MCHF

100,000 m²

Taicun Village Solar (China)
~ Gondosolar



**EPR KKW
Olkiluoto, Finland**

> 12'000 GWh/year

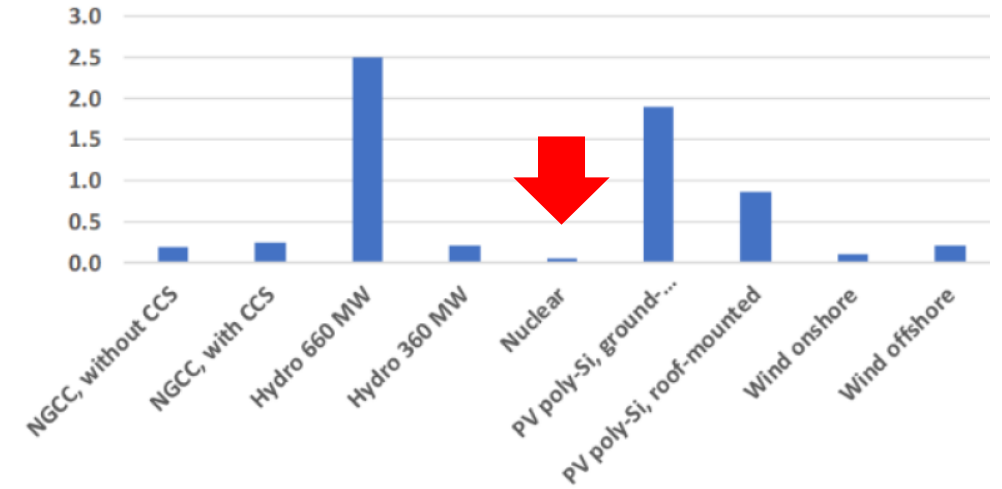


Wichtig, um die Bauzeiten und Kapitalkosten eines KKW zu verstehen

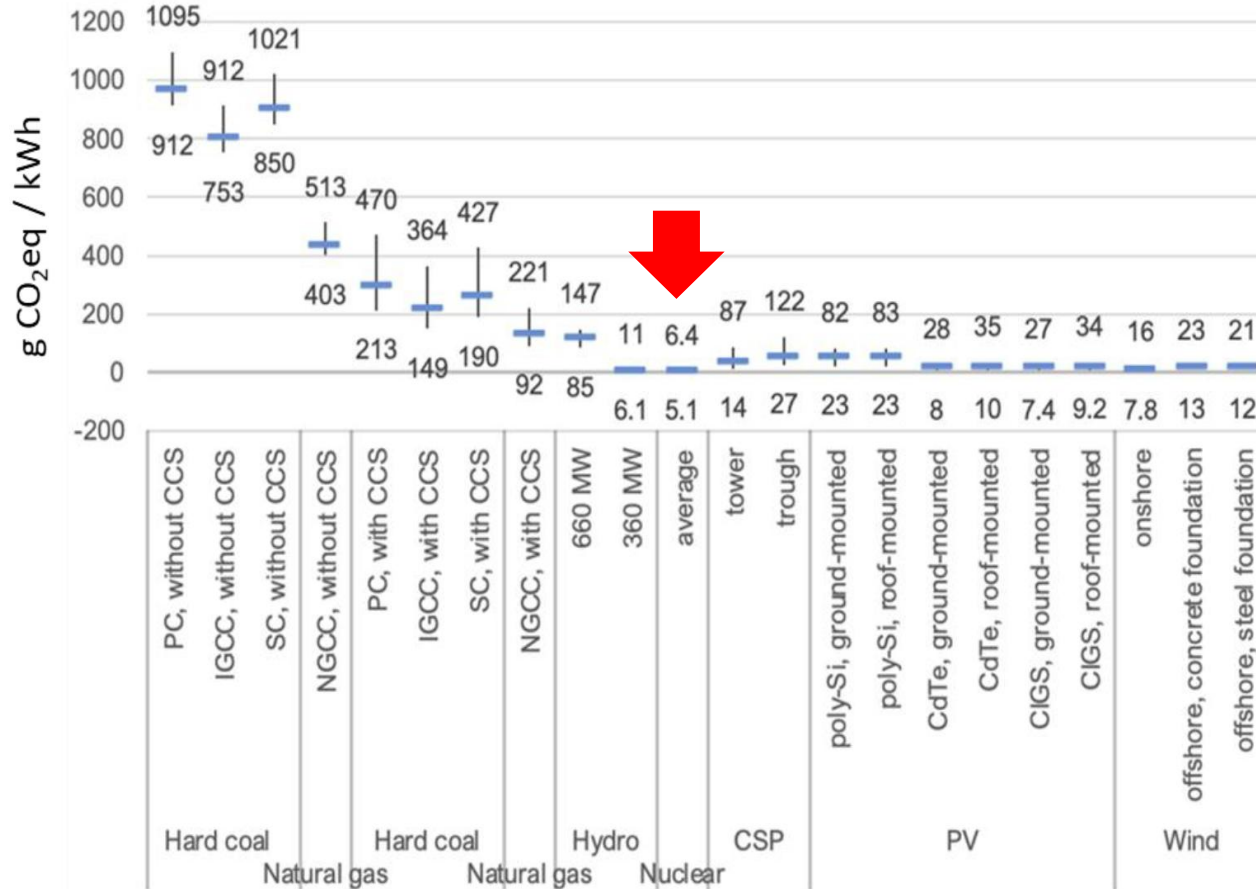
Lebenszyklusanalyse

Landbedarf

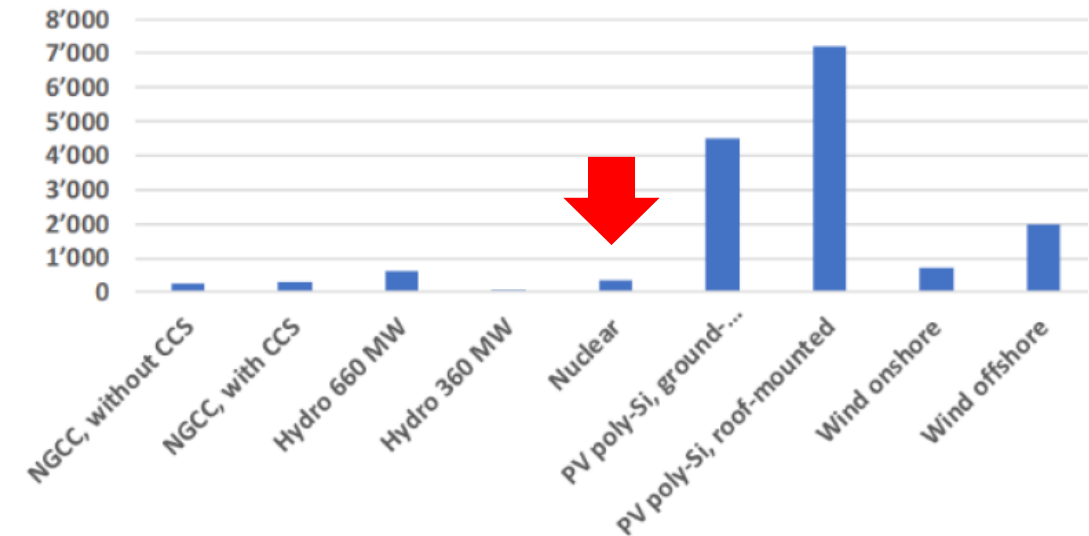
LAND USE [points]



CO₂-äquivalente Emissionen [g/kWh]



Mineralien und Metalle [µg Sb eq.]



Ist Kernenergie umweltfreundlich?

Bergbauintensität der Energieerzeugung

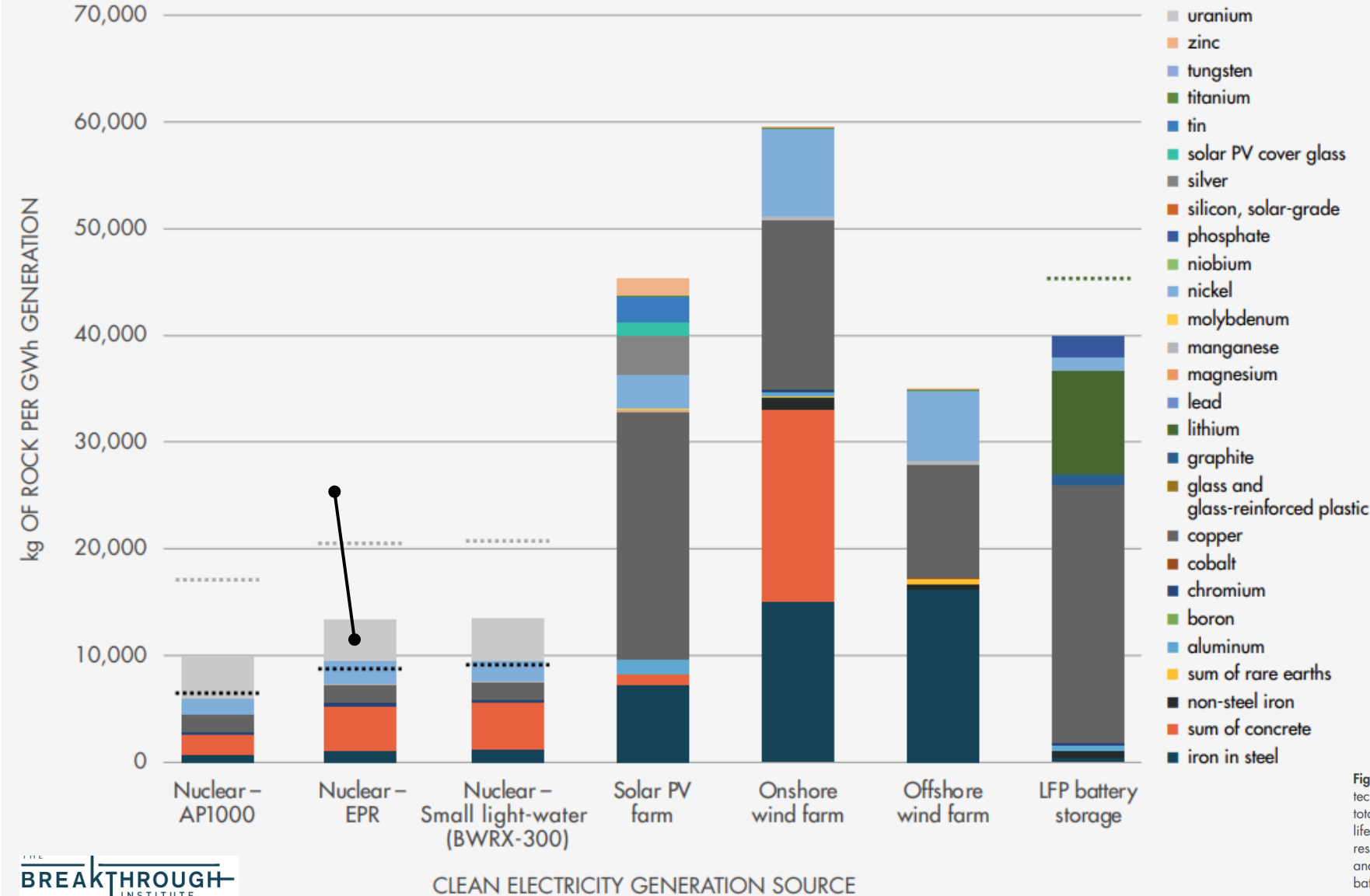


Figure 7: Material and rock moved per GWh of electricity produced by low-carbon electricity generation technologies, color-coded based on mining impact from each raw material. Black dotted lines denote lower total nuclear material requirements per GWh if assuming a higher 92% capacity factor and an 80-year lifetime. We assumed hardrock mining comprises 34.8% and 60% of global uranium and lithium production, respectively. Dashed lines indicate total height of bars if 100% hardrock mining were assumed for uranium and lithium (calculated for original, lower nuclear capacity factor and lifetime). LFP battery storage considers battery cell mineral inputs only, and assumes 1 GWh of output from a 2 GWh, 500 MW battery system cycling once daily over a 25-year life.

Beispiel: Wie Fehlinformationen (Lügen) konstruiert und in „wissenschaftlichen“ Kreisen verbreitet werden

Deutsche
Welle
29.11.2021

NATURE AND ENVIRONMENT | GLOBAL ISSUES

Fact check: Is nuclear energy good for the climate?

Joscha Weber
11/29/2021

Supporters of nuclear energy say it can help us wean our economies off polluting fossil fuels. No surprise, it's a heated issue. But what about the facts? Can nuclear power really help save the climate?

