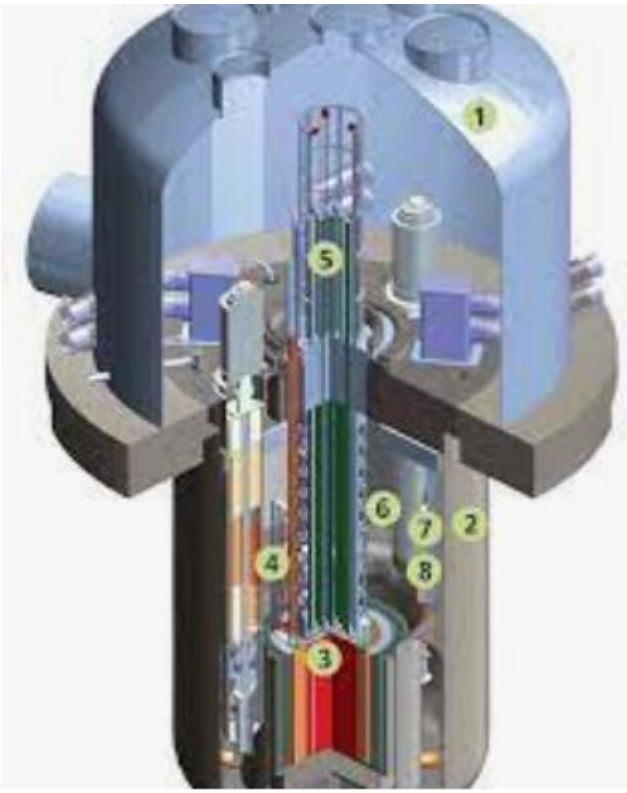
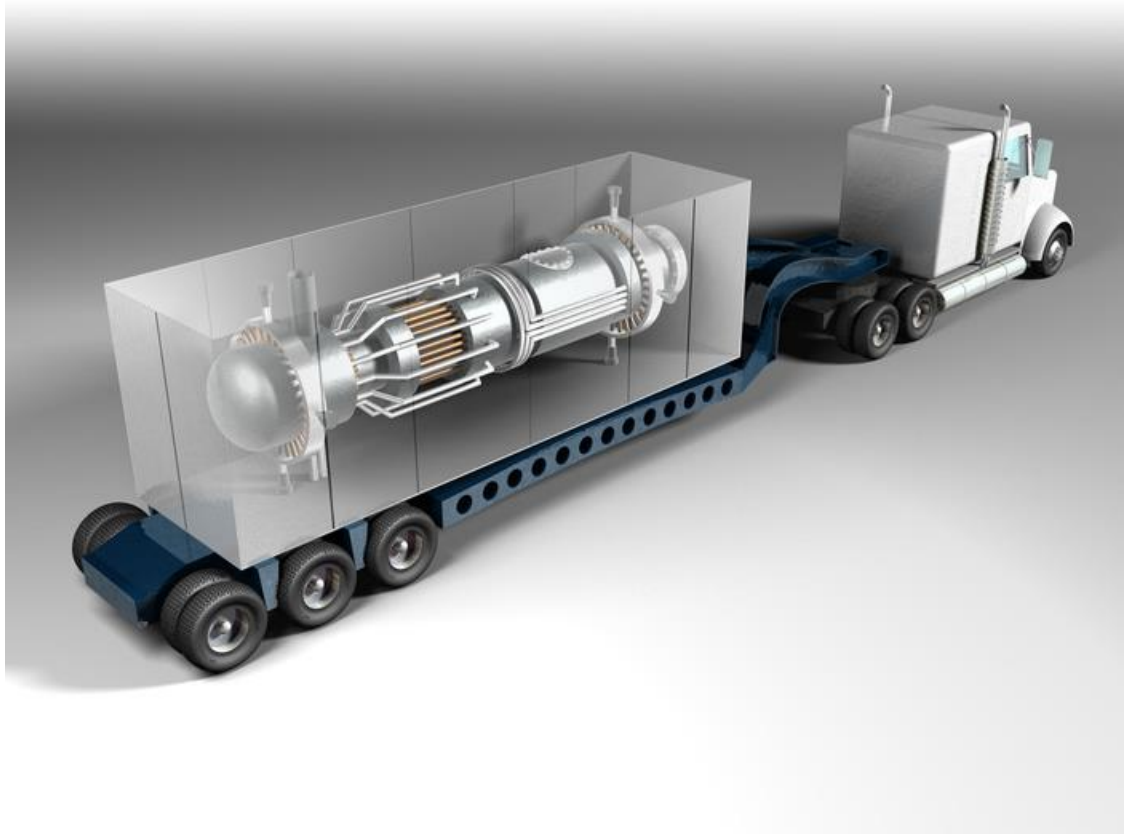




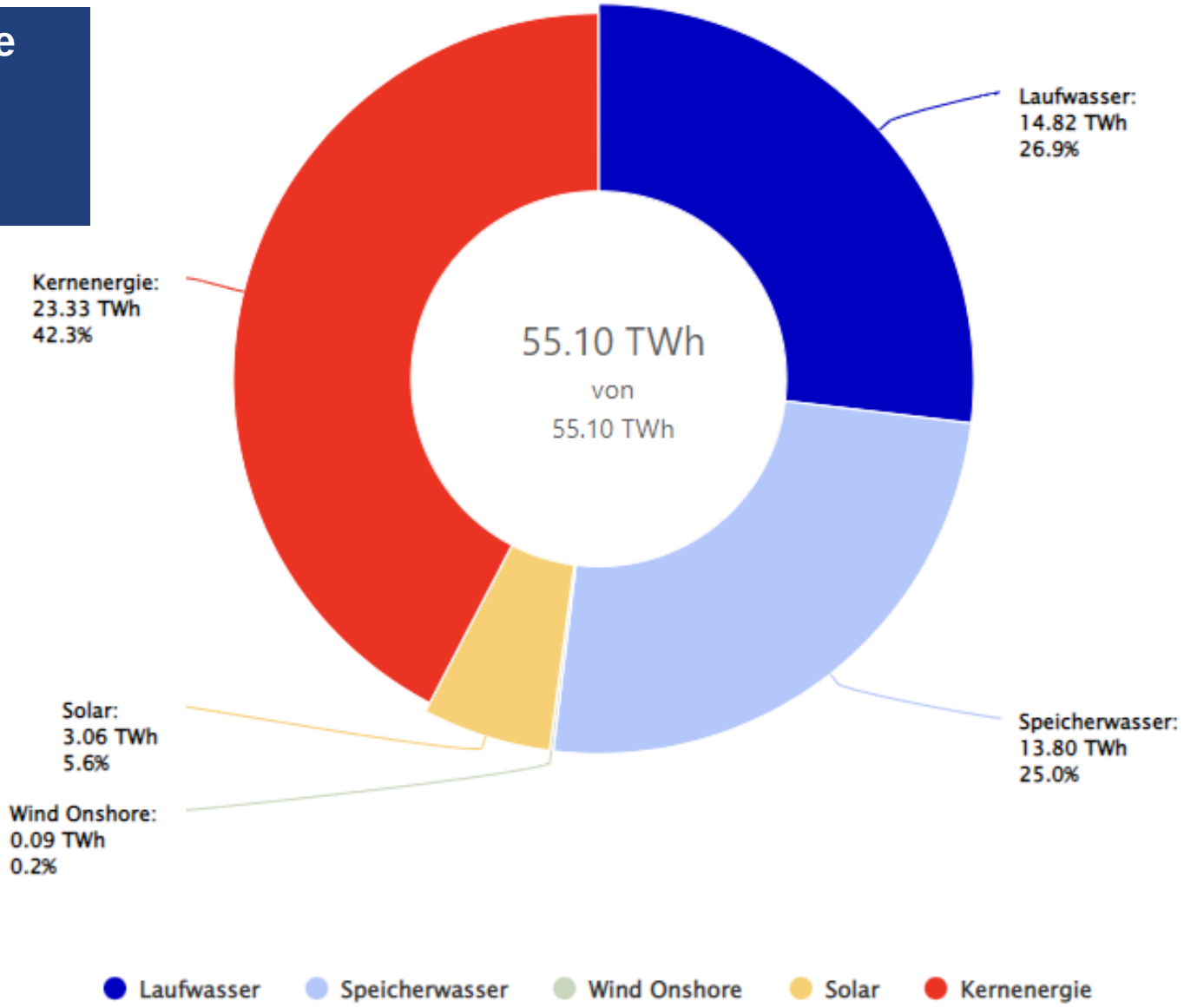
Kernenergie – Heute und in Zukunft

Annalisa Manera

Informationsveranstaltung zum Thema Energie
13.01.2023, Sarnen

Nettostromerzeugung in der Schweiz 2022

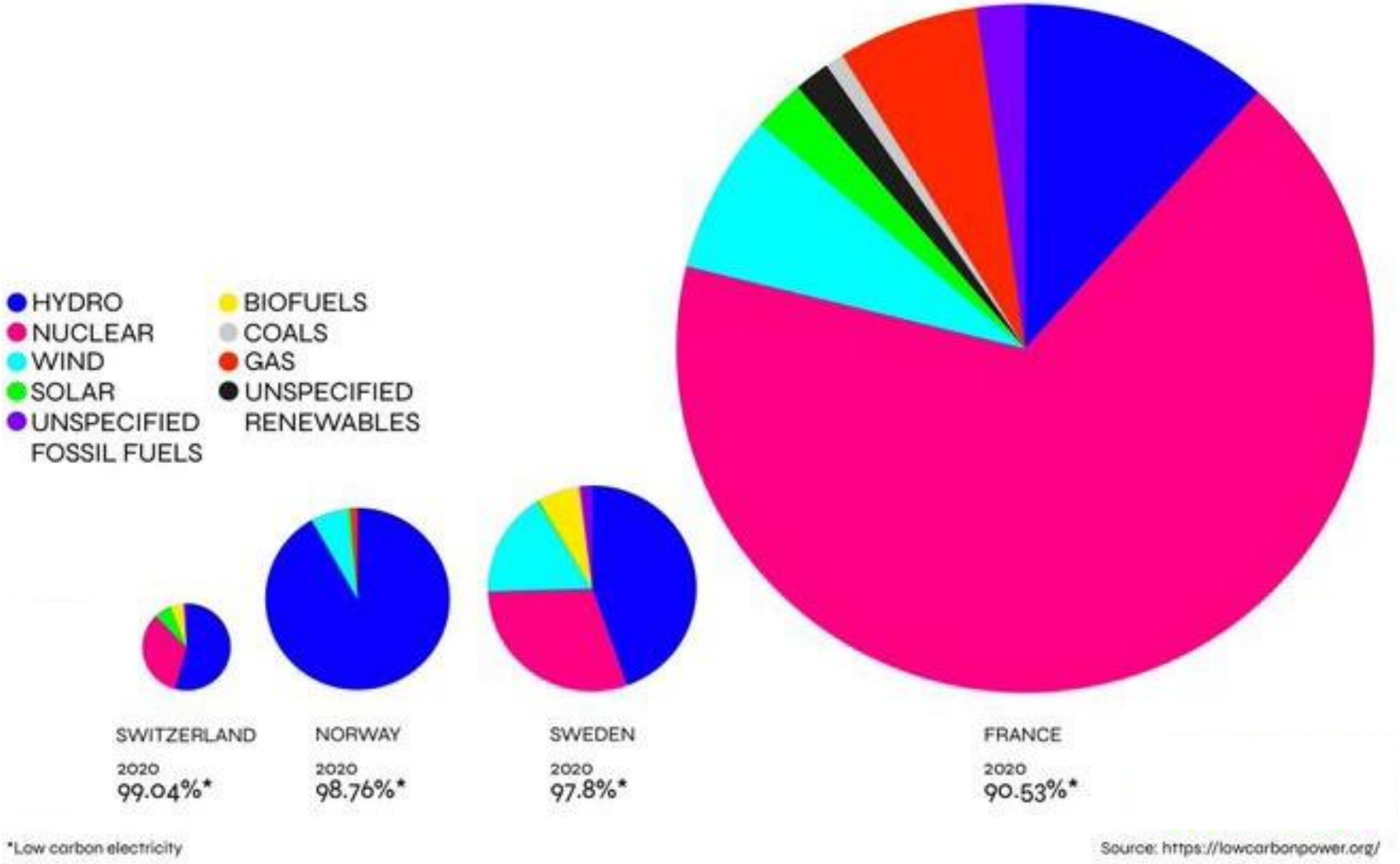
Beitrag der Kernenergie zur Stromproduktion in der Schweiz: mehr als 42%



Source: www.energy-charts.info/

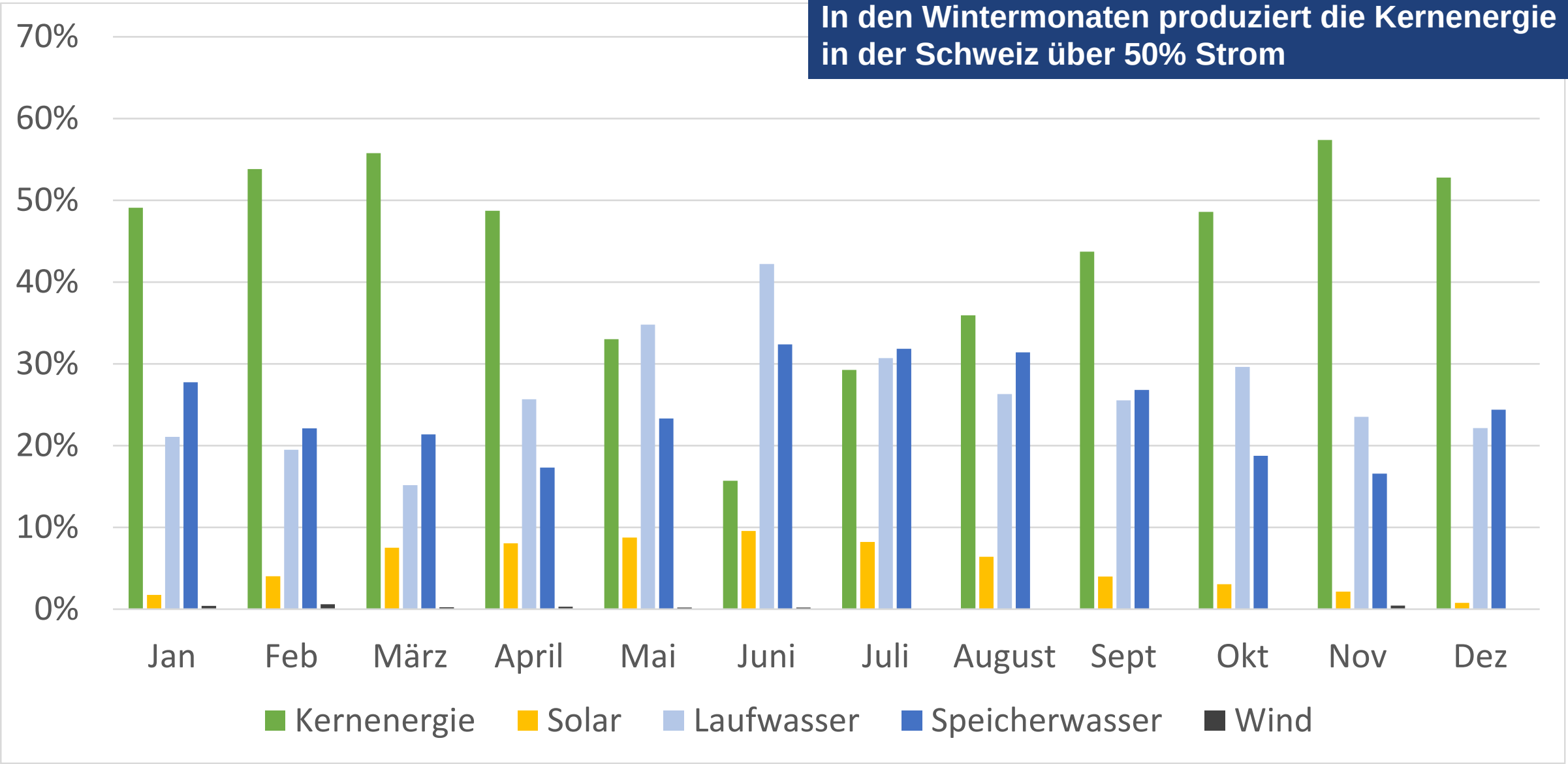
Die Stromproduktion in der Schweiz ist bereits CO2-frei

