

Faszination Kerntechnik

"Stand der weltweiten Entwicklung der Kernenergie – erste Auswirkungen des Ukrainekriegs"

- 1. Juli 2022 -

Dr.- Ing. L. Mohrbach

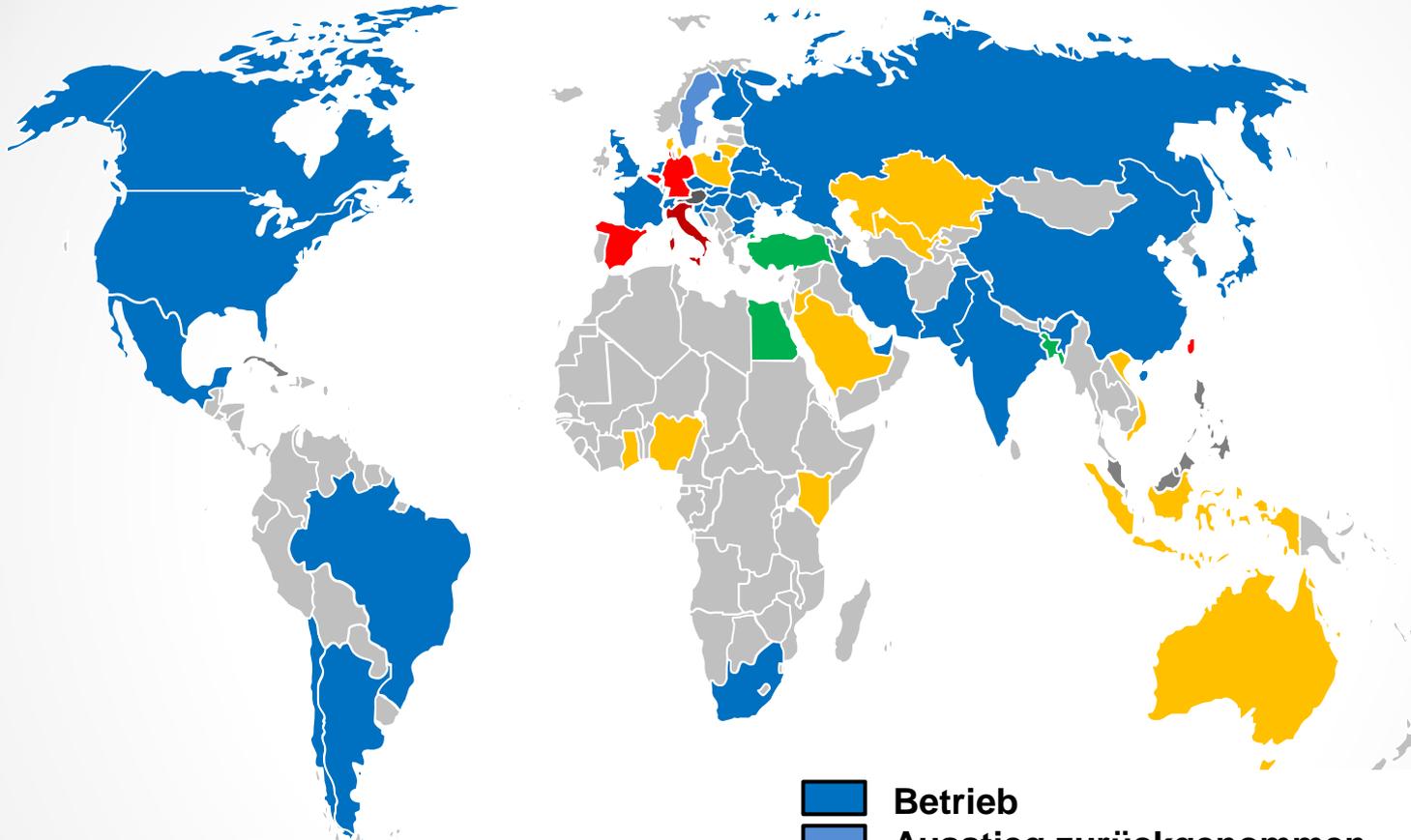
Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Länder mit Kernkraftwerken

33 Länder + 3 Einsteiger + 12+ Interessierte (6/2022)



 Einstieg angekündigt
 Einsteiger (im Bau)

