

# Sichere Stromversorgung für die Schweiz und neue Entwicklungen der Kerntechnik

Prof. Annalisa Manera

Laboratory for Nuclear Systems and Multiphase Flows

ETH-Zurich

AVES, Zug / May 23, 2023

# Risiken für die Schweiz



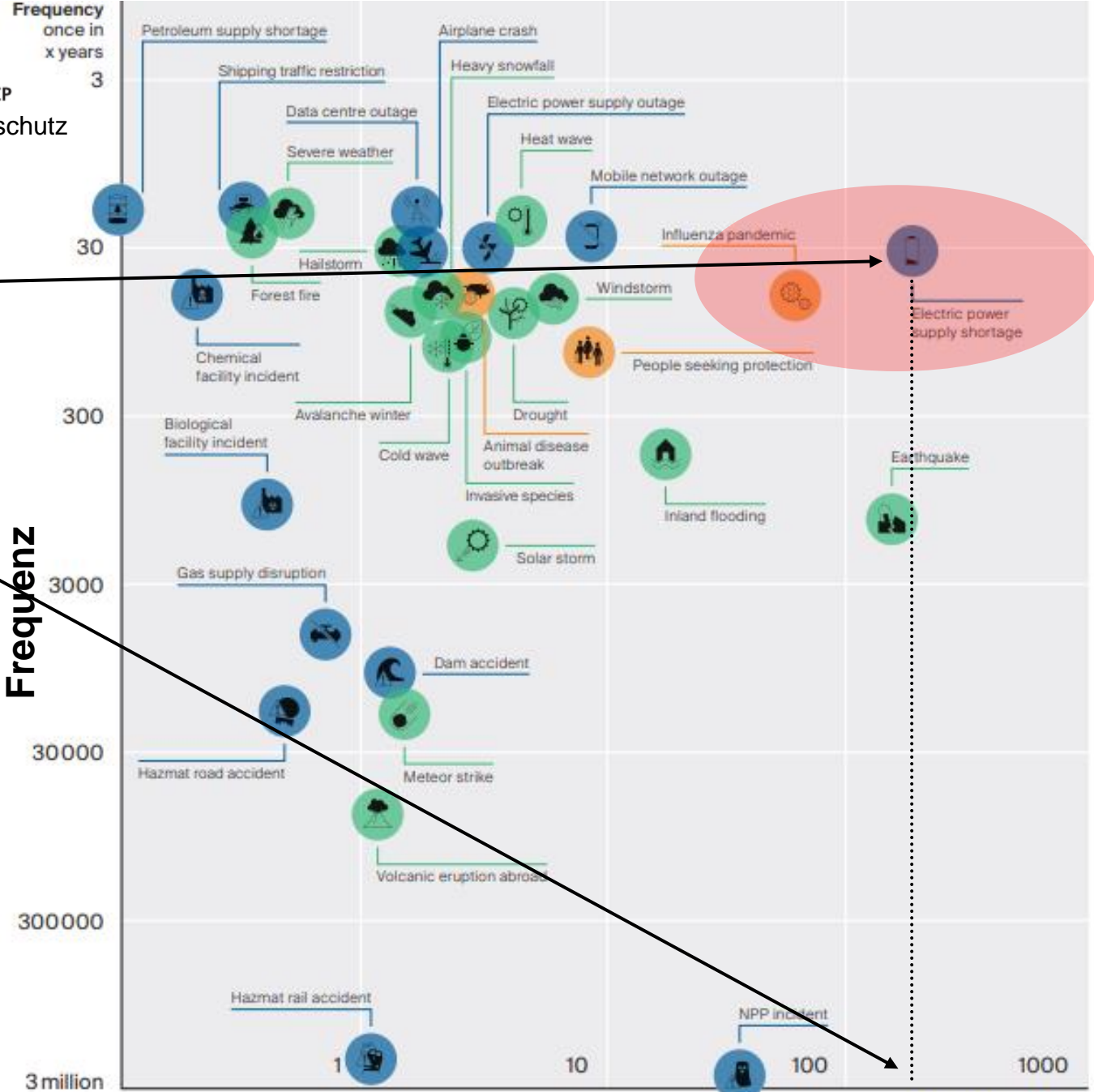
Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Federal Office for Civil Protection FOCP  
Bundesamt für Bevölkerungsschutz

FOCP: das Risiko mit der höchsten Wahrscheinlichkeit und dem höchsten Schaden (Kosten) ist gemäss BAG eine Verknappung der Stromversorgung.

Kosten

Frequenz



Gesamtschaden [Milliarden CHF]

Aggregated damage in CHF billion

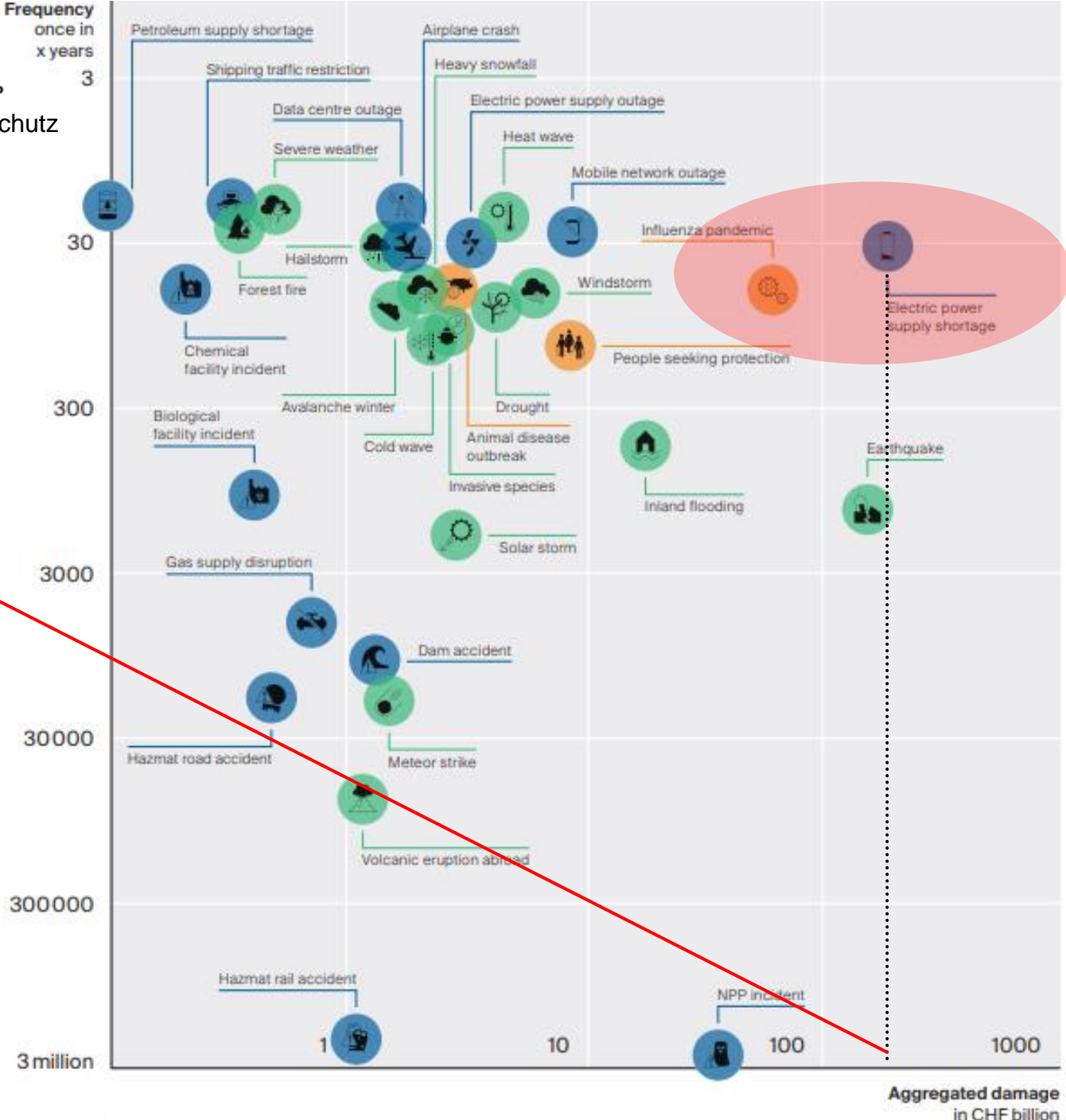
# Risiken für die Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Federal Office for Civil Protection FOC  
Bundesamt für Bevölkerungsschutz

Deutschland: in < 1 Jahr seit dem Ukraine-Konflikt 440 Milliarden Euro Kosten für Maßnahmen zur Vermeidung von Stromausfällen und zur Erschließung neuer Energiequellen.



# Risiken für die Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Federal Office for Civil Protection FOC  
Bundesamt für Bevölkerungsschutz

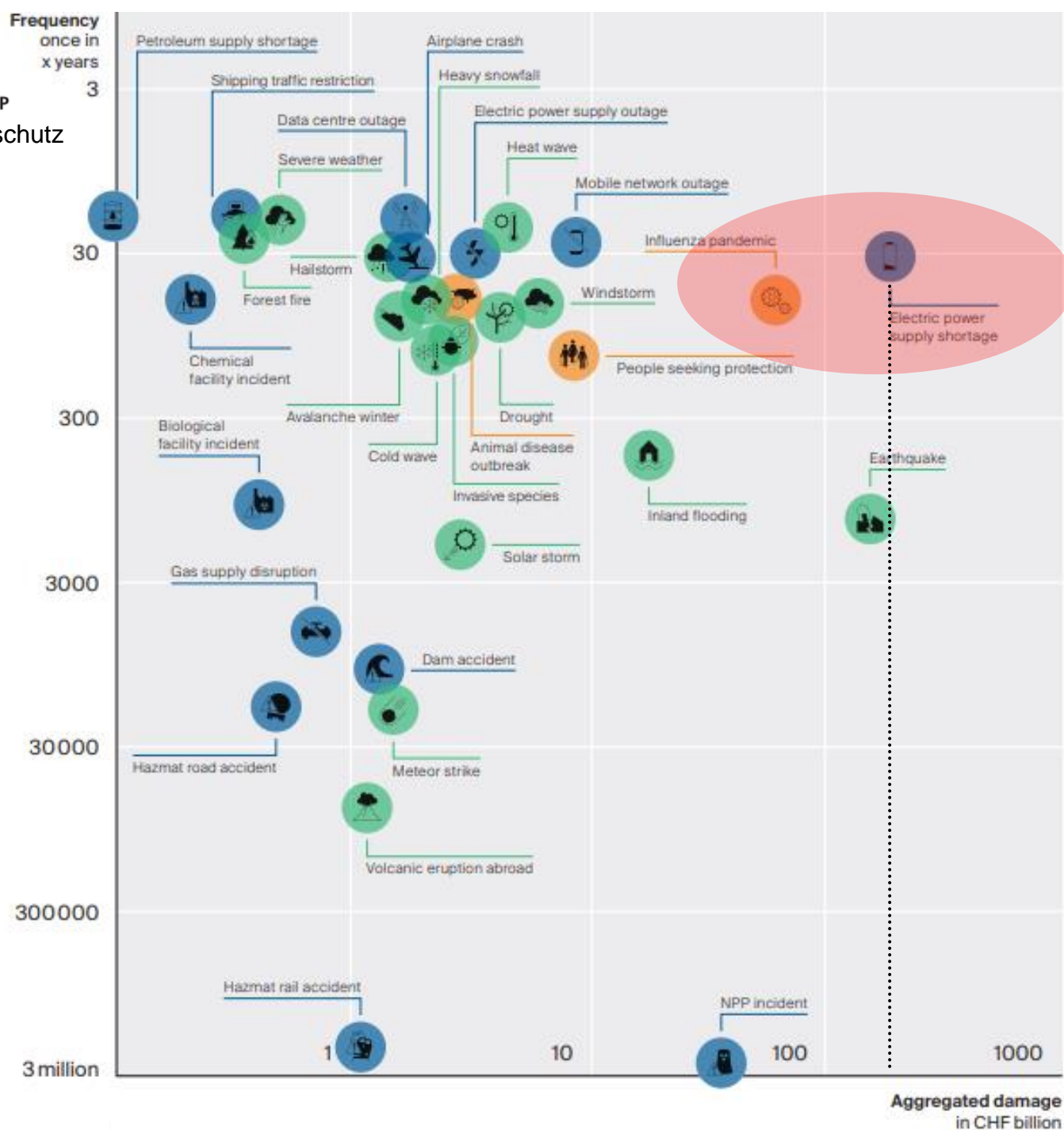
## Zusätzliche Beispiele

### TEXAS Winterstorm Feb 2021

- 247 Tote als direkte Folge des Stromausfalls
- \$300 Milliarden Schäden

### CALIFORNIA – Sept 2022 Stromnetz 30 Minuten vor dem Zusammenbruch

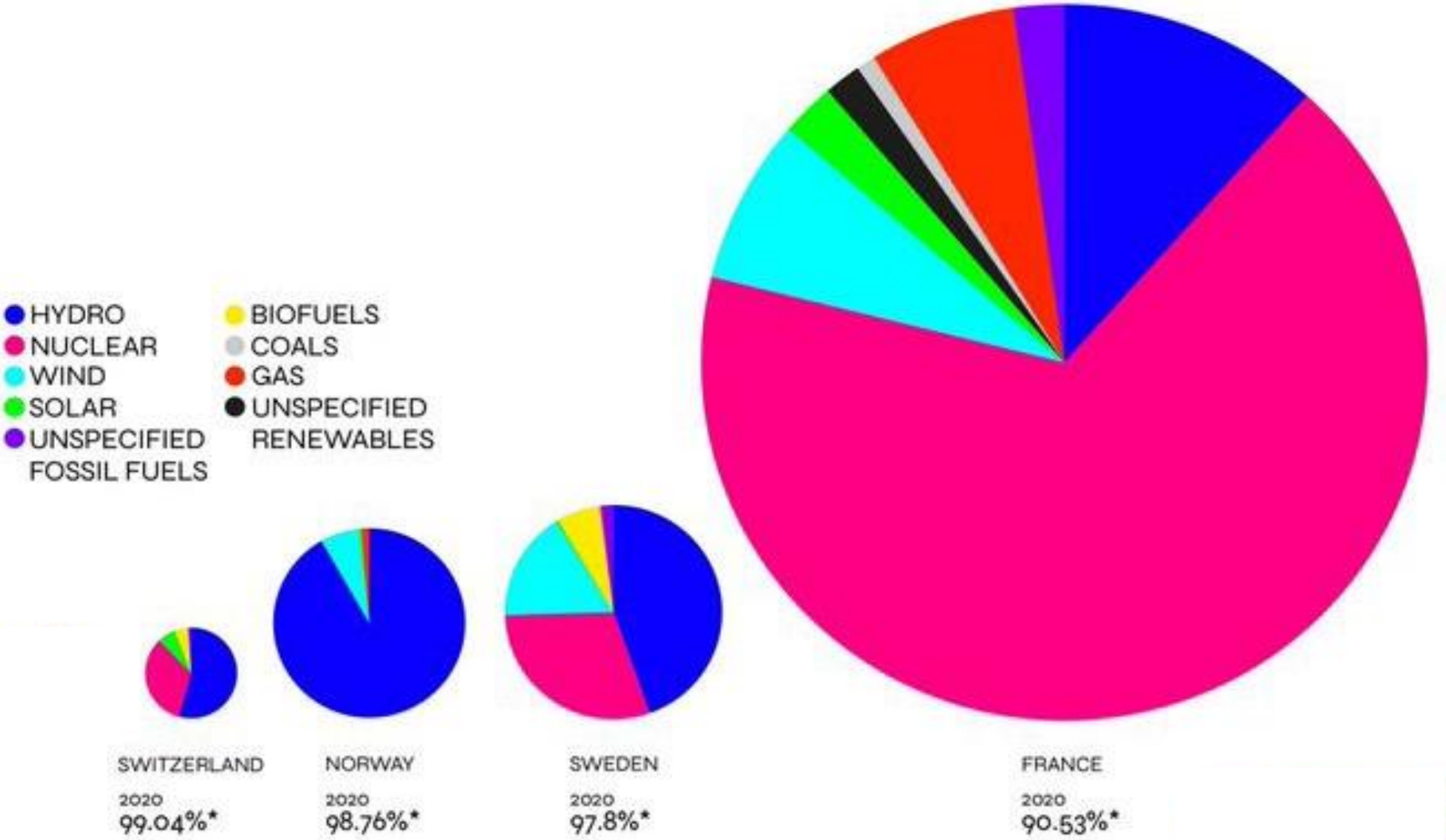
- Abschalten von EV-Autos, Klimaanlage und andere elektrische Geräte
- Letzter KKW wegen Strommangel "gerettet" (Die Abschaltung war für Dezember 2022 geplant, die Regierung investiert 1 Milliarde, um die Lebensdauer zu verlängern)





# 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



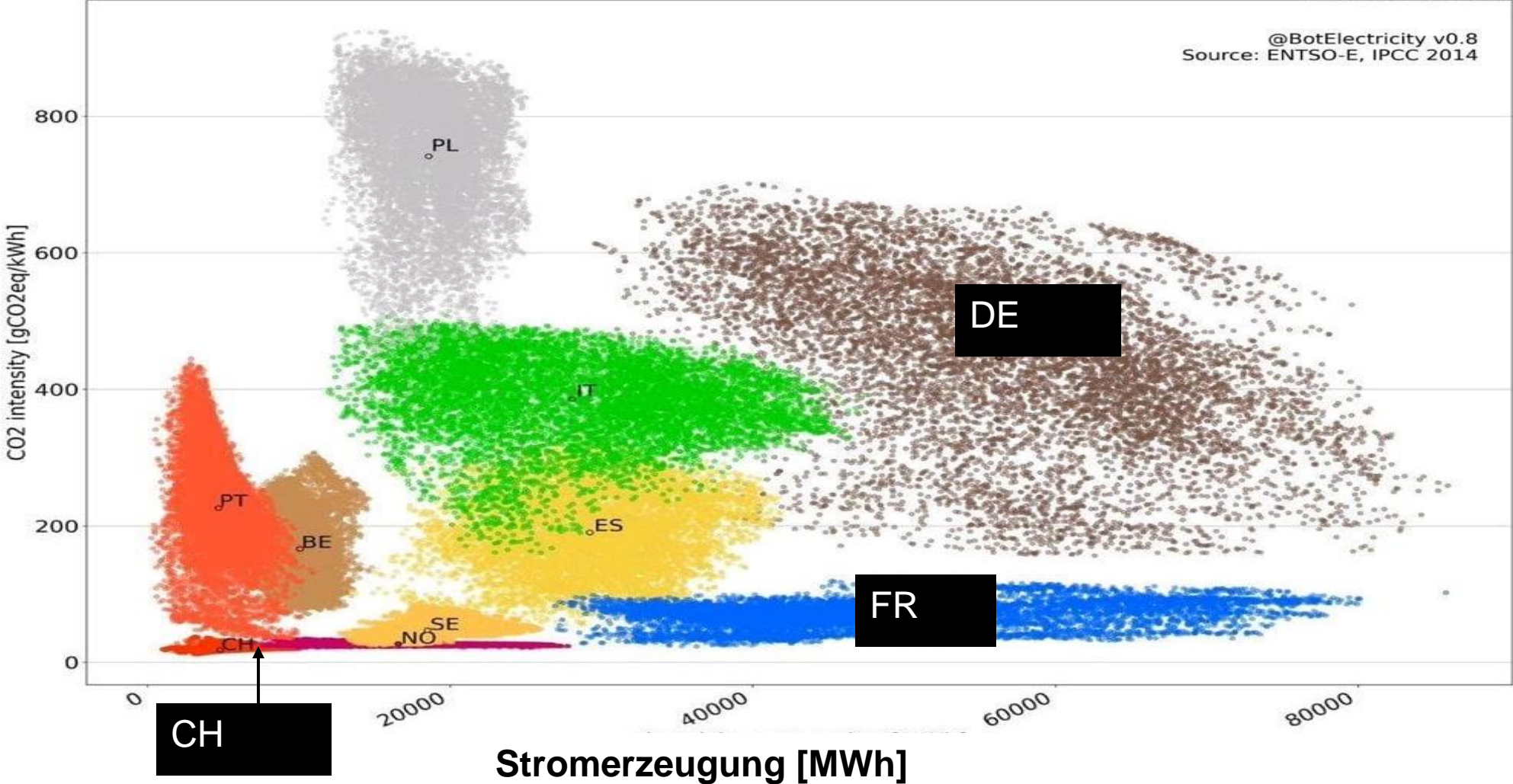
\*Low carbon electricity

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

# Die Stromproduktion in der Schweiz ist bereits CO2-frei

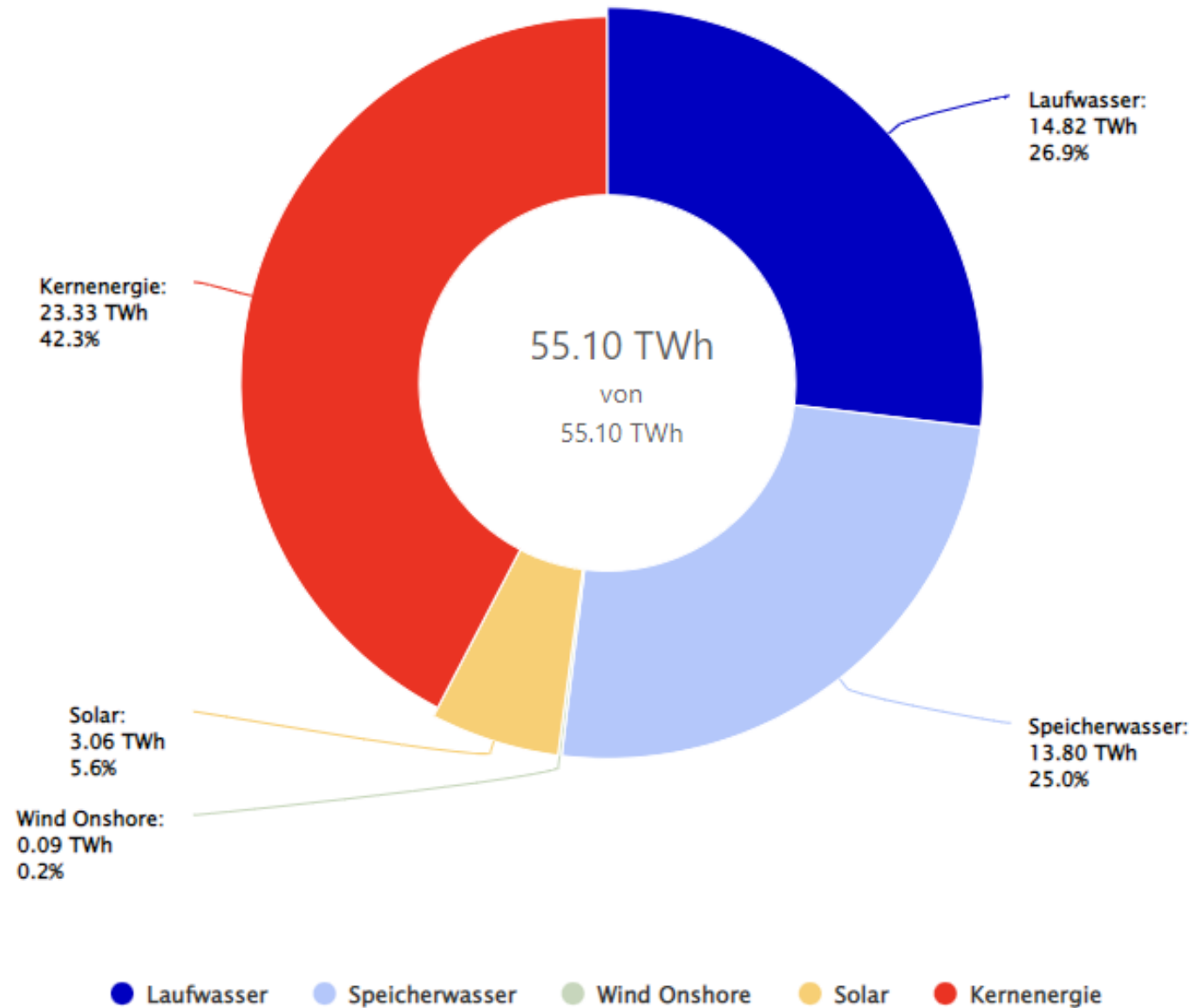
Länder in Europa mit ~ CO2-frei Stromerzeugung nutzen Kernenergie  
Ausnahme: Norwegen mit mehr als 98 % Wasserkraft