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



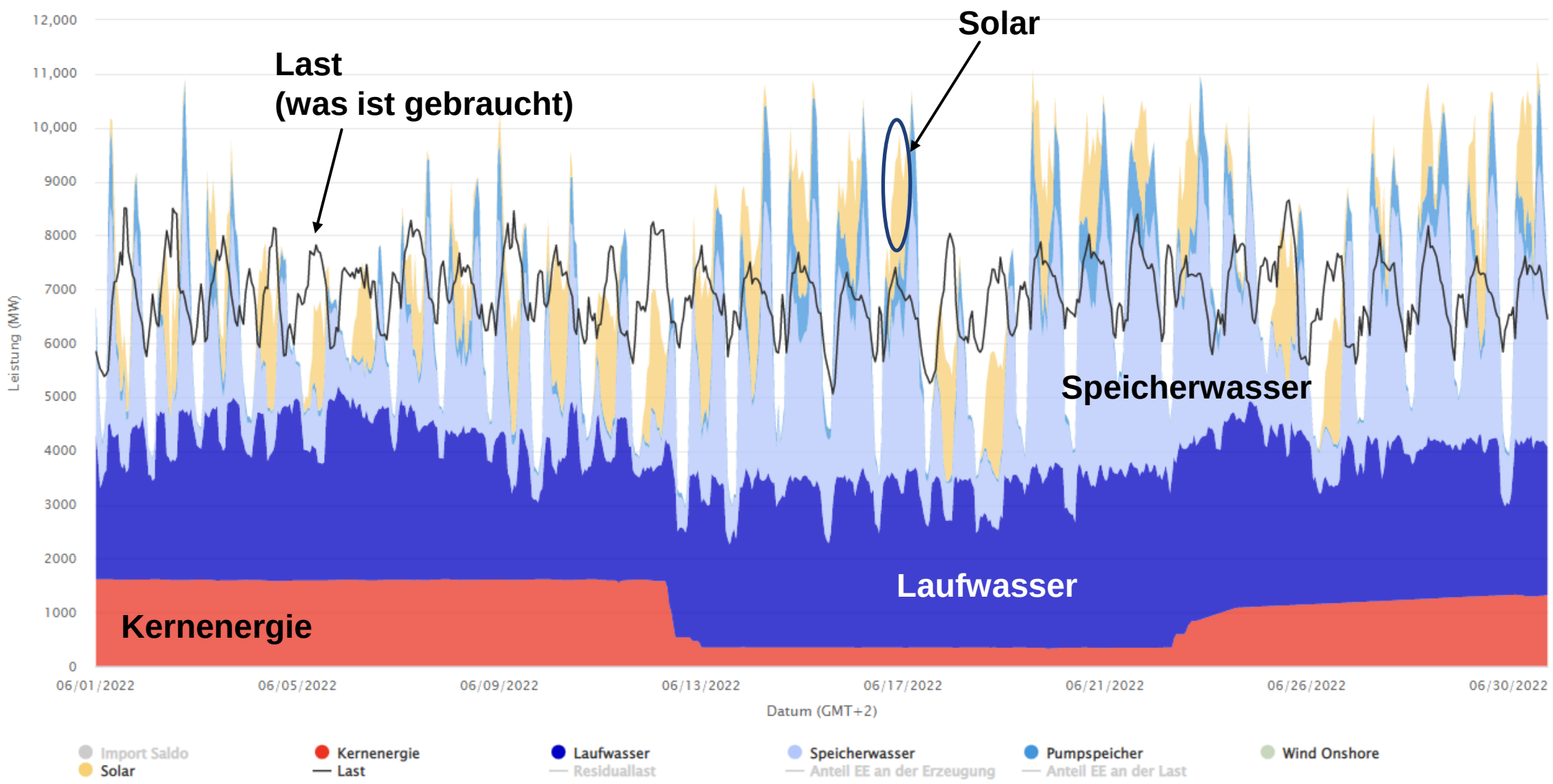
Nettostromerzeugung in der Schweiz 2022

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



Source: www.energy-charts.info/

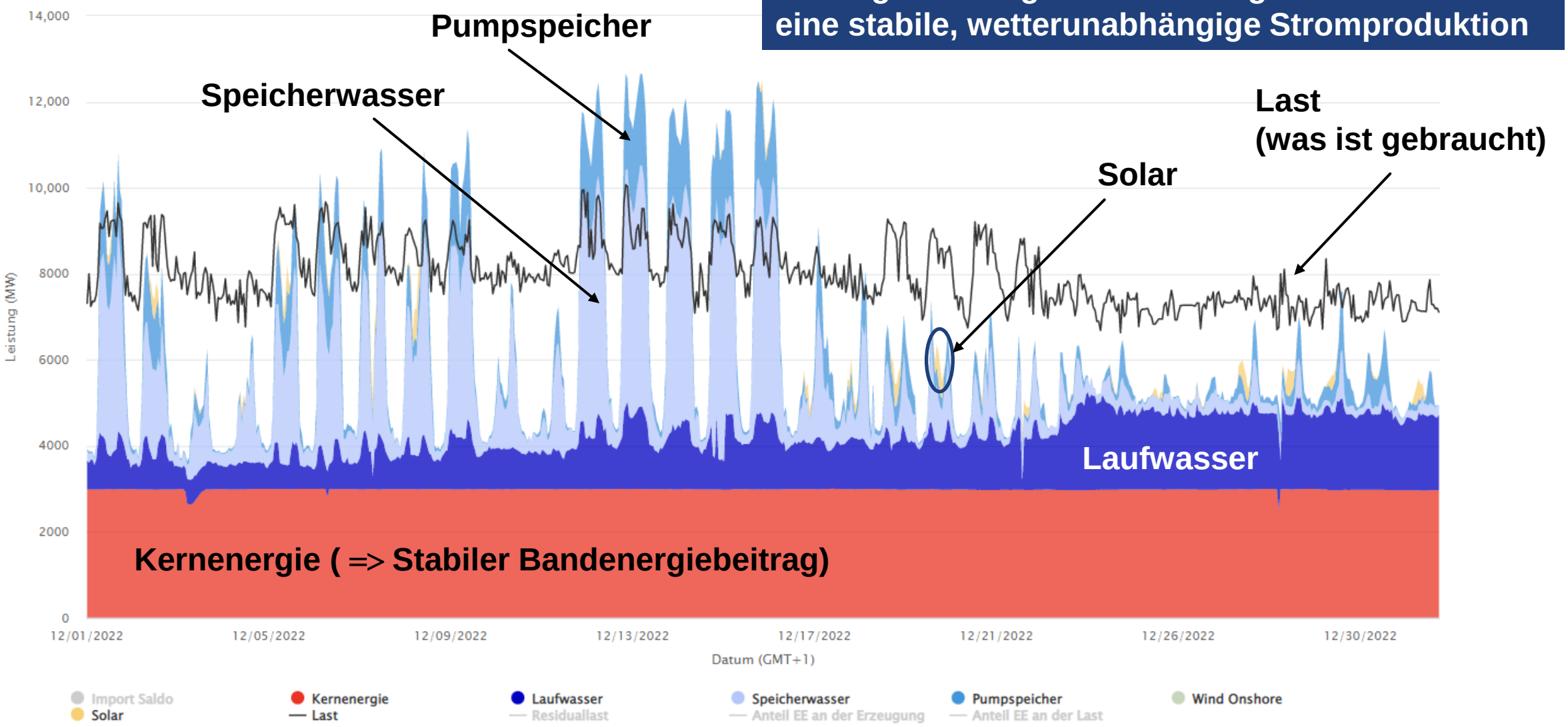
Nettostromerzeugung in der Schweiz – Juli 2022



Source: www.energy-charts.info/

Nettostromerzeugung in der Schweiz – Dezember 2022

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

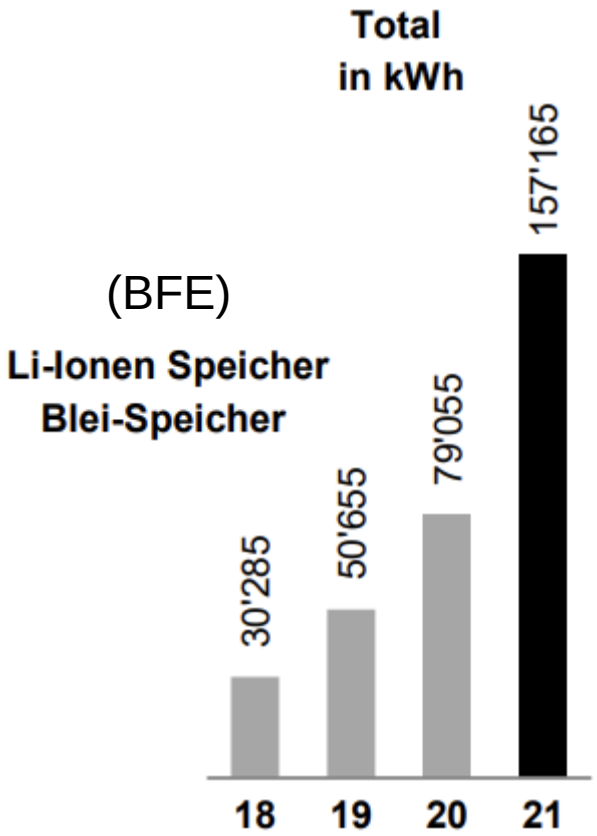


Last größer als Produktion => Importbedarf

Source: www.energy-charts.info/

Ein Blick auf die Zahlen...

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

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.

Ein Blick auf die Zahlen...

In den Nachrichten vom 22.11.2022

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

axpo

Mega-Investition in den Alpen

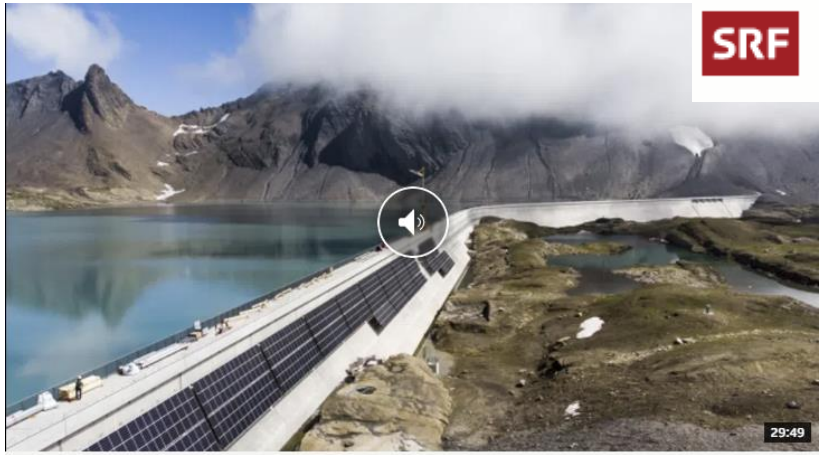
Axpo baut für 1,5 Milliarden Franken Solaranlagen

Blick

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

SRF



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

Ein Blick auf die Zahlen...