CO₂-Emissionen in Gramm pro kWh*



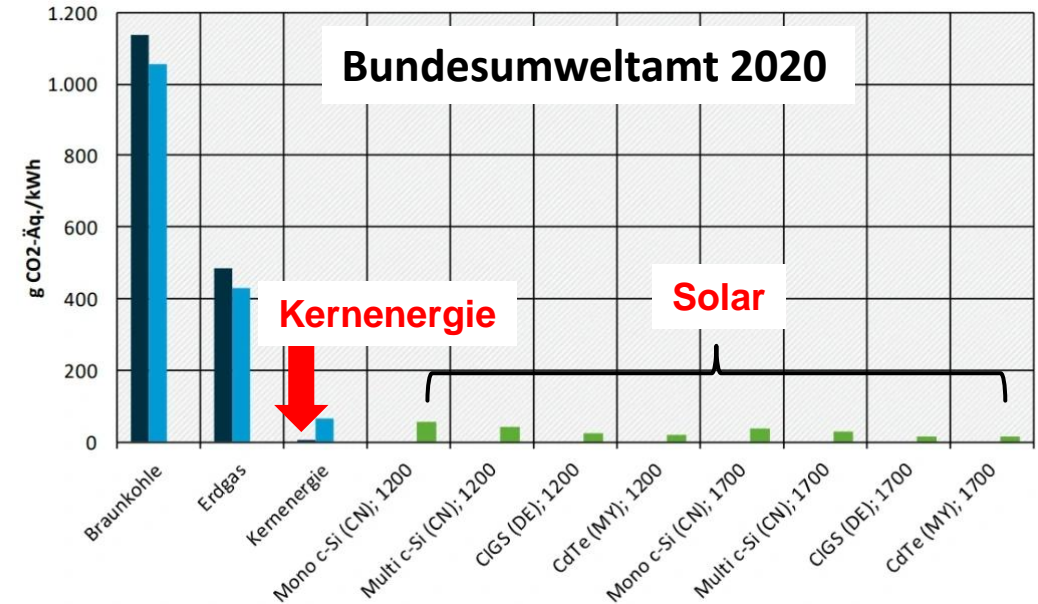
* in CO₂-Äquivalent kompletter Lebenszyklus

** für PV-Anlagen mit Silizium-Technologie

*** für Windräder der aktuellen Generation



Quelle: UBA, WISE



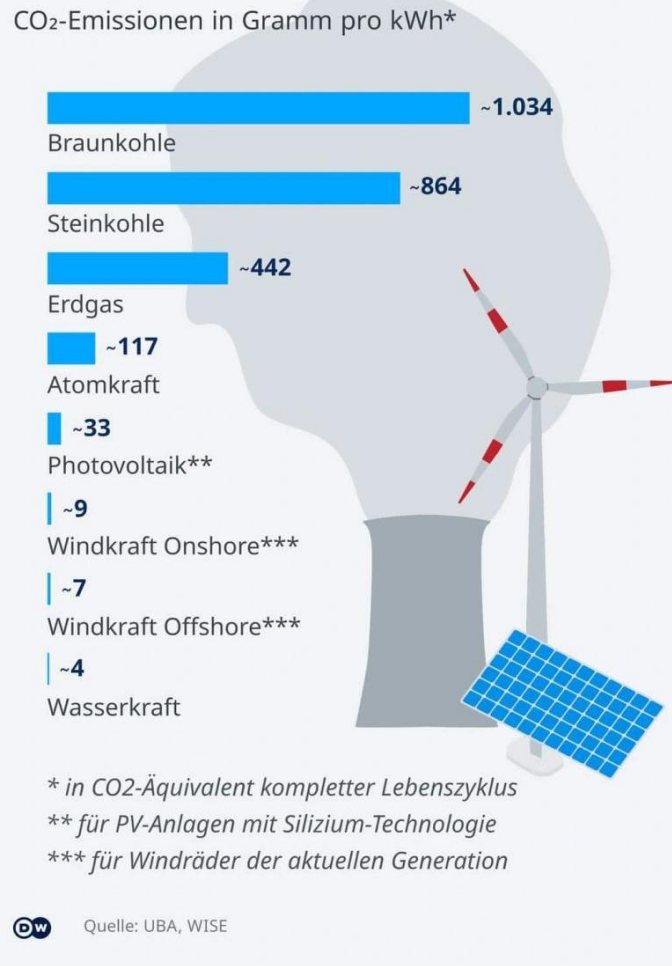
Der in den Niederlanden ansässige World Information Service on Energy (**WISE**) hat berechnet, dass Kernkraftwerke 117 Gramm CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde verursachen. **Es ist jedoch anzumerken, dass WISE eine Anti-Atomkraft-Gruppe ist, also nicht ganz unvoreingenommen ist.**

Quelle: Bundesumweltamt 2020, WISE

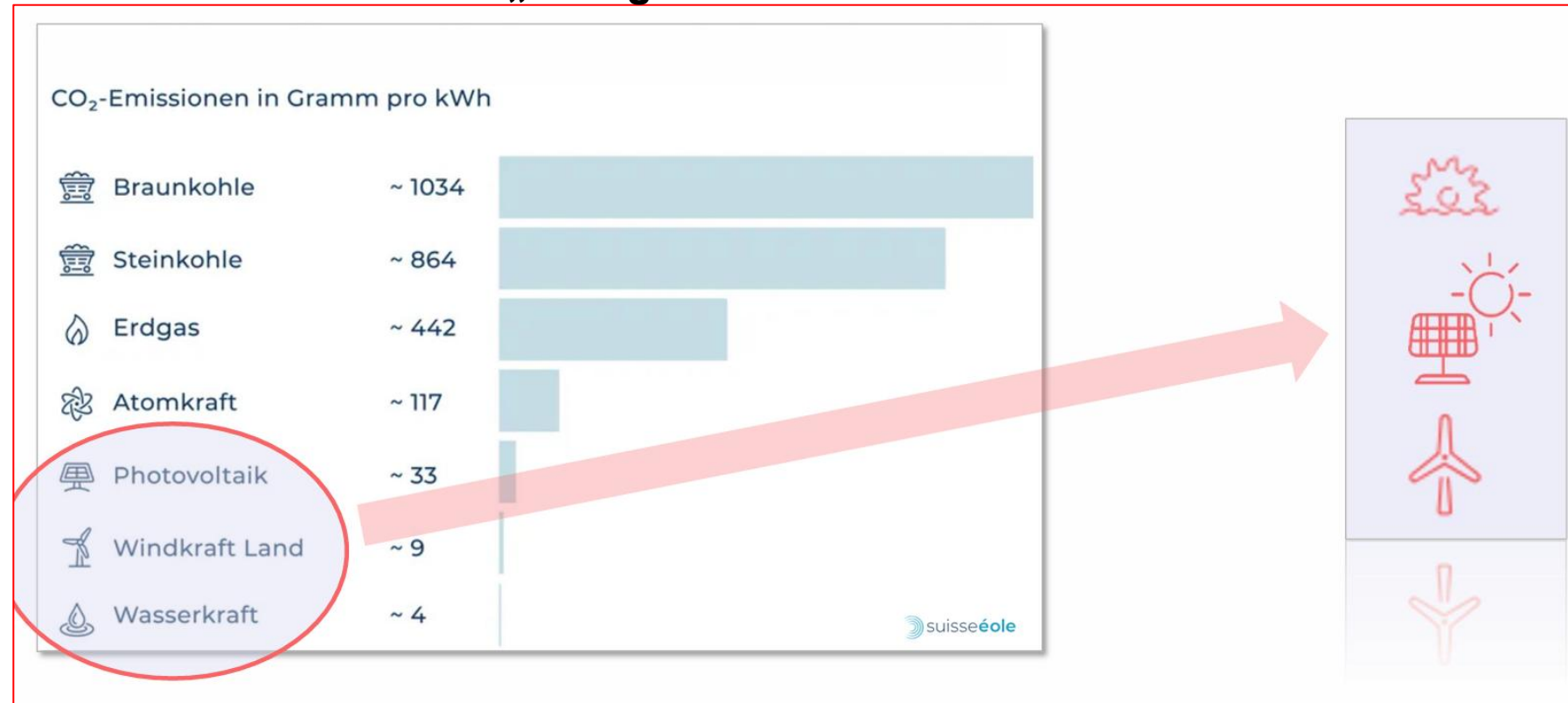
Beispiel: Wie Fehlinformationen (Lügen) konstruiert und in „wissenschaftlichen“ Kreisen verbreitet werden



und dann in einem wissenschaftlichen Symposium im Oktober 2024 von Cédric Aubert, Leiter Axpo Wind Schweiz!!!!