CO2eq/kWh – Jahr 2022



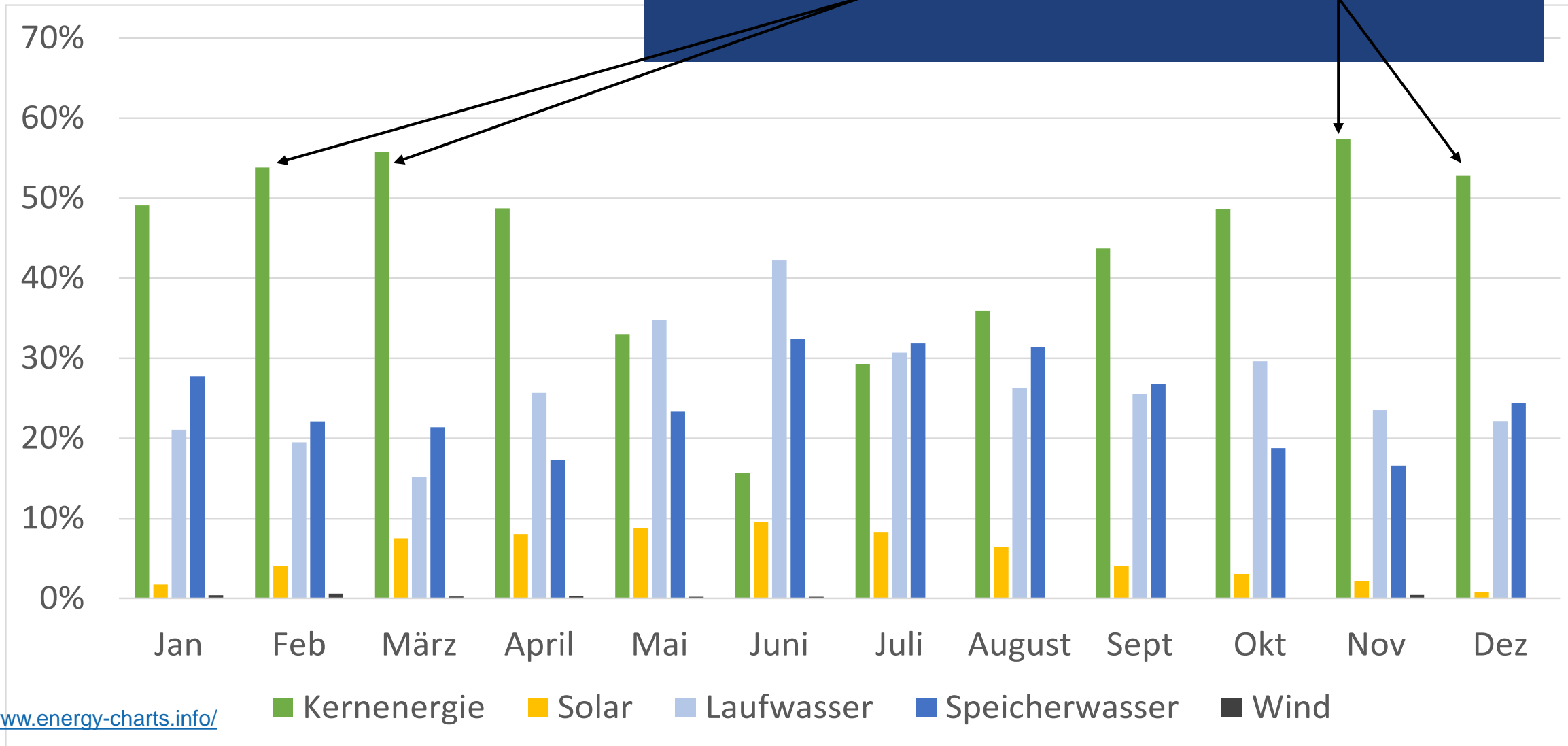
# Nettostromerzeugung in der Schweiz 2022

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



# Nettostromerzeugung in der Schweiz 2022

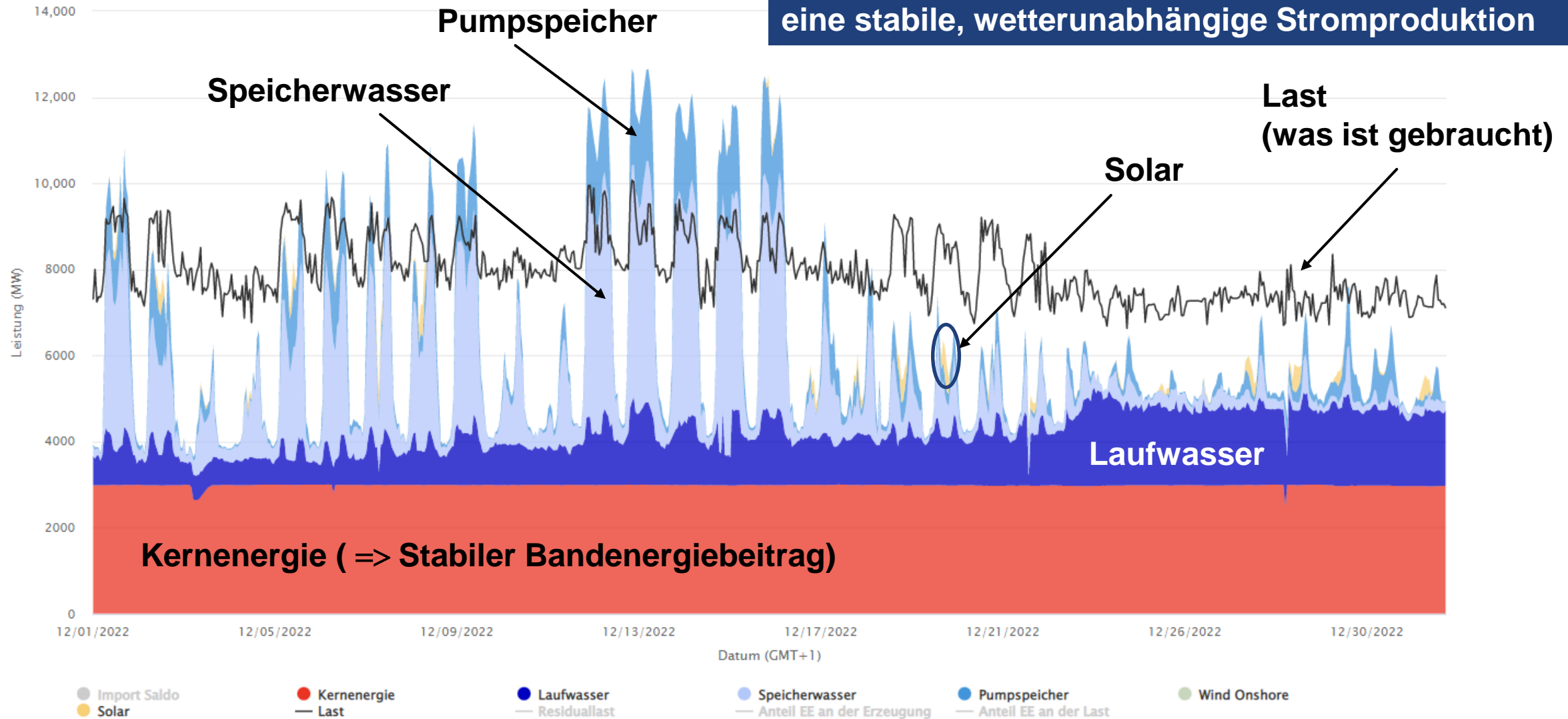
In den Wintermonaten produziert die Kernenergie in der Schweiz über 50% Strom





# Nettostromerzeugung in der Schweiz – Dezember 2022

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

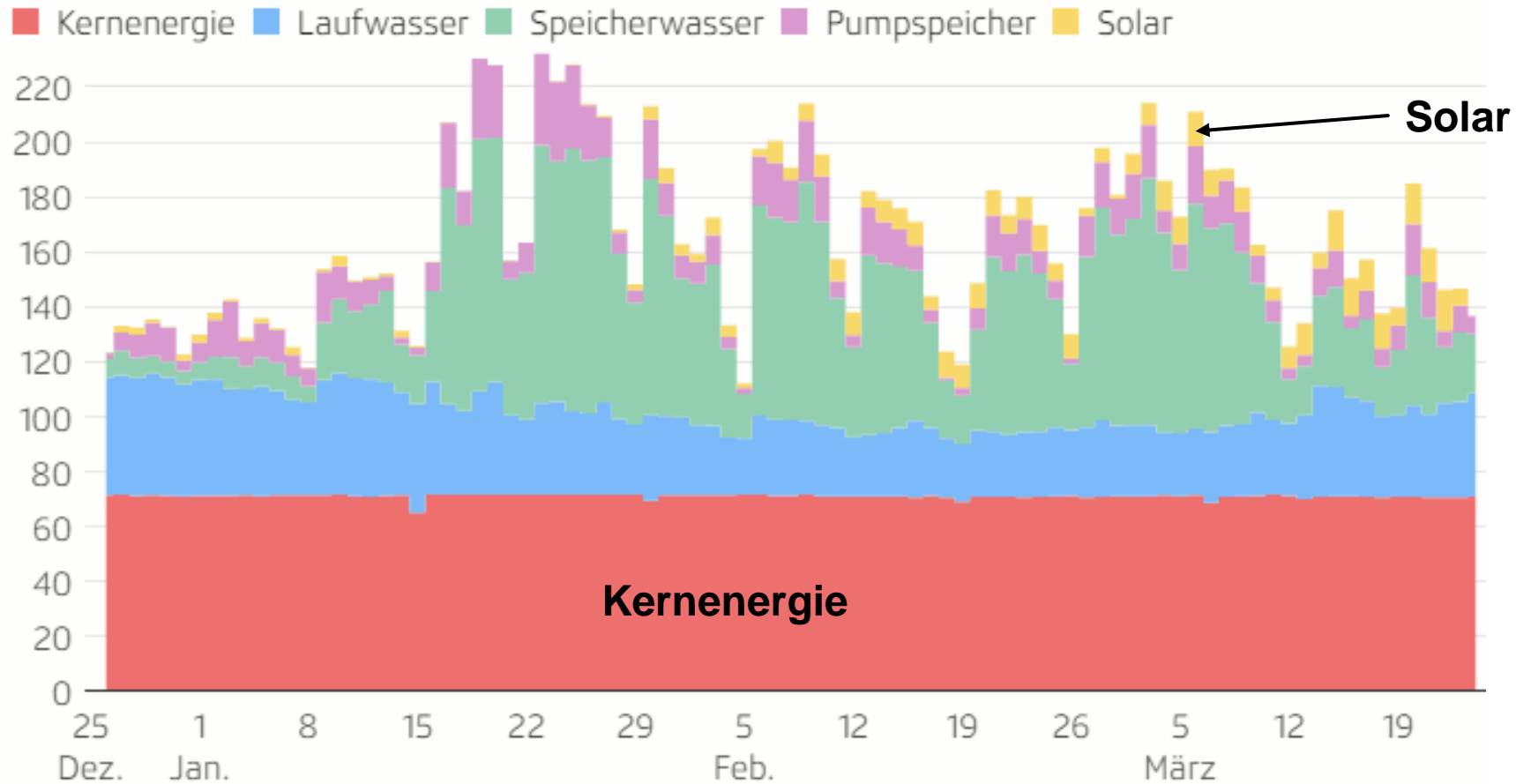


Source: [www.energy-charts.info/](http://www.energy-charts.info/)

Last größer als Produktion => Importbedarf

# Nettostromerzeugung in der Schweiz 2023 / Januar - März

Nettostromerzeugung nach Erzeugungsart in GWh

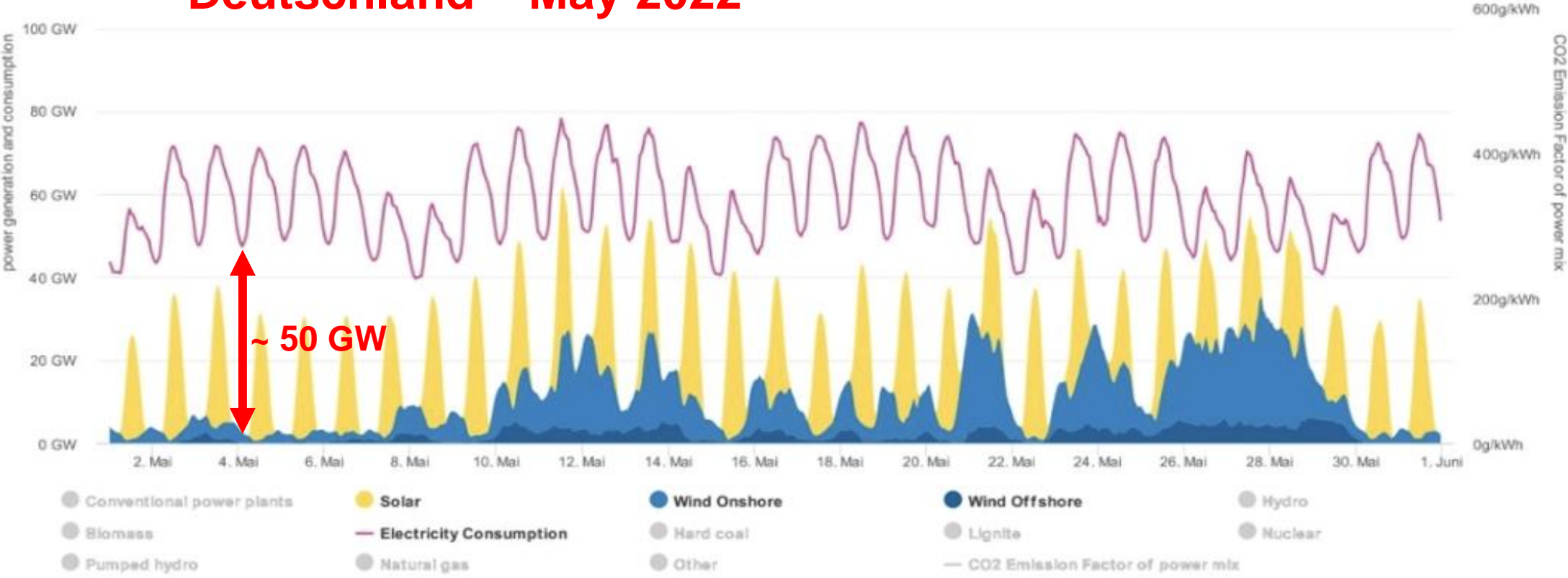


Wind wird nicht angezeigt (Werte zu klein). Wird täglich aktualisiert.

Grafik: SRF Data • Quelle: [ENTSO-E](#)

# Beispiel Deutschland – Ersatz von KKW durch Erneuerbare

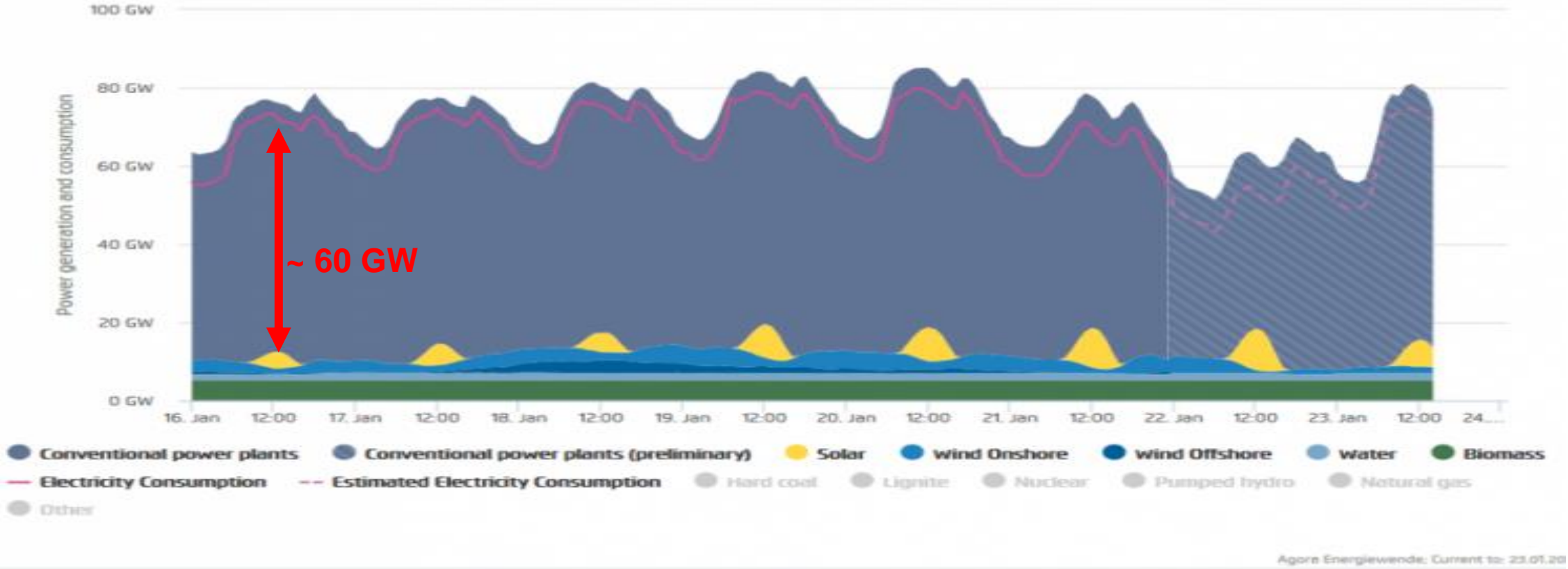
## Deutschland – May 2022



Die Grundlastproduktion ist entscheidend!

# Beispiel Deutschland – Ersatz von KKW durch Erneuerbare

## Deutschland – Jan 2022

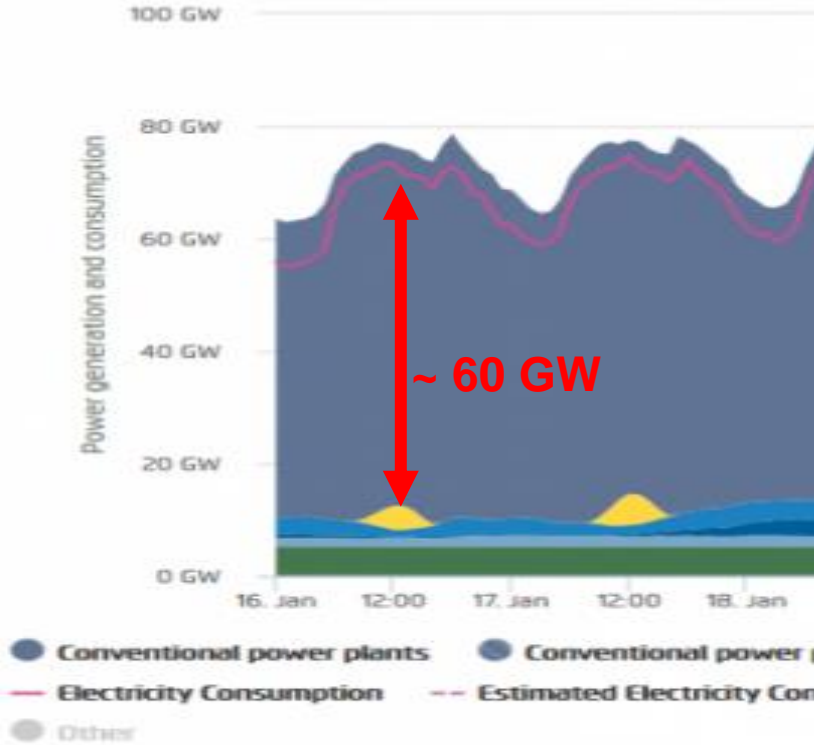


Die Grundlastproduktion ist entscheidend!””