Axpo Plan - bis 2030 1.2 GW installierte Leistung Solar

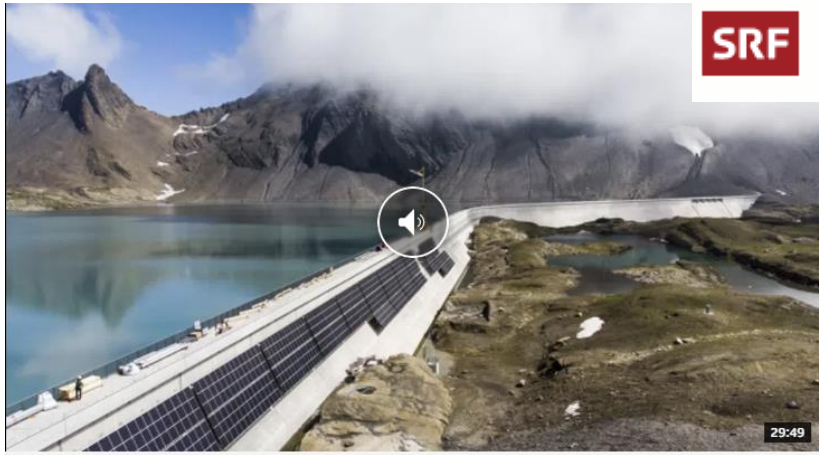
Energie Produktion: 1.5 TWh/Jahr

Anlagenkosten: CHF 1.5 Milliarden

BFE Scenario

Jahr	TWh
2032	10
2039	20
2050	33.5

BFE Scenario:
bis 2032 sollen 10 TWh/Jahr Solar gebaud werden



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

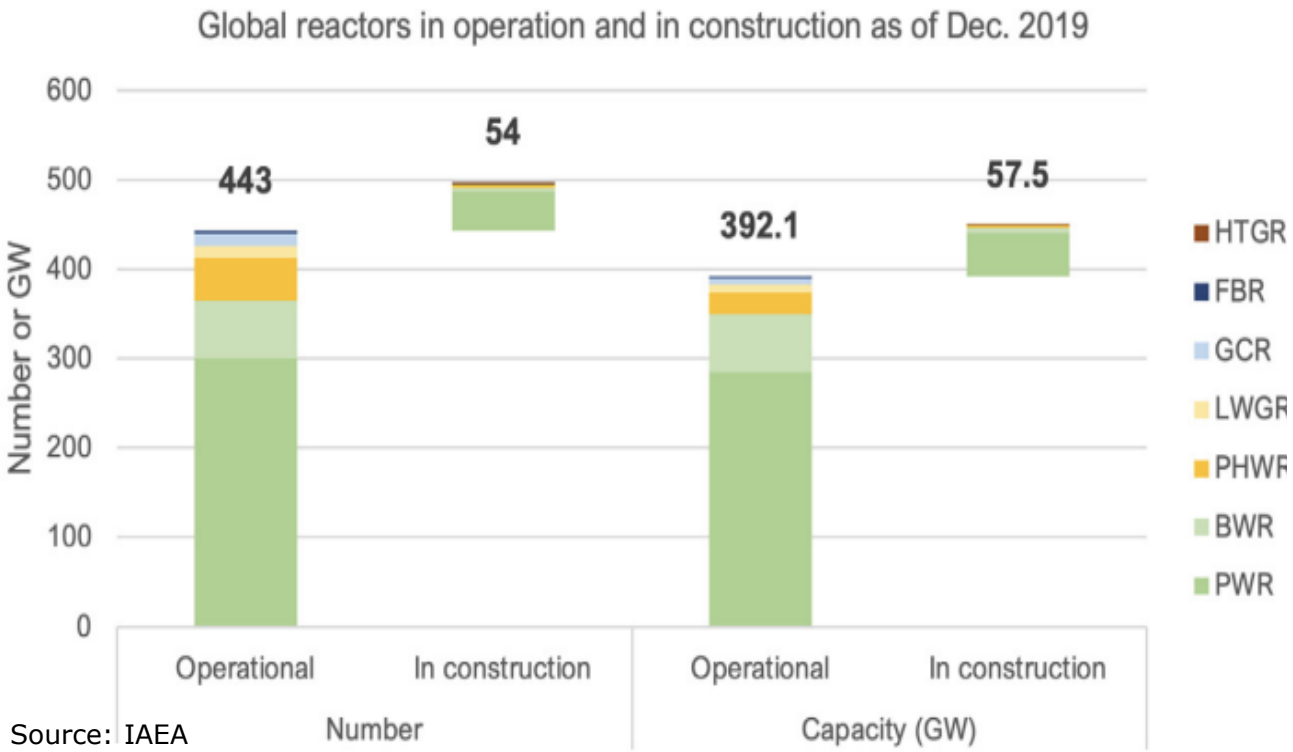
Mega-Investition in den Alpen

Axpo baut für 1,5 Milliarden Franken Solaranlagen Blick

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

Kernenergie Weltweit

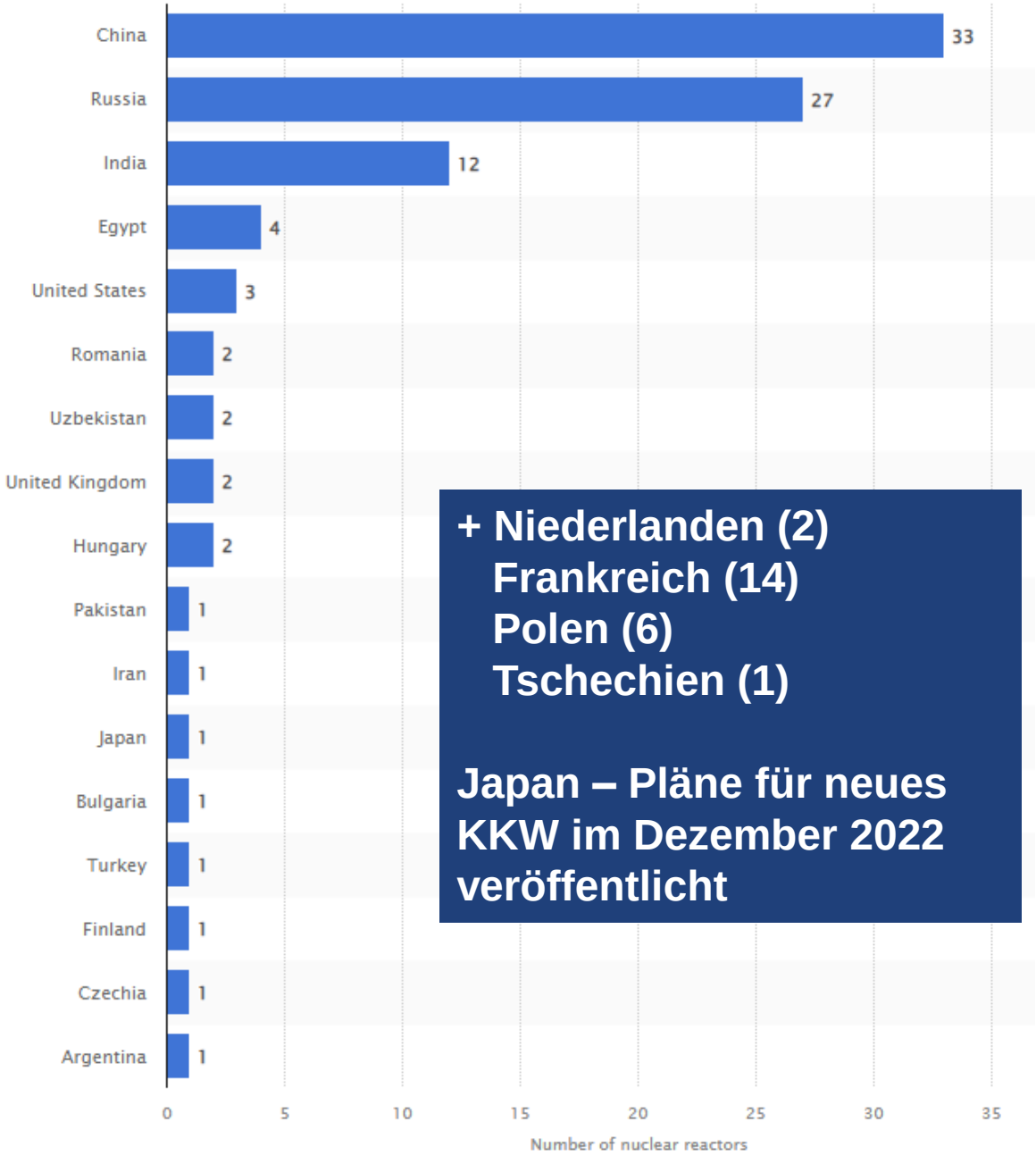


Source: IAEA

Europa:
180 KKW in Betrieb (159.36 GW)

Weltweit:
443 KKW in Betrieb
54 KKW im Bau

Geplant KKW



+ Niederlanden (2)
Frankreich (14)
Polen (6)
Tschechien (1)

Japan – Pläne für neues KKW im Dezember 2022 veröffentlicht

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)

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

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)

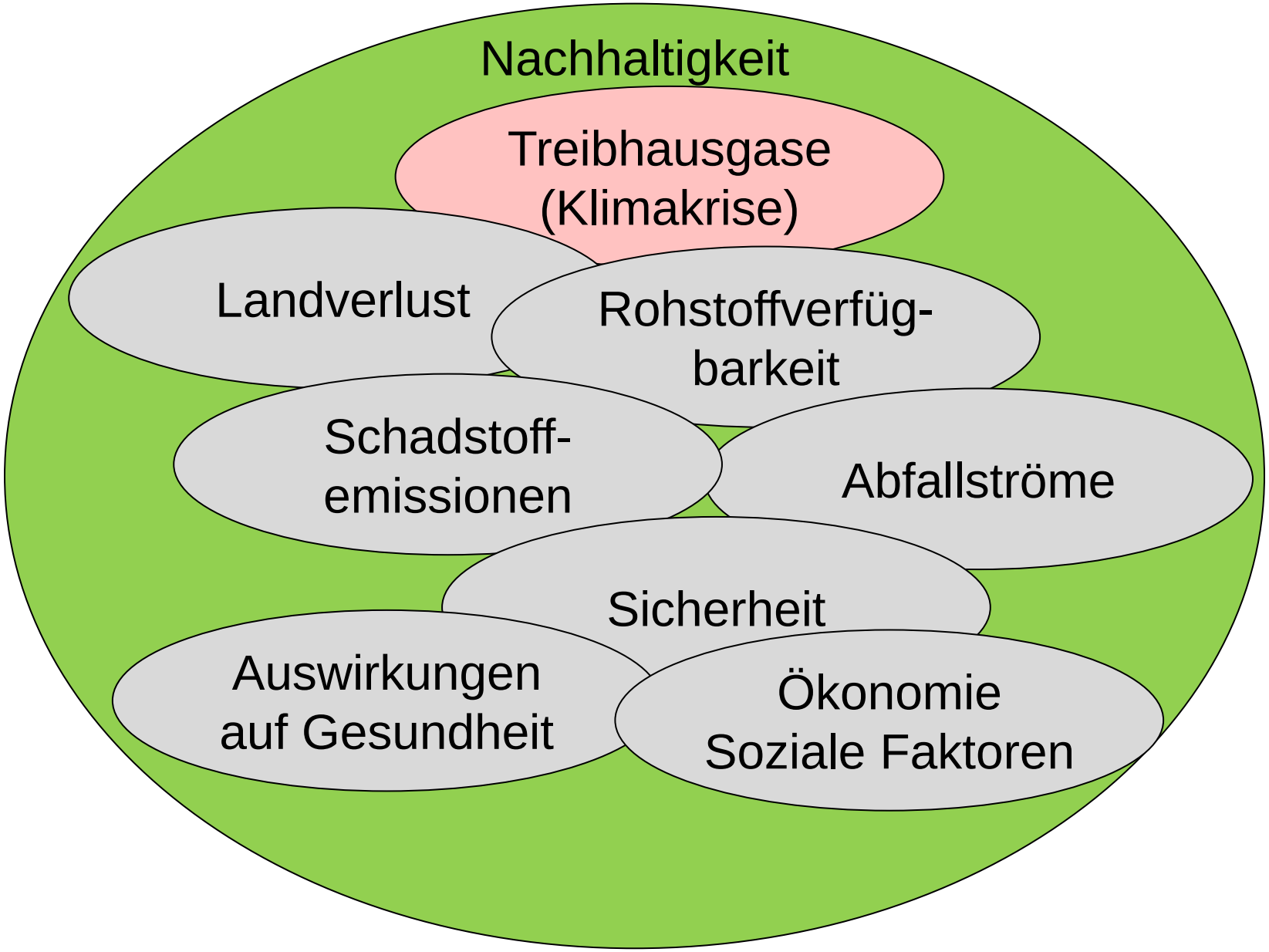
2023 **UAE:** 4 KKW in Betrieb, 5.3 GWe (KEPCO/Südkorea)

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

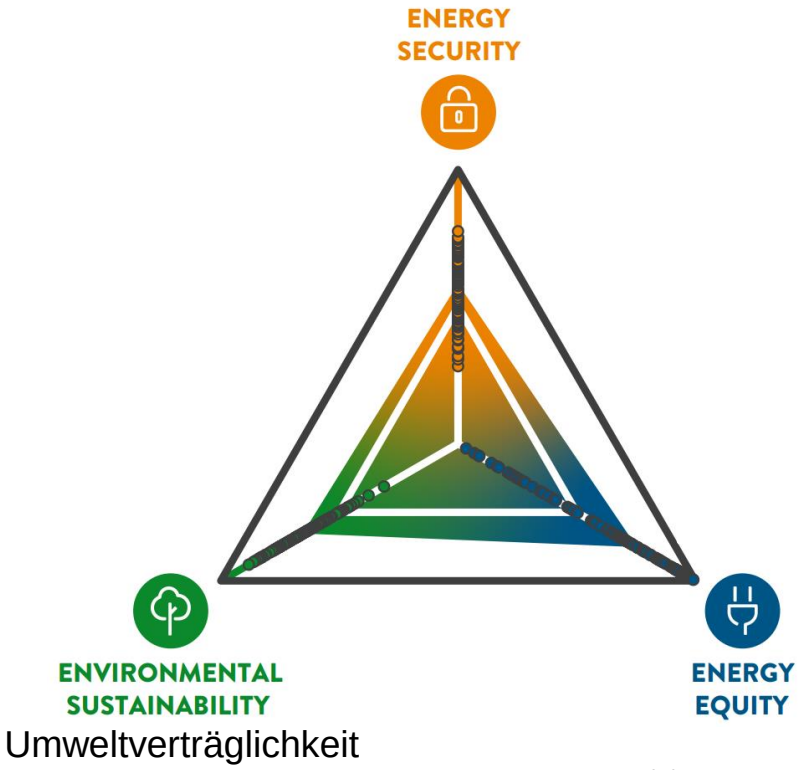
2023 **USA**: Net-zero nicht möglich ohne Kernenergie. Neue KKW in Betrieb seit 2016.
2 neue KKW im 2022 fertiggestellt, mehrere SMR geplant.

China, Kanada, Indien, enz.