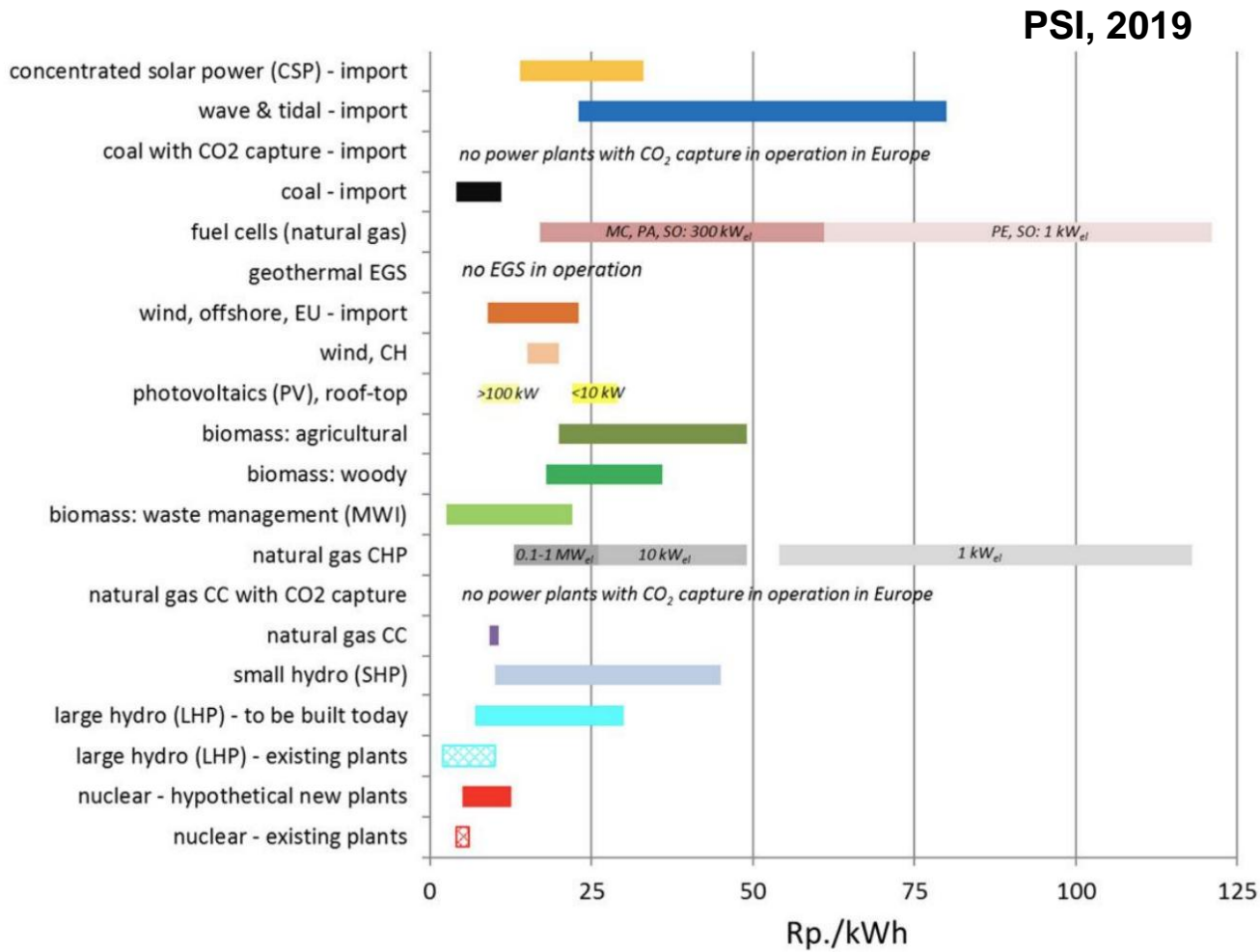


Grafik „nachgekocht“ von Suisseéole

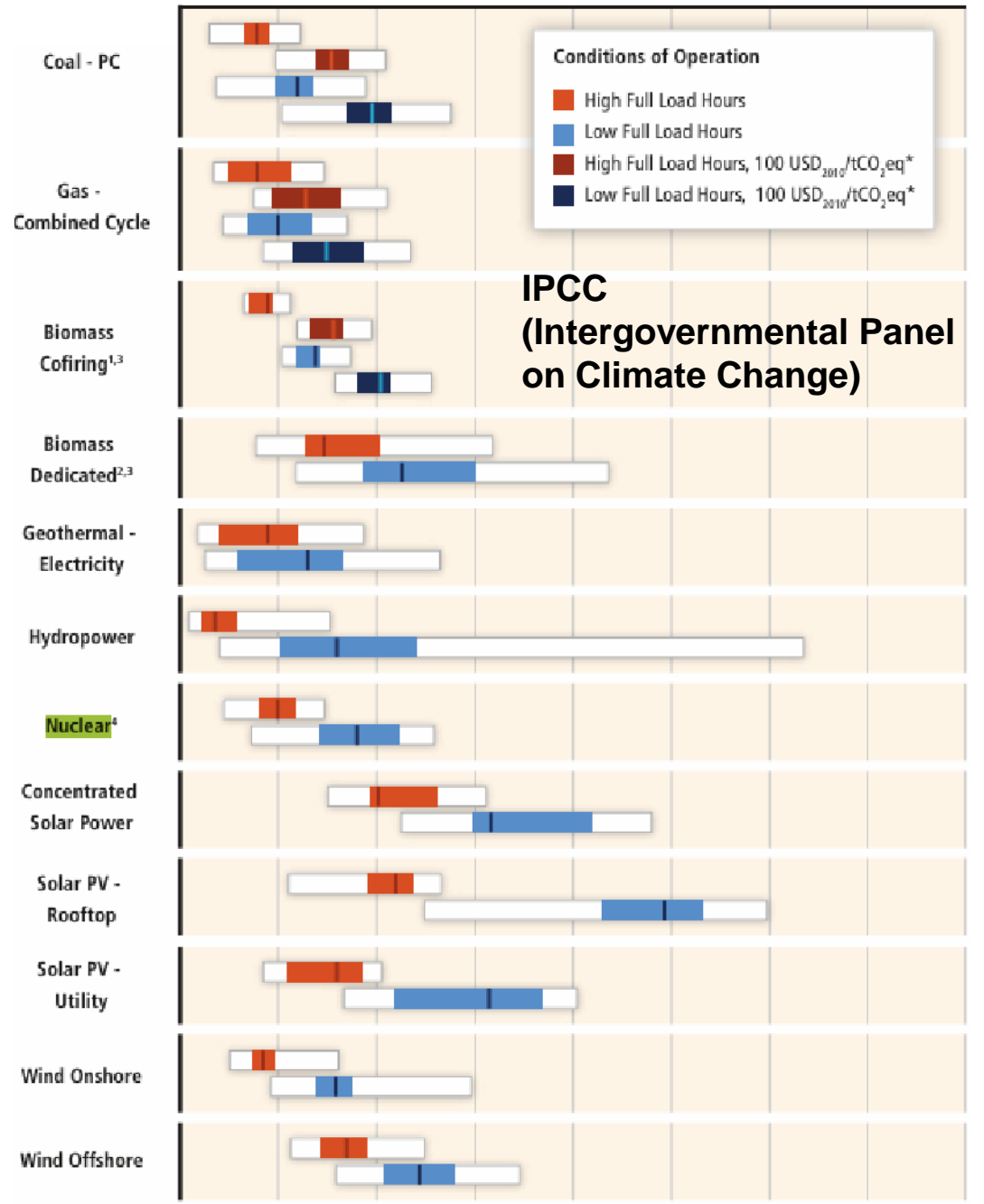


Alle Zahlen stammen aus wissenschaftlichen Quellen, mit Ausnahme der Zahlen für die Kernenergie, für die eine Anti-Atomkraft-Gruppe als Quelle angegeben wurde

Kosten



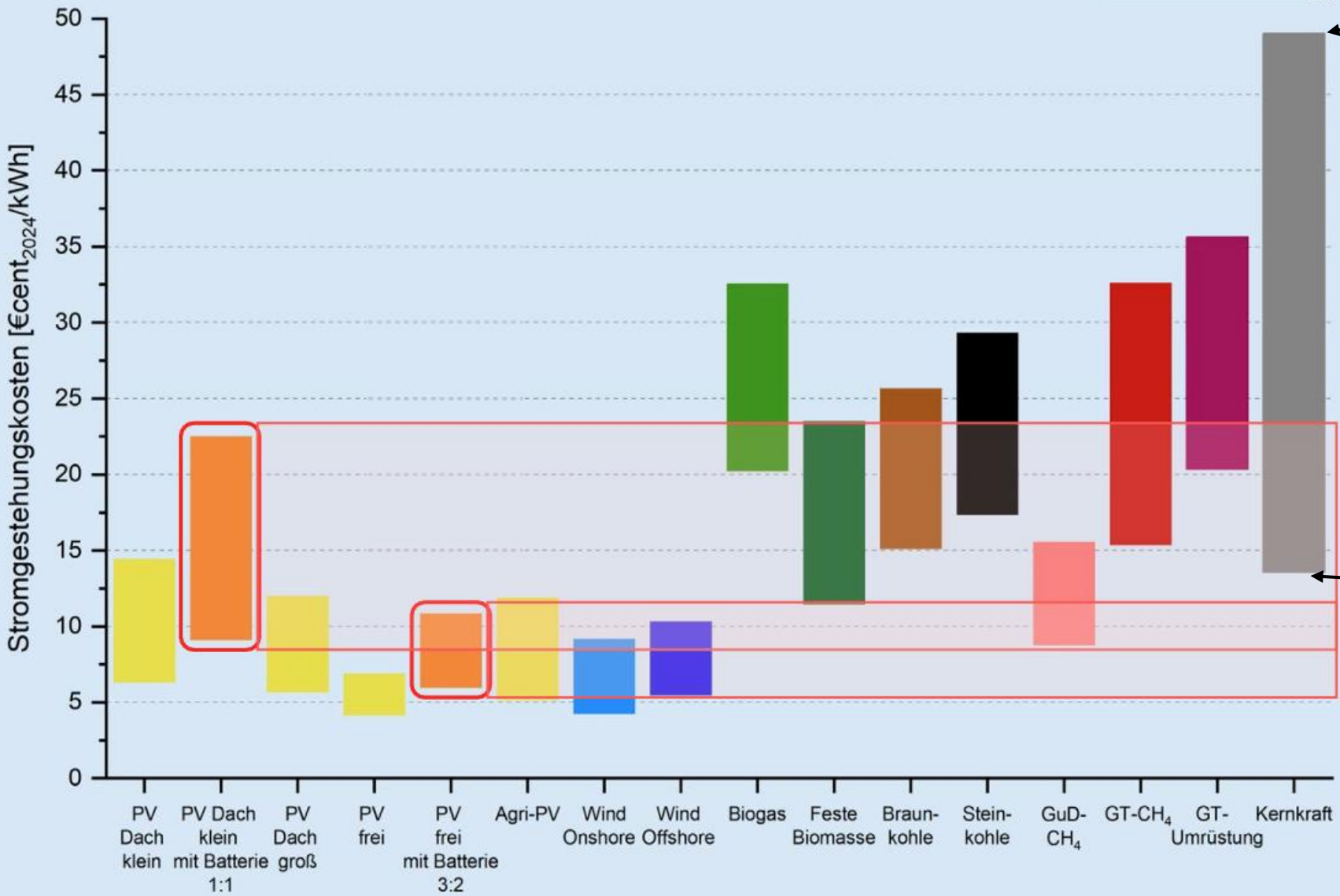
Levelized Cost of Electricity at 10% Weighted Average Cost of Capital (WACC) [USD₂₀₁₀/MWh]



C. Bauer, B. Cox, T. Heck, X. Zhang, "Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies: an update of electricity generation costs and potentials", Swiss Federal Office of Energy SFOE, 2019.

Kosten

Stand: Juli 2024



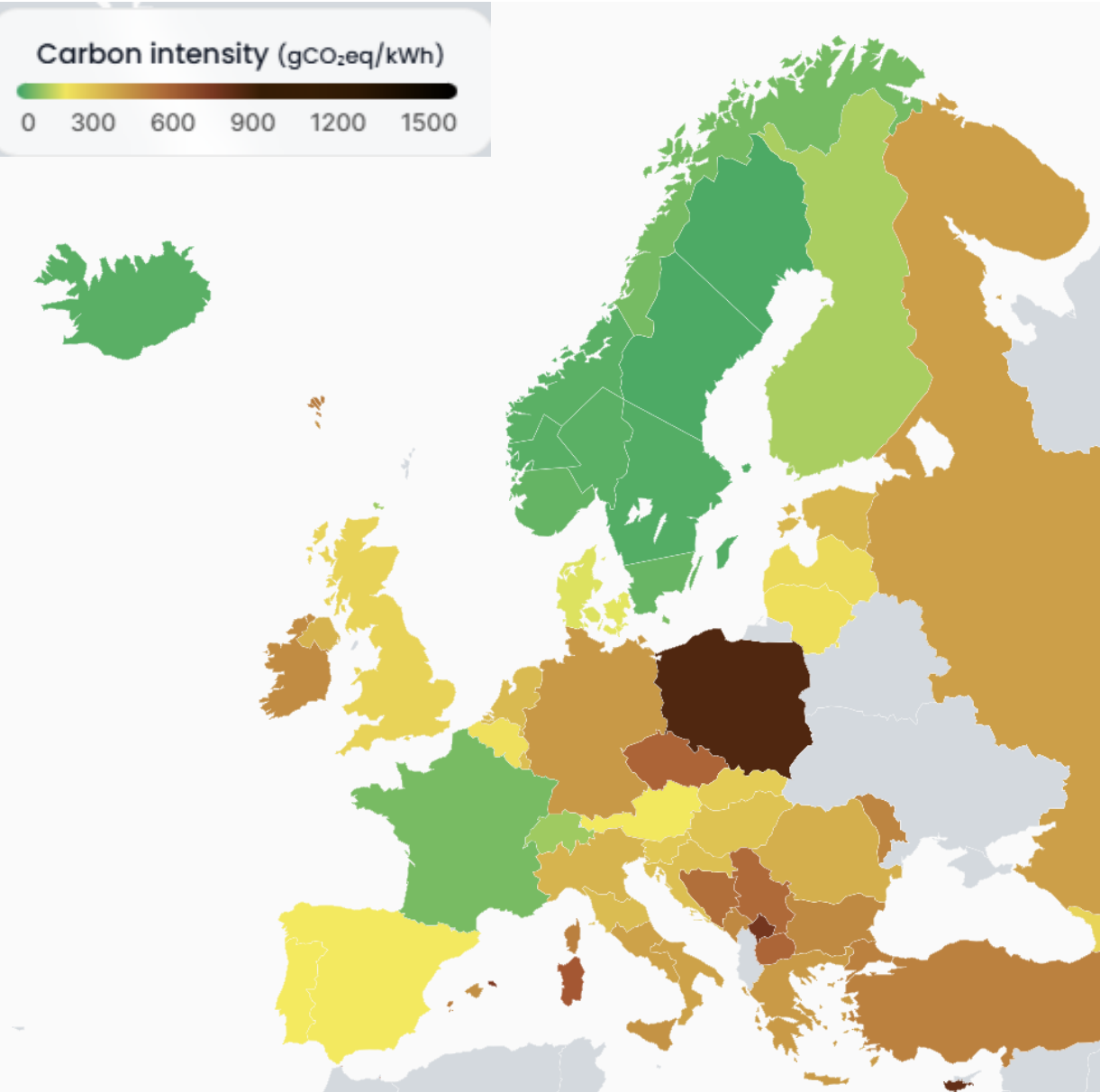
Annahme:
KKW-Betrieb
2000 Stunden/Jahr (!)
statt mehr als
7800 Stunden/Jahr

**Sehr grosses
Variationsband!**

12 €cent/kWh
Stromkosten von
Flamanville
(Frankreich), dem
teuersten
Kernkraftwerk der Welt

Kann Kernenergie zur Dekarbonisierung beitragen?

CO2 Emissionen - Strom (Jahr 2023)



Länder, die ihren Strommix erfolgreich dekarbonisiert haben (in grün):

- Schweden (Kernenergie + Erneuerbare)
- Frankreich (Kernenergie + Erneuerbare)
- Schweiz (Kernenergie + Erneuerbare)
- Finnland (Kernenergie + Erneuerbare)
- Norwegen (90 % Wasserkraft + 10 % Wind)
- Island (70 % Wasserkraft + 30 % Geothermie)

Norwegen- und Island-Modelle sind nicht in andere Länder „exportierbar“, da sie von der jeweiligen Ländertopologie (Berge, Vulkane) abhängig sind.

Alle anderen Länder, die ihren Strommix erfolgreich dekarbonisiert haben, nutzen eine Kombination aus erneuerbaren Energien und Kernenergie

Die Stromproduktion in der Schweiz ist bereits CO2-arm – Jahr 2022

- Die Schweiz ist eines der Länder mit den geringsten CO2-Emissionen bei der Stromproduktion
- Länder in Europa mit geringem CO2-Ausstoß haben Kernenergie in ihrem Strommix
- Ausnahmen: Norwegen mit ~ 90 % Wasserkraft; Island: 70 % Wasserkraft, 30 % Geothermie

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

Data: ourworldindata.org/electricity-mix

Kein Land hat sowohl die Kernenergie als auch die fossile Energieerzeugung abgeschafft.