# Beispiel Deutschland

## Deutschland – Jan 2021



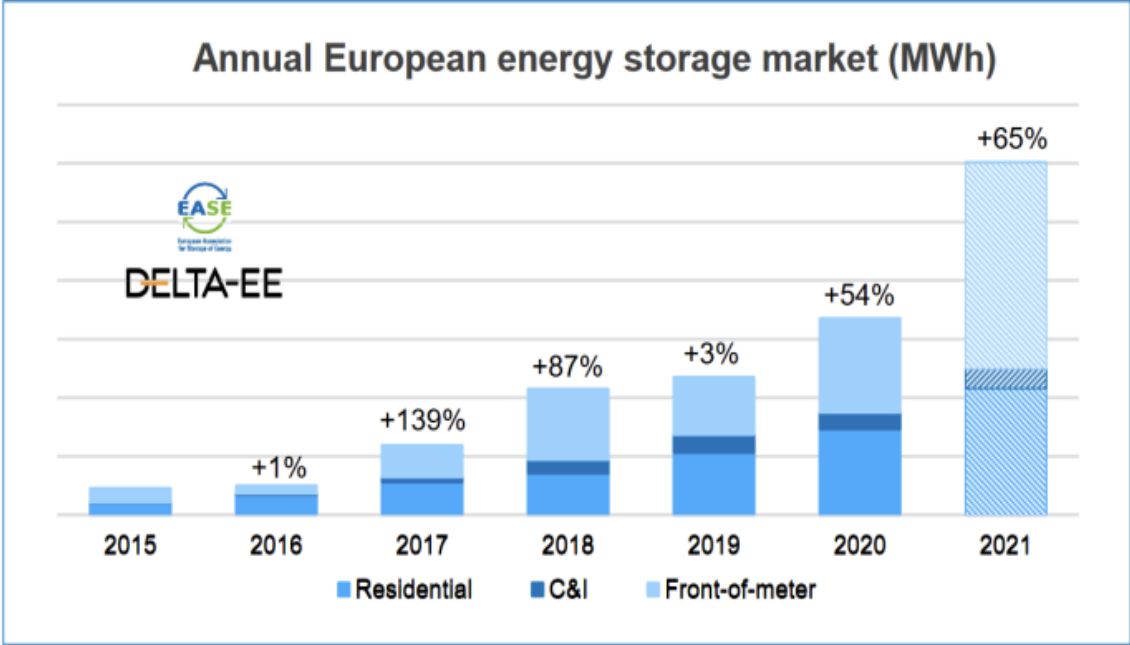
8.3 GWh  
2021

↑

0.6 GWh  
2015

Cumulative  
installed base

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



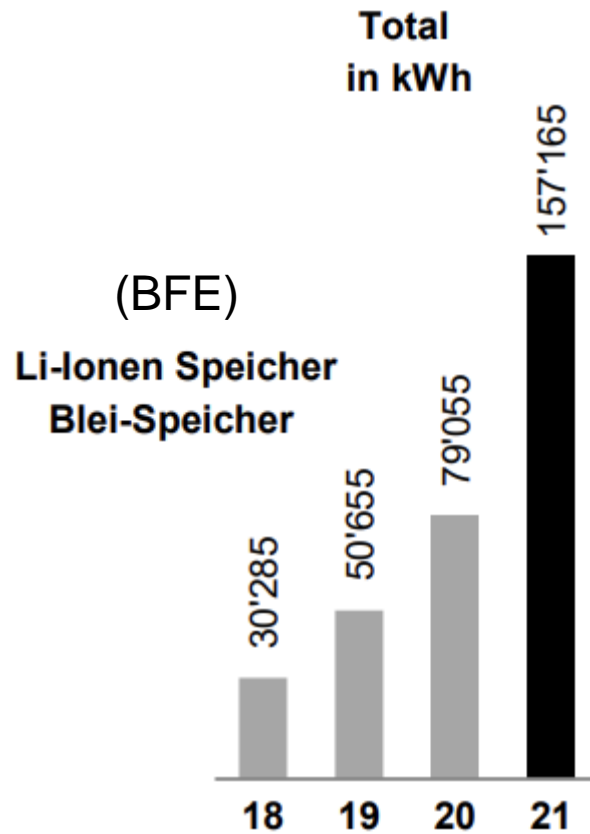
Source: EASE, EMMES 5.0 market data and forecasts - electrical energy storage, 2021. Vertical gradient/horizontal division of the graph on the right is of 0.5 GWh of annual storage deployment

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

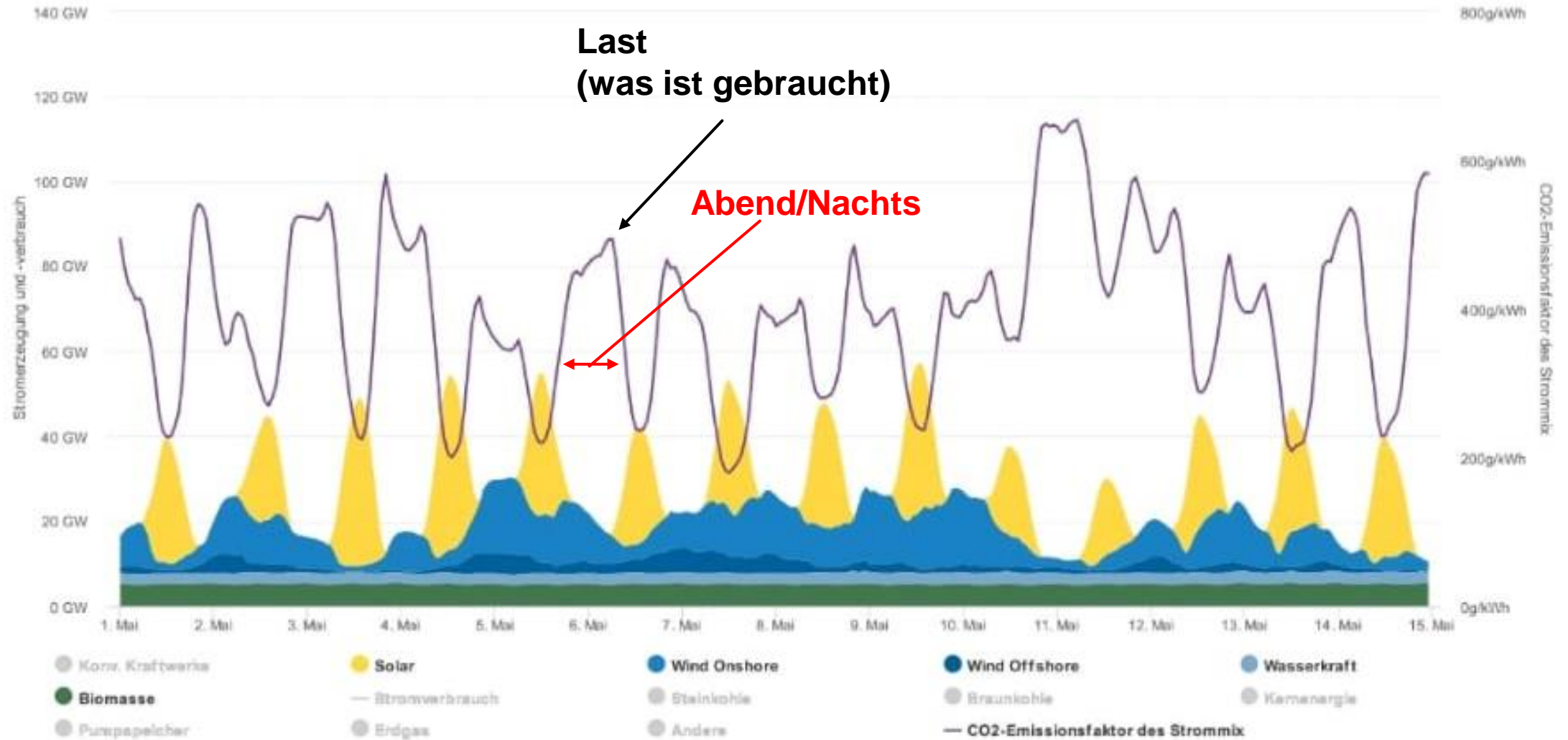


HARMONY ENERGY

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.

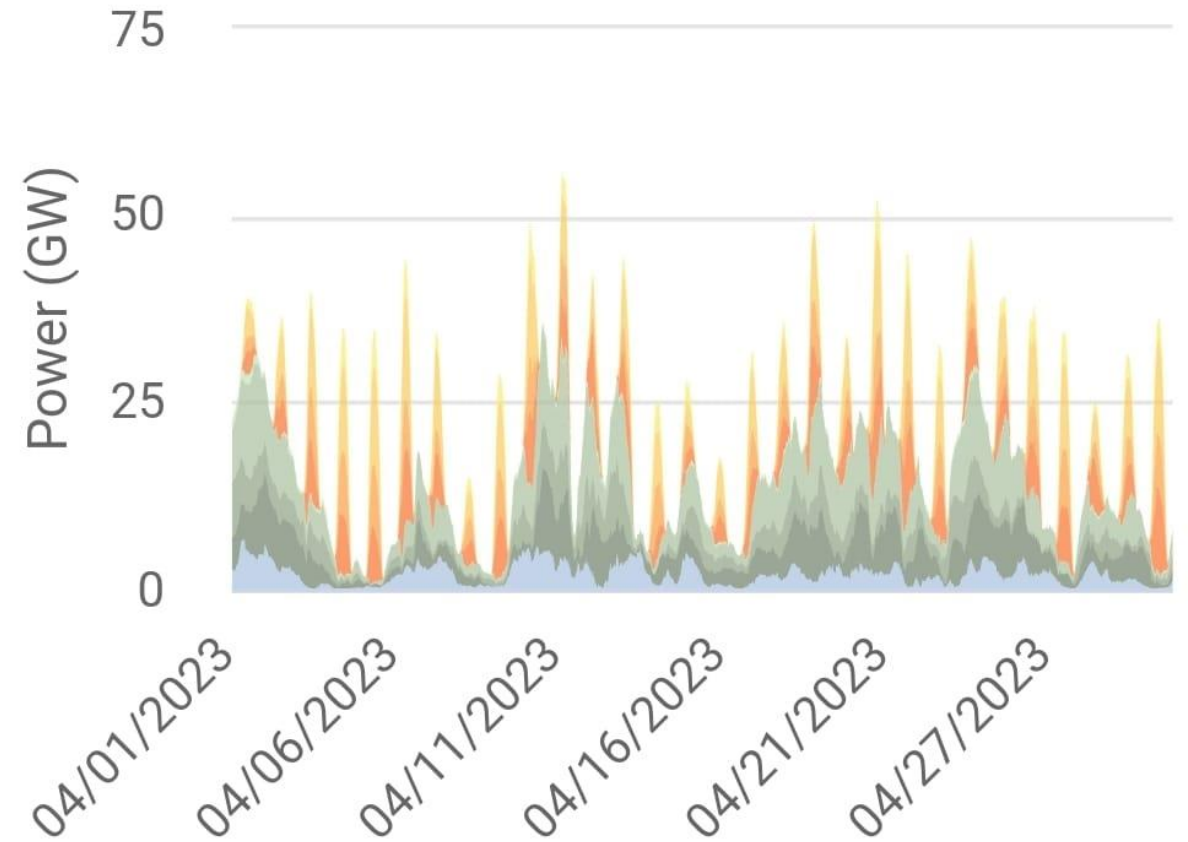
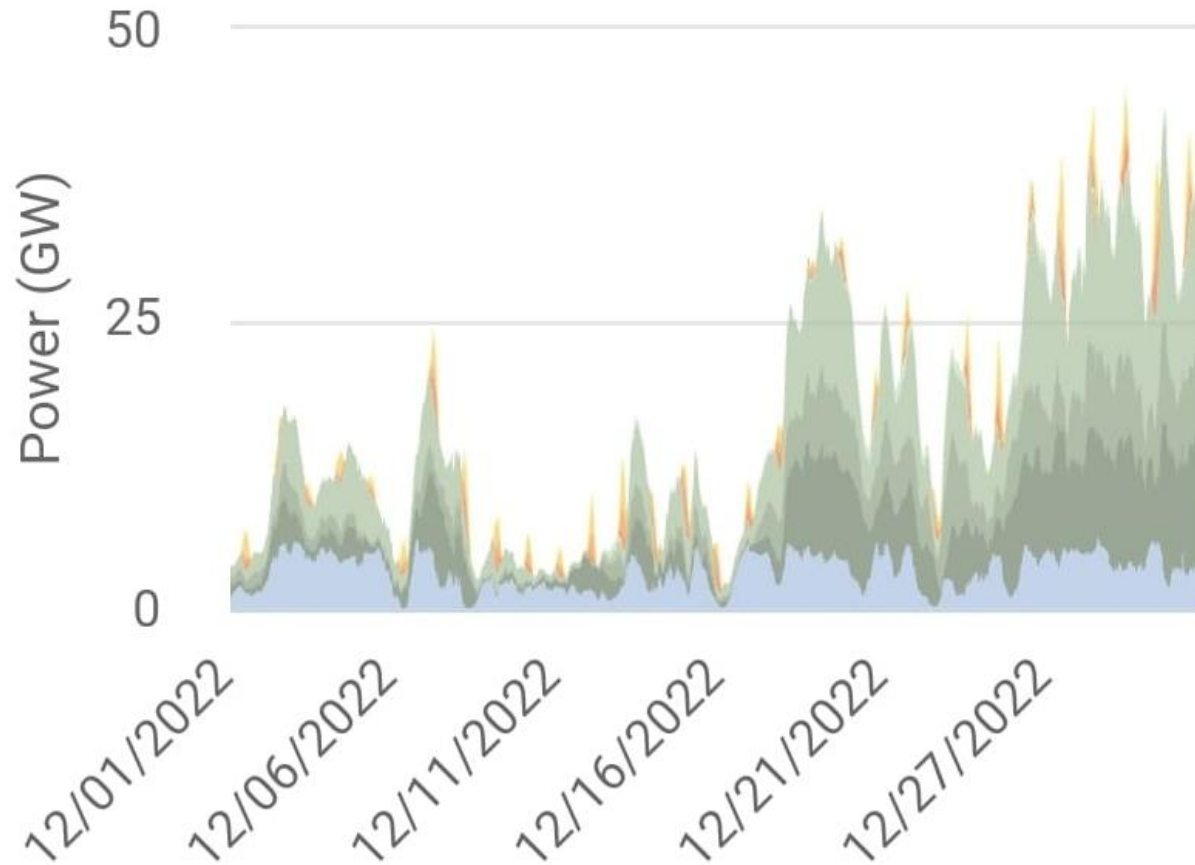
# E-Auto nachts laden / Heizen mit Wärmepumpe





# Deutschland – Wind/Sonne

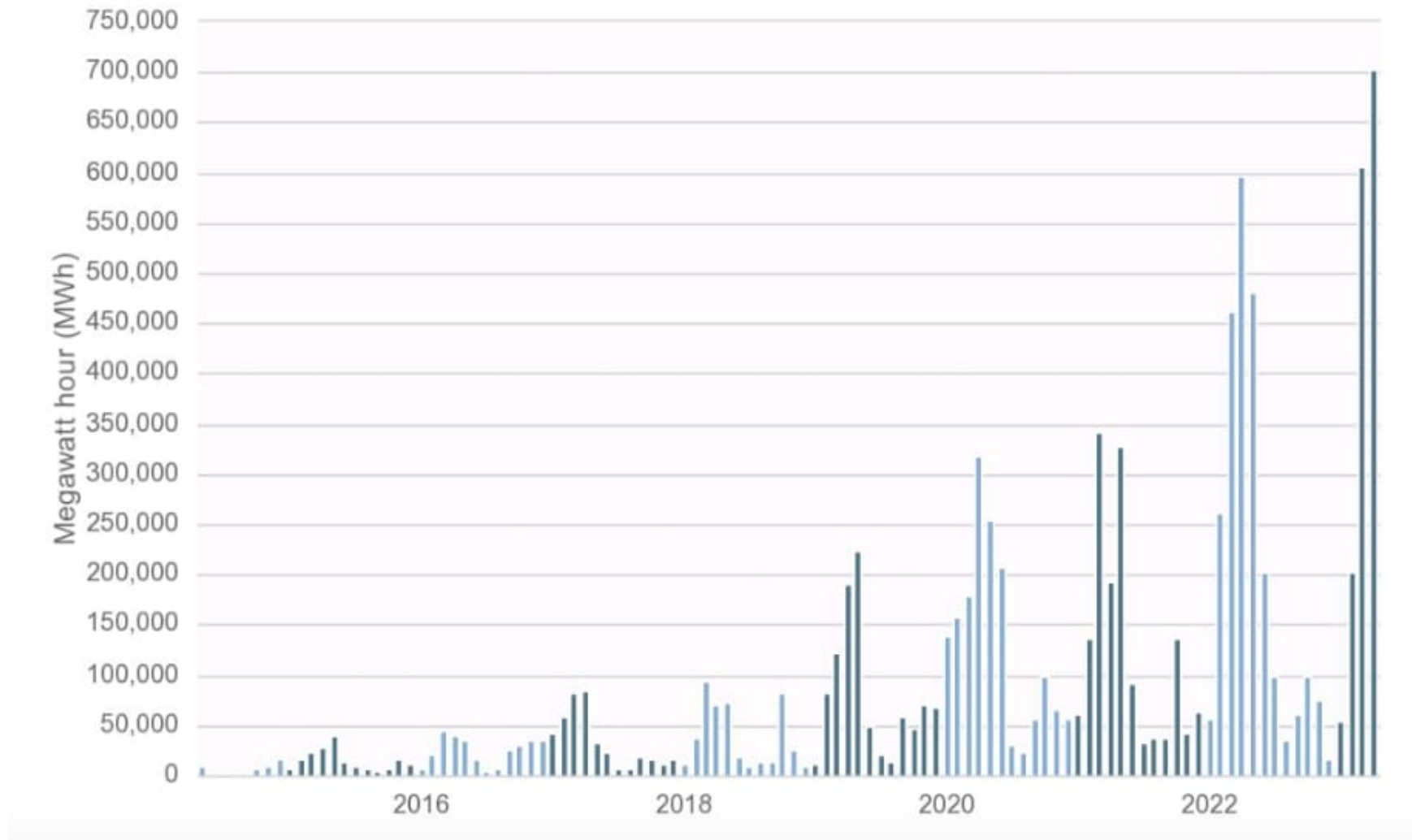
Risiko eines Kernkraftwerks:  
wenn es nicht verfügbar ist, eine große Menge  
Strom ersetzt werden muss