Warum Interesse an Kernenergie?
Nachhaltigkeit und Energie-Trilemma



Energy trilemma



Umweltverträglichkeit

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

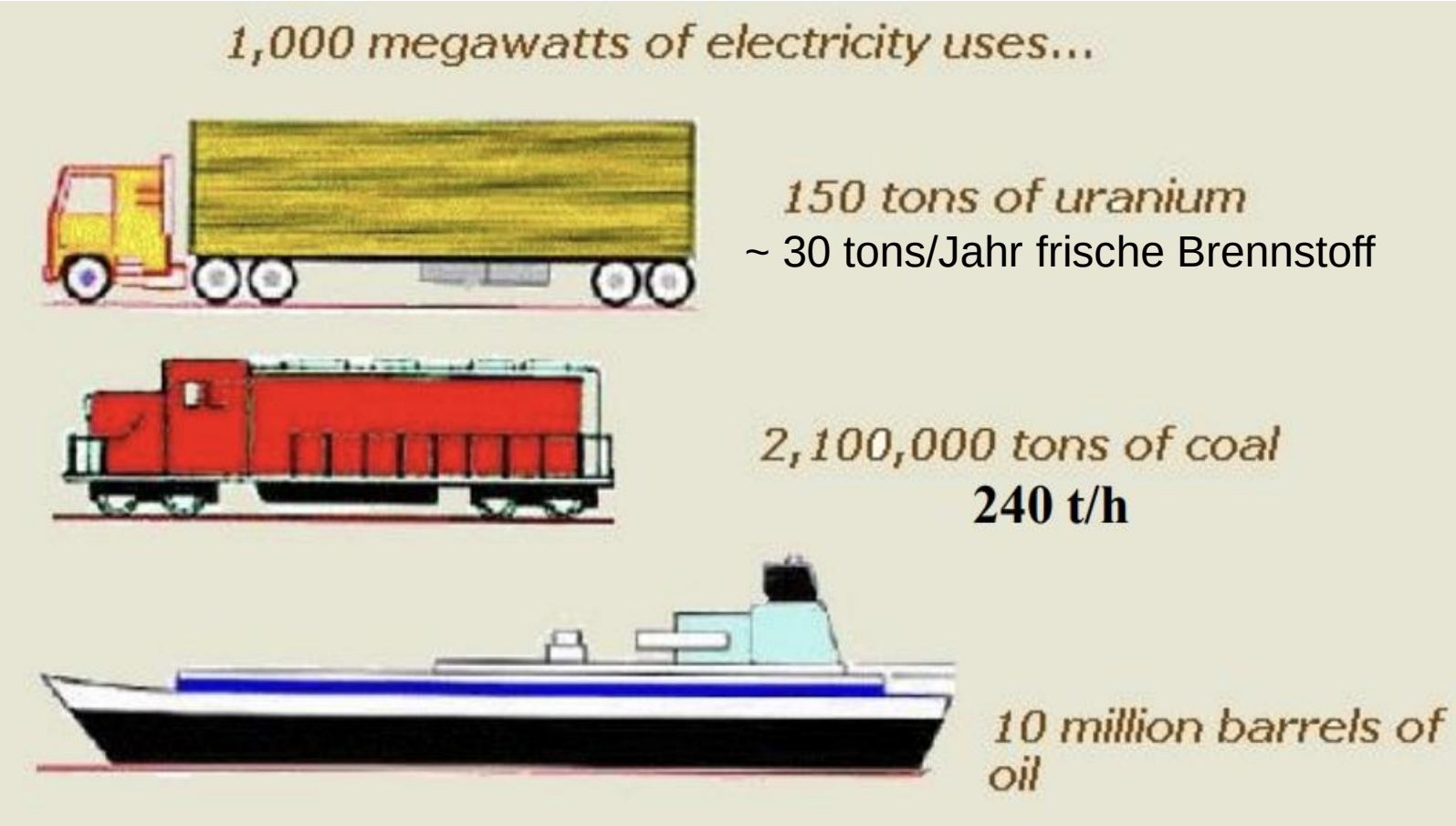
Eine Kernreaktion erzeugt > 1,000,000 mal mehr Energie als eine chemische Reaktion

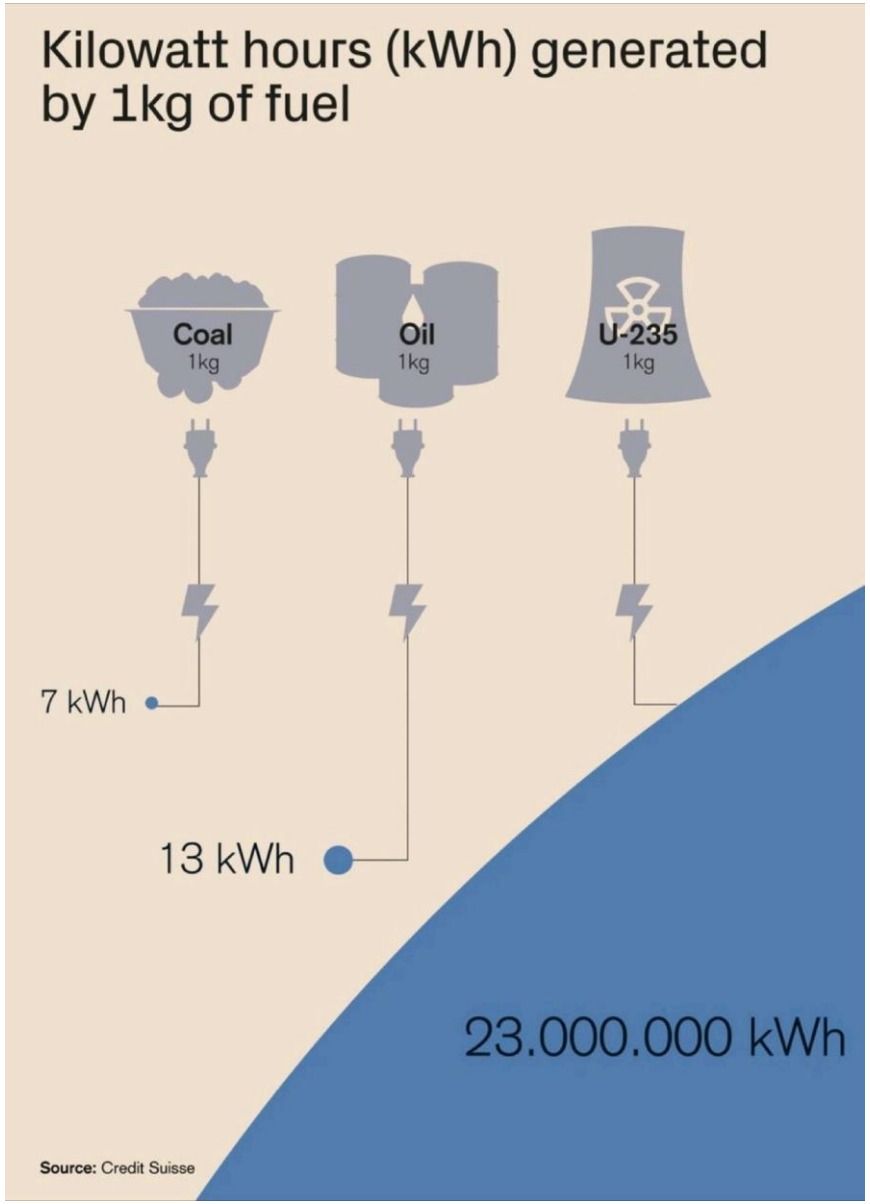
Brennelemente: Vier- bis fünfjährigem Einsatz im Reaktor

Hohe Energiedichte →

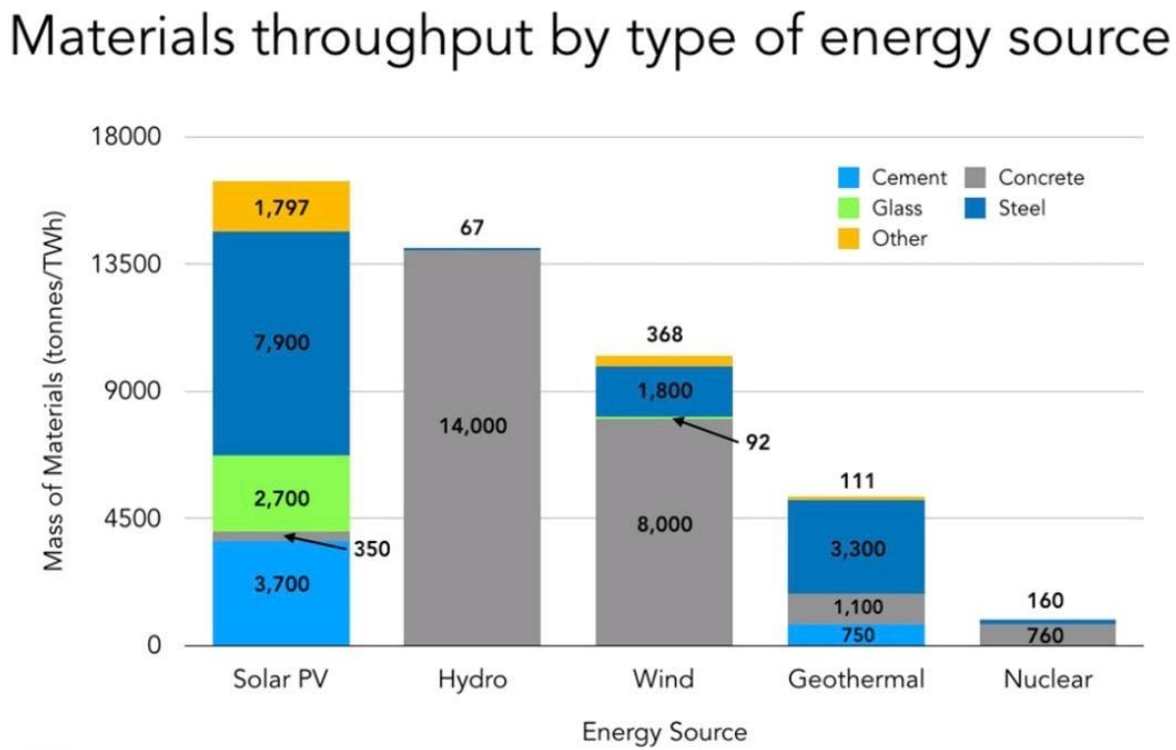
- Kleine Menge Brennstoff
- Kleiner Landbedarf
- Geringe Menge an Abfall

Energie Äquivalenz



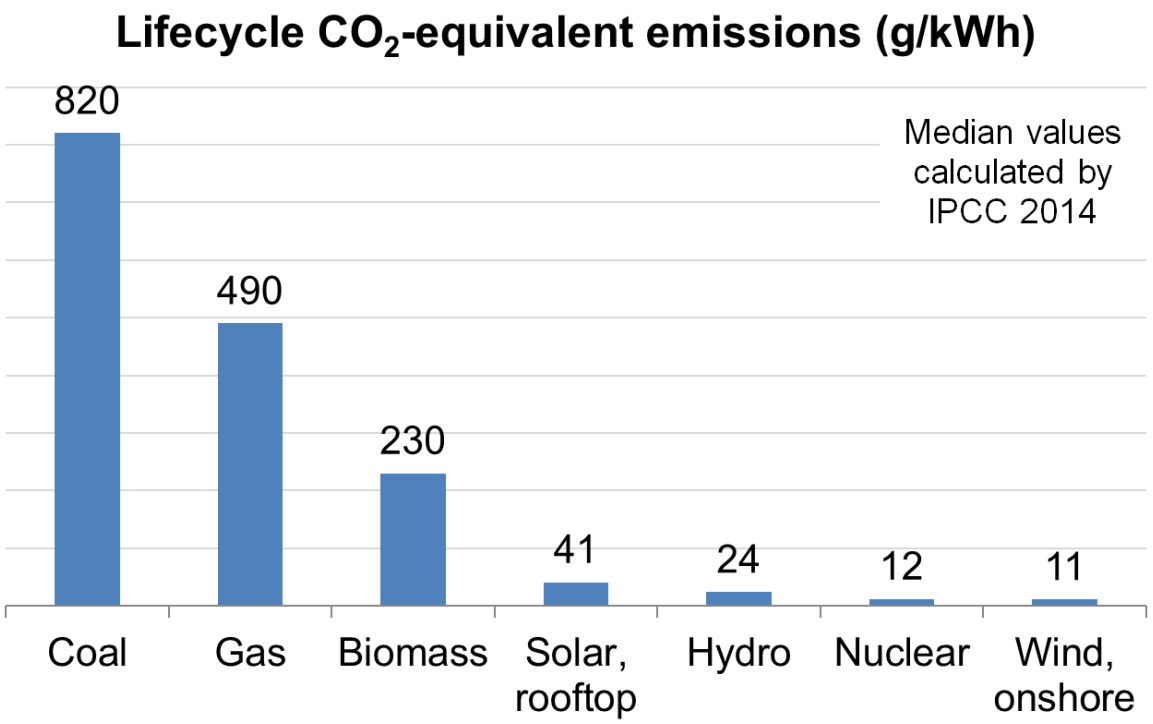


Ist Kernenergie unweltfreundlich?



ENVIRONMENTAL PROGRESS

"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.



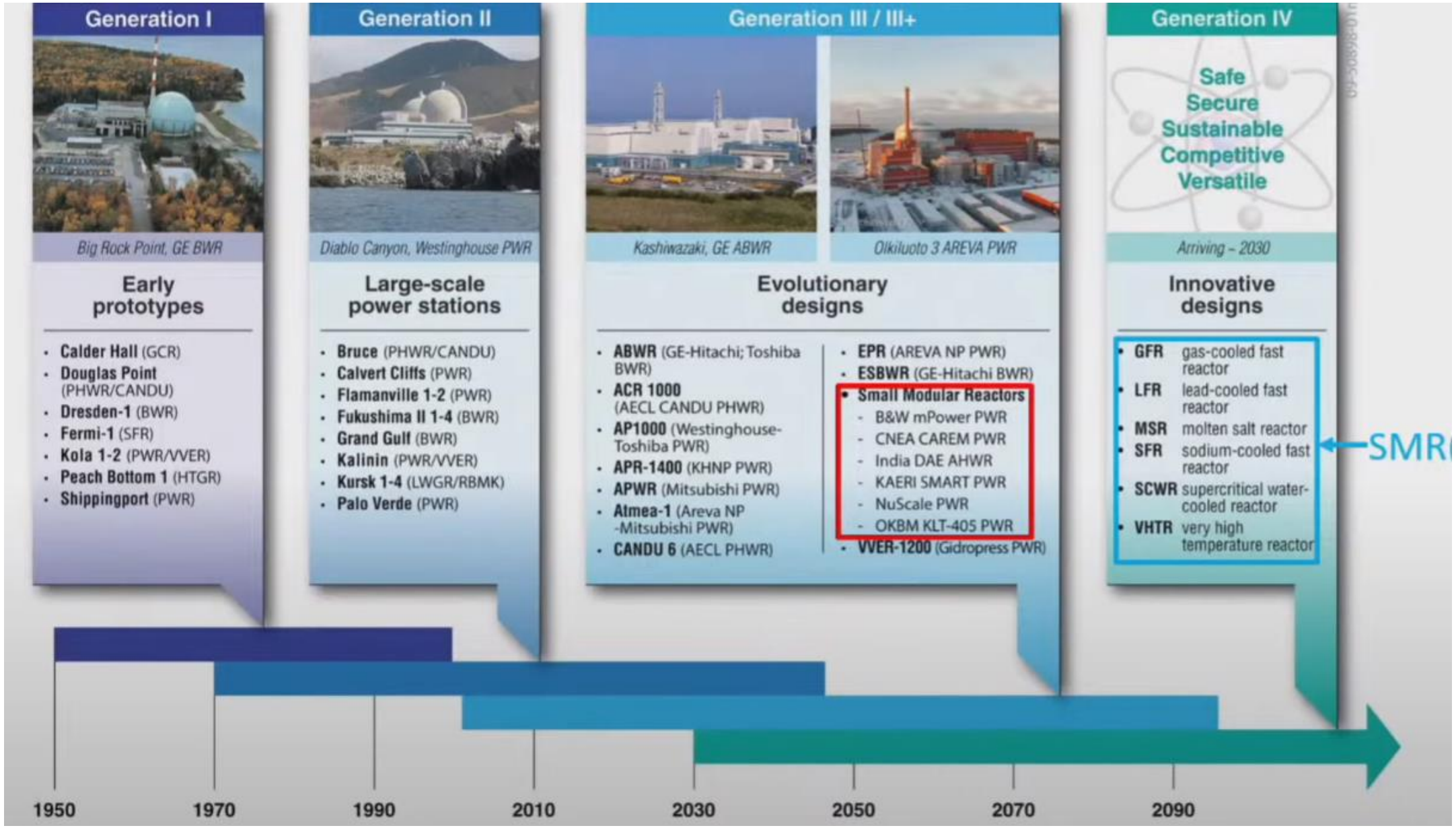
Landbedarf

- Kernergie 10,000 W/m^2
- Solar-PV 5 W/m^2 (ohne Speicherung)
- Wind 2 W/m^2 (ohne Speicherung)