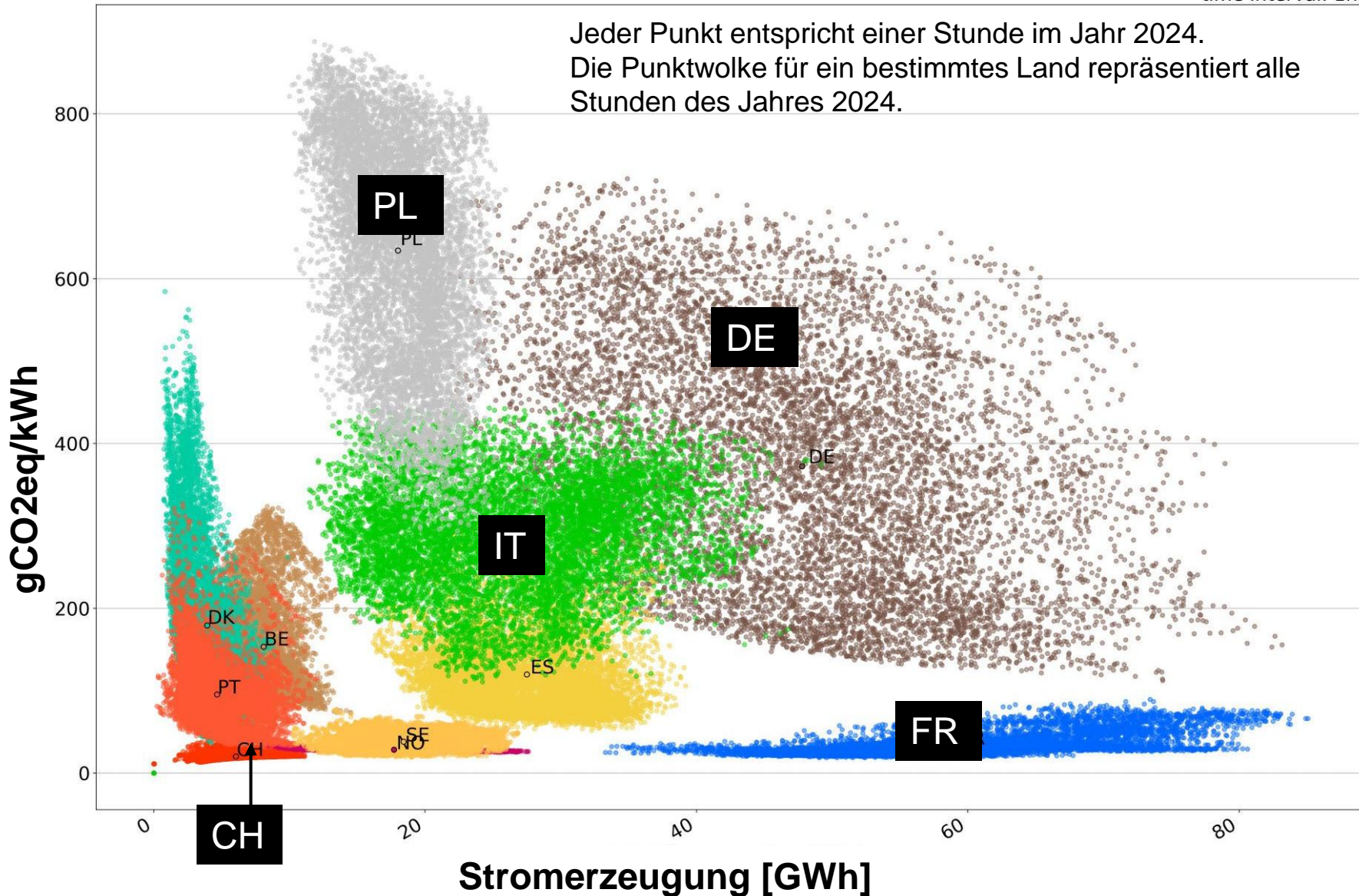
Die Wahl ist nicht Kernenergie vs. Solar/Wind

Die Wahl ist Kernenergie vs. Gas/Kohle ! (+ Solar/Wind)

CO2-Emissionen im Zusammenhang mit der Stromerzeugung

CO2eq/kWh – Year 2024

time interval: 1hr



- BE
- CH
- DE
- DK
- ES
- FR
- IT
- NO
- PL
- PT
- SE

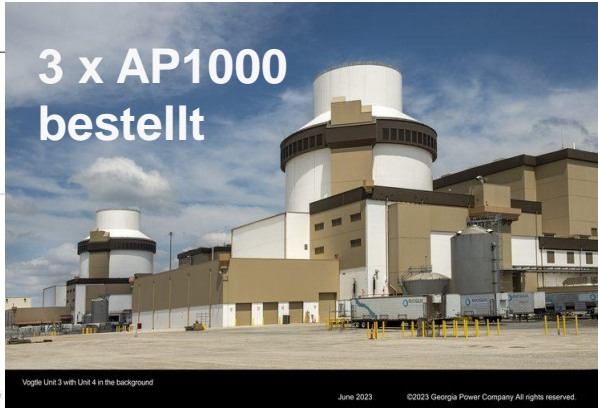
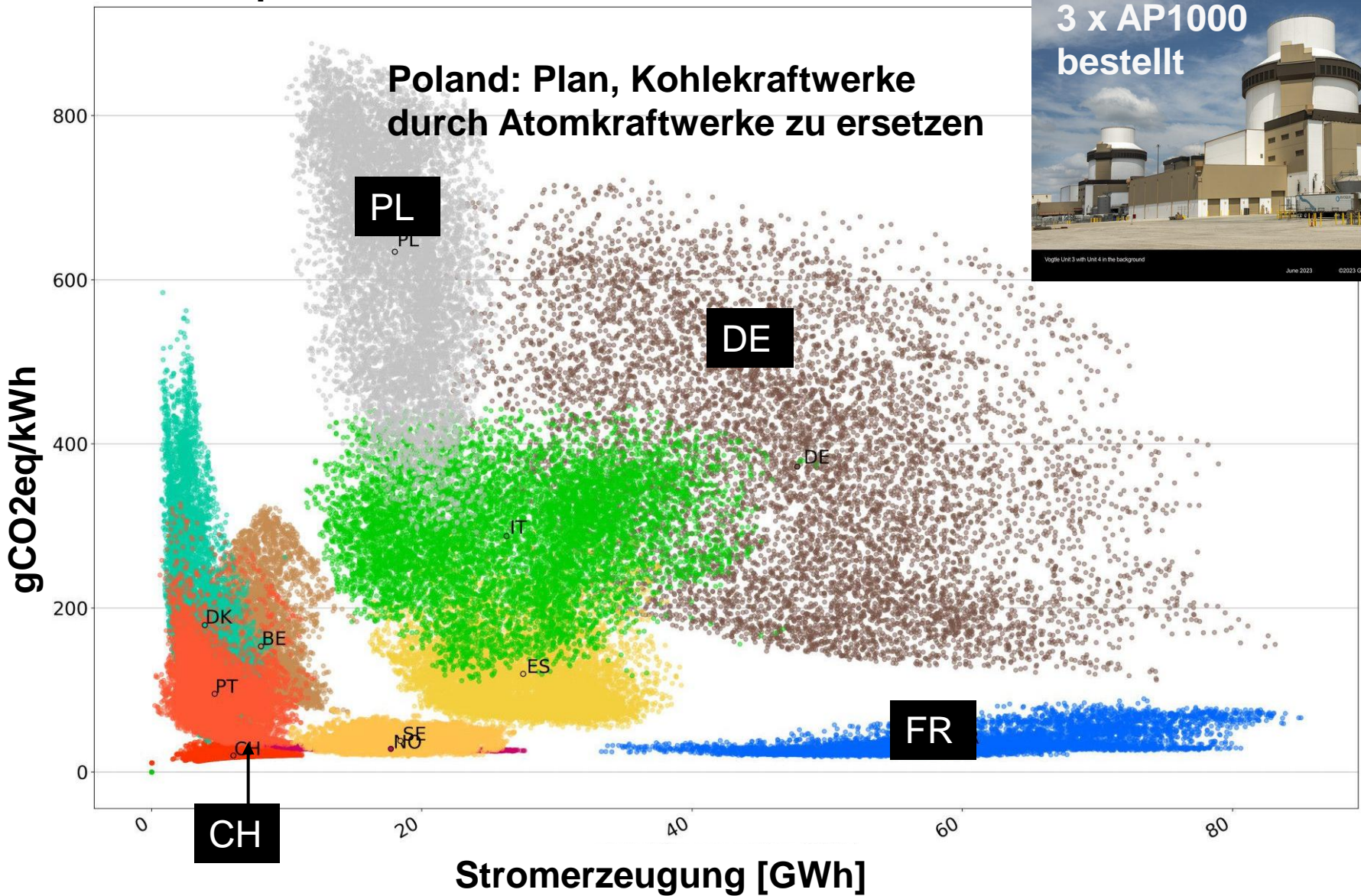
Deutschland und Frankreich sind in ihrer Dekarbonisierungsstrategie unterschiedliche Wege gegangen:

- Frankreich: mit Kernenergie + 25 % erneuerbaren Energien
- Deutschland: Atomausstieg und hoher Anteil erneuerbarer Energien (ergänzt durch Gas und Kohle)

Hinweis: In keiner einzigen Stunde des Jahres weist Deutschland eine so gute CO2-Bilanz auf wie Frankreich.

CO2-Emissionen im Zusammenhang mit der Stromerzeugung

CO2eq/kWh – Year 2024

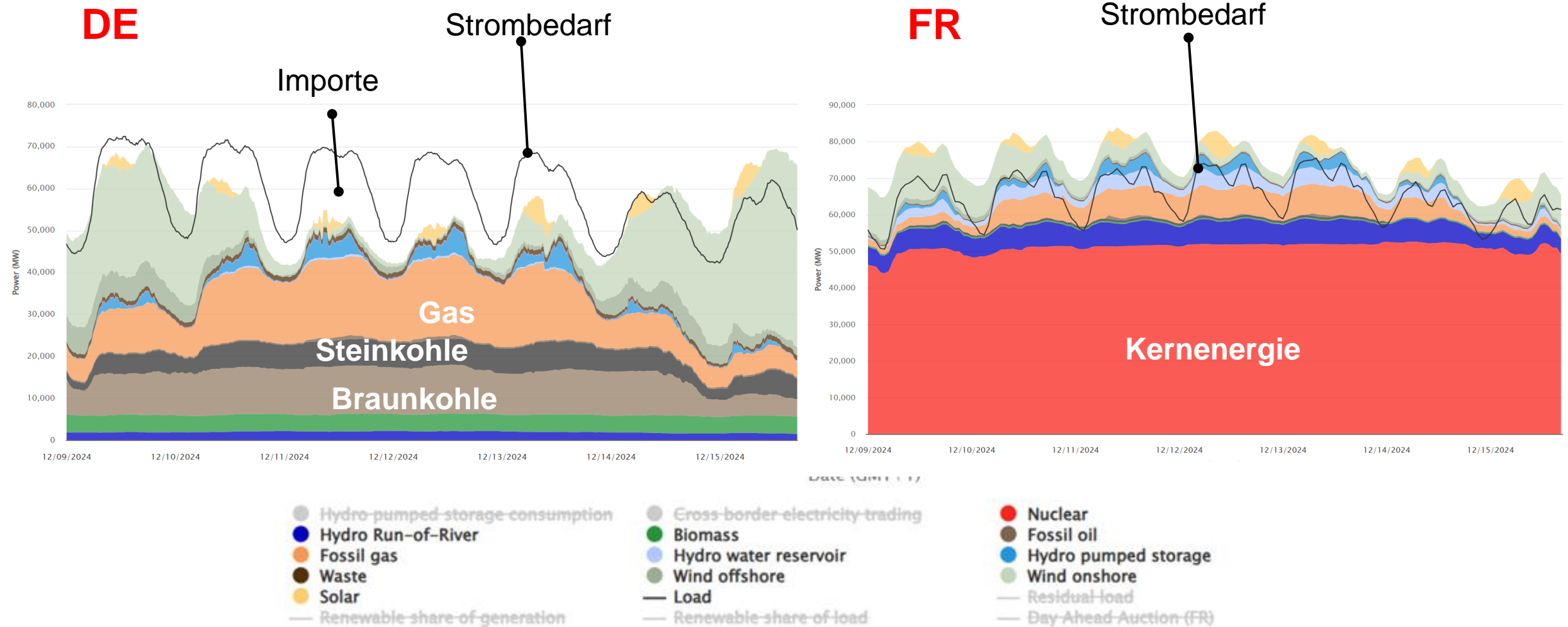


@BotElectricity v0.8
Source: ENTSO-E, IPCC 2014

SE

Beispiel – Deutschland vs Frankreich

Nov 9 – 15, 2024



Deutschland verfügt über ~4x mehr installierte Solarkapazität als Frankreich

France vs Germany

Netto-Null-Ziele

- Frankreich hat es geschafft!
- Deutschland noch ein ganzes Stück weit...

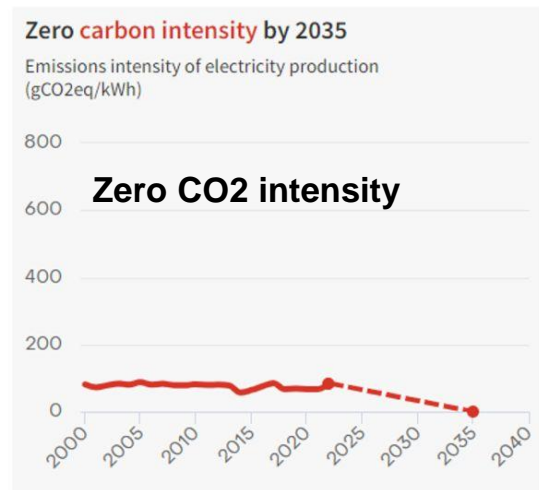
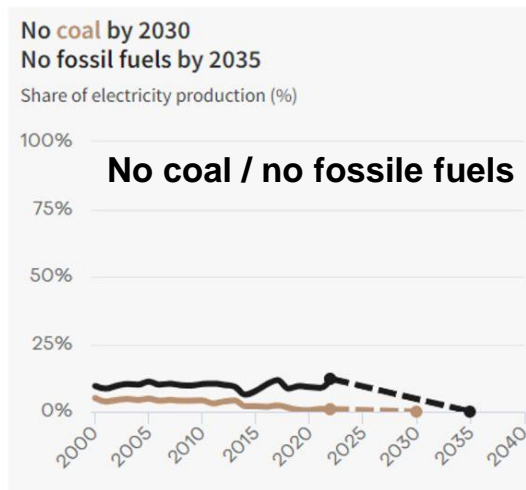
Wie hat Frankreich das gemacht?