 Betrieb
 Ausstieg zurückgenommen
 Ausstieg geplant
 Ausstieg vollendet
 Ausstieg vor Betriebsaufnahme
 Indifferent

Kernenergie reduziert CO₂- Emissionen wirkungsvoll



- **Ca. 450 Kernkraftwerke liefern ca. 10% der weltweiten elektrischen Energie.**
- **Sie sparen pro Jahr rd. 2,7 Gt (2.700.000.000 t) CO₂- Emissionen.**
- **Dies entspricht etwa 5% der weltweiten anthropogenen CO₂- Emissionen.**

Kernenergiepolitik nach Fukushima



Folgen	Land
Kernenergie- Einstieg	 UAE  BY  BD  TR  EG  SA  JO  PO  UZ
Neue Neubauprojekte	 AR  CN  FI  HU  IN  IR  PK  RU  UK  US  FR
Unveränderte Weiterentwickl.	 BG  BR  CZ  HR  MX  RO  SE  SK  UA
Neubaumoratorium	 CA  ZA  LT  NL  SK  TW
Umkehrung des Ausstiegs	 CH  JP
Restlaufzeiten verlängert	 BE  ES
Ausstieg aus dem Wiedereinstieg	 IT
Abschaltung von in Betrieb befindlichen Anlagen, Ausstieg	 GER

Japan 

Abschaltung 2011

4 SWRs

- ▶ Fukushima Daiichi 1
- ▶ Fukushima Daiichi 2
- ▶ Fukushima Daiichi 3
- ▶ Fukushima Daiichi 4

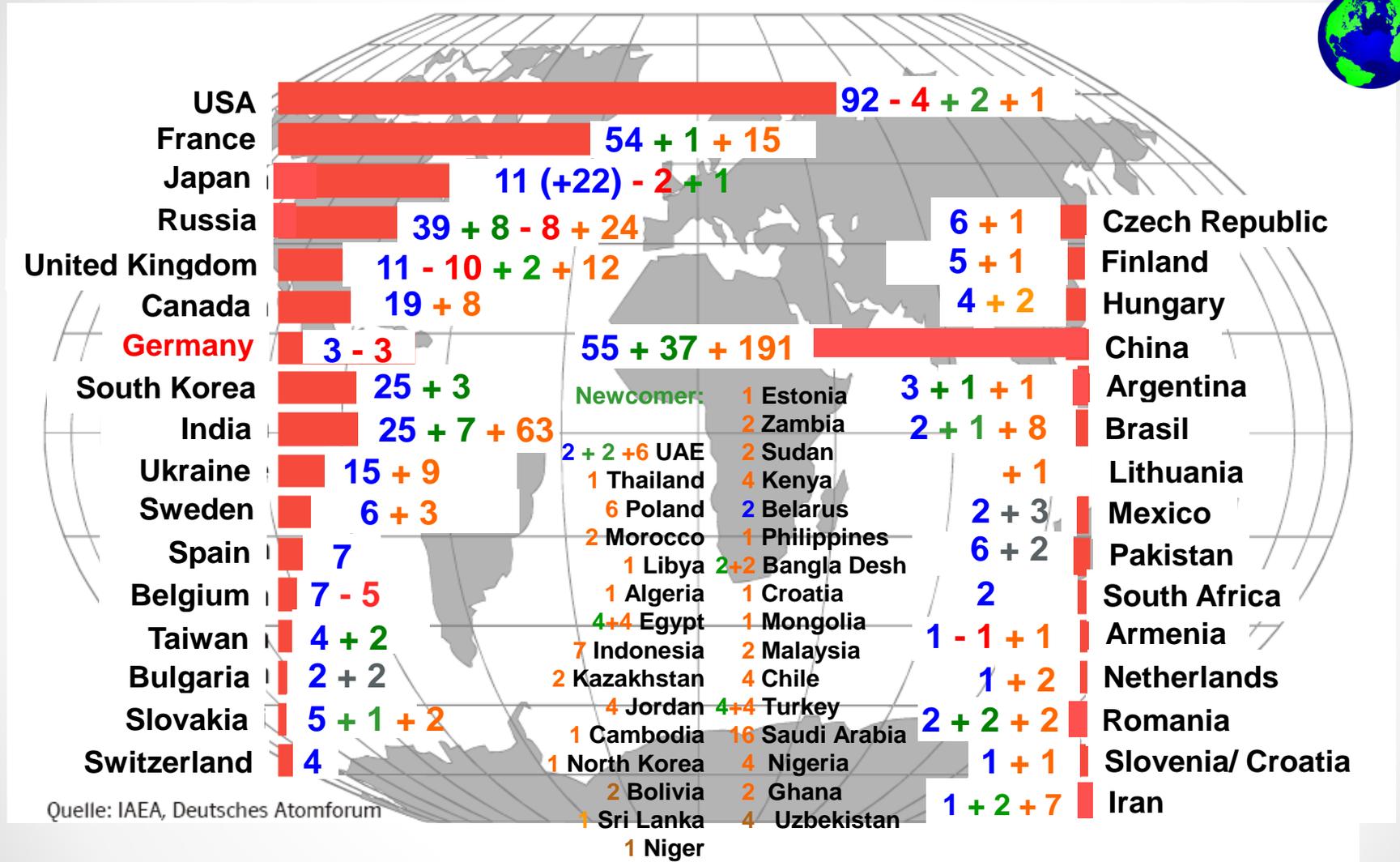
2013 – 2020:

16 DWR, SWR, SNR

Abschaltungen 

2011	2015-21
4 DWRs	4 DWR
▶ Biblis A	Grafenrhenf.
▶ Biblis B	Philippsburg 2
▶ Neckarwestheim I	Grohnde
▶ Unterweser	Brokdorf
4 SWRs	2 SWR
▶ Brunsbüttel	Gundremm. B
▶ Isar 1	Gundremm. C
▶ Krümmel	
▶ Philippsburg 1	

446 Kernkraftwerke in 33 Ländern (6/2022)



Quelle: IAEA, Deutsches Atomforum

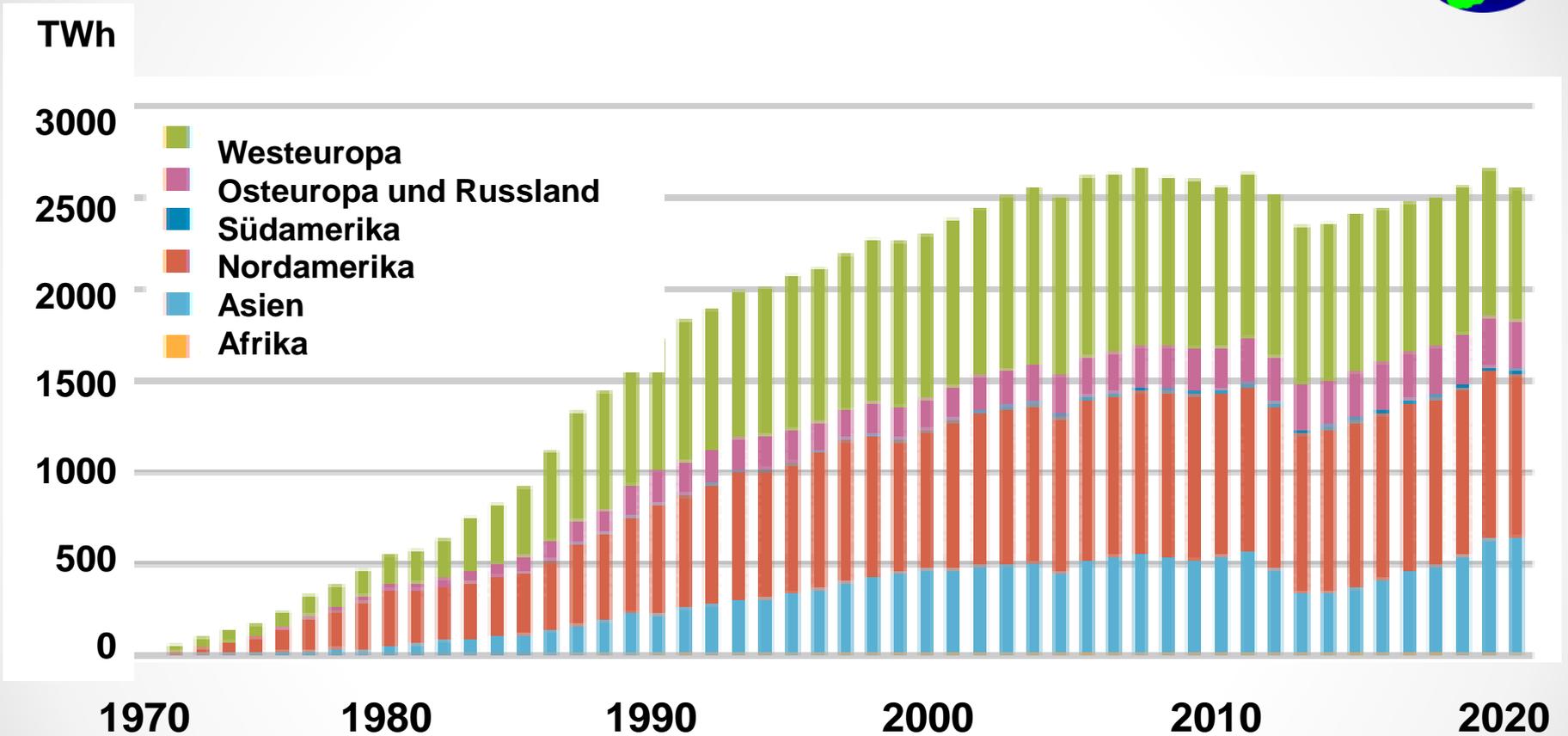
Stillegung: 33

Im Bau: 80 (IAEA: 53)

Projekte: 356 + 90

Andere Interessenten: Puerto Rico, Azerbaijan, Congo, Denmark, Ethiopia, Serbia, Australia

Weltweite Stromerzeugung aus Kernenergie

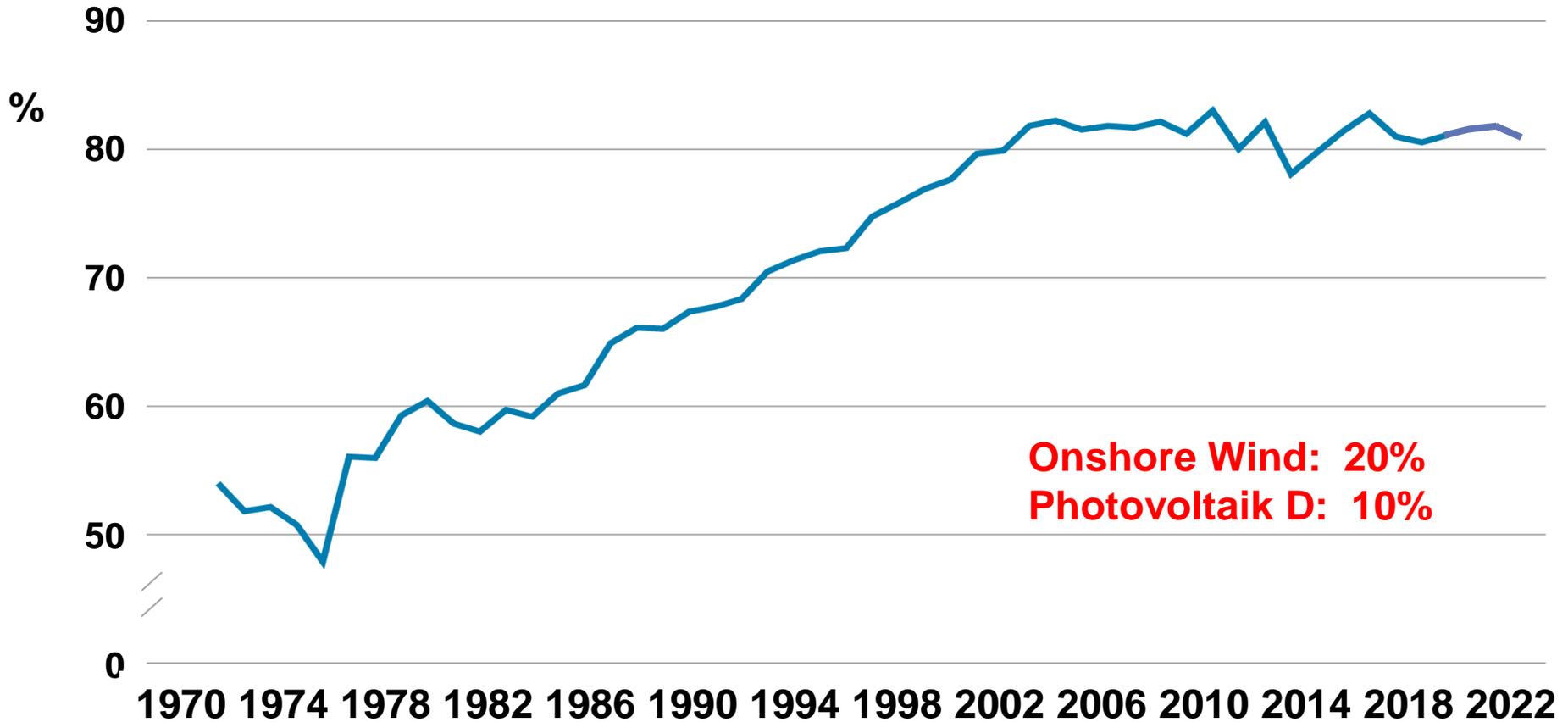


Quelle: WNA, <https://world-nuclear.org/getmedia/891c0cd8-2beb-4acf-bb4b-552da1696695/world-nuclear-performance-report-2021>

Durchschnittliche weltweite Ausnutzung von Kernkraftwerken

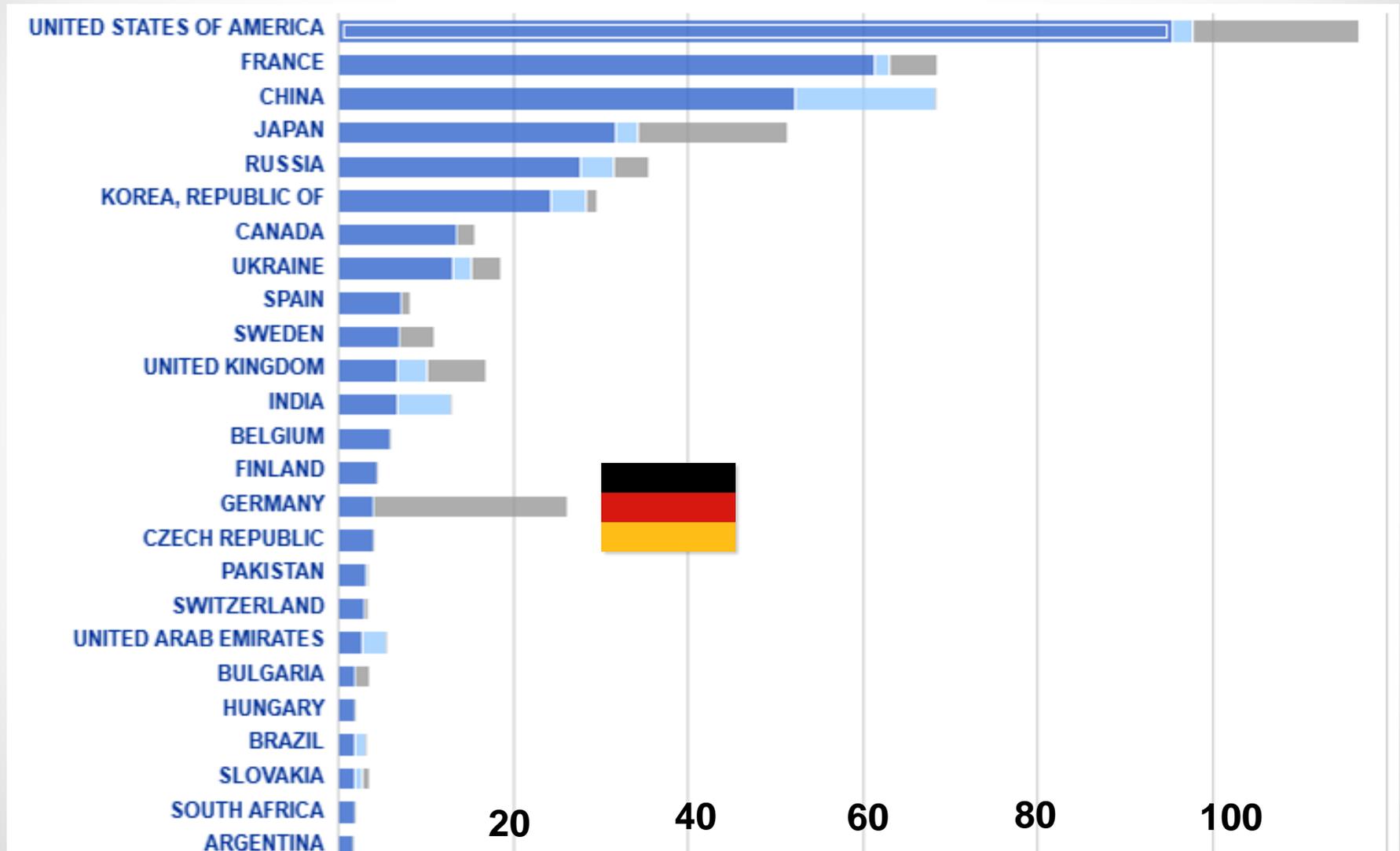


WORLD NUCLEAR
ASSOCIATION

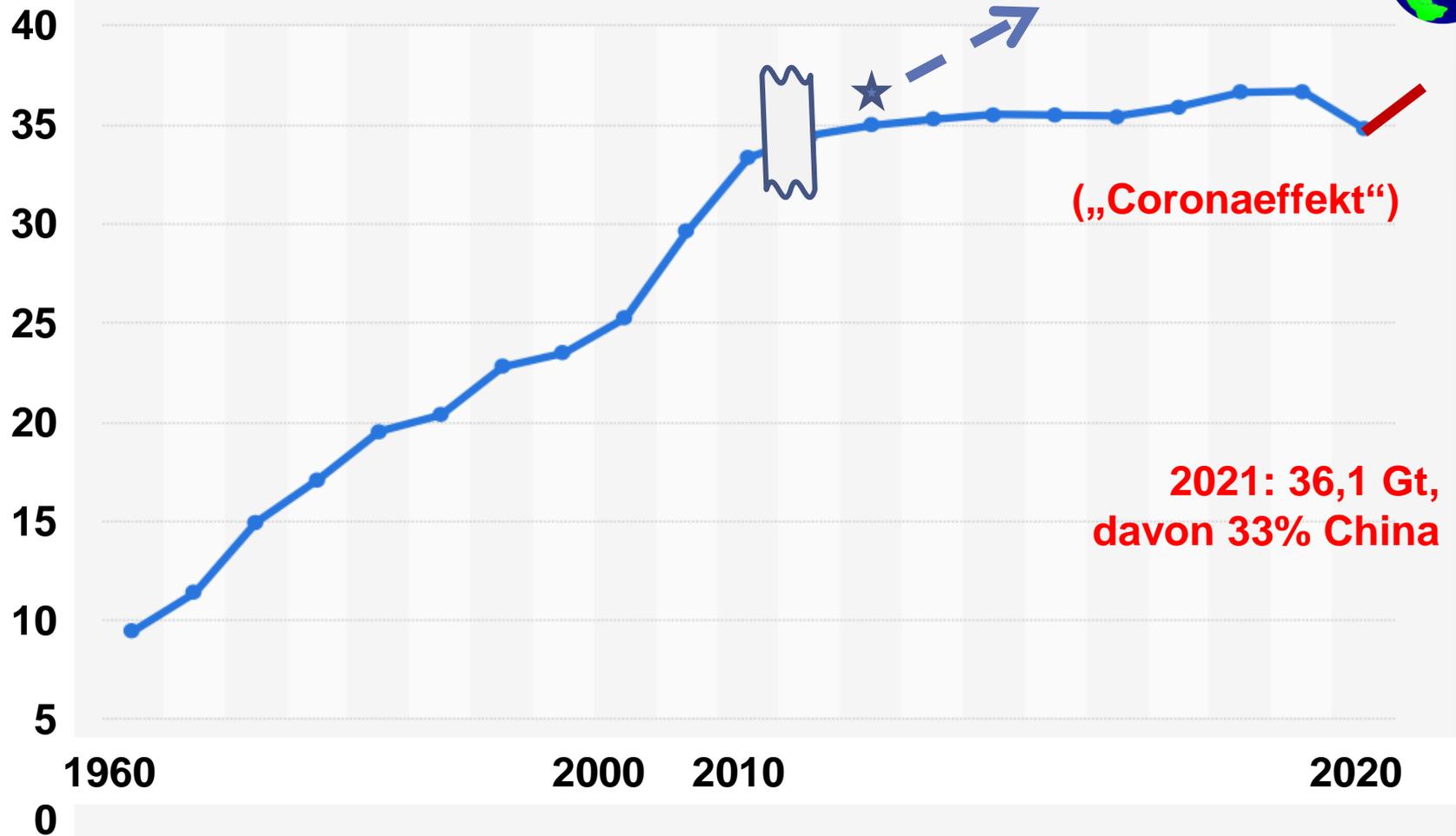


Source: WNA, IAEA

Betrieb, Neubau und Stilllegung von Kernkraftwerken weltweit



Globale anthropogene CO₂- Emissionen in Gt/a



Quelle
Global Carbon Project
© Statista 2022

Weitere Informationen:
Weltweit; 1960 bis 2020; Stand: November 2021.

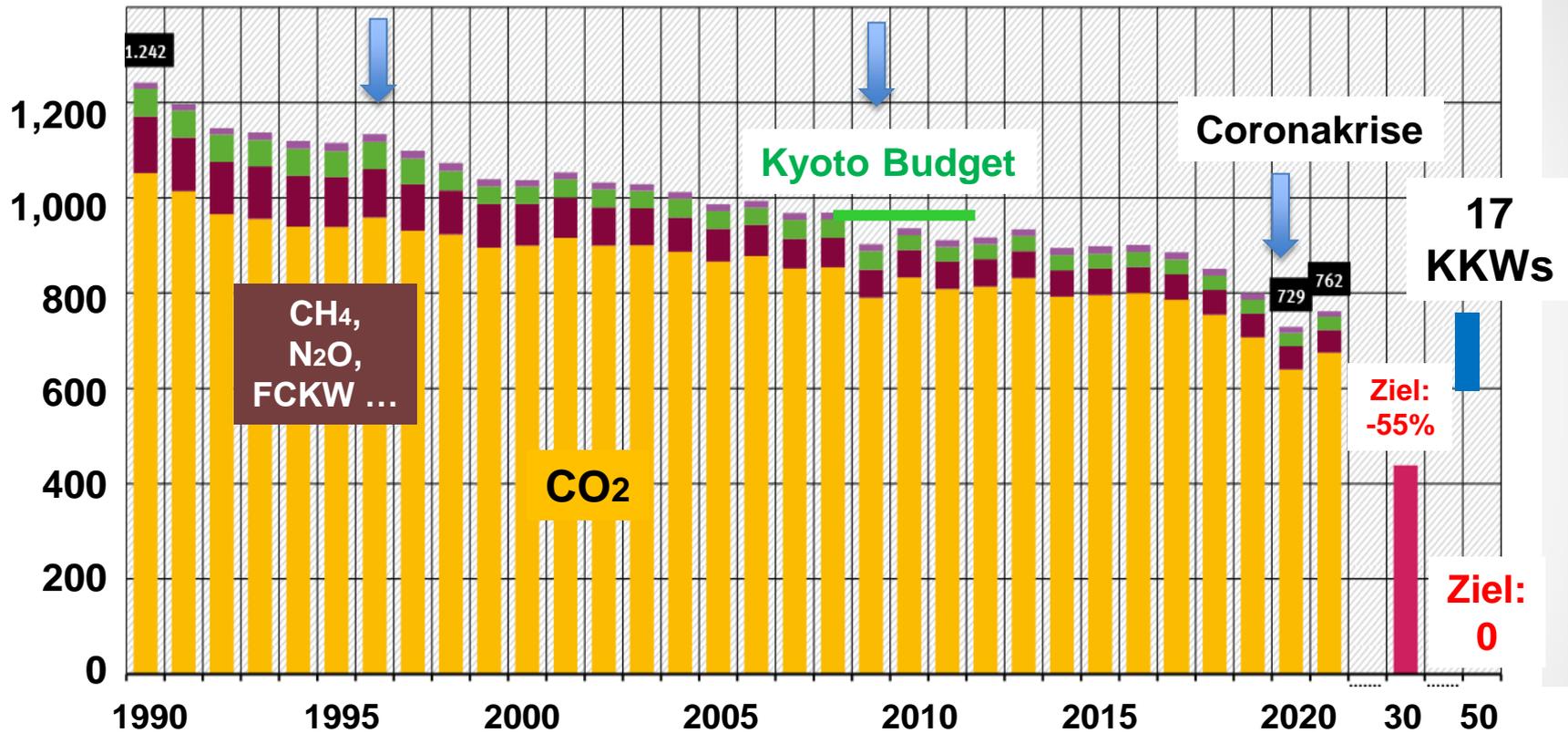
Treibhausgasemissionen (CO₂ - Äquivalente)



Mio t/a

„Wall Fall Profit“

Finanzkrise

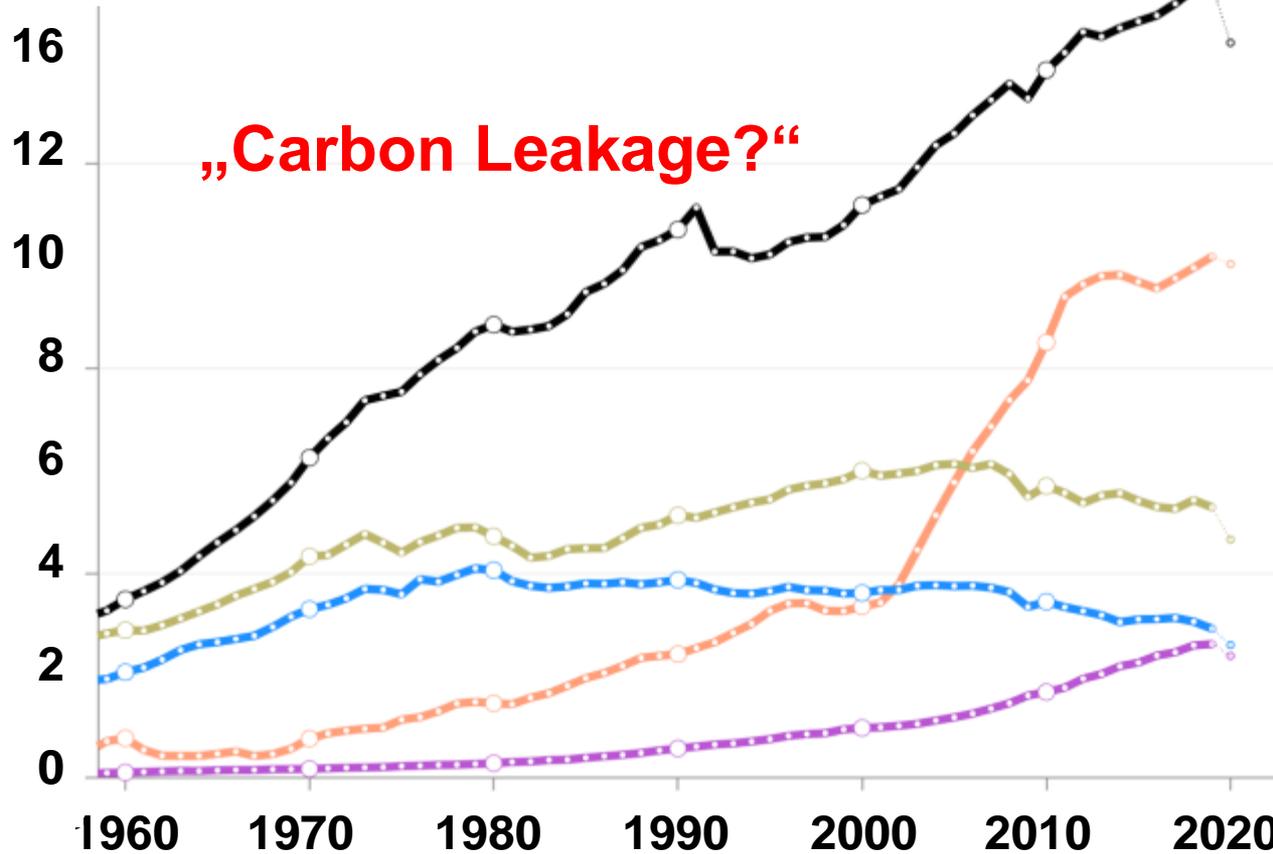


Source: Umweltbundesamt Emissionssituation 2016, Energie-Infodienst 2022,
IER Washington, «Germany's Energy Plan Is Leading to Insecure Supply», 17. Oktober 2019

CO₂ - Emissionen aus Verbrennung



Gt CO₂ / a



© Global Carbon Project • Data: CDIAC/GCP/UNFCCC/BP/USGS

Inhalt