Kernenergie hat die kleinste:

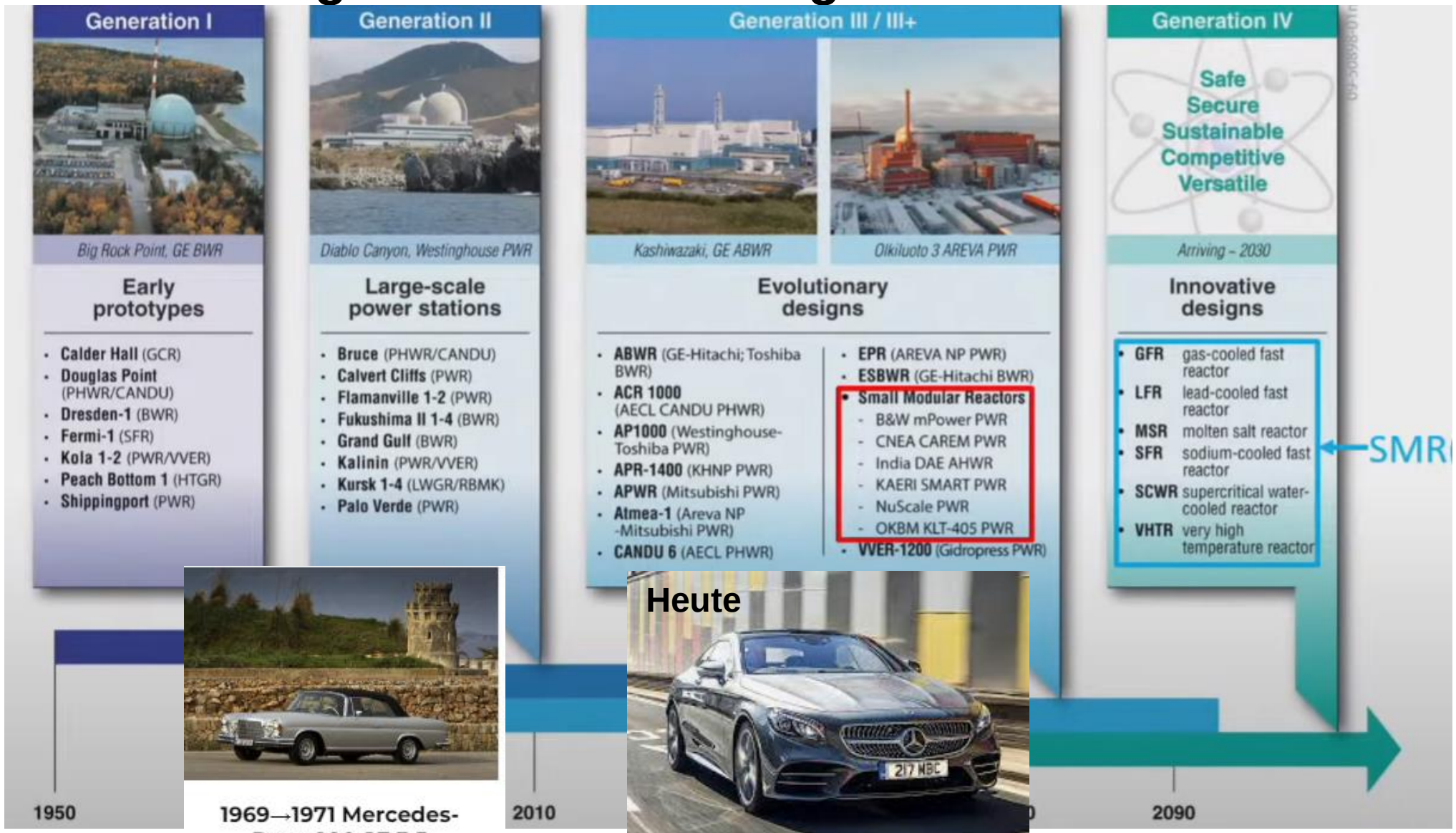
- **CO2-Emissionen**
- **Stoffströme**
- **Landbedarf**

Neue Entwicklungen im Reaktordesign



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

Neue Entwicklungen im Reaktordesign

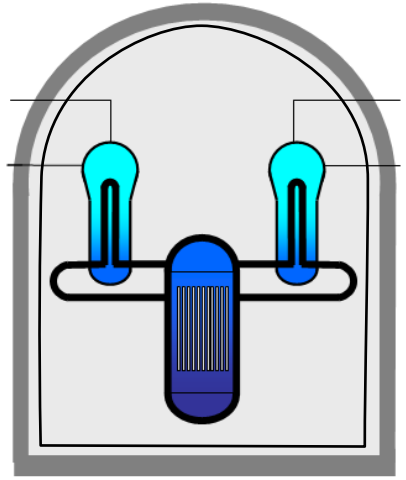


Fukushima Daichi (1971) wurde nicht nachgerüstet

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

Gen II: Nachrüstmaßnahmen (Schweiz)

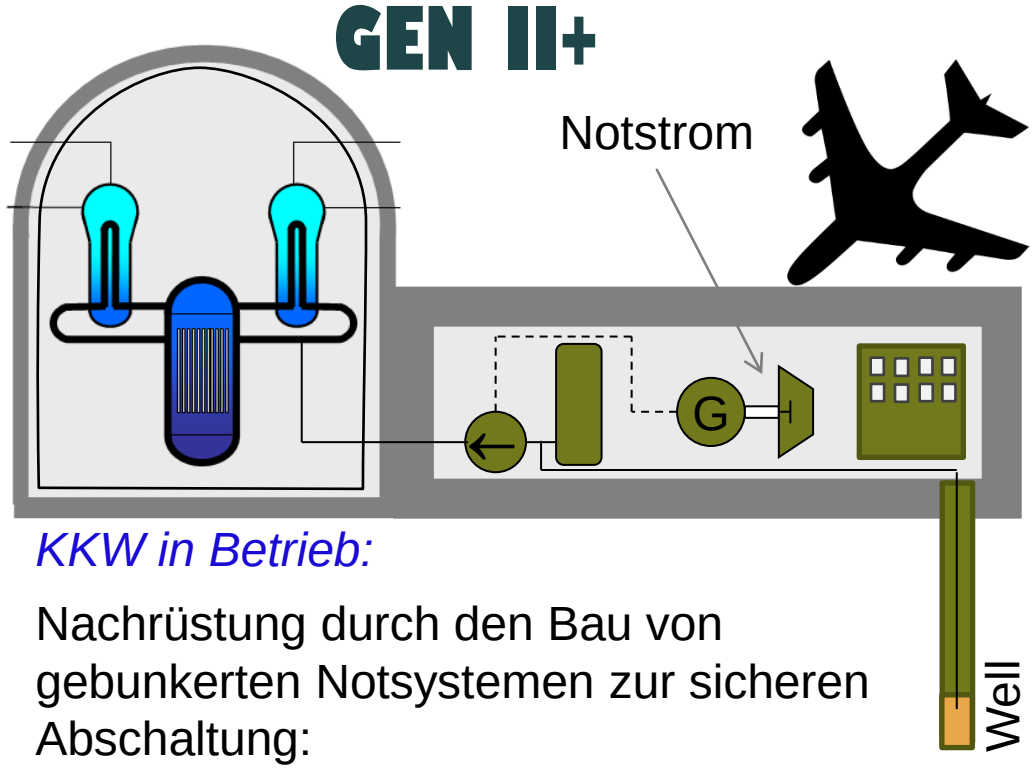
…länger vor Fukushima (2011):



KKW wie gebaut

GEN II

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+

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

Die Kernschadenshäufigkeit wird durch Verstärkung der aktiven Sicherheitsysteme reduziert

Kernschäden werden deterministisch ausgeschlossen (passive Sicherheitssysteme)

Radioaktiver Freisetzungen werden deterministisch ausgeschlossen

Ausschluss oder Minderung der Folgen unwahrscheinlicher Kernschäden durch Containment

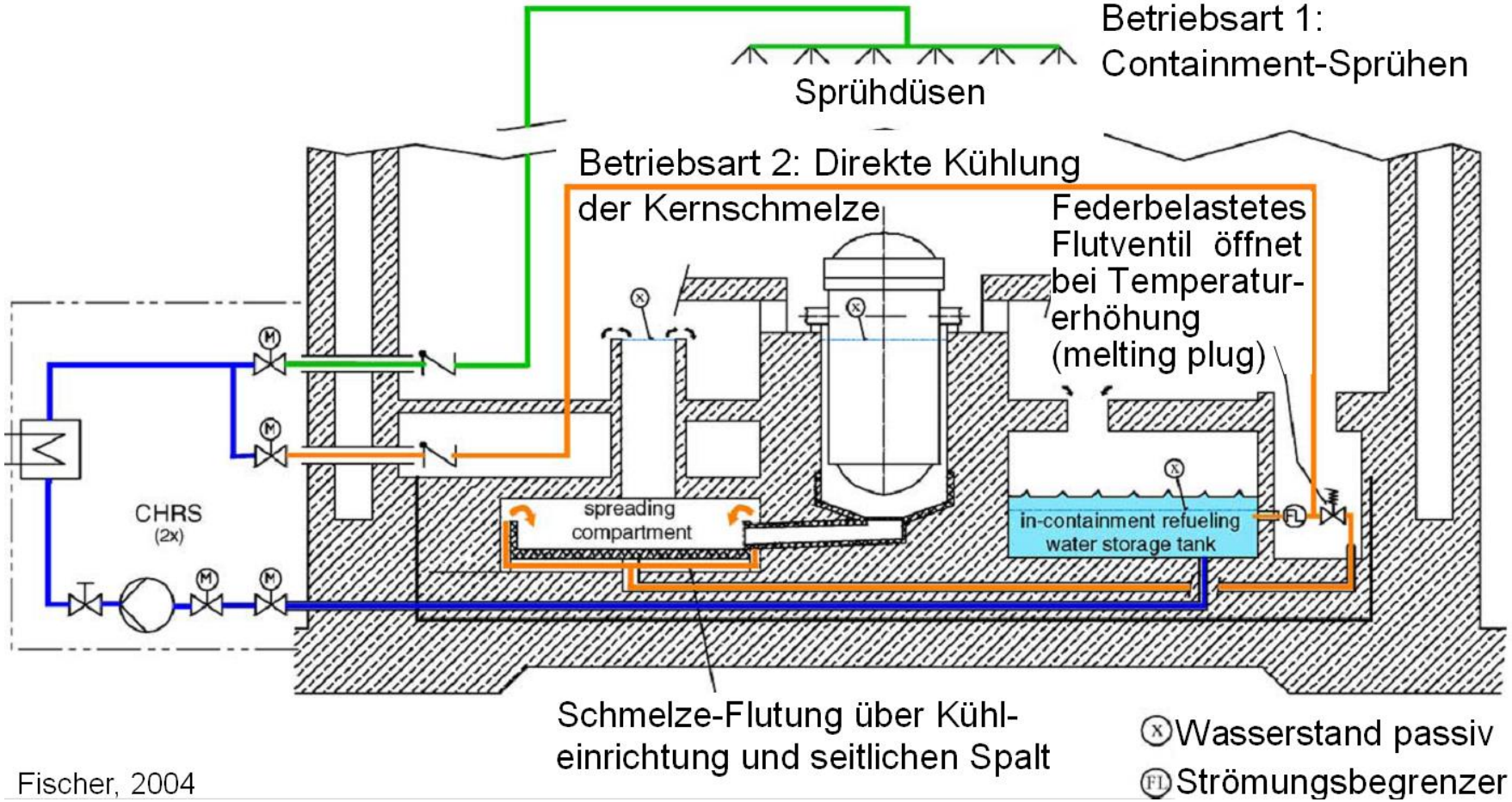
$\sim 10^{-9}$ 1/a

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

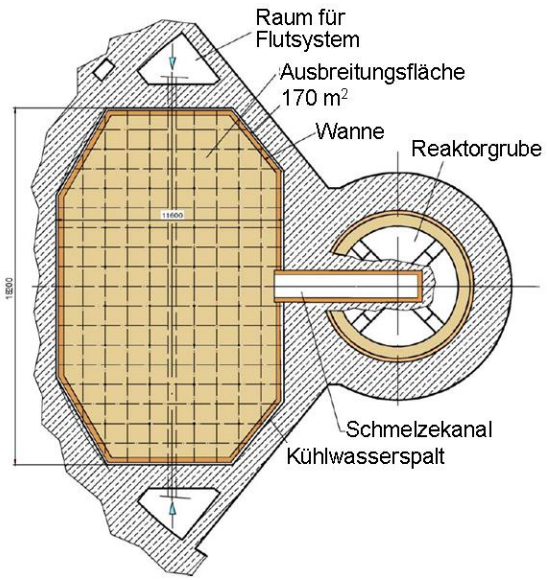
Beispiel EPR Design: passives System zum sicheren Einschließen und Kühlen der Kernschmelze bei schweren Unfällen