Source: Ember-climate

Progress towards clean power targets

France
2000–2040

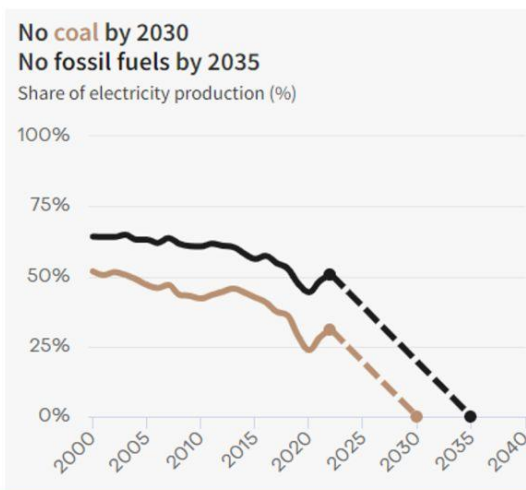
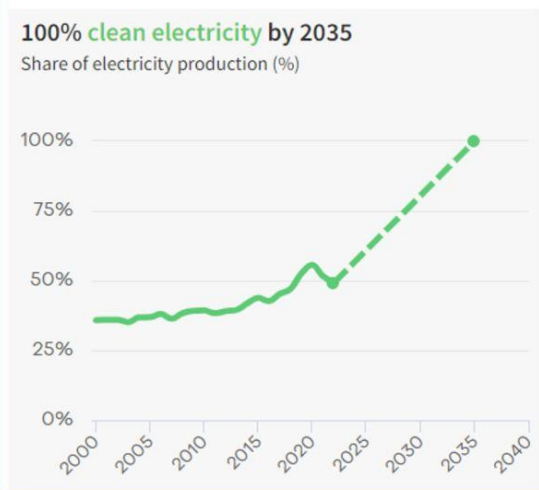
FRANCE



Progress towards clean power targets

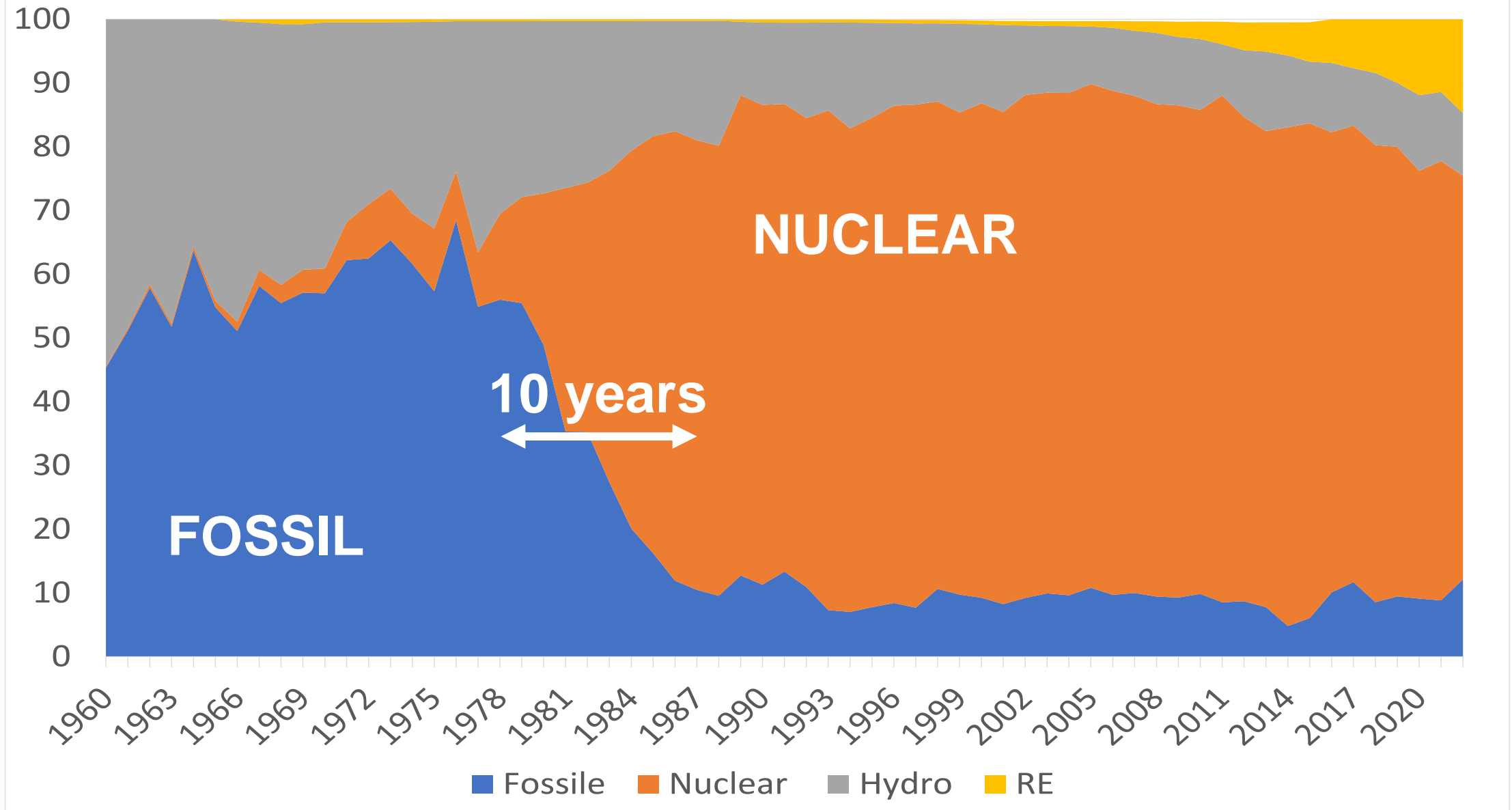
Germany
2000–2040

GERMANY

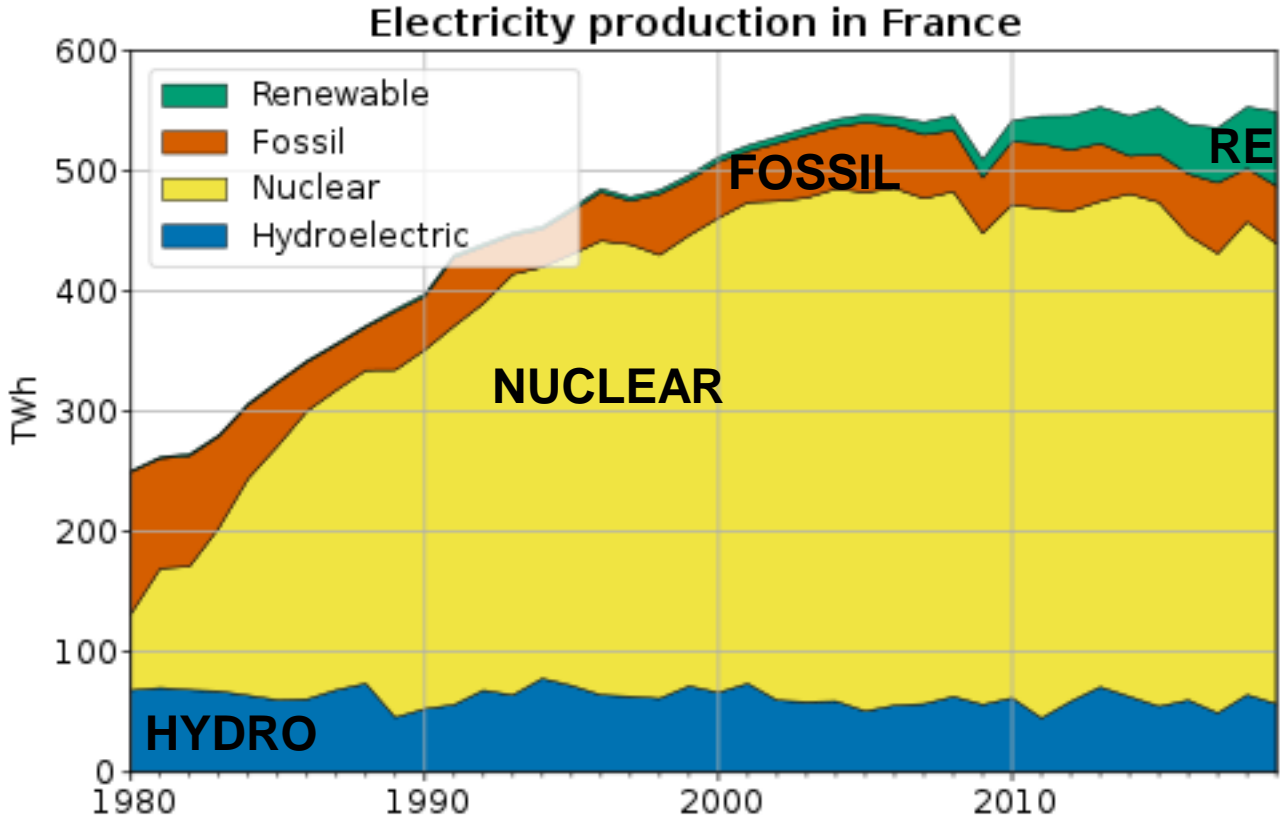


...durch den Ersatz fossiler Brennstoffe durch Kernenergie

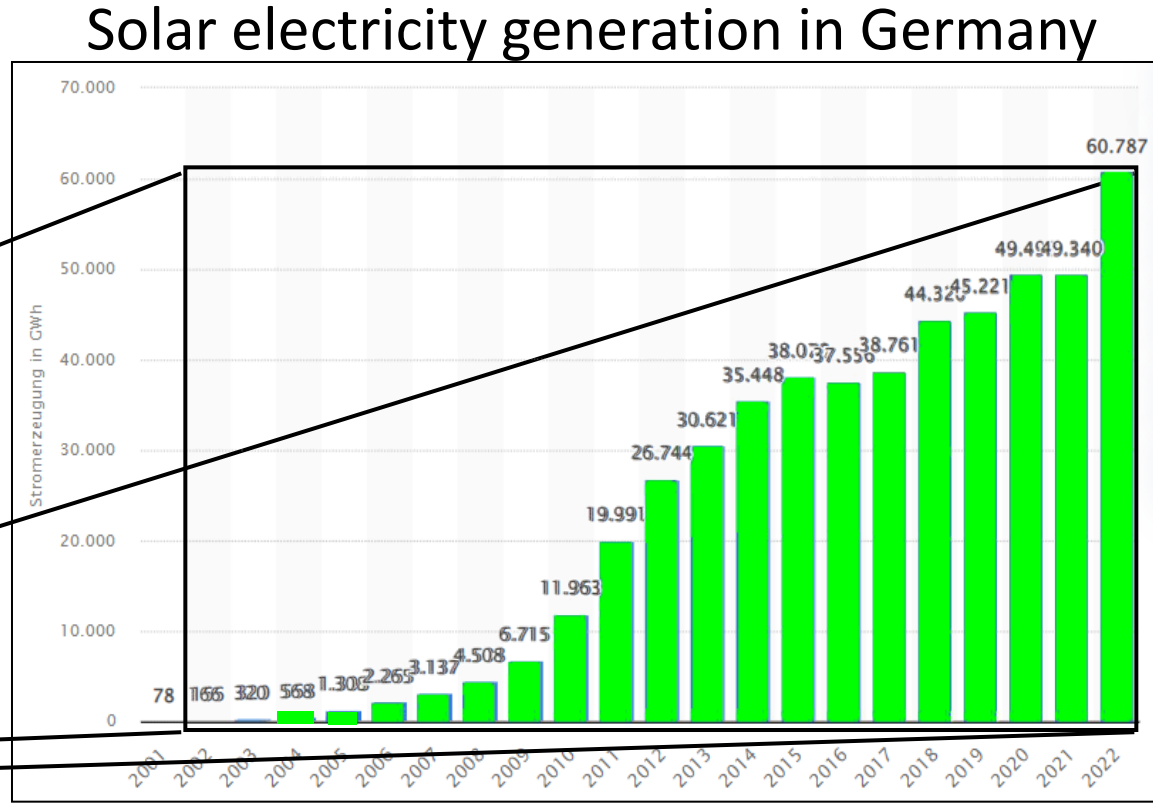
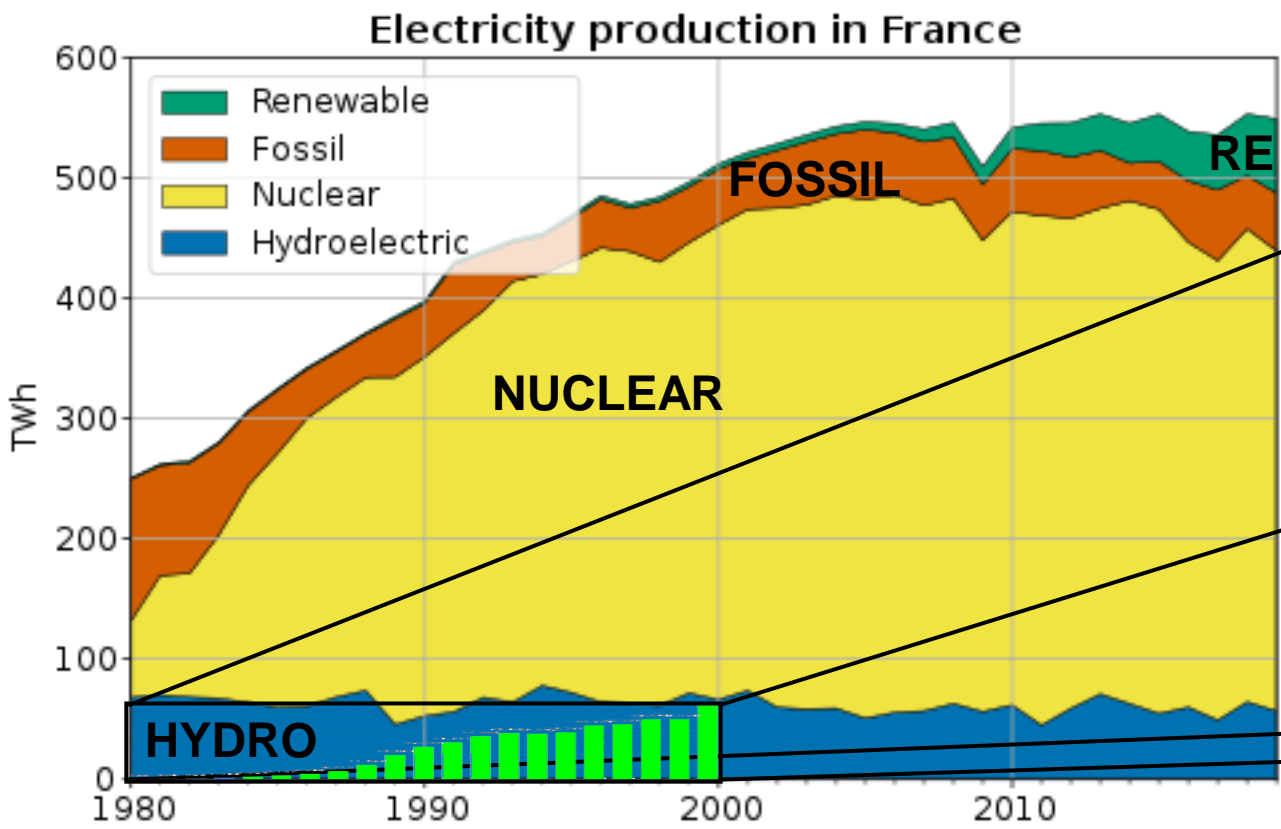
SHARE OF ELECTRICITY PRODUCTION BY SOURCE - FRANCE