# California

## Menge an Sonnen-/Windenergie aufgrund unzureichender Spannungsleitungen eingeschränkt

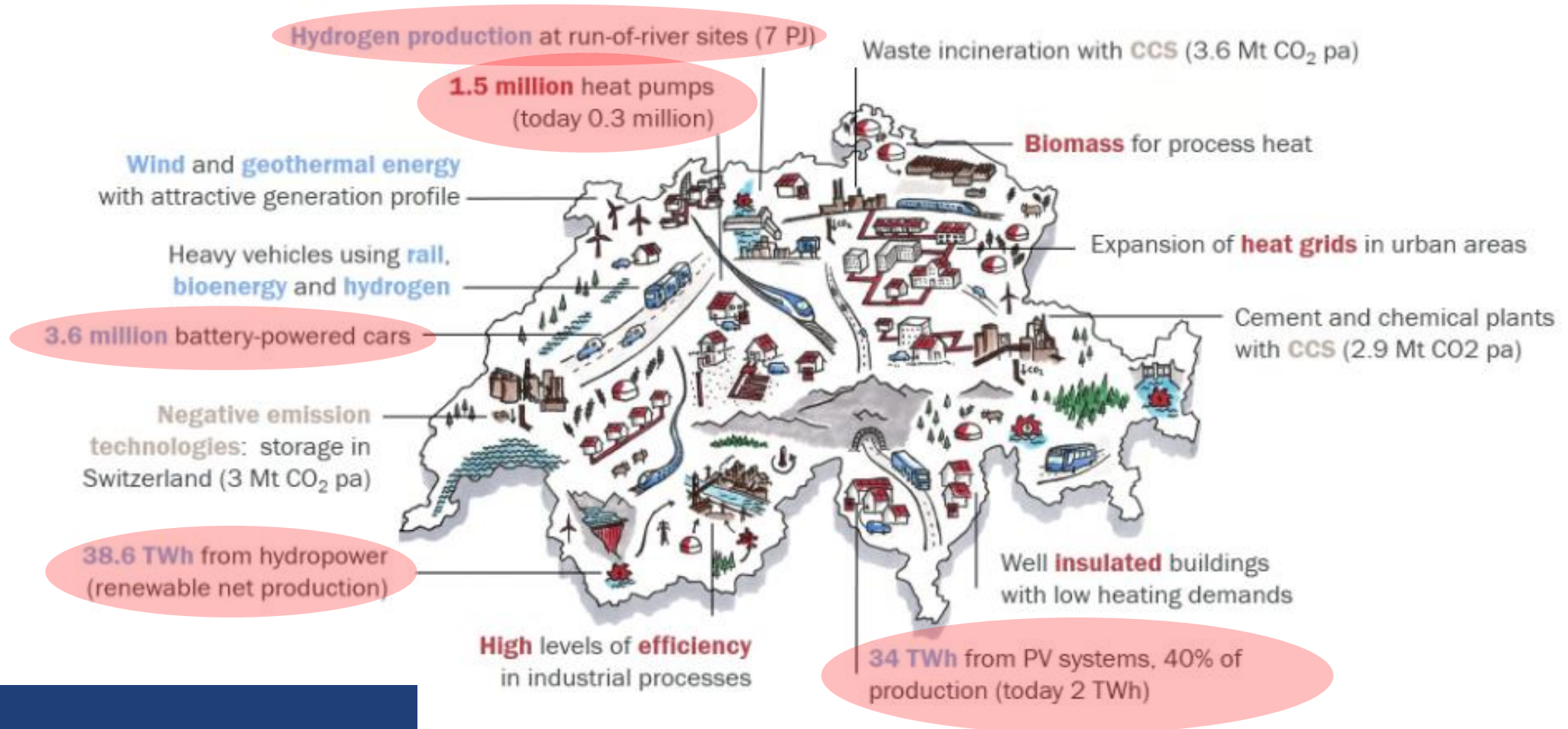


# **BACKGROUND INFO**

## **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)

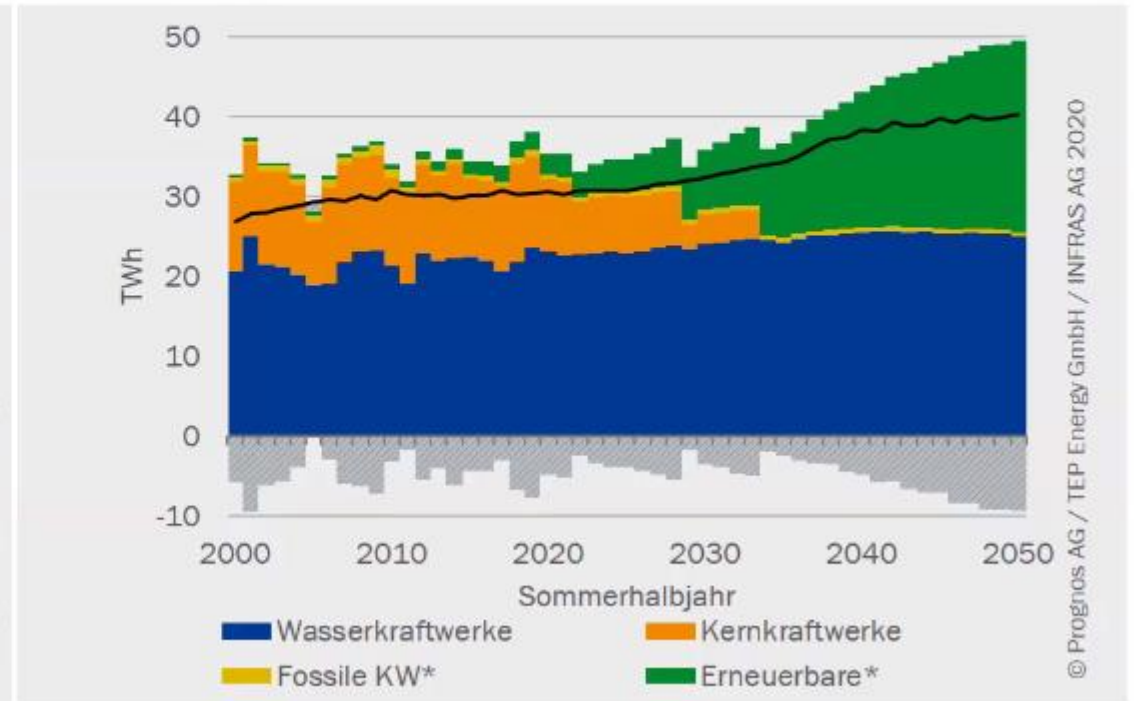
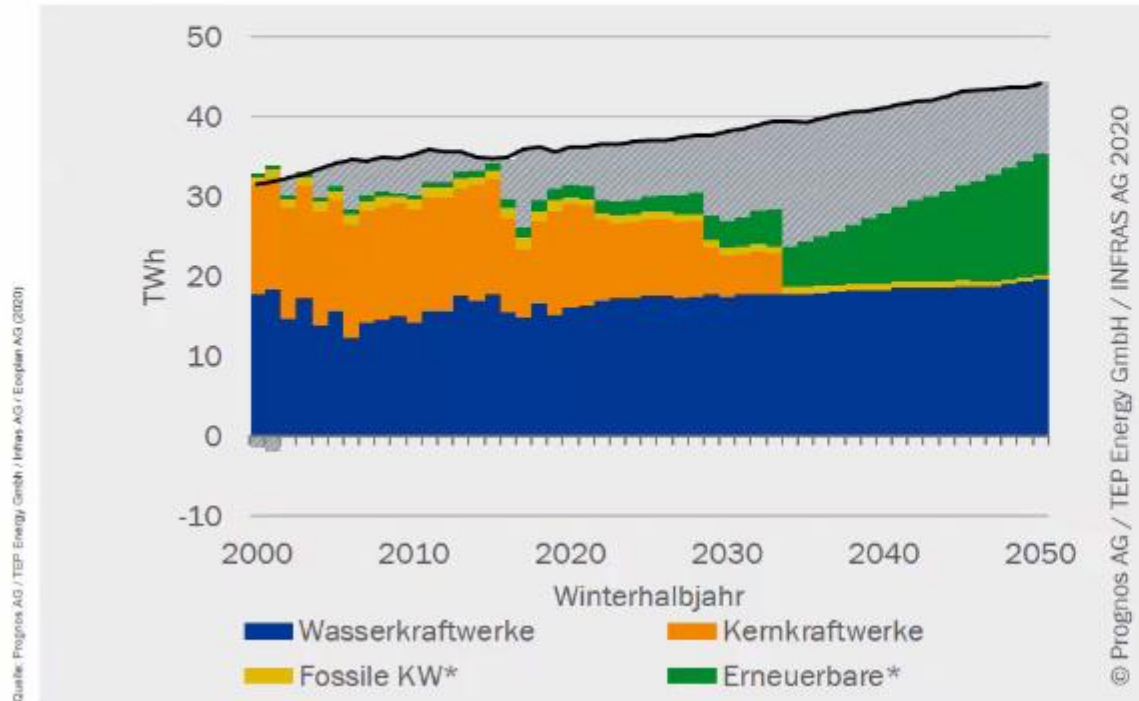
Studie der Bankiervereinigung und Boston Consulting Group  
347 Mia. CHF (2020–2050)

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+

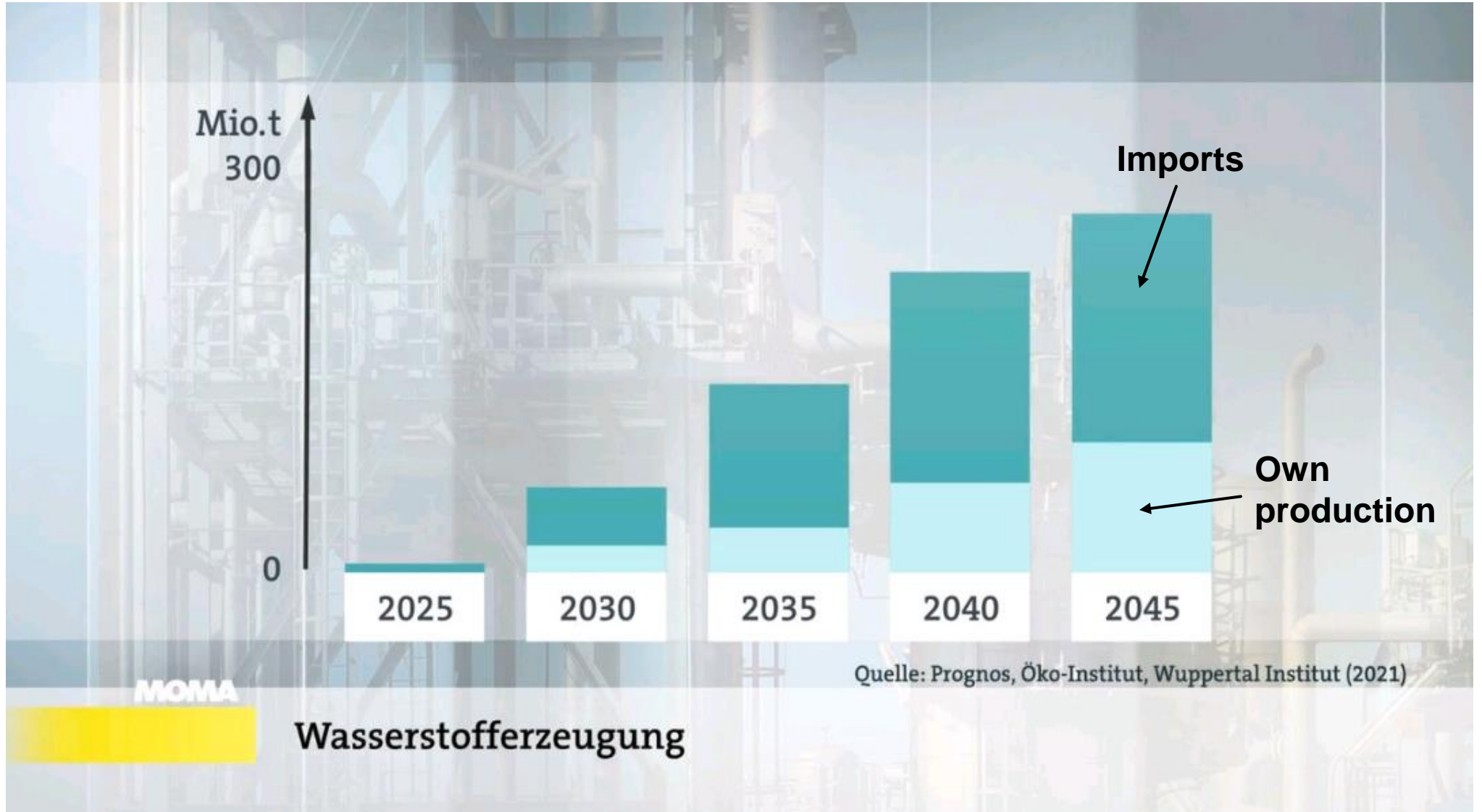
## Annahmen:

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



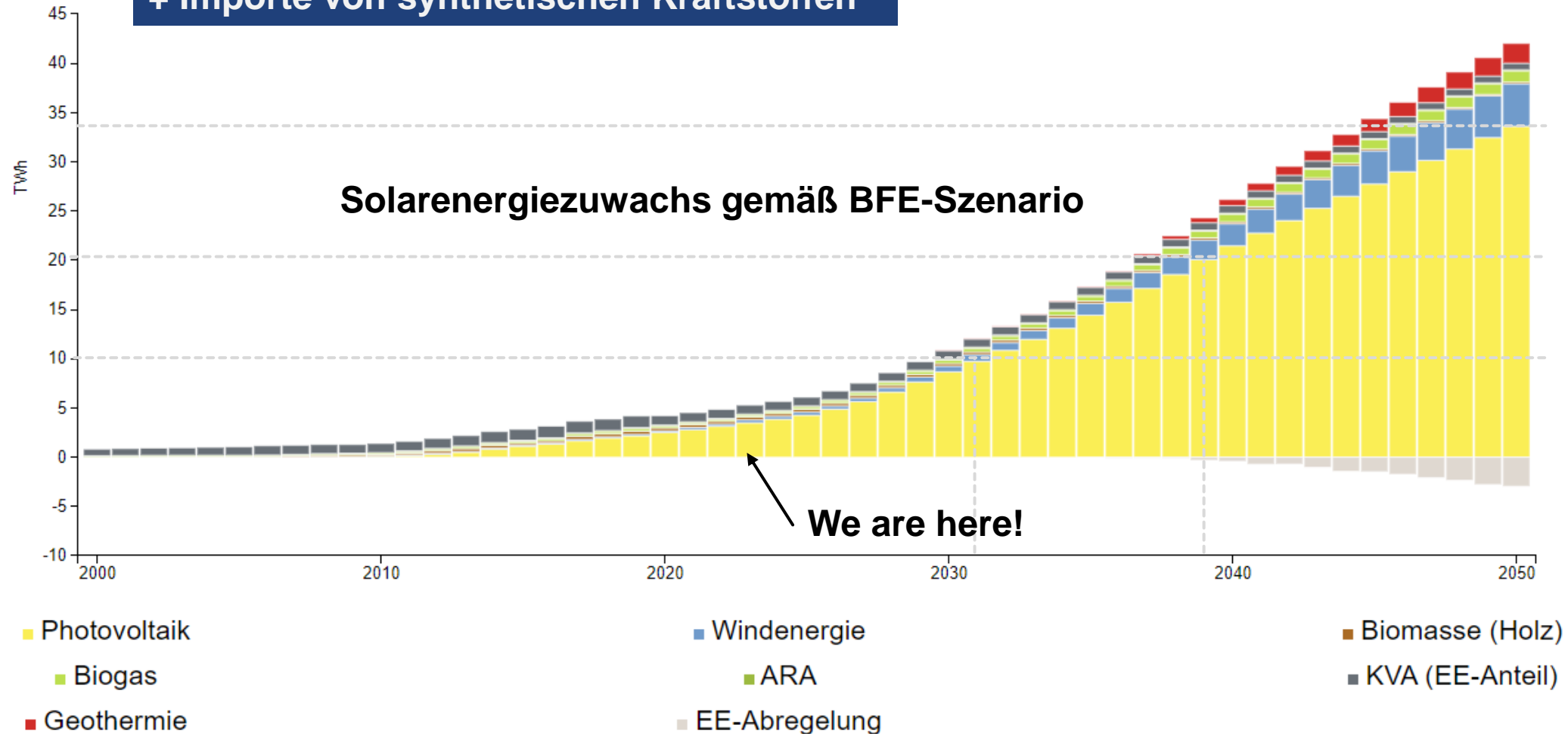
# Ein Blick auf die Zahlen...

## 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>

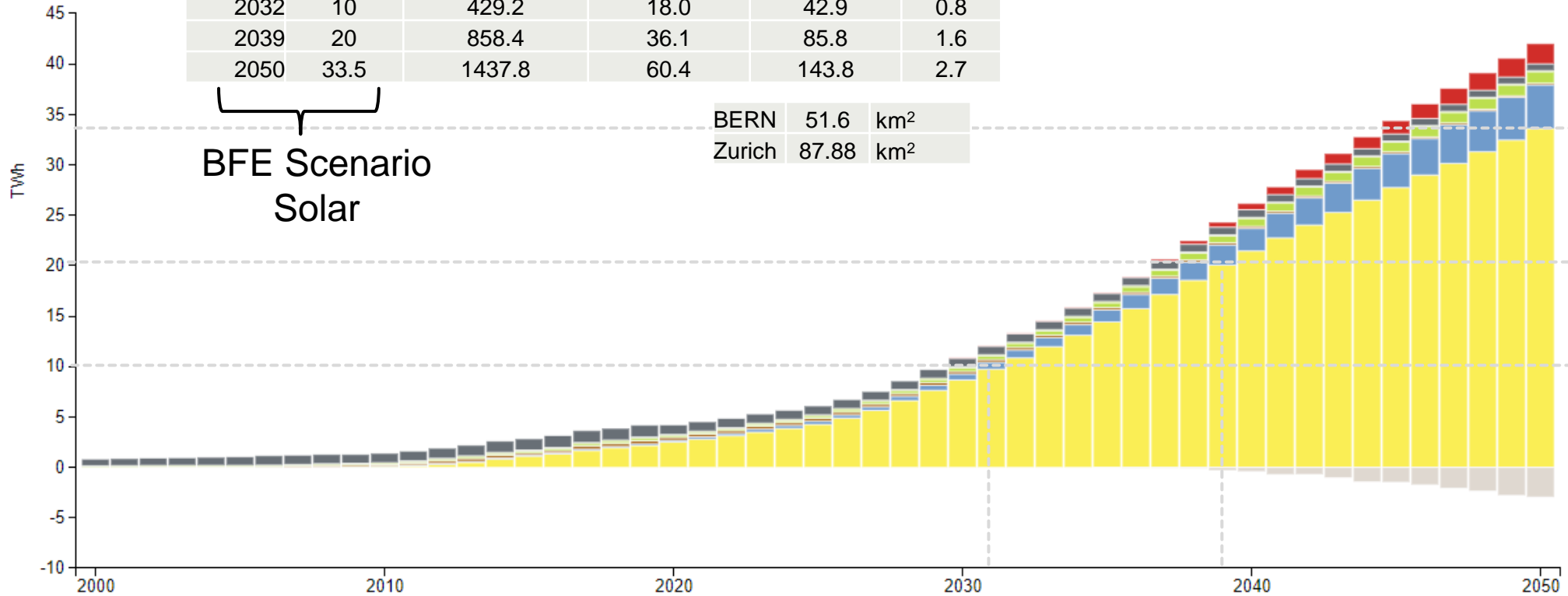


# Ein Blick auf die Zahlen...

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** MW<sub>p</sub>

Megawatt  
Leistung

**4872**

Solarmodule  
Anzahl

**50**

Prozent  
Winterstrom

**3,3**

Gigawattstunden  
Energie

**CHF7.9 Mio.**

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

# 25 TWh (nur für Strom)

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

Wenn man das Schweizer KKW durch Alpinsolar ersetzen würde, bräuchte man mehr als 7500 solcher Anlagen mit fast 37 Millionen Solarmodulen und Kosten von fast 60 Milliarden CHF

### Bis 2050

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



In den Nachrichten vom 22.11.2022

Axpo versechsfacht  
Solar-Ambitionen in der  
Schweiz und baut  
nächste alpine  
Solaranlage

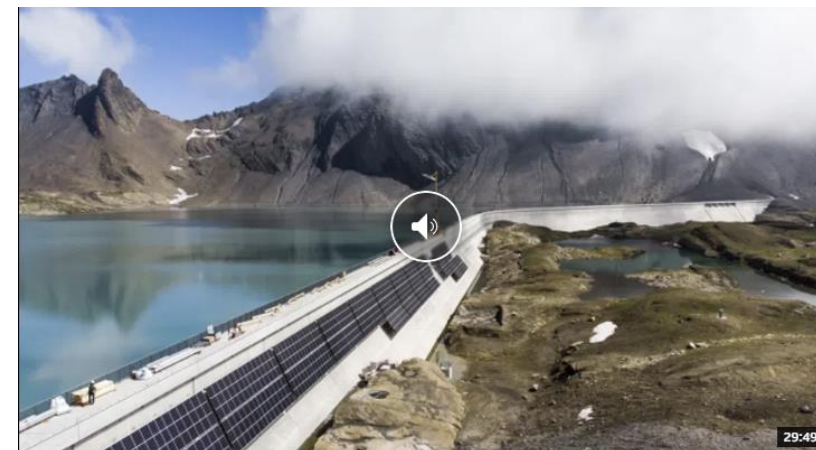


Mega-Investition in den Alpen

# Axpo baut für 1,5 Milliarden Franken Solaranlagen

Der Energiekonzern Axpo will in der Schweiz kräftig in Sonnenstrom investieren. Ein Grund seien Erleichterungen der politischen Rahmenbedingungen für Anlagen in den Alpen. Es lohnt sich aber auch angesichts der hohen Strompreise an den Märkten.

Publiziert: 22.11.2022 um 10:29 Uhr | Aktualisiert: 22.11.2022 um 14:04 Uhr



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

KEYSTONE/Gian Ehrenzeller

[Audio & Podcasts >](#)

[Rendez-vous >](#)

## Axpo will 1.5 Milliarden Franken in Solaranlagen investieren

# Ein Blick auf die Zahlen...

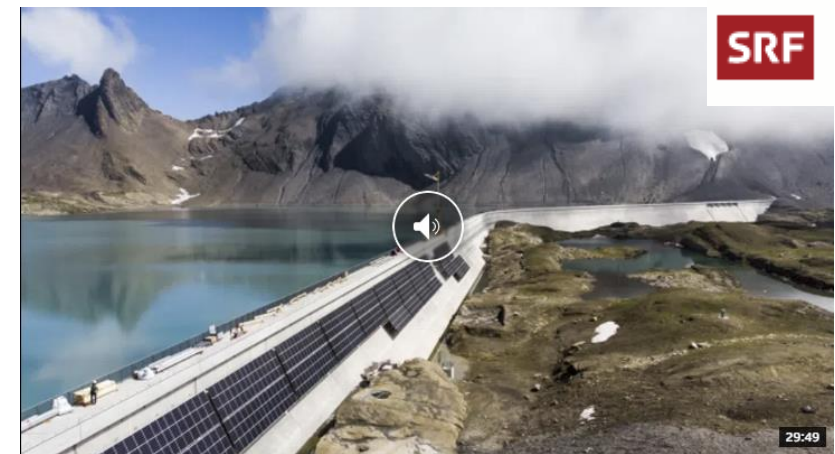
Axpo Plan - bis 2030 1.2 GW installierte Leistung Solar

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

## AXPO-CEO:

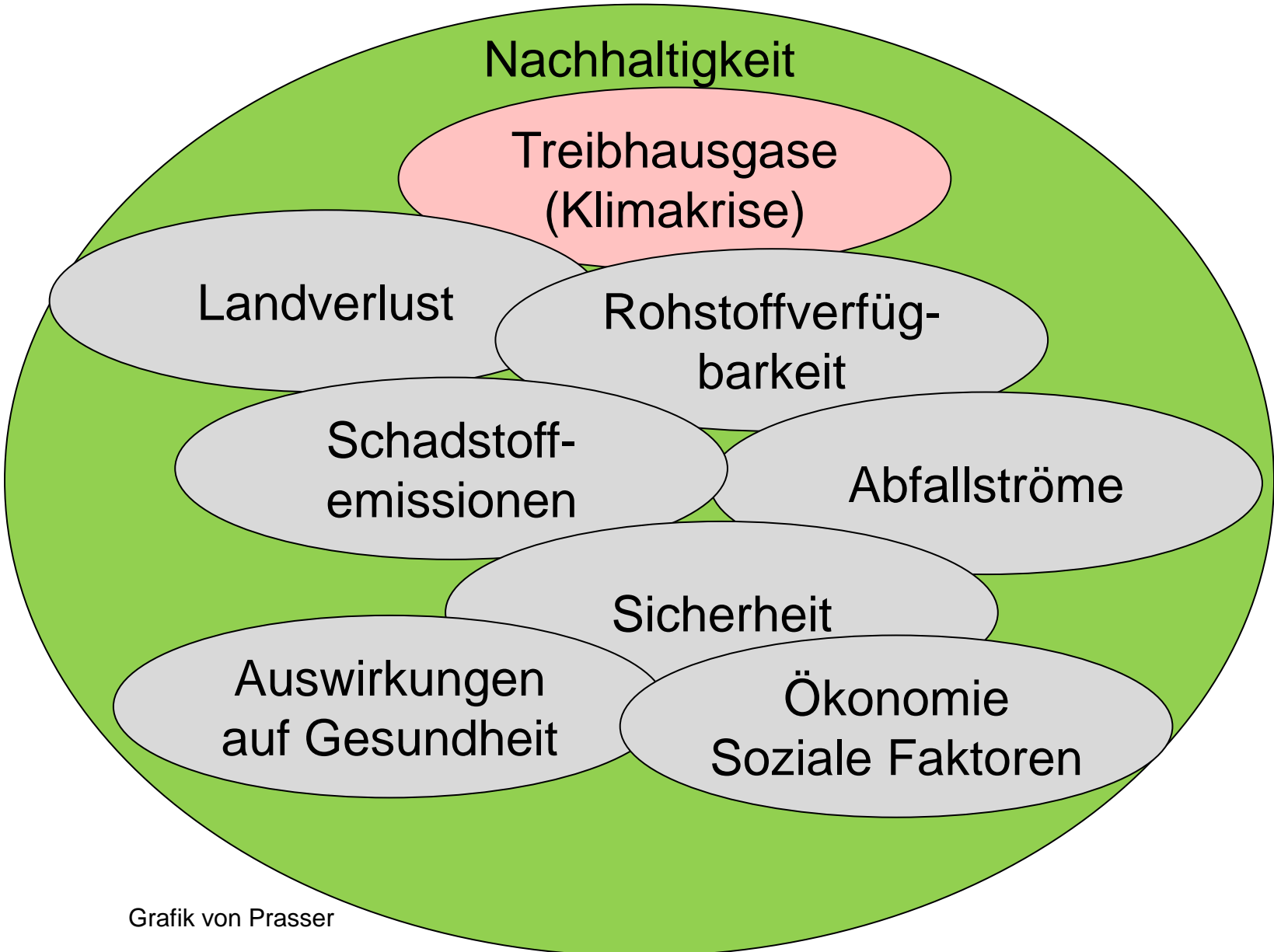
Alpinsolar-Projekt nicht rentabel

## ALPIQ-Ankündigung:

Kein Gondosolar, es sei denn, die Regierung stellt 60 % der Finanzierung bereit

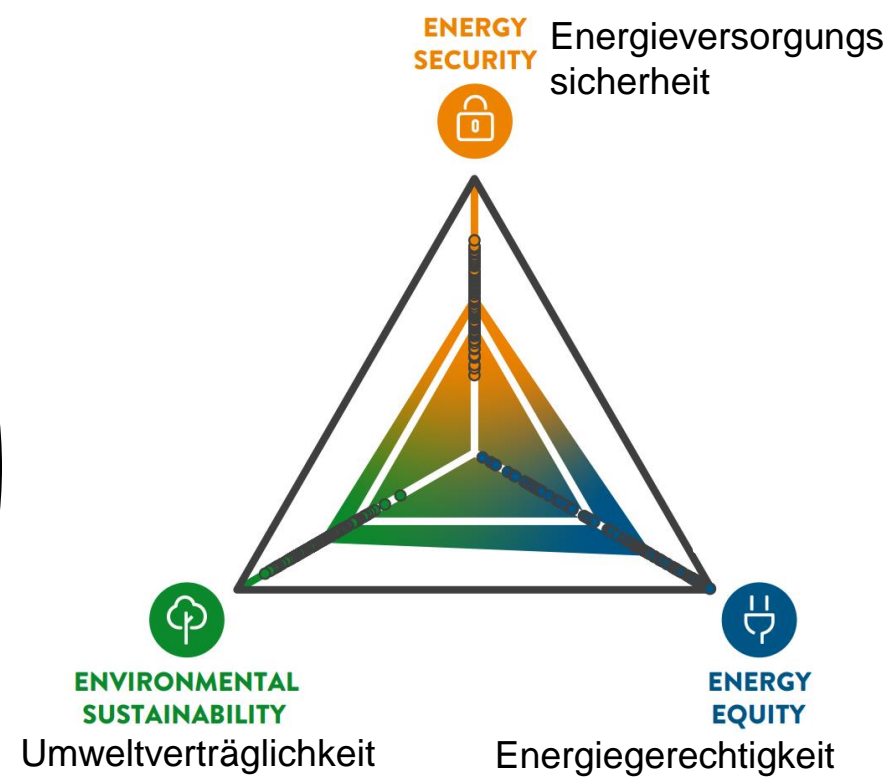


# Warum Interesse an Kernenergie? Nachhaltigkeit und Energie-Trilemma



Grafik von Prasser

## Energy trilemma



Source: World Energy Council

# Was ist das Besondere an Kernbrennstoff?

## Energie Äquivalenz

1 Uranium Brennstoff-Pellet



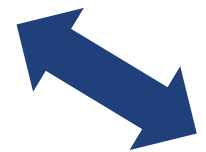
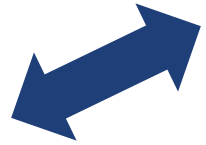
1 Tonne Kohle



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

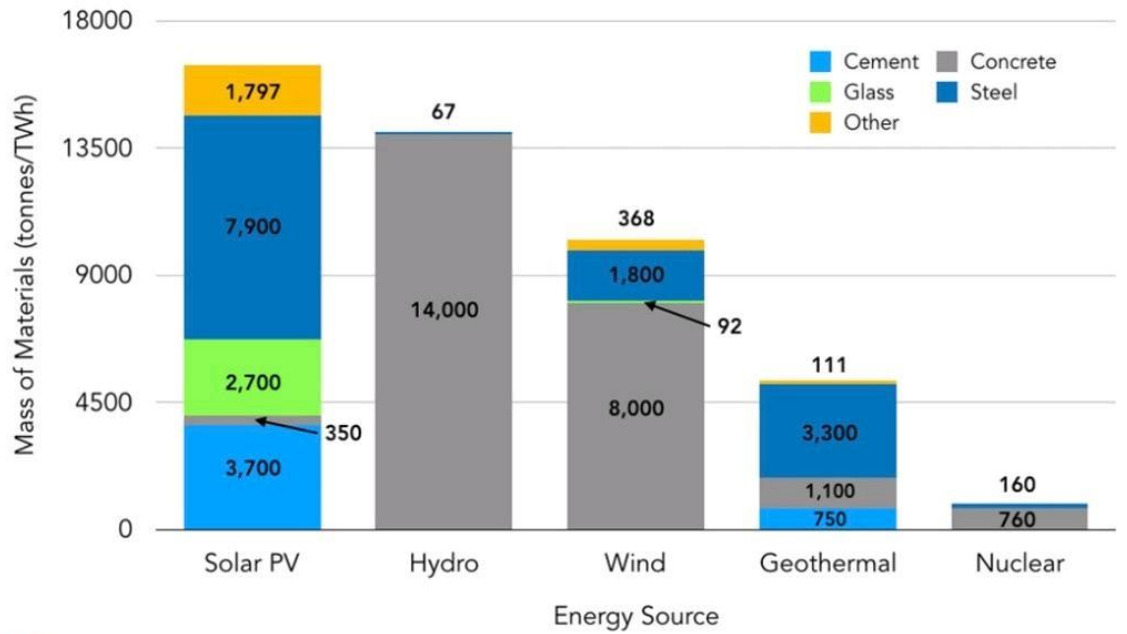
Hohe Energiedichte → 

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



# Ist Kernenergie umweltfreundlich?

Materials throughput by type of energy source

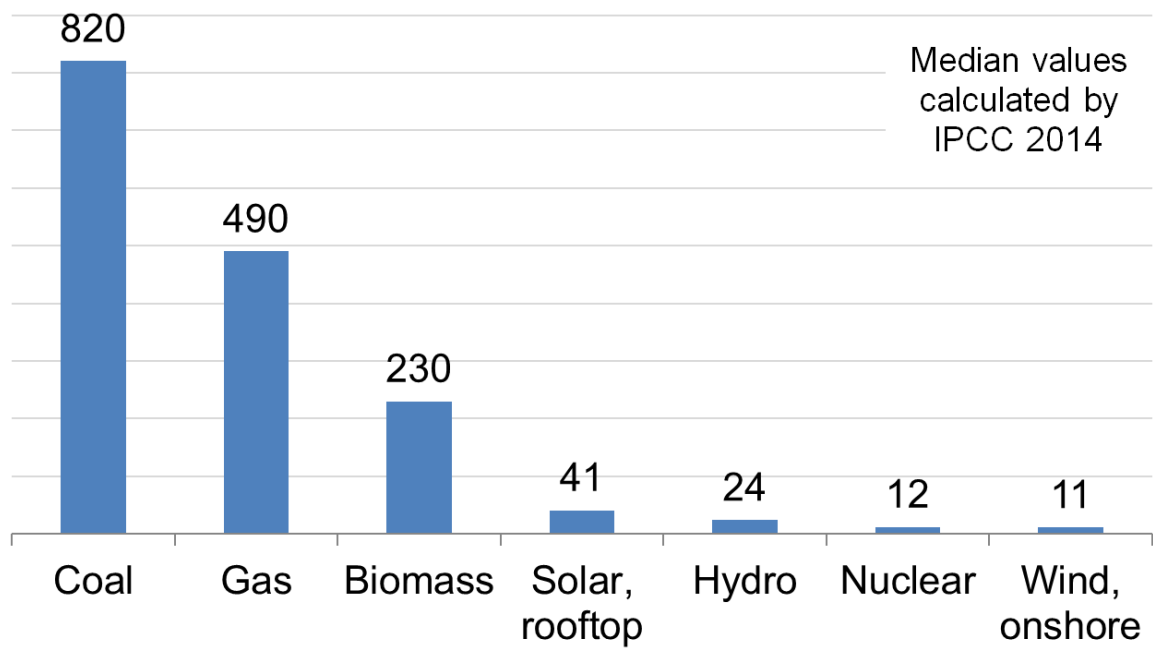


ENVIRONMENTAL PROGRESS logo. "Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities," Table 10. September 2015. United States Department of Energy. Nuclear and hydro require 10 tonnes/TWh and 1 tonne/TWh of other materials, respectively, but are unable to be labeled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



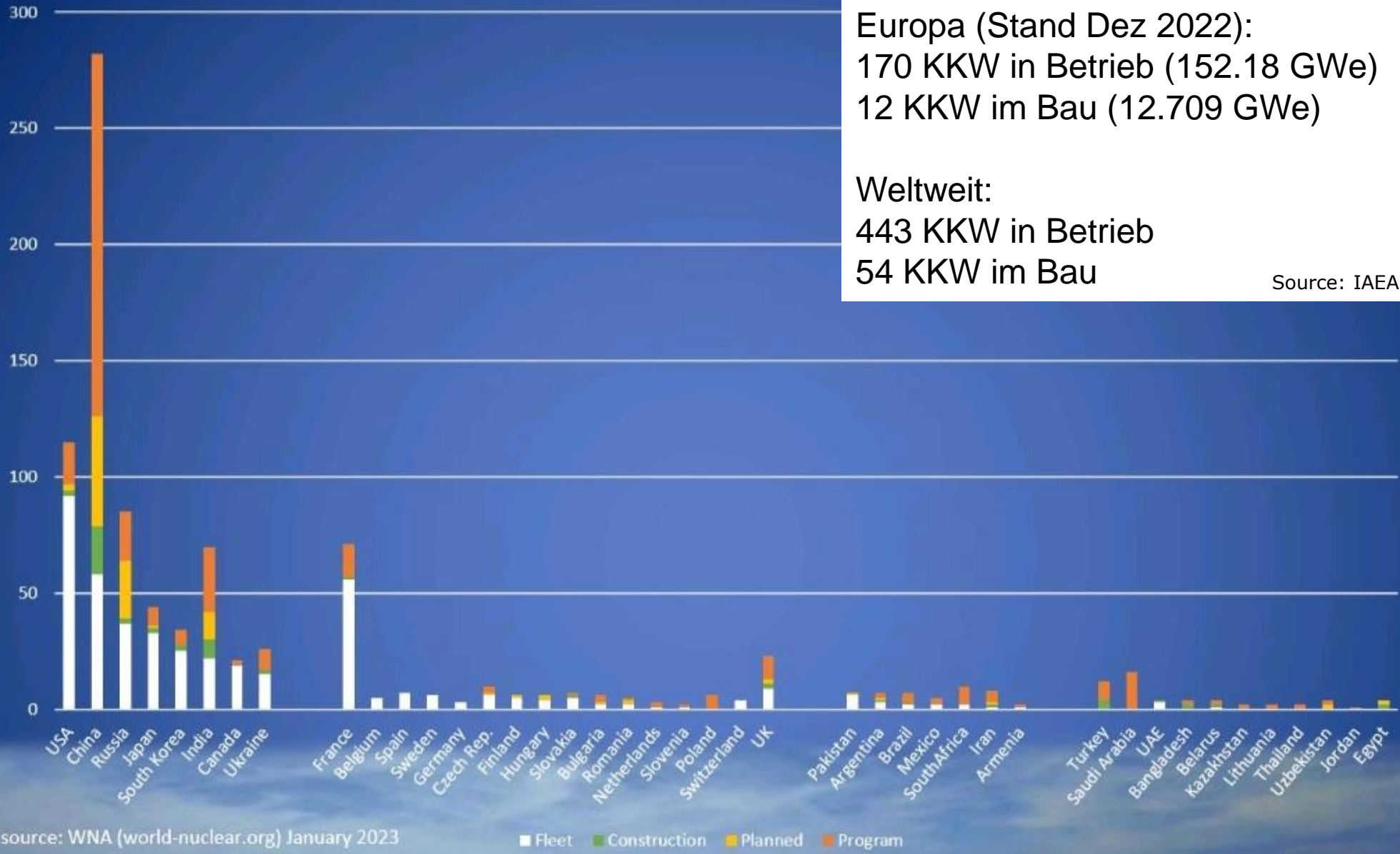
## Kernenergie hat die kleinste:

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

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

# **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)**

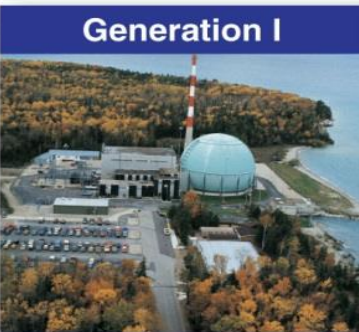
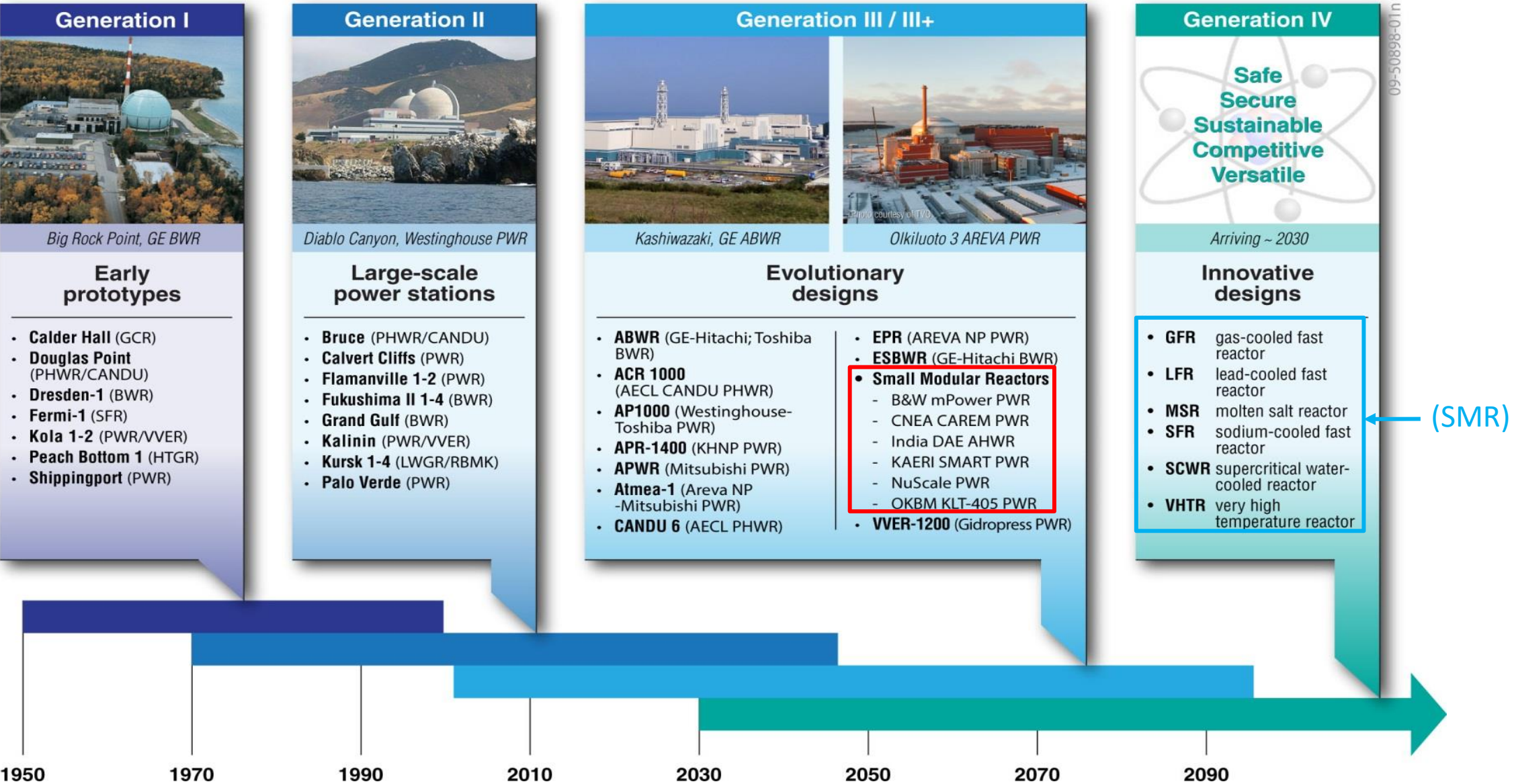
2023 **China**: 55 KKW in Betrieb, 22 KKW in Bau, 43 KKW geplant

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



# Neue Entwicklungen im Reaktordesign

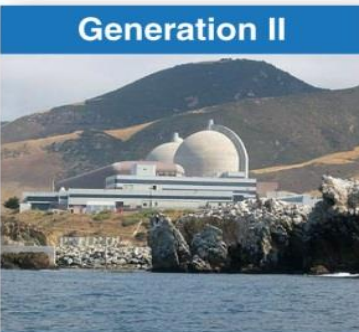


Generation I

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)
- Flamanville 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**

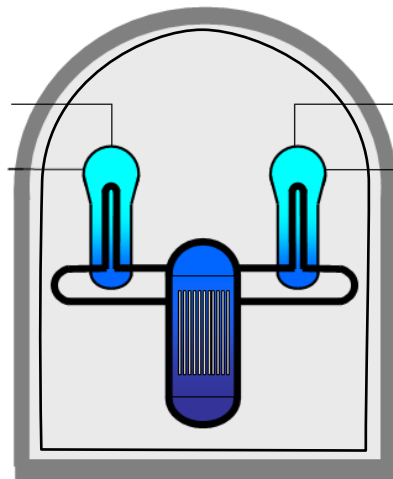
- GFR gas-cooled fast reactor
- LFR lead-cooled fast reactor
- MSR molten salt reactor
- SFR sodium-cooled fast reactor
- SCWR supercritical water-cooled reactor
- VHTR very high temperature reactor

(SMR)

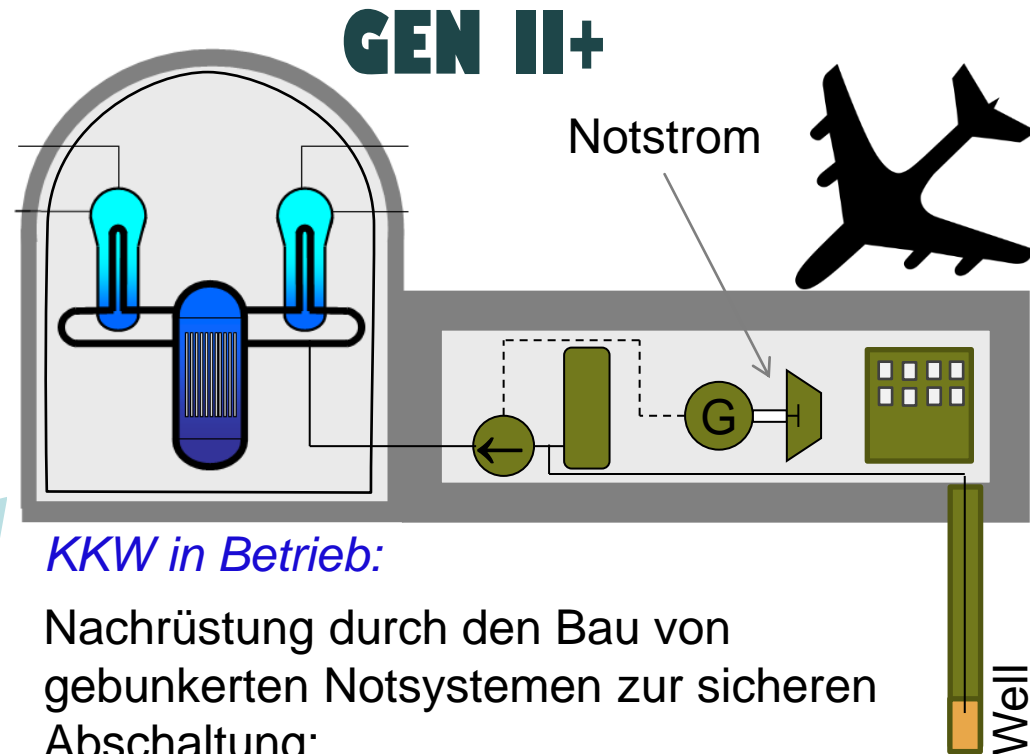
**KKW in der Schweiz gehören zur Gen-II, wurden aber standing nachgerüstet**

# 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:

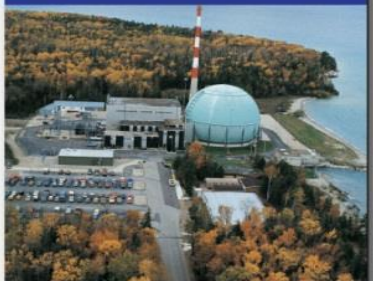
- Flugzeugabsturz sicher
- Erdbebenfest
- Hochwasser geschützt