Core Catcher (Gen III / EPR)
Langzeitkühlung der Schmelze
Containment Heat Removal System (CHRS)

- Zwei redundante Stränge



Fischer, 2004



Grossversuche zur Schmelzeausbreitung COMAS

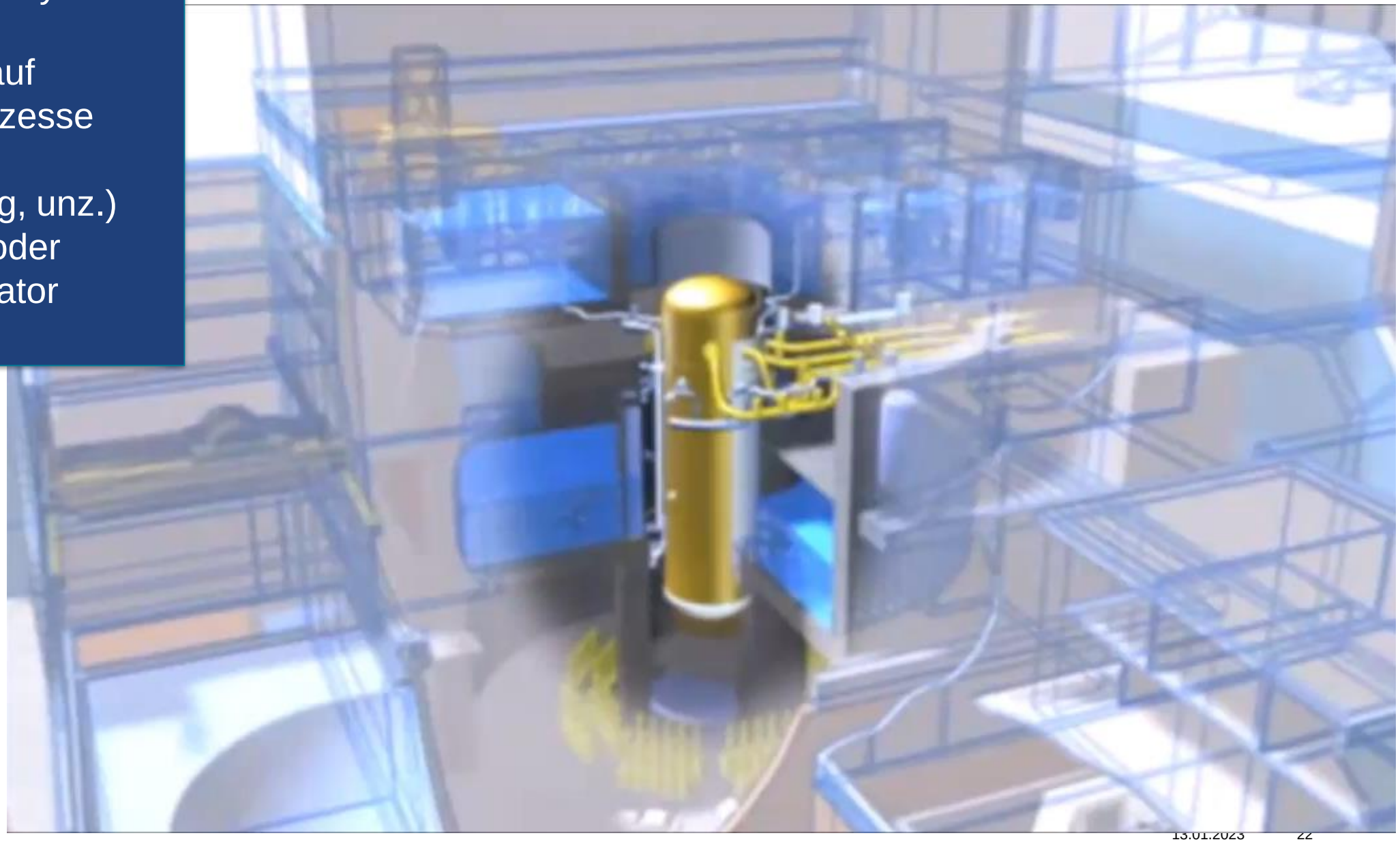
Siempelkamp
Nukleartechnik

Gen-III+

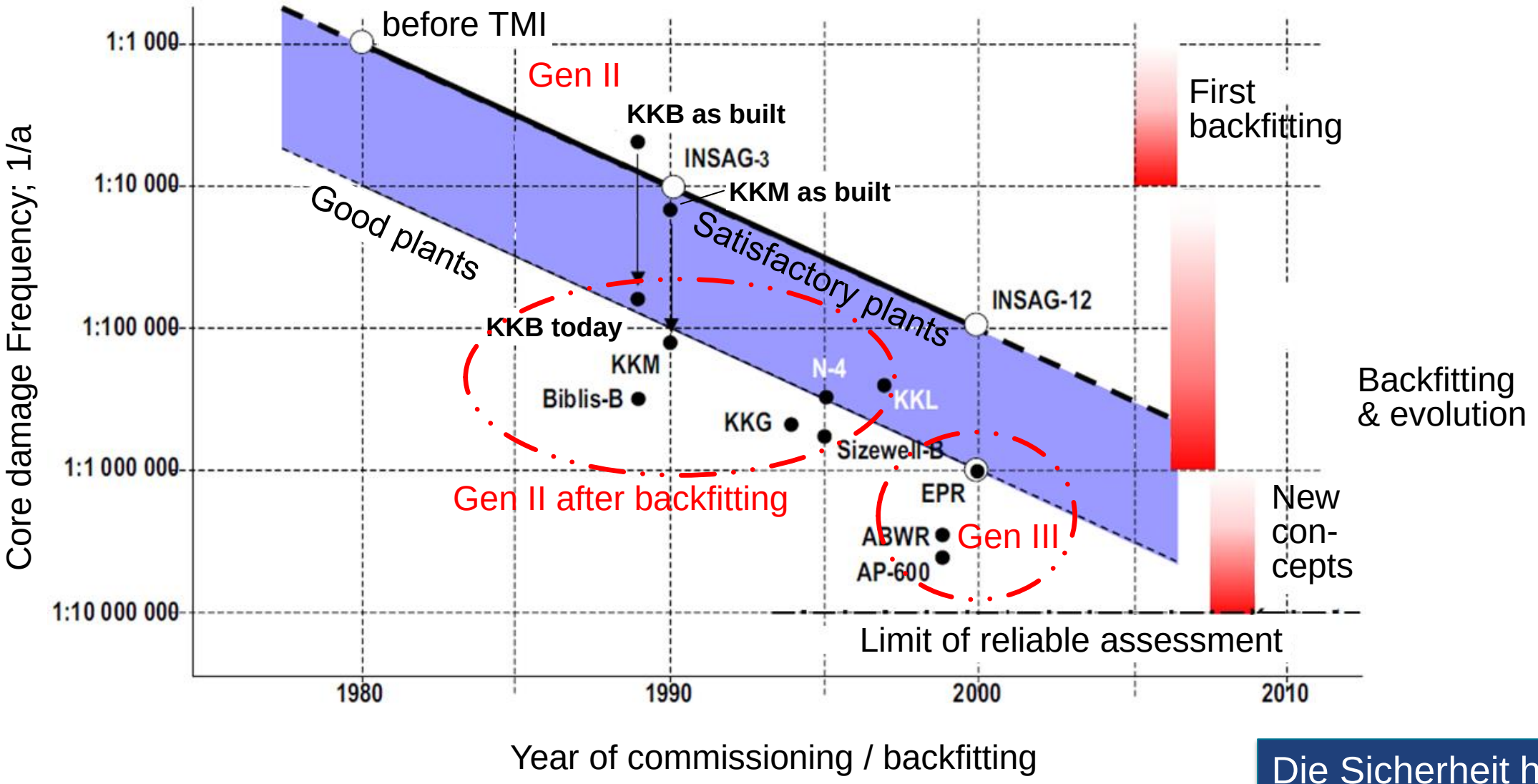
Passive Sicherheitssysteme:

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

General Electric ESBWR



Zuwachs des Sicherheit im Reaktor Design

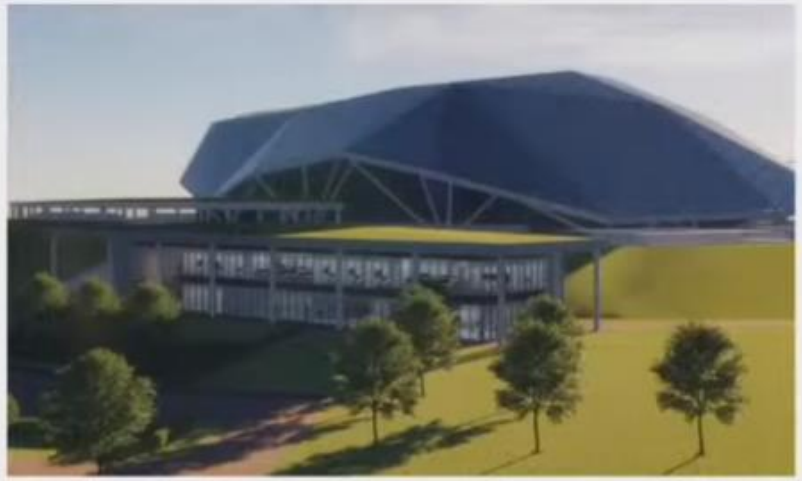


Die Sicherheit hat im Laufe der Jahre kontinuierlich und stark zugenommen

Neue Entwicklungen im Reaktordesign – SMR (kleine modulare KKW)

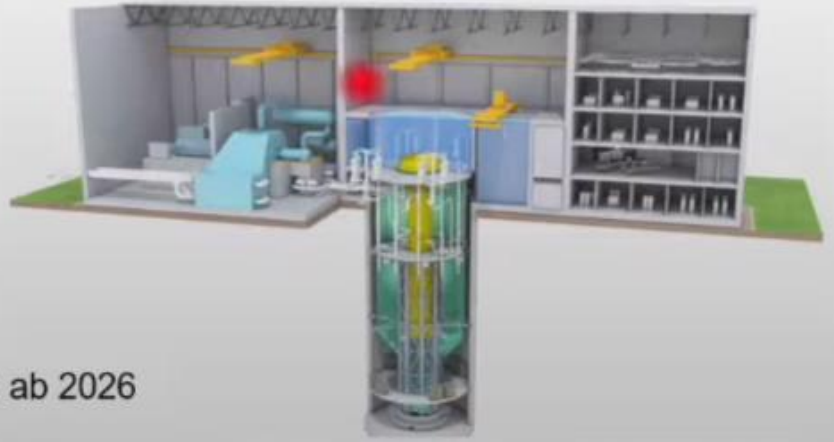
NuSCALE (6x77 MW), für Utah, ab 2027
LCOE: 65$/MWh, 3'600 $/kW installiert

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



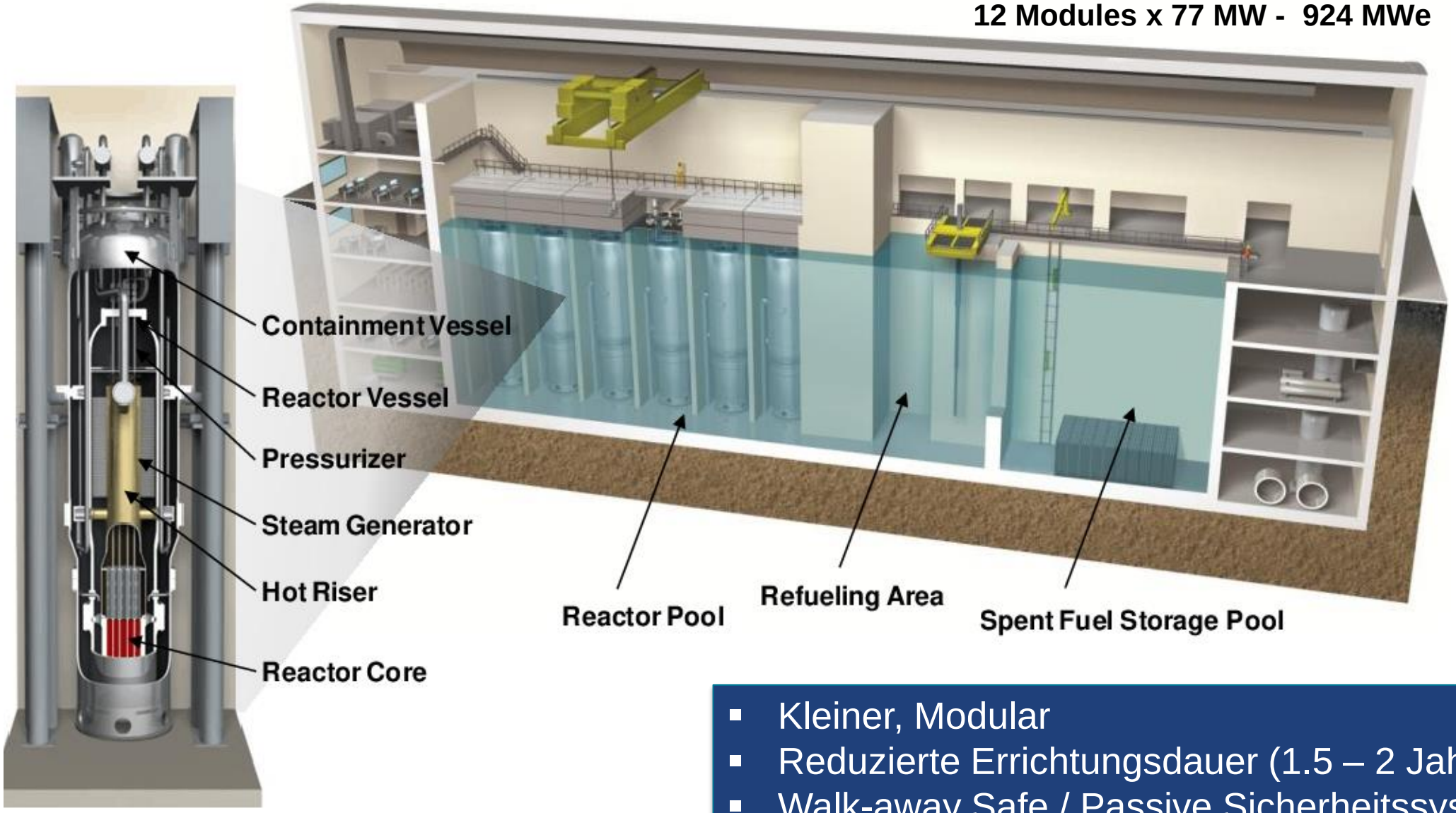
RITM-200 (Russia), Betrieb in Kirgistan ab 2028