20 Jahre Kapazitätsaufbau in Deutschland und Frankreich



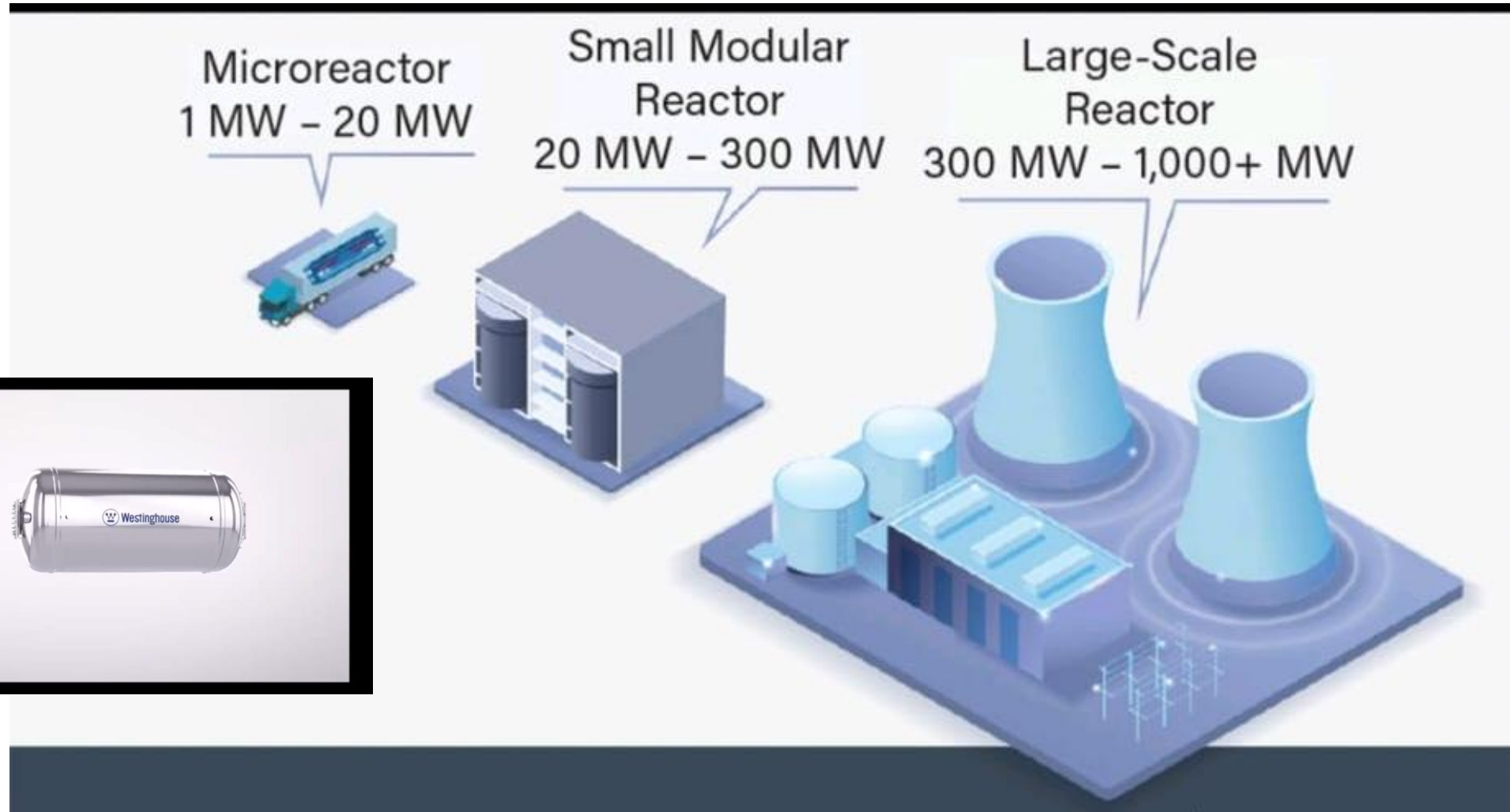
20 Jahre Kapazitätsaufbau in Deutschland und Frankreich



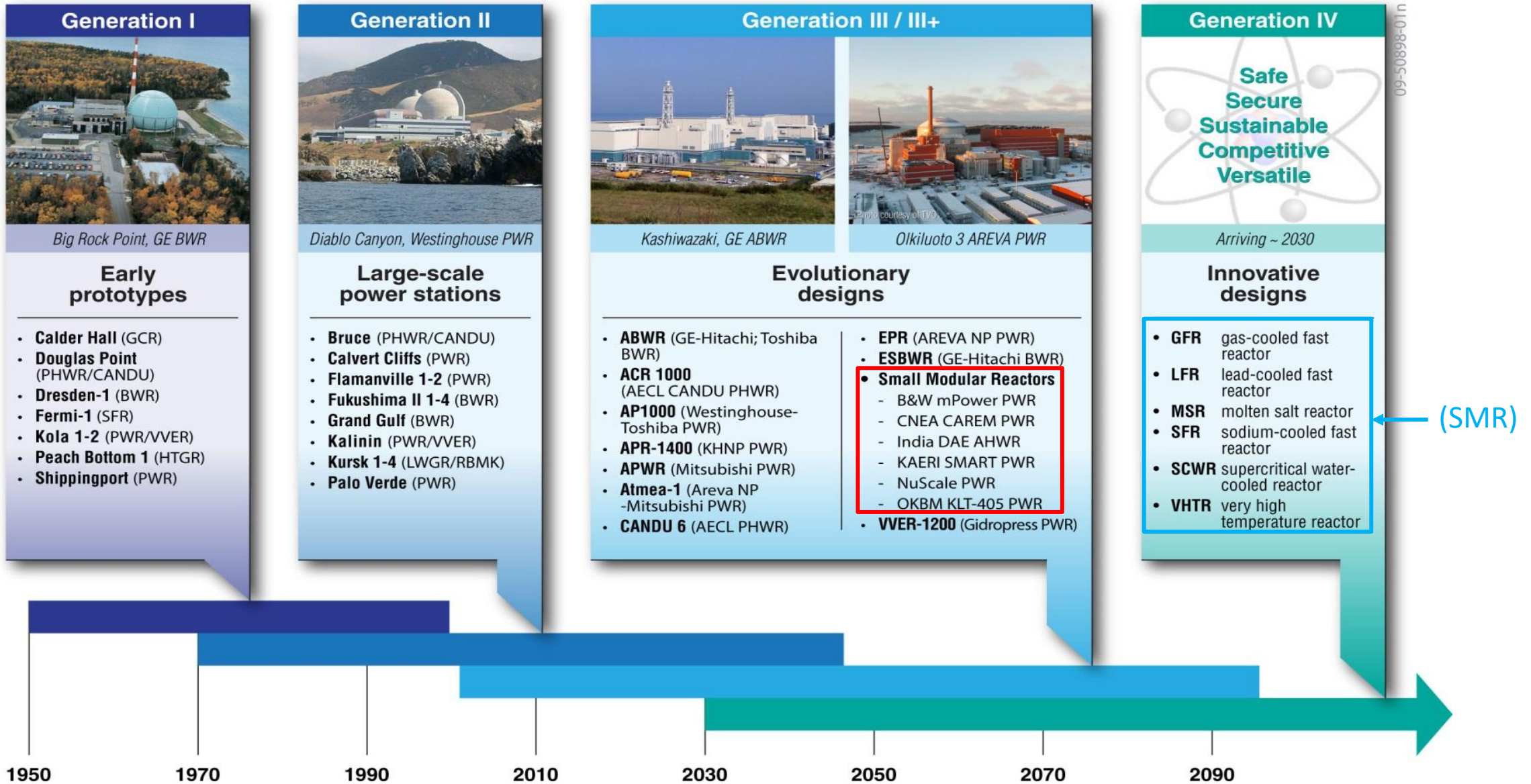
STAND DER TECHNIK

Neue Entwicklungen im Reaktordesign

KKW-GRÖSSENKLASSIFIZIERUNG

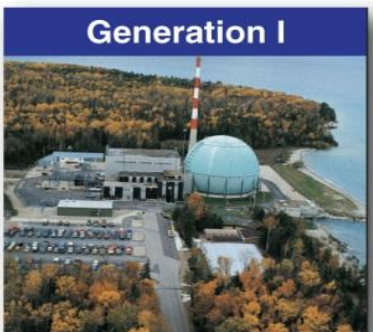


Neue Entwicklungen im Reaktordesign



09-50898-01n

Neue Entwicklungen im Reaktordesign

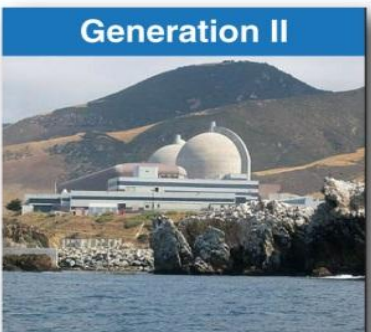


Generation I

Big Rock Point, GE BWR

Early prototypes

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

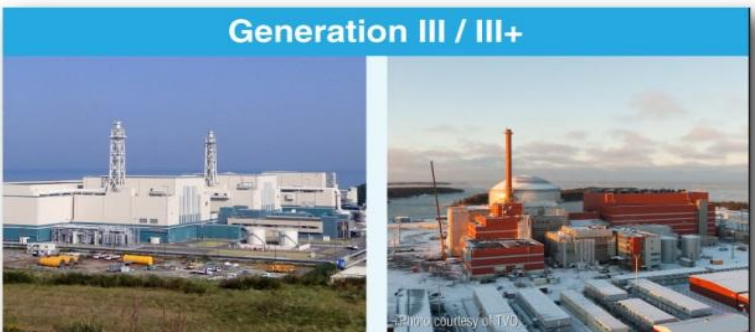


Generation II

Diablo Canyon, Westinghouse PWR

Large-scale power stations

- Bruce (PHWR/CANDU)
- Calvert Cliffs (PWR)
- Flamanville 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