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



# Neue Entwicklungen im Reaktordesign

**Generation I**

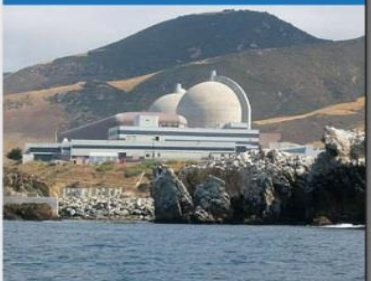


*Big Rock Point, GE BWR*

**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



## Gen III: EPR (1600 MWe)



Fukushima Daichi, Blöcke I-IV, Japan

**1970**  
Generation-II



Olkiluoto-III (EPR), Finland

**2020**  
Generation-III



# 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

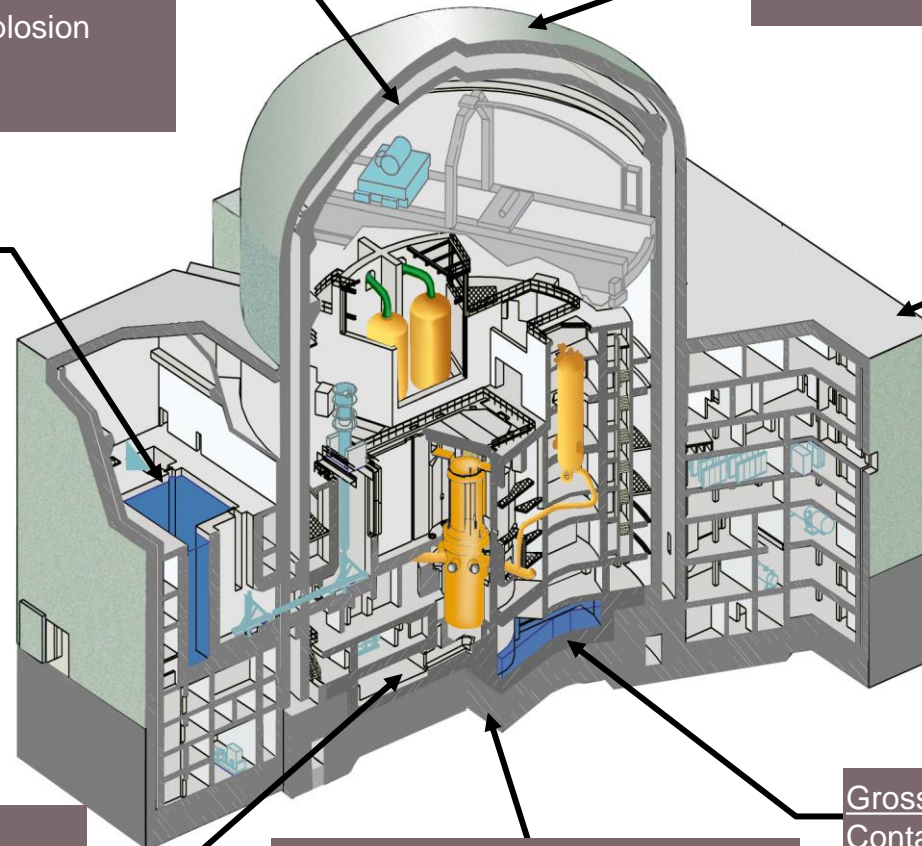
Wahrscheinlichkeit einer  
frühen Freisetzung  $<10^{-8}$ /Jahr

## Core Catcher:

Sicherer Einfang der Kernschmelze bei  
schweren Störfällen

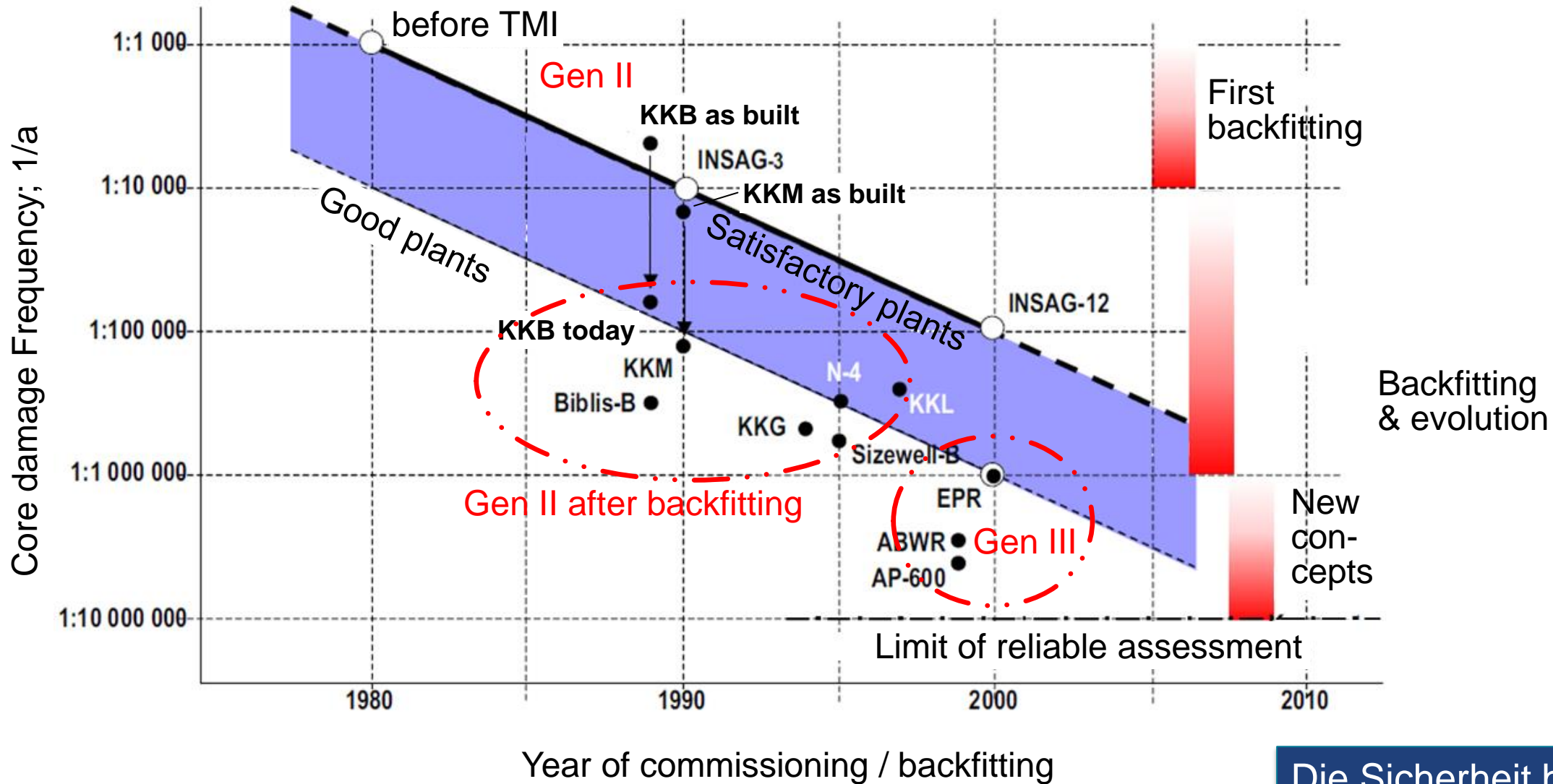
Erdbebensicheres Design ausgelegt  
für 100'000-jähriges Erdbeben

Grosser geschützter Wasservorrat innerhalb des  
Containments für die Beherrschung schwerer  
Störfälle





# Zuwachs des Sicherheit im Reaktor Design



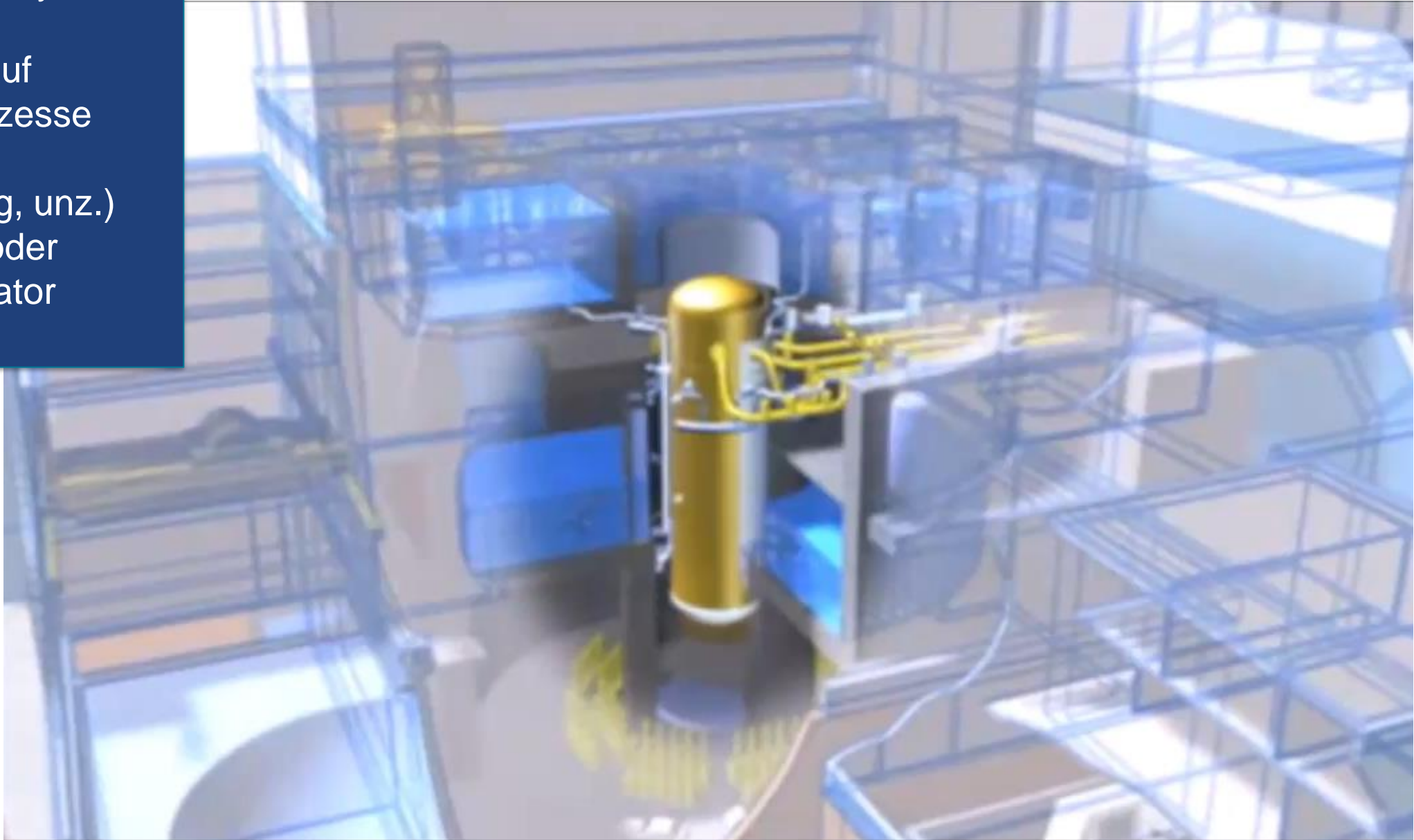
Die Sicherheit hat im Laufe der Jahre kontinuierlich und stark zugenommen

# Gen-III+

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 – 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

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

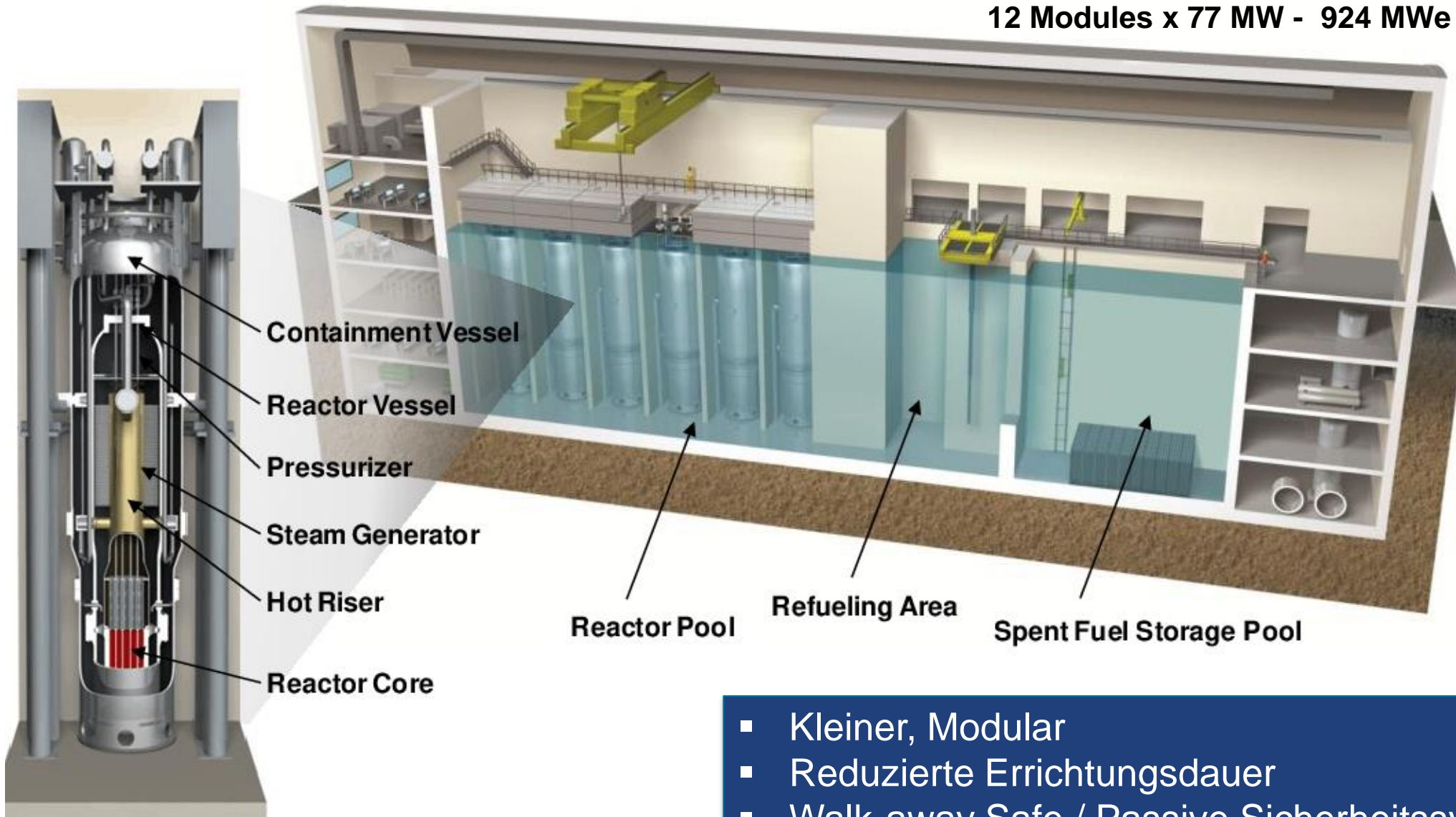
Wahrscheinlichkeit einer großen Veröffentlichung (LRF) *sehr klein* but  $\neq 0$



# Neue Entwicklungen im Reaktordesign

NUSCALE

12 Modules x 77 MW - 924 MWe



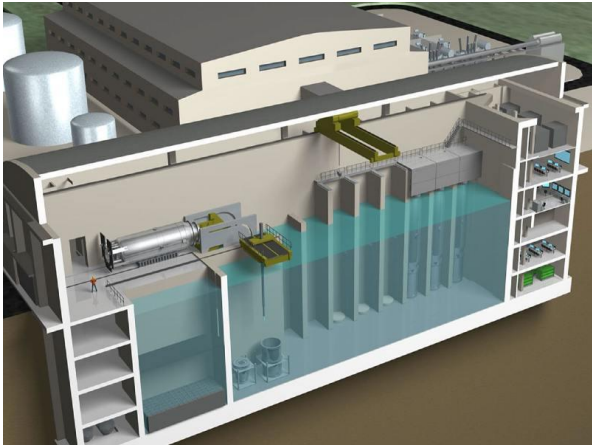
➤ US NRC  
Genehmigung  
seit Aug 2022

➤ In Utah ab  
2029

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



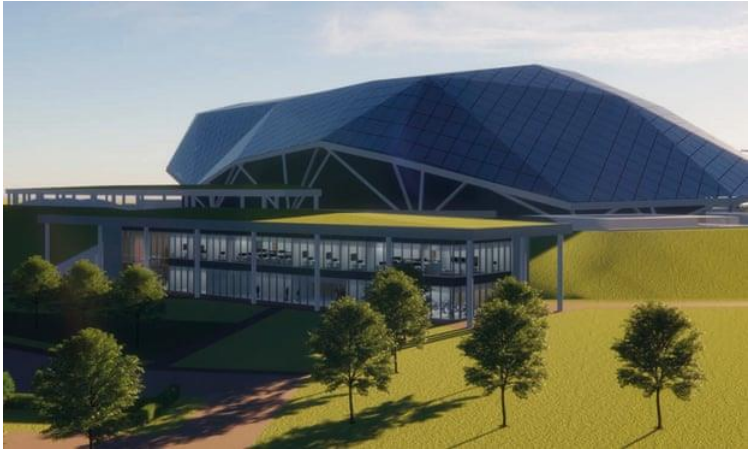
# Neue Entwicklungen im Reaktordesign – SMR (kleine modulare KKW)



NuSCALE (6x77 MW), für Utah, ab 2027



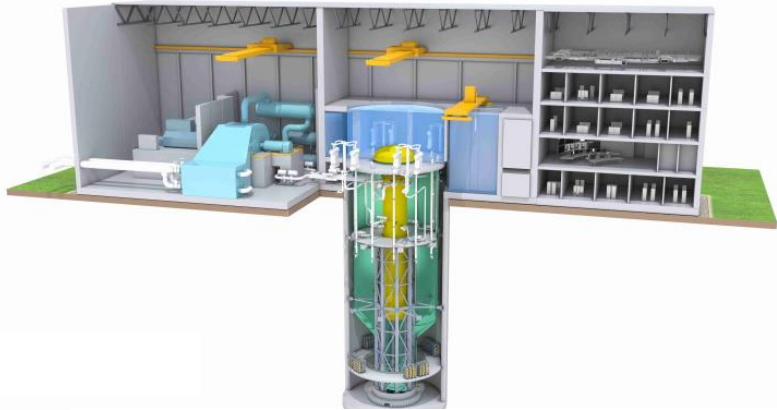
NUWARD (EdF/Technicatome), 170 MW, ab 2030



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

NUSCALE-Sperrzone: Umfang des KKW

# Neue Entwicklungen im Reaktordesign (Gen IV – Natrium)

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

Baugenehmigung soll 2023  
eingereicht werden (Wyoming)

TERRAPOW – 345 MWe  
1 GWh Energiespeicher



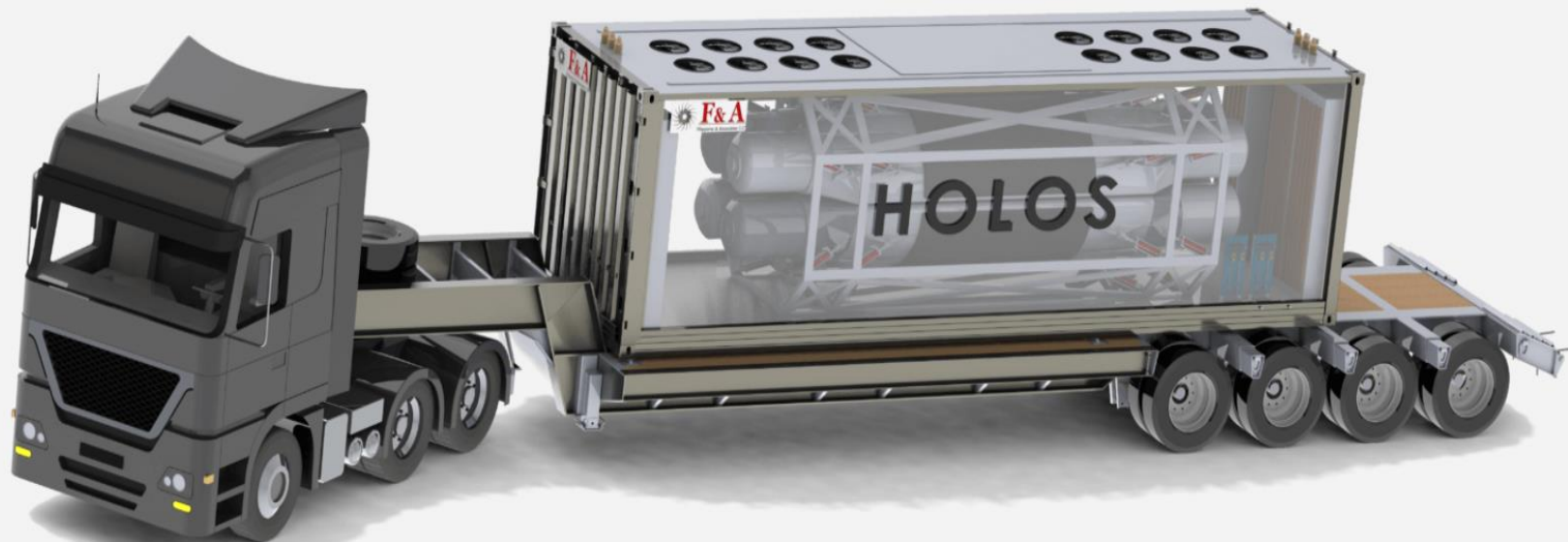
Brutreaktor!  
U238 als Brennstoff



# Microreaktoren

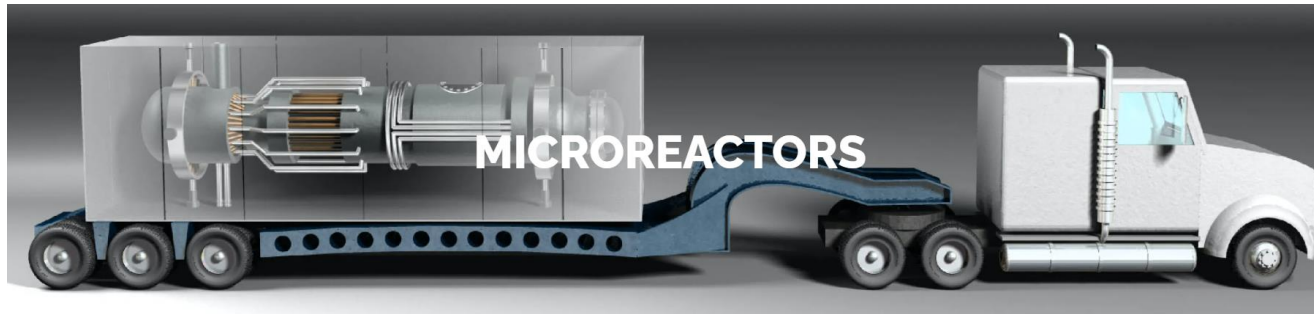


Erster Mikroreaktor im Bau.  
Inbetriebnahme im Jahr 2024 in  
Idaho (USA)



# 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**

**KOSTEN**



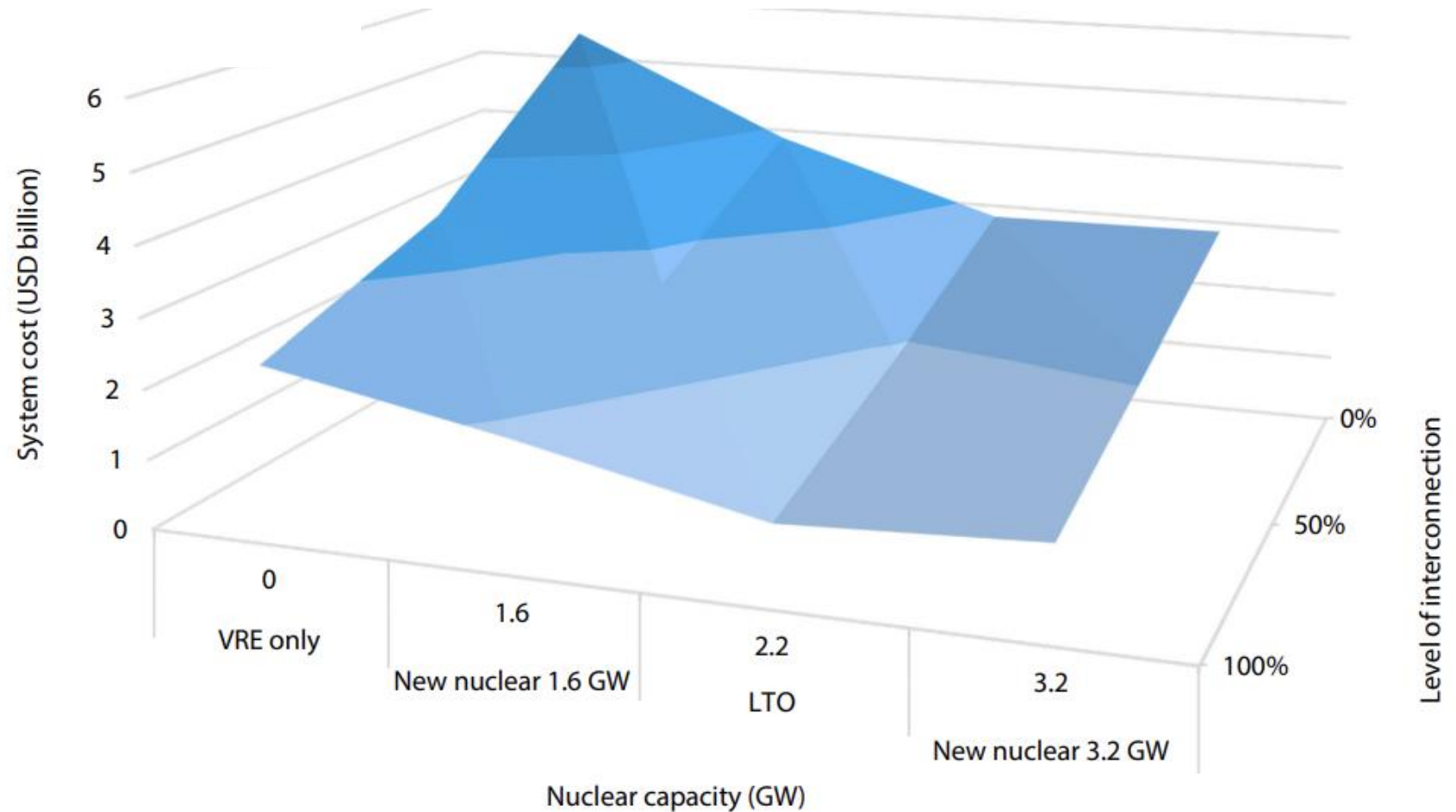
# Achieving Net Zero Carbon Emissions in Switzerland in 2050

Alle Kosten inbegriffen

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

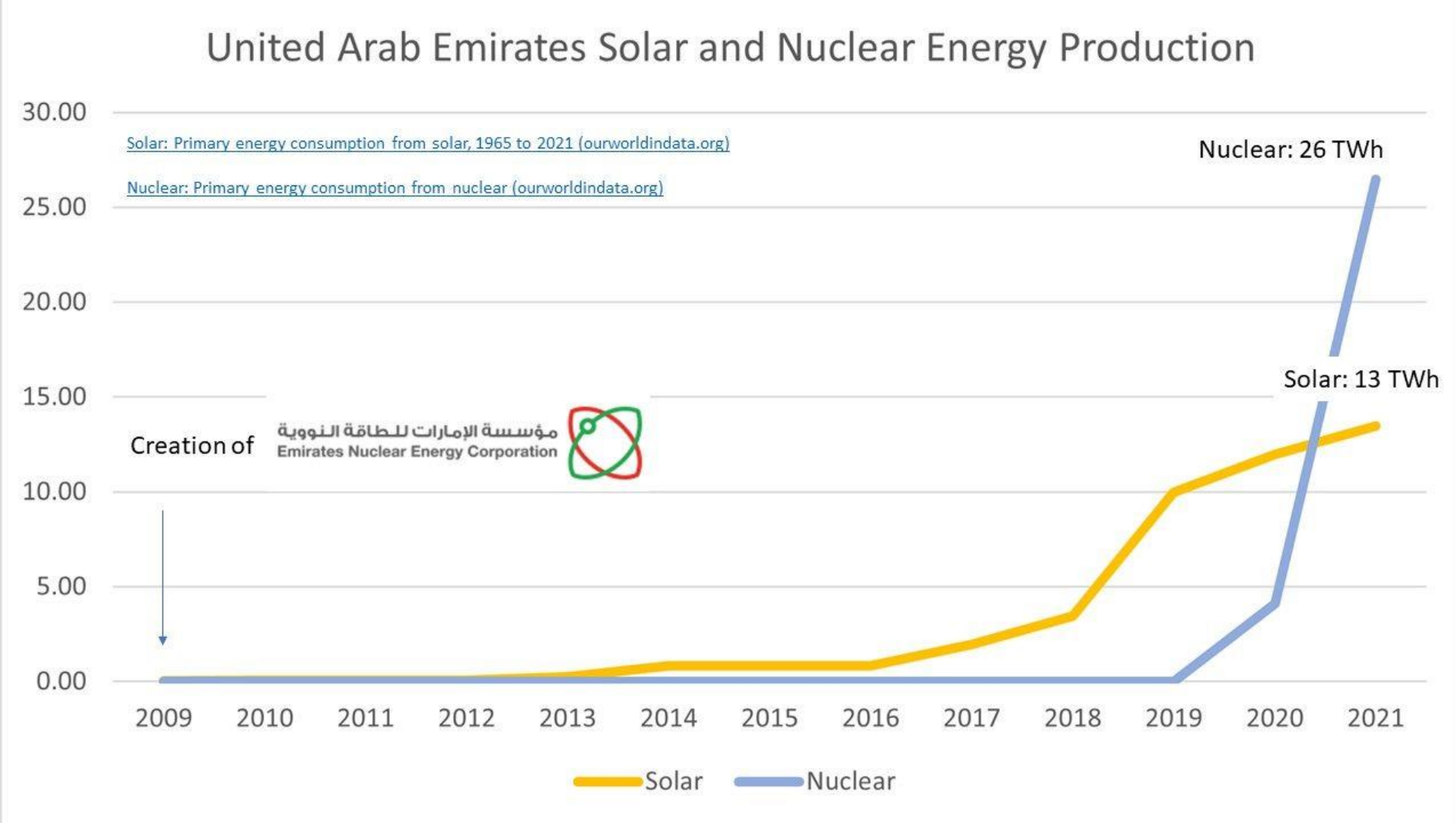
❑ 42 TWh/Jahr

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

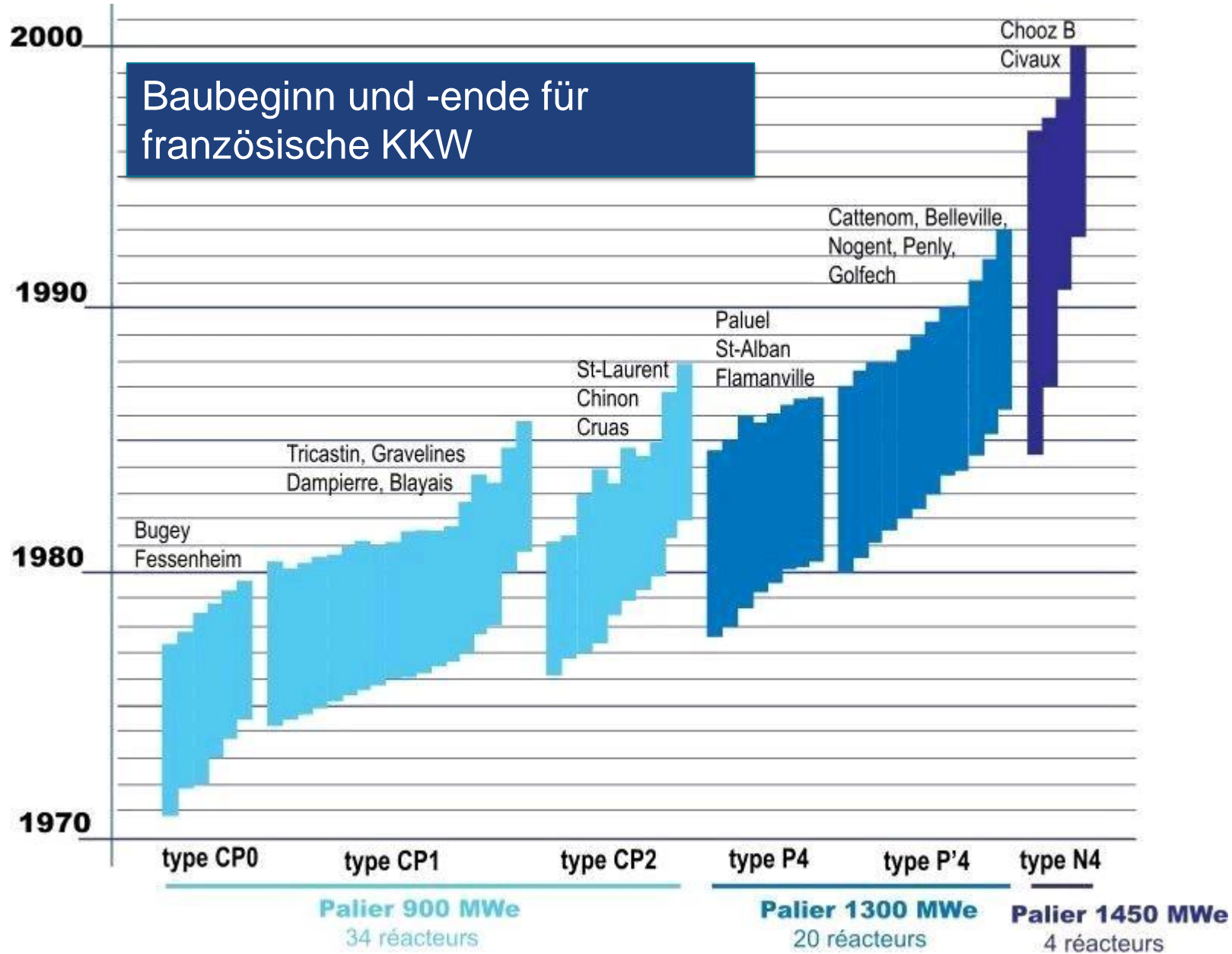
25 TWh/Jahr => 1000 Gondosolar  
Kosten: 45 Milliarden CHF (ohne Speicherung und Hochspannungsleitungen!)

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



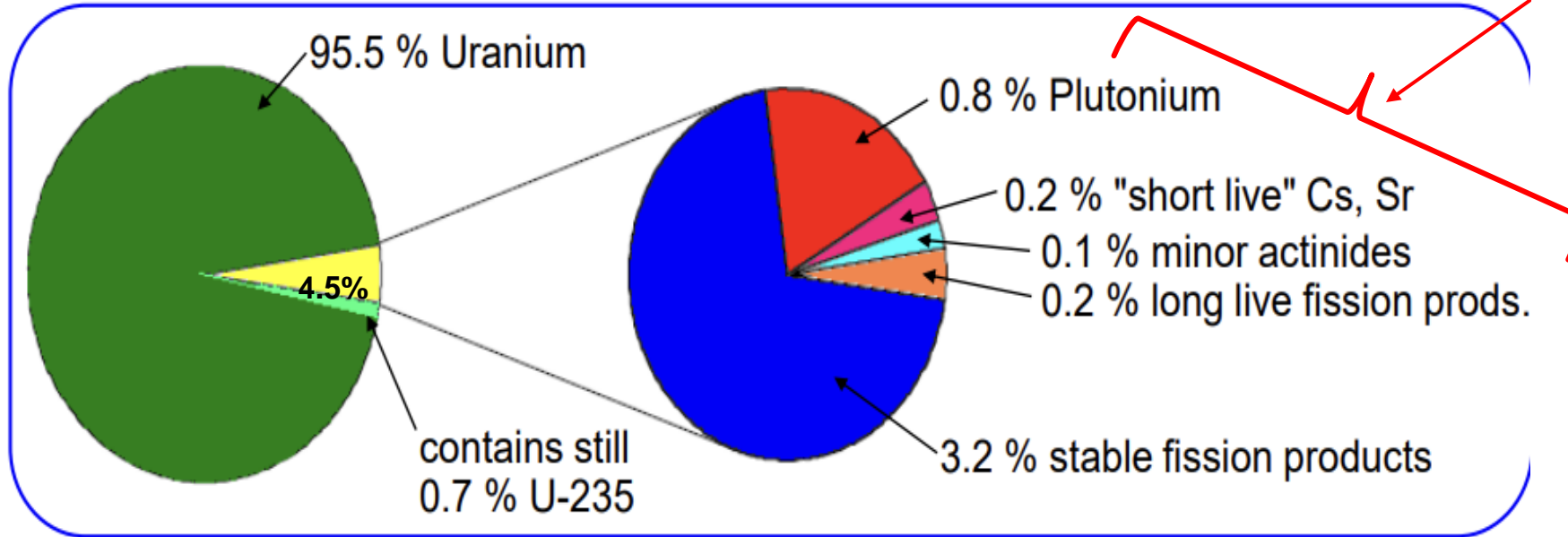
Lieferkette muss neu aufgebaut werden

**ABFALL**

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

Zusammensetzung abgebrannter Brennelemente

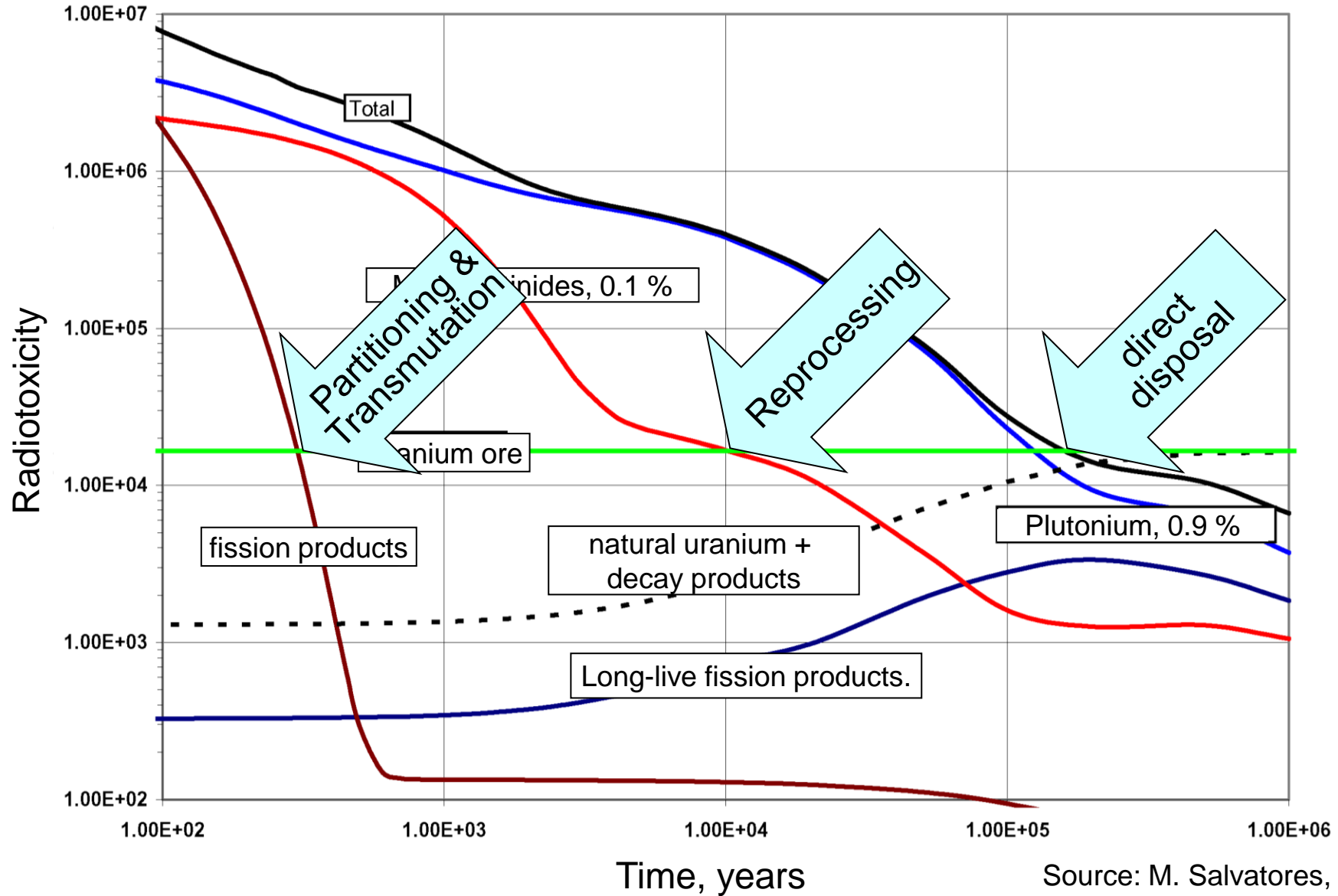
Nur 1,3% (!! ) des verbrauchten  
Brennstoffs sind hochradioaktiv



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

# Transmutation

## Reduction of radiotoxicity in spent fuel

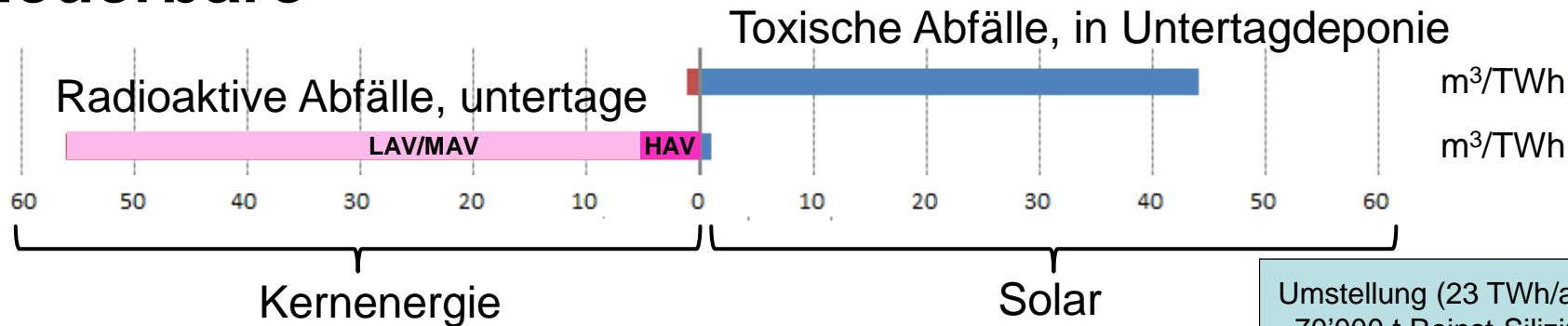


Source: M. Salvatores, CEA



# KE und Erneuerbare

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



Umstellung (23 TWh/a) → 70'000 t Reinst-Silizium

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)

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

Home ▶ Newsroom ▶ Polysilicon News ▶ Article

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

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

# 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 => over 30 years  $23.3 \cdot 30 = 699$  GWh

total energy over 30 years

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

## KKG

1 FA => 666 kg

33 FA exchanged per year =>  $33 \cdot 666 / 1000 = 21.98$  tons in a year

8 TWh produced in a year

SPENT FUEL WASTE =>  $21.98 / 8 = 2.75$  tons/TWh

(+ Stilllegungsabfälle)



# Endlager

Deponie innerhalb 300 m  
Salzschicht.

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





## Abfall im Tiefenlager:

### Radioaktiv ↔ Chemisch-toxisch

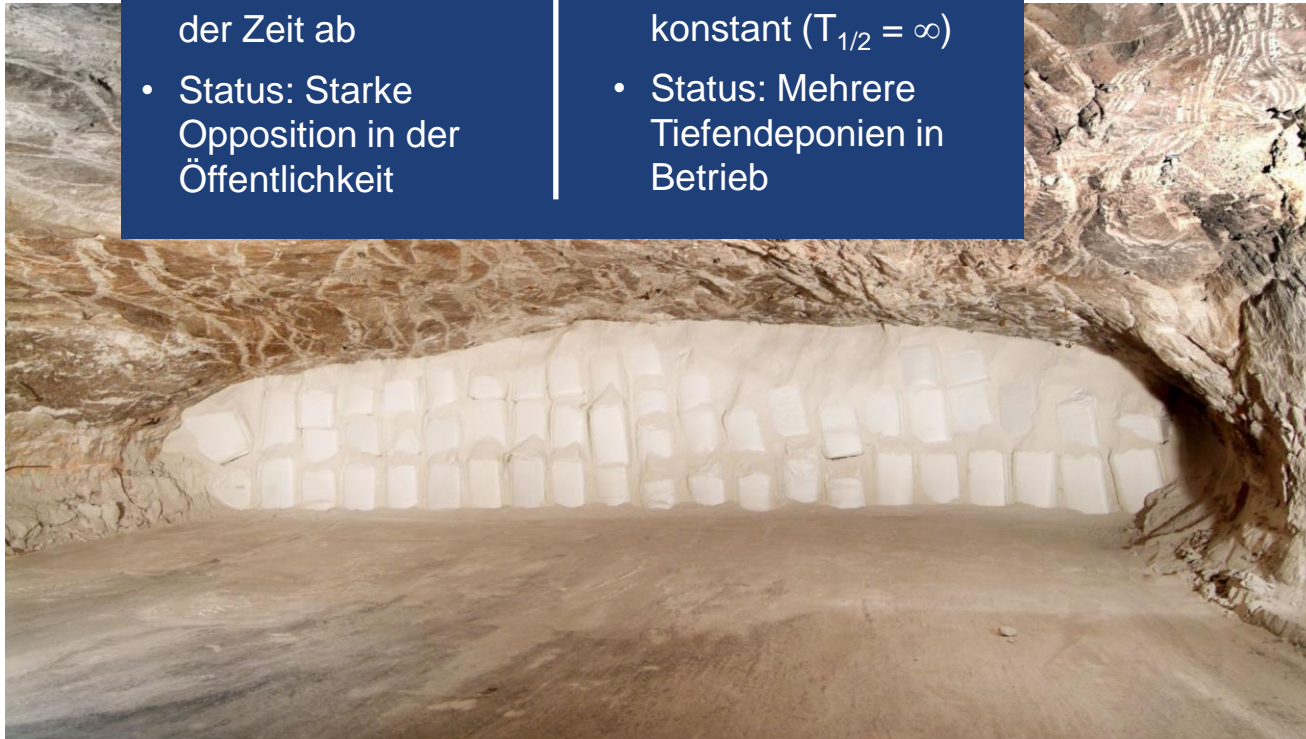
- Unterschiedliche Schädigungsmechanismen (chemisches Gift, interne Strahlenwirkung)
- Vergleichbare Wirkung im Organismus (akut giftig bzw. krebserregend)
- Identischer Ausbreitungs- und Expositionspfad (über Nahrungsketten und Trinkwasser)
- Toxizität fällt mit der Zeit ab
- Status: Starke Opposition 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

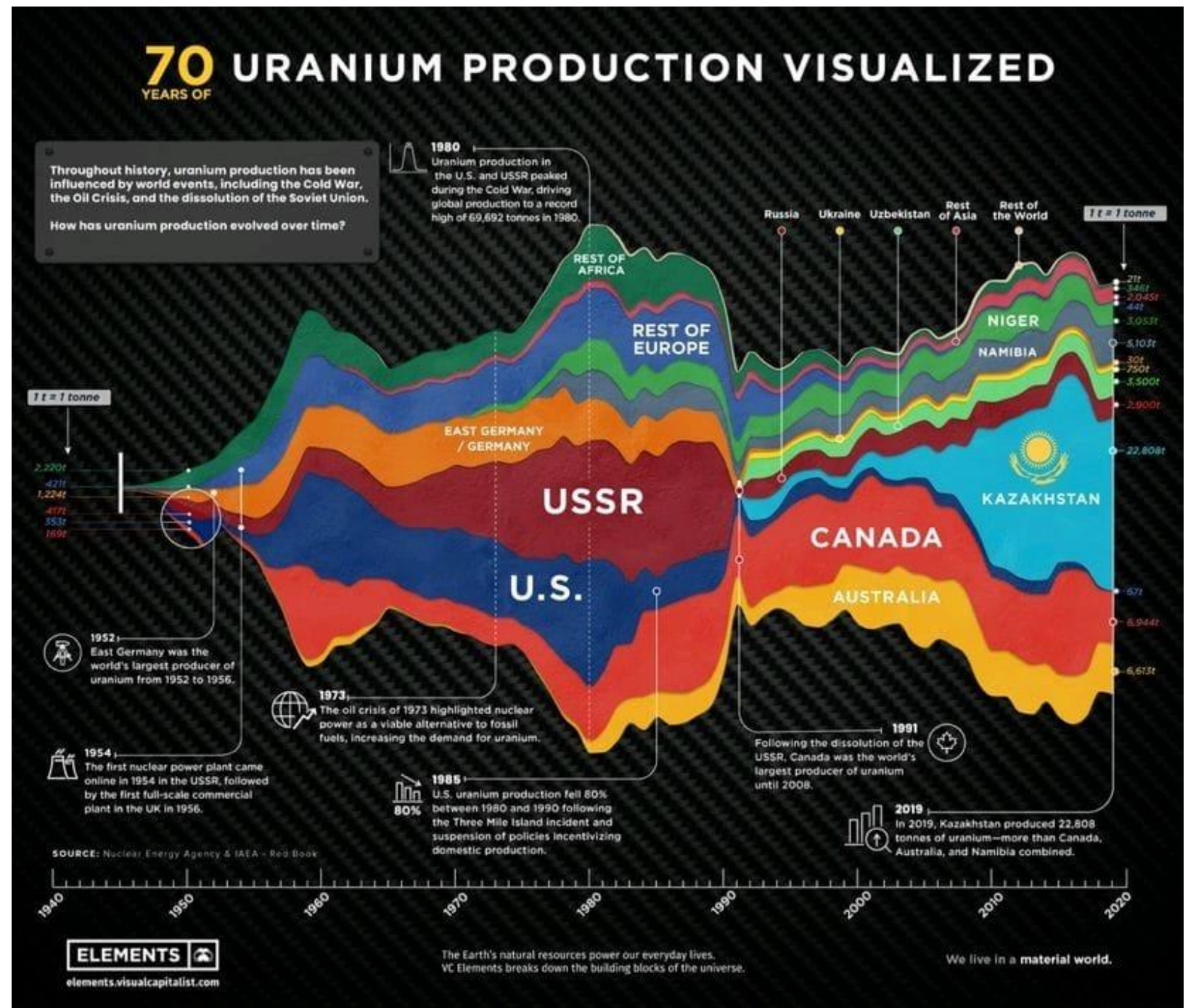


# Uran Ressourcen

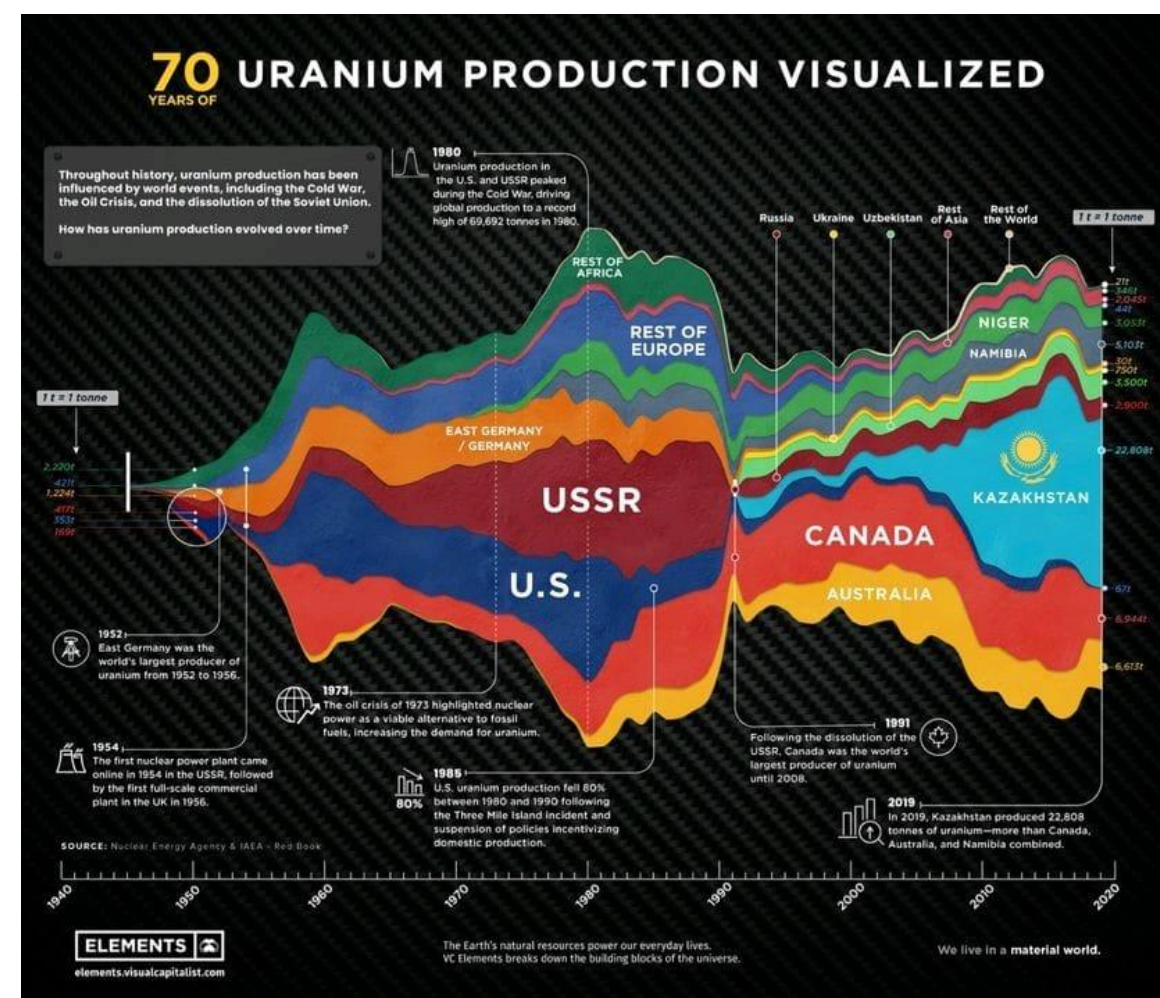
Die größten Uranproduzenten sind:

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%

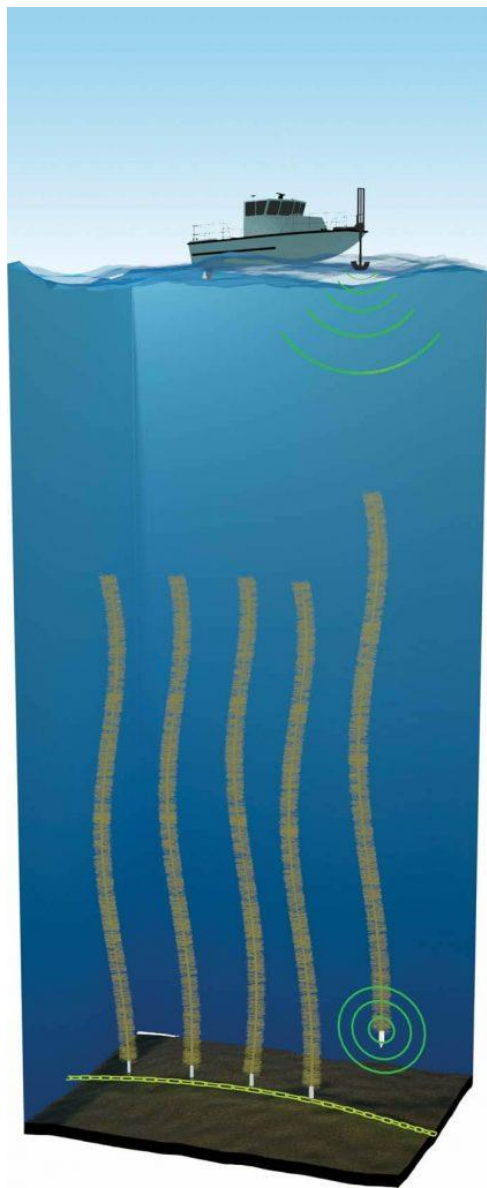
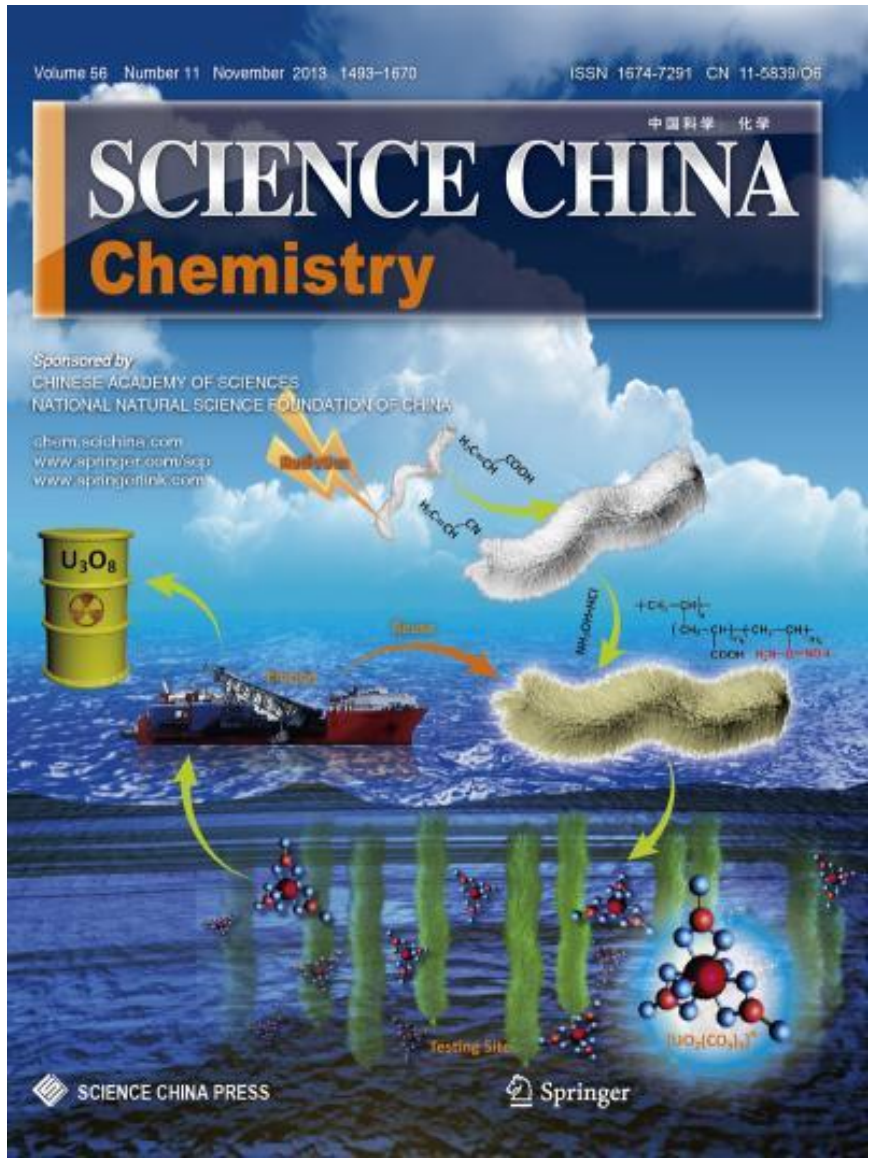
} 42.8%  
Derzeit werden die Kapazitäten erweitert

Source: World Nuclear Association [138].



# Ist Kernenergie erneuerbar?

Uran im Meerwasser ist erneuerbar

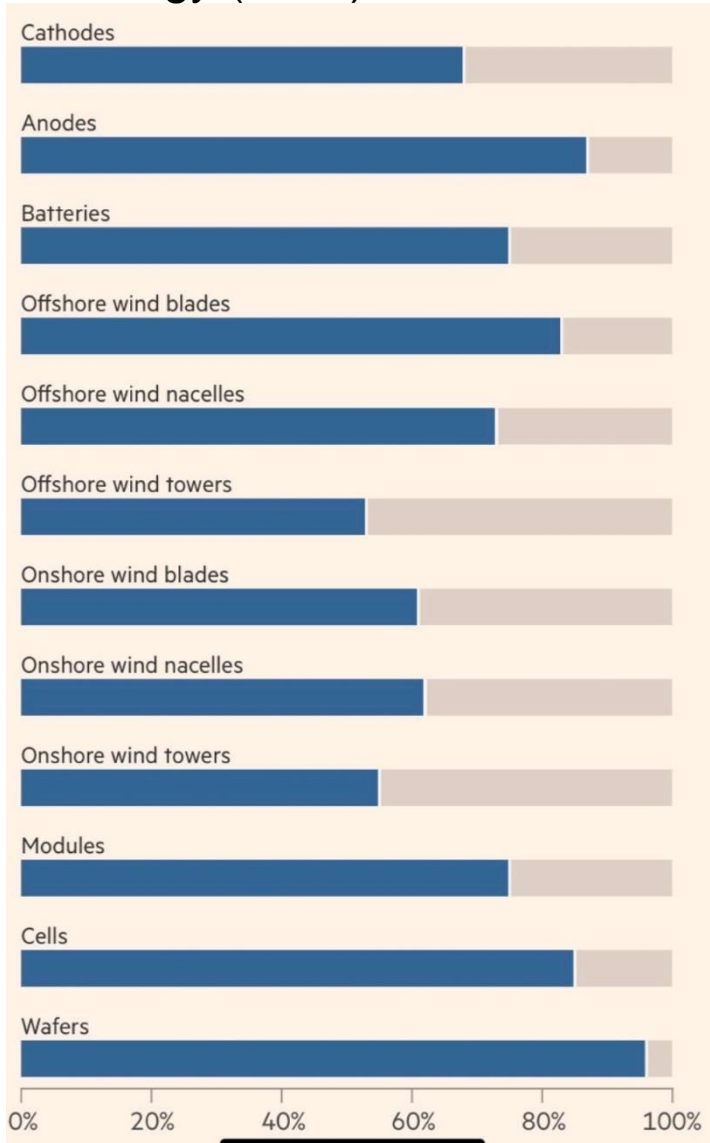


4,5 Milliarden Tonnen Uran im Meerwasser

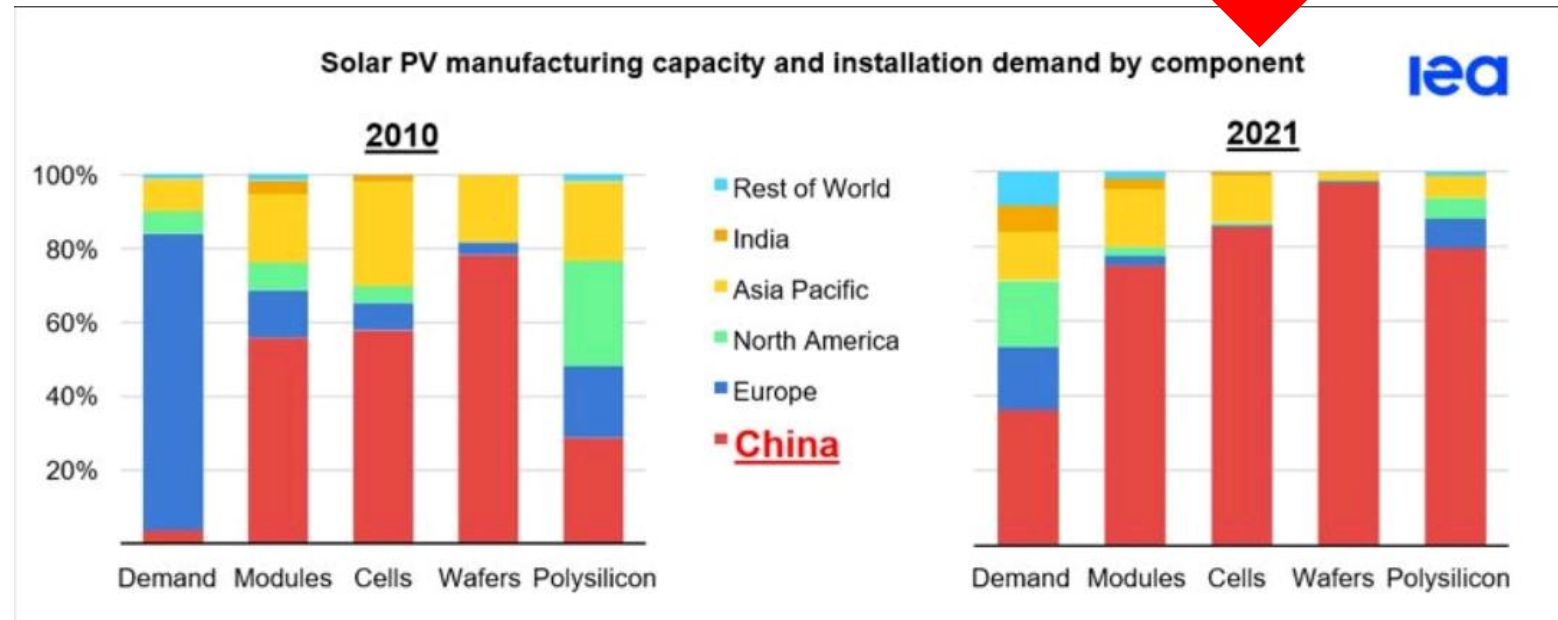
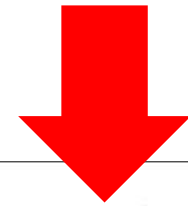
Uran im Meerwasser wird durch stationäre chemische Reaktionen zwischen dem Wasser und uranhaltigen Gesteinen kontrolliert, so dass immer dann, wenn Uran aus Meerwasser extrahiert wird, die gleiche Menge aus dem Gestein ersetzt wird.

# 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!

# 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