BWRX-300 (GE/Hitachi) für Ontario Power, Betrieb ab 2028, mittelfristiges Preistarget: **2'250 $/kW**

Mehrere SMR gehen bis 2030 in Betrieb / auf dem Markt

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 (1.5 – 2 Jahre pro Modul)
- Walk-away Safe / Passive Sicherheitssysteme

Neue Entwicklungen im Reaktordesign (Gen IV – Natrium)

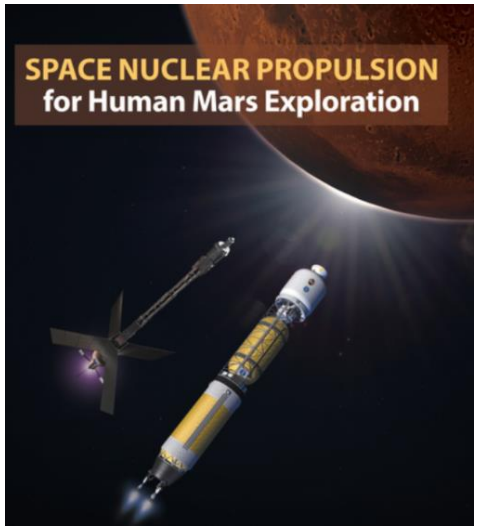
KKW mit integriertem Energiespeicher (geschmolzenes Salz)

Baugenehmigung soll 2023 eingereicht werden (Wyoming)

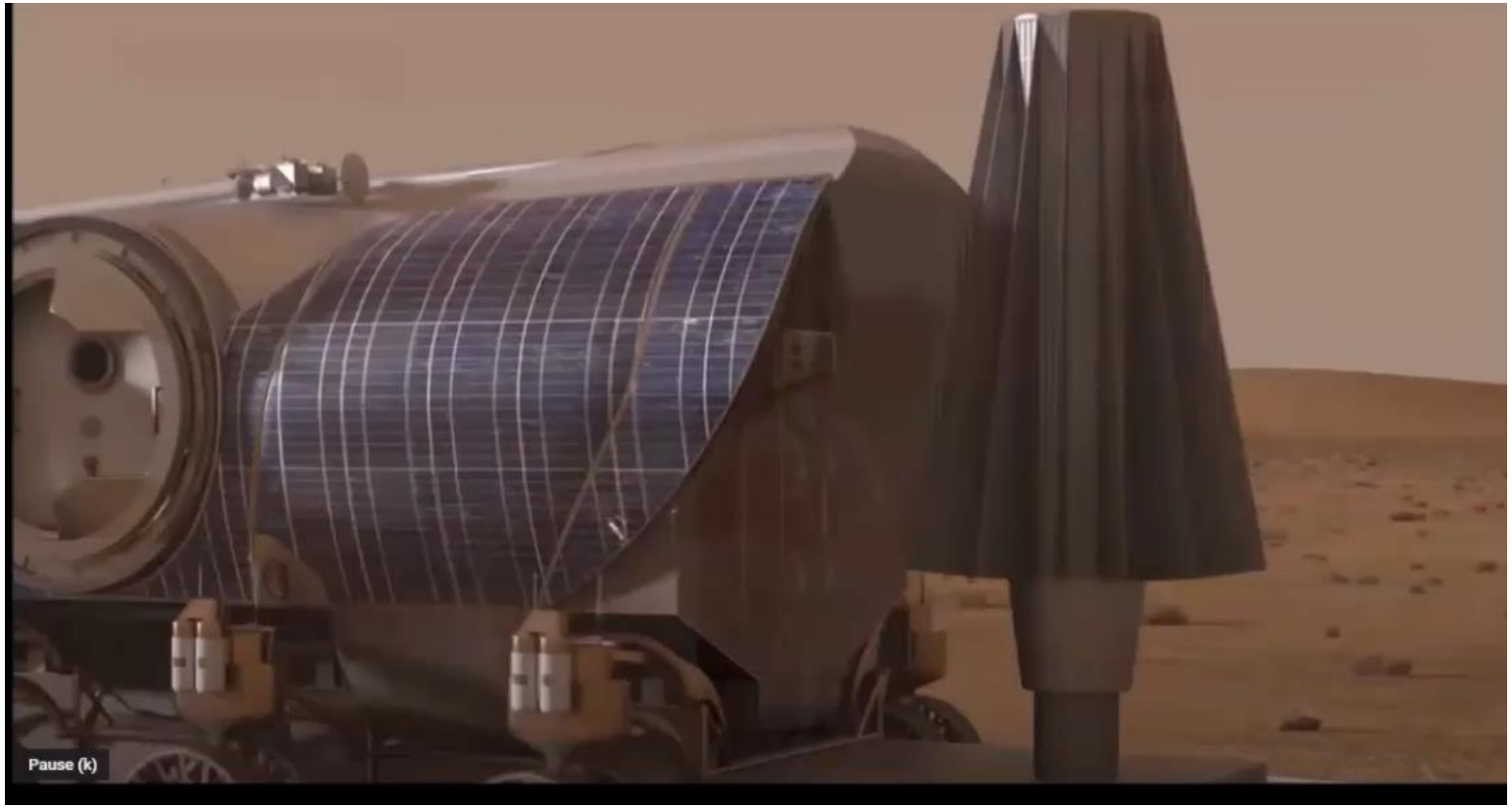
TERRAPOWER – 345 MWe
1 GWh Energiespeicher

Atomkraft für den Weltraum

KILOPOWER – NASA/LANL



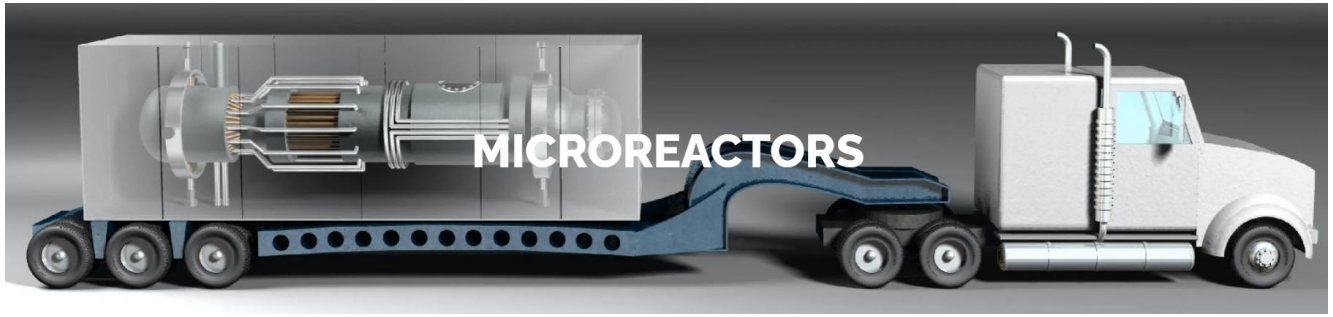
Stromerzeugung auf dem MARS



(youtube.com/watch?v=fugONNLb9JE)

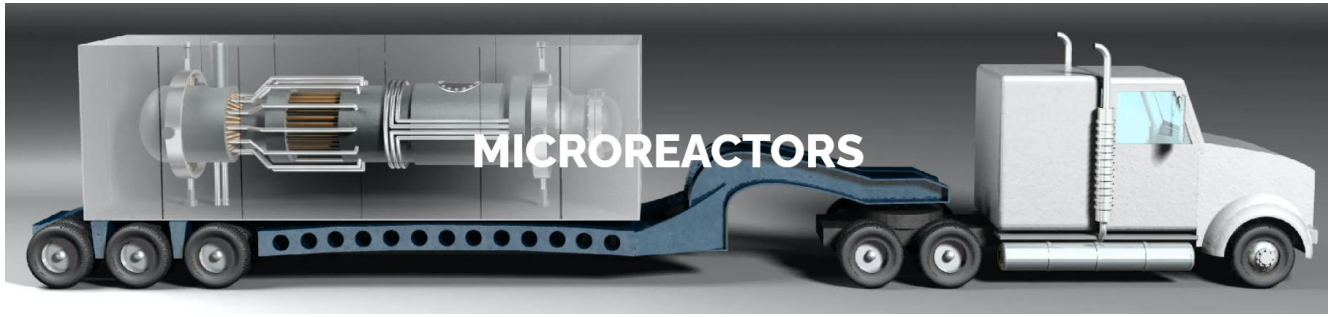
Von Weltraum zur Erde - Microreaktoren

eVinci Westinghouse



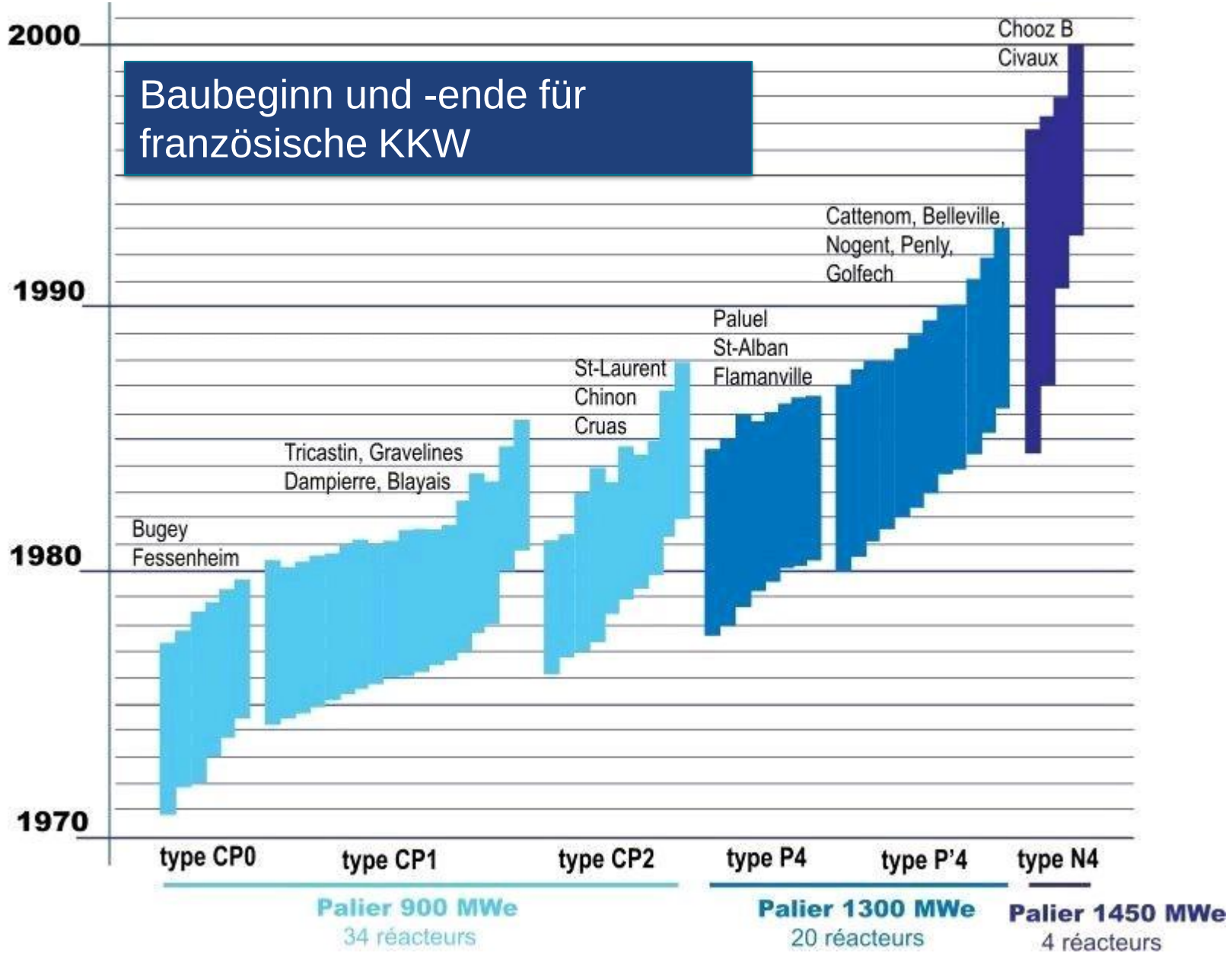
- Walk-away safe
- Kann als Teil des Stromnetzes, unabhängig vom Stromnetz oder als Teil eines Microgrids betrieben werden
- Komplett in einer Fabrik gebaut, und in einem ISO-Container auf LWK transportierbar
- Bis zu 10-12 MWe zur Stromerzeugung und Bereitstellung von Wärme für industrielle Anwendungen
- Stromversorgung abgelegener, ländlicher Gemeinden, die auf Dieselgeneratoren angewiesen sind
- CO_2-freie Energiequellen für Wasserentsalzung, Wasserstofferzeugung und andere Industrien

Von Weltraum zur Erde - Microreaktoren



4.5 mal die Leistung von Taicun Village Solar
(und Gondosolar – 100,000 m^2)

Kernenergie – dauert zu lange (?)



Von den 70er jahren bis 2000 wurden Reaktoren in Frankreich innerhalb von 5-7 Jahren gebaut.

Was ist passiert?

Kernenergie – dauert zu lange (?)

Verbesserungen in Rechenmodellen und Technologie

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

Beispiel KKL Schweiz

Usprungliche 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

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.