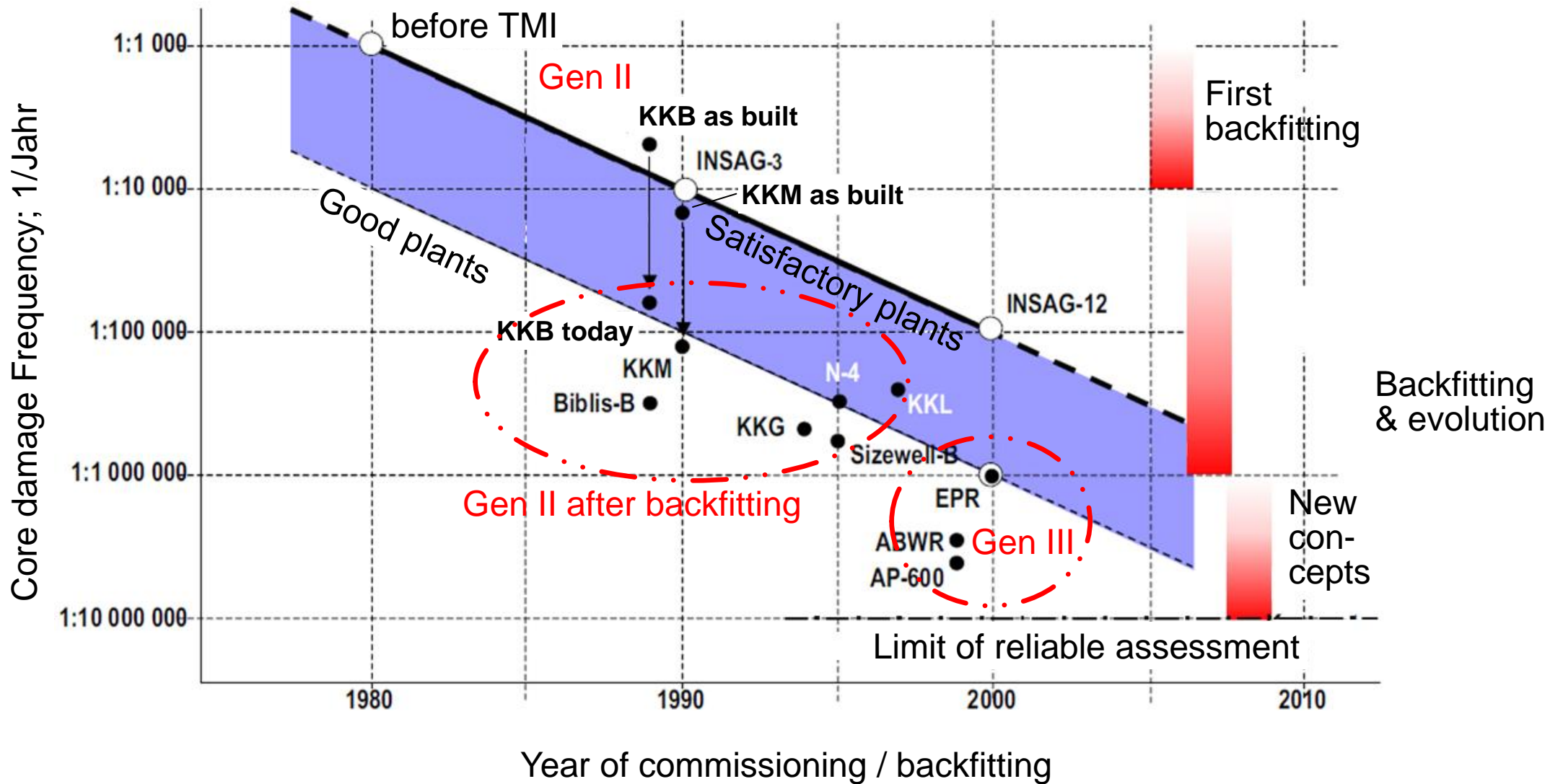
2090

Fukushima Daichi (1971) wurde nicht nachgerüstet

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

09-50898-01in

Zuwachs des Sicherheit im Reaktor Design



S. Hirschberg, et al., 2005.

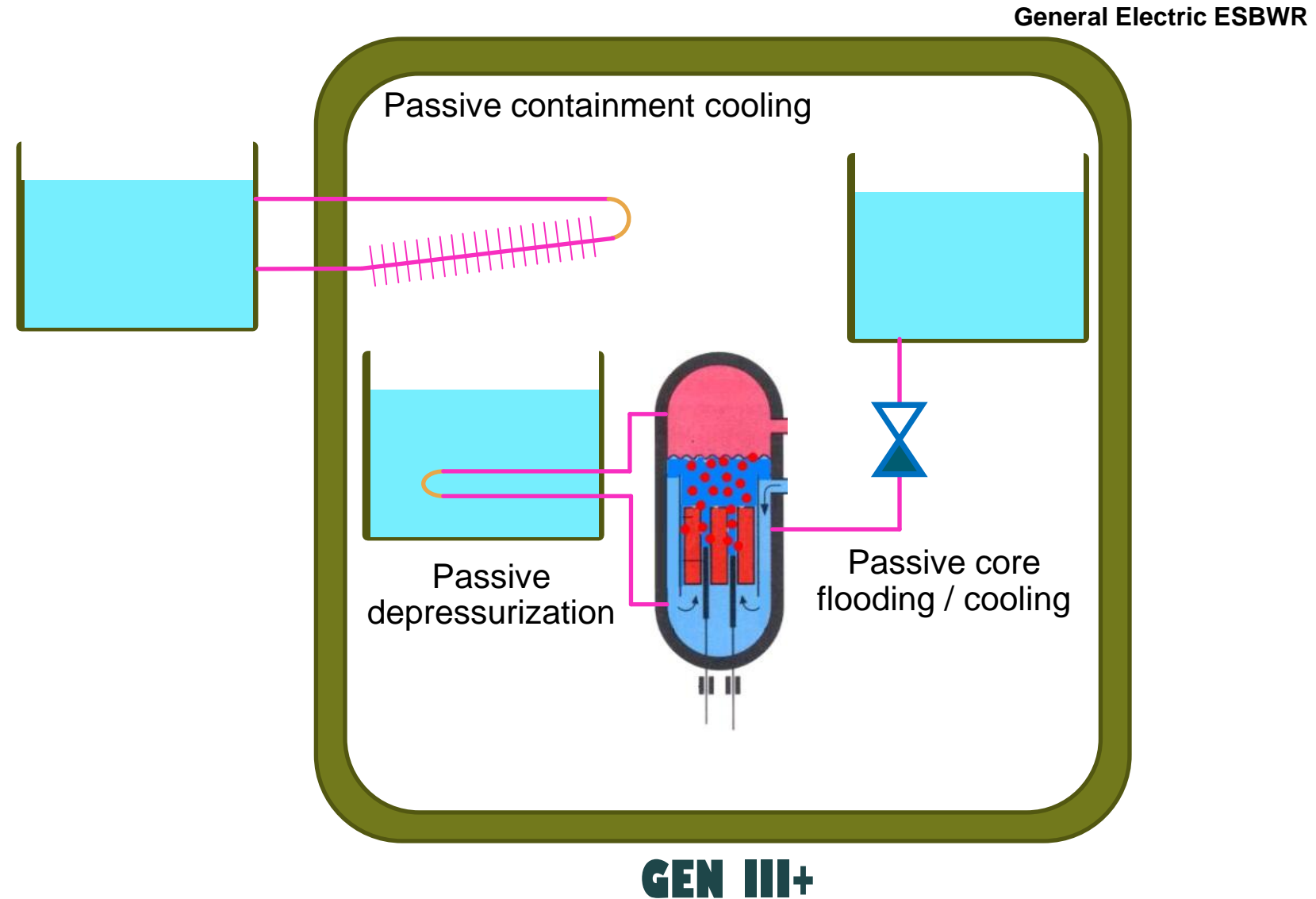
Die Sicherheit hat im Laufe der Jahre kontinuierlich und stark zugenommen

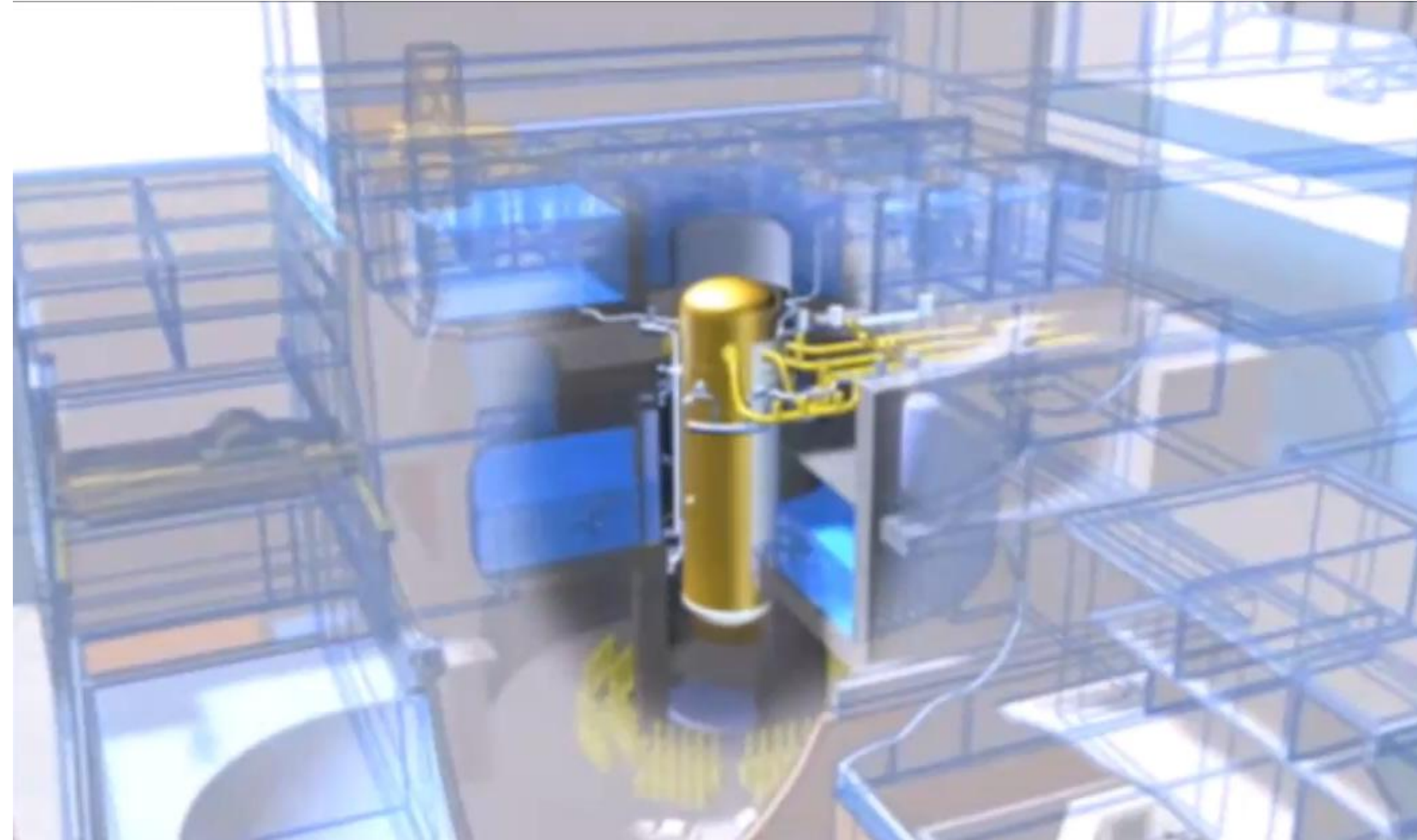
Gen-III+: passive Sicherheitssysteme

Radikale Änderung der Sicherheitsphilosophie:

- Sehr unwahrscheinliche schwere Unfälle (bisher außerplanmäßige Unfallszenarien) sind nun integraler Bestandteil des KKW Entwurfs.
- Neue Sicherheitssysteme speziell für den Umgang mit schweren Unfällen

Passive Sicherheitssysteme





Passive Sicherheitssysteme:

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

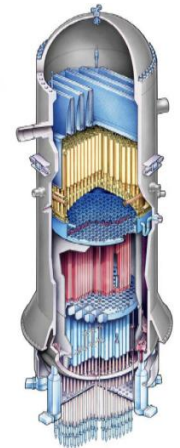
Die Kernschadenshäufigkeit ist nicht die ganze Geschichte

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

Grosse KKW der Generation III/III+ auf dem Markt und bereits in Betrieb: Beispiele



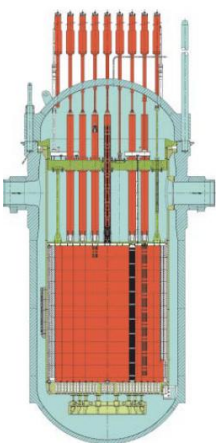
ABWR (Japan)



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

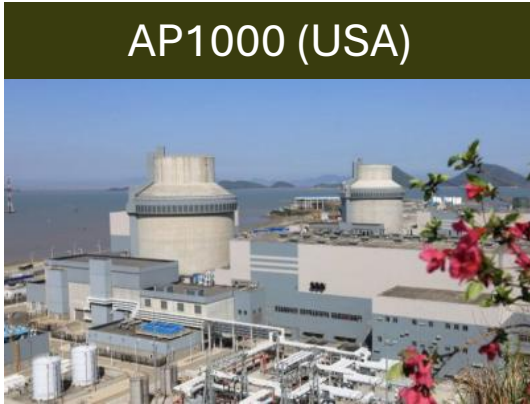


EPR (FR)



In Betrieb: 3 (China, Finland)
Im Bau: 2 (UK), 1 (FR)

Geplant: 2 (UK), > 6 (FR)

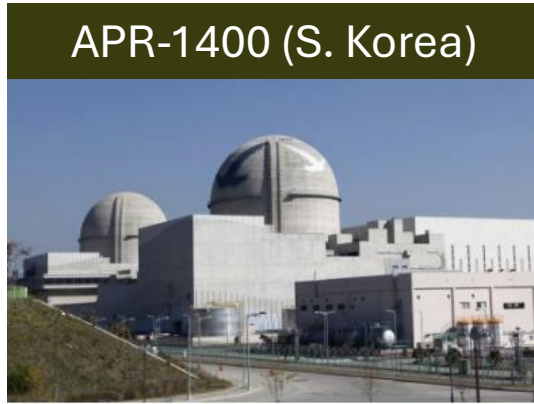


AP1000 (USA)

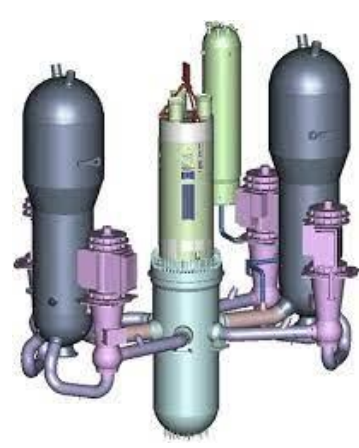


In Betrieb: 6 (China, USA)

Bestellt: 3 (PL)



APR-1400 (S. Korea)



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

Bestellt: 2 (CZEC)

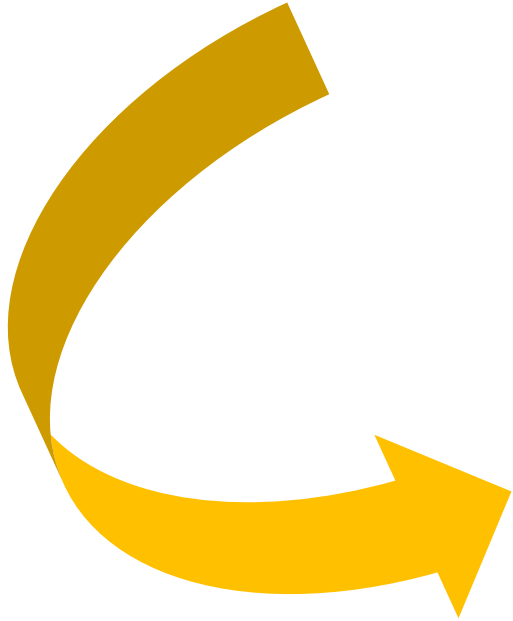
Grosse KKW - Herausforderungen

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



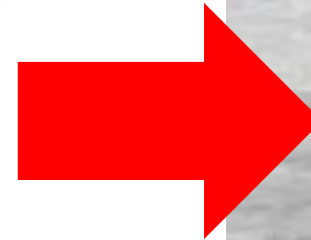
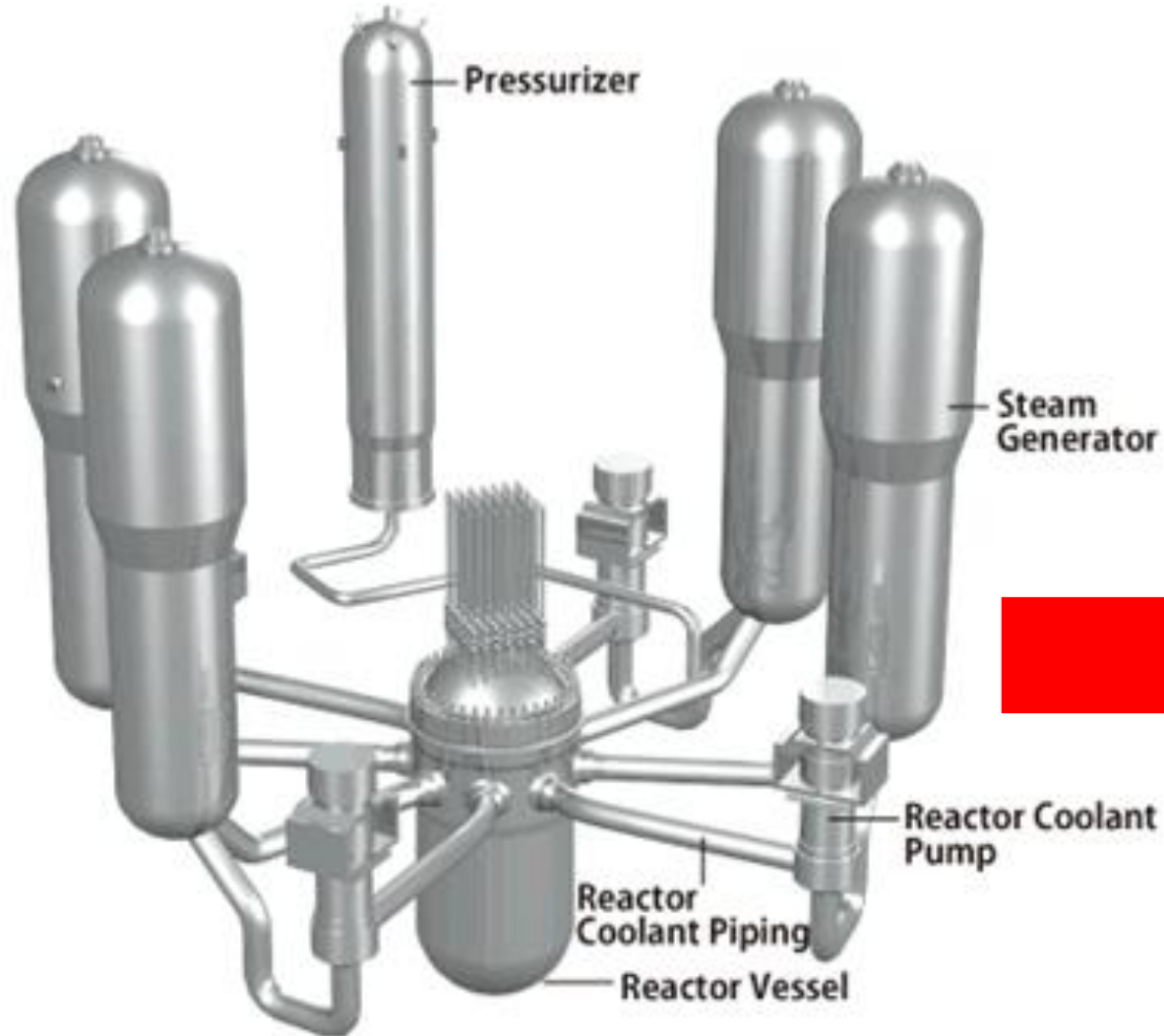
Grosse KKW - Herausforderungen

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



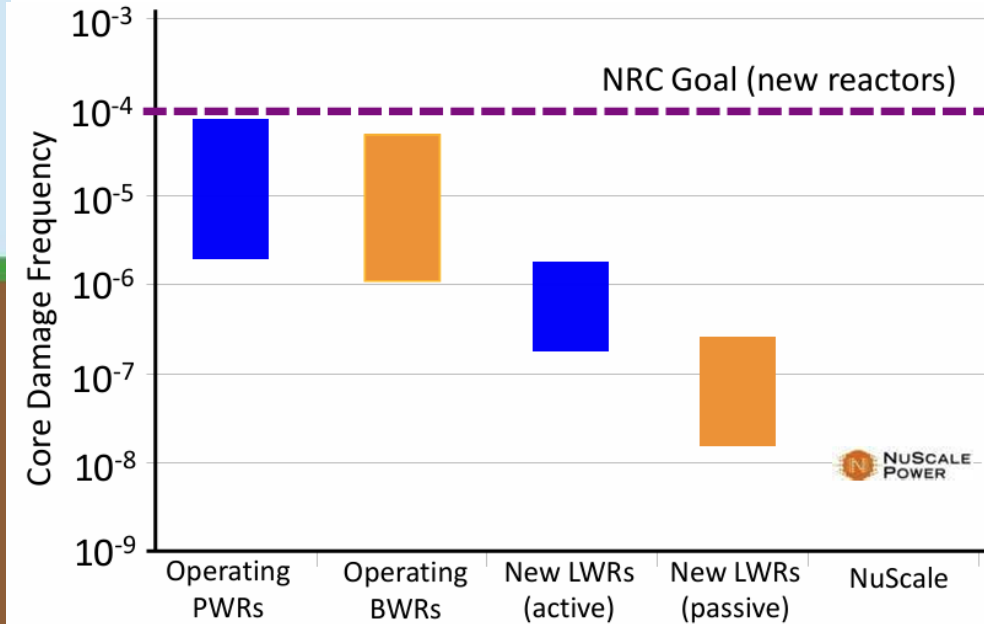
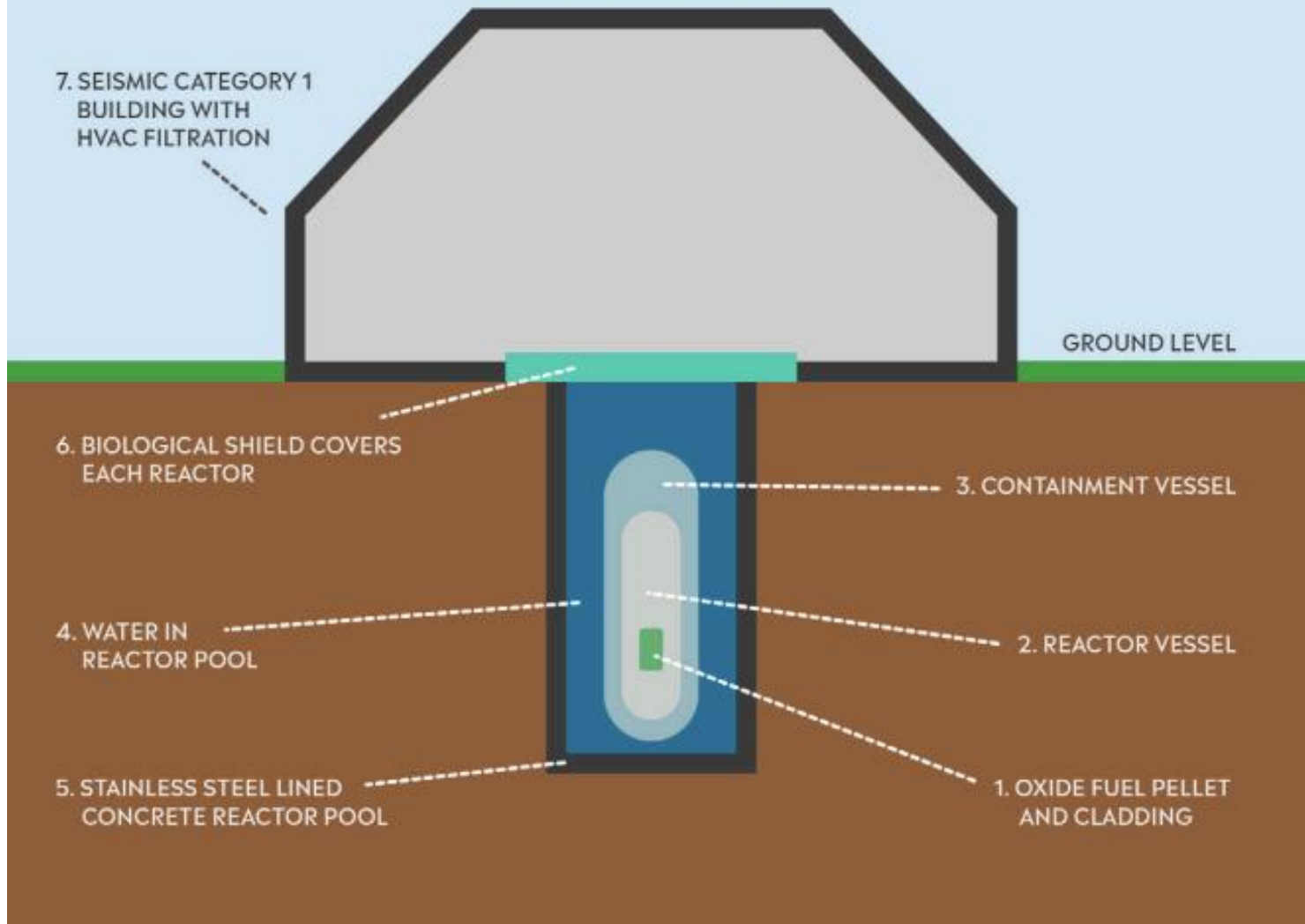
- Einfacheres Design
- Modular, Fabrikfertigung (effizienter und billiger)
- Geringere Kapitalkosten und kürzere Bauzeiten
- Mehr als nur Energie ins Netz einspeisen

SMRs – kleine modulare Reaktoren



- Ganze Unfallklassen durch Konstruktion ausgeschlossen (z.B.: LOCAs)
- Fabrikgefertigt
- Zum Einsatzort transportiert

NUSCALE'S BARRIERS



**Notfallplanungszone begrenzt auf den Anlagenumfang
(keine Evakuierung notwendig, auch bei schweren Storfällen)**