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

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

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

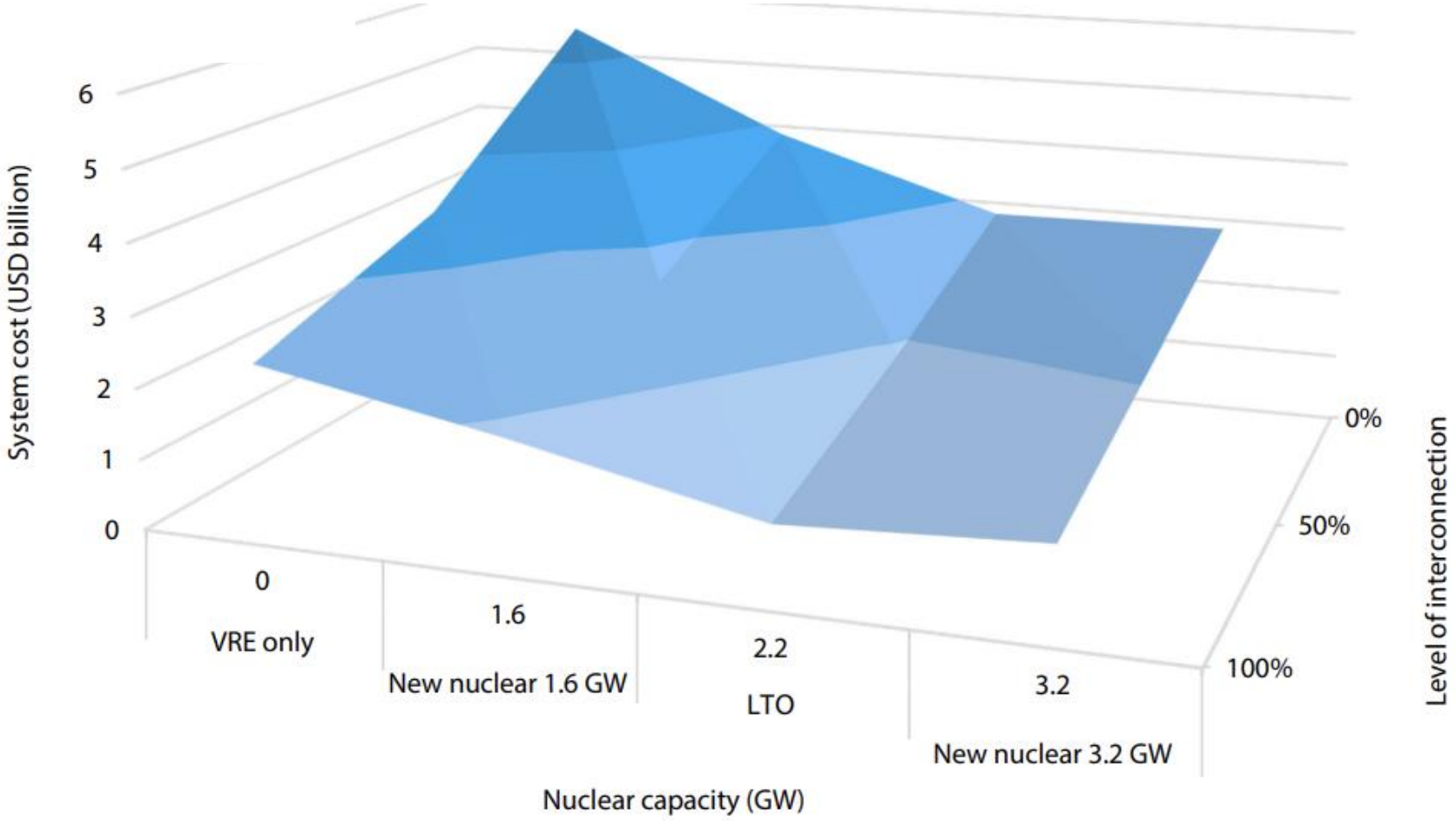
25 TWh/Jahr, um das aktuelle KKW in der Schweiz zu ersetzen:
- 1000 Gondosolar oder 2 EPR KKW (Beispiel für Kostenvergleich)

Achieving Net Zero Carbon Emissions in Switzerland in 2050

OECD
BETTER POLICIES FOR BETTER LIVES
von 30.10.2022

Ergebnisse Studie der OECD (Oktober 2022):

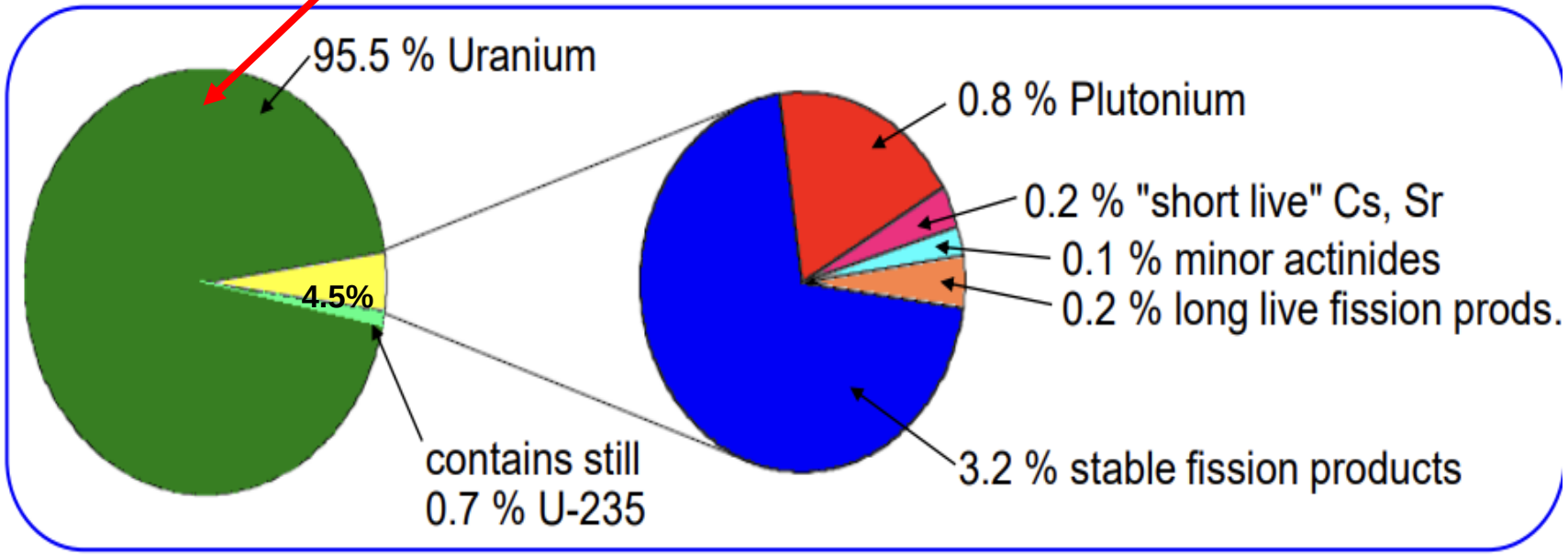
Ersatz des Schweizer KKW mit neue KKW führt zu einer billigeren Option und mehr Unabhängigkeit von Europa.



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

Fuel for Terrapower-like reactors!

Zusammensetzung abgebrannter Brennelemente



1,3 % des verbrauchten Brennstoffs sind hochradioaktiv

Total von 1500 m3 hochaktiver Abfall (Schweiz) für alle KKW bis 60 Lebensjahre

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

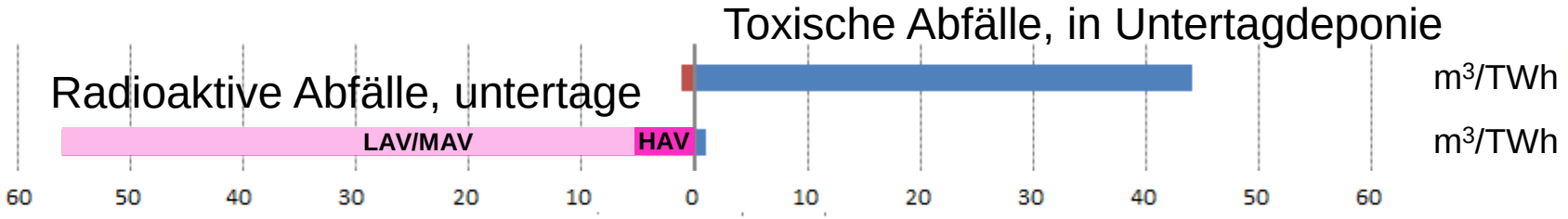
Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung werden im Bundeszwischenlager aufbewahrt, das ebenfalls in Würenlingen steht

Heute befinden sich die radioaktiven Abfälle in Zwischenlagern.
Bei den KKWs und im Zwilag AG gibt es genügend Zwischenlagerkapazität für sämtliche Abfälle aus Betrieb und Stilllegung der fünf Schweizer Kernkraftwerke, bis geologische Tiefenlager gebaut ist.

Abgebrannter Brennelemente

- Vier- bis fünfjährigem Einsatz im Reaktor
- Die verbrauchten Brennelemente werden 5 bis 10 Jahre zur Kühlung in Lagerbassins (Abklingbecken) unter Wasser gelagert
- dann in Transport- und Zwischenlagerbehälter verpackt und in Zwischenlager gebracht. Dort verbleiben sie bis zum Transport in ein Tiefenlager

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: $SiCl_4$ bei der Fertigung

Achtung: Toxische Abfälle kommen vorrangig aus der Reinstsiliziumproduktion: SeH_2, $As(CH_3)_3$, Blei, $HSiCl_3$

Trichlorosilen

Home ▸ Newsroom ▸ Polysilicon News ▸ Article

Im Falle einer Freisetzung: Evakuierung und shelter-in-place

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

Jungblut et al., 2010 Sachbilanzen von Energiesystemen, Ökobilanzen für die Schweiz, ecoinvent report No. 6-XII, ESU-services Ltd, Uster, 2010

- **100g/m²** in Unterirdischen Deponie
- 100,000 m2 => 10 tons

Endlager

Deponie innerhalb 300 m Salzschicht.

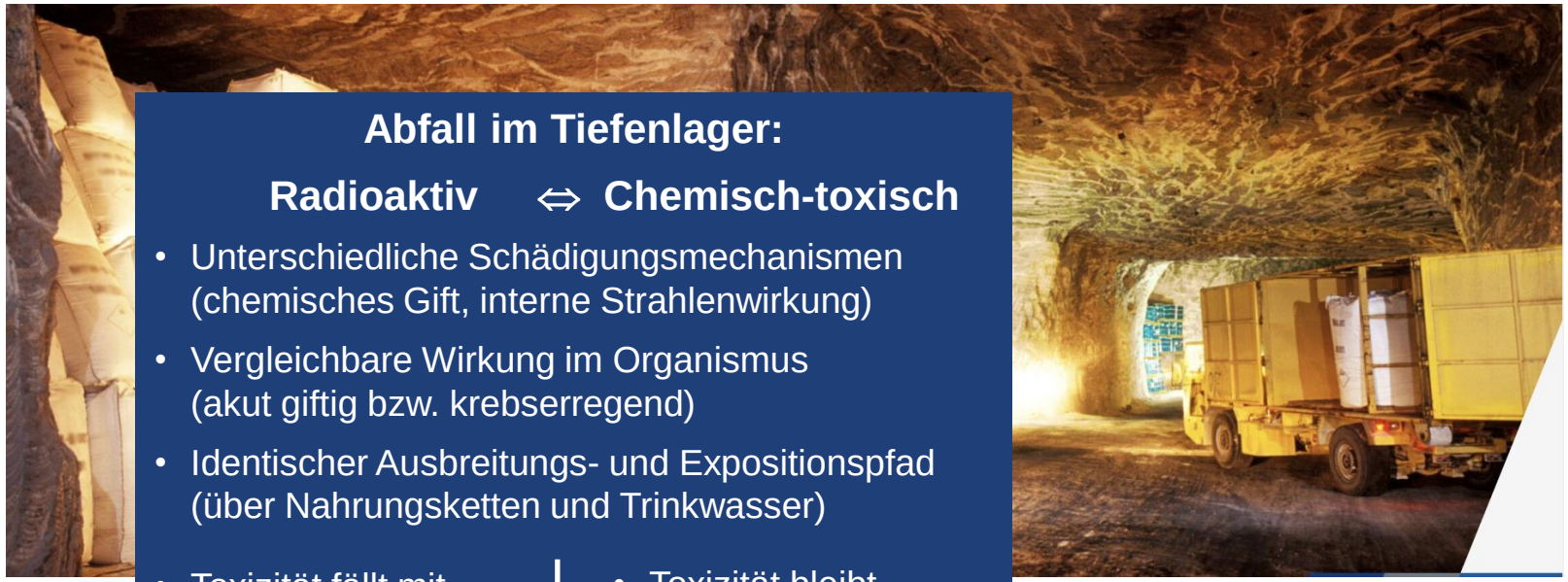
Herfa-Neurode, DE

Chemische Toxische Abfälle

www.kpluss.com/

Endlager

Deponie innerhalb 300 m Salzschicht.



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	• Toxizität bleibt konstant ($T_{1/2} = \infty$)
• Status: Starke Opposition in der Öffentlichkeit	• Status: Mehrere Tiefendeponien in Betrieb

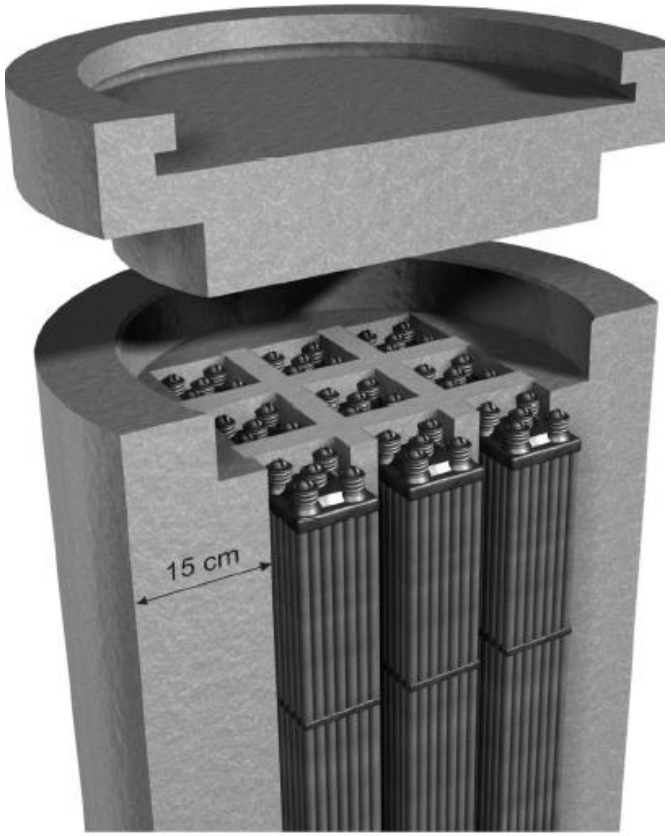
Herfa-Neurode, DE

Chemische Toxische Abfälle

www.kpluss.com/

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 m3 hochaktiver Abfall (Schweiz).
Mit Kanister 9300 m3

Niedrige spezifische Wertschöpfung
→ kostengünstige Lösung erforderlich

Gebinde mit chemisch-toxischem Abfall

Bildquelle: https://www.kpluss.com

3,2 Millionen Tonnen gefährliche Abfälle (Stand 2019)

- Dyoxin, Quecksilber, Zyanid, Arsen, unz.

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)

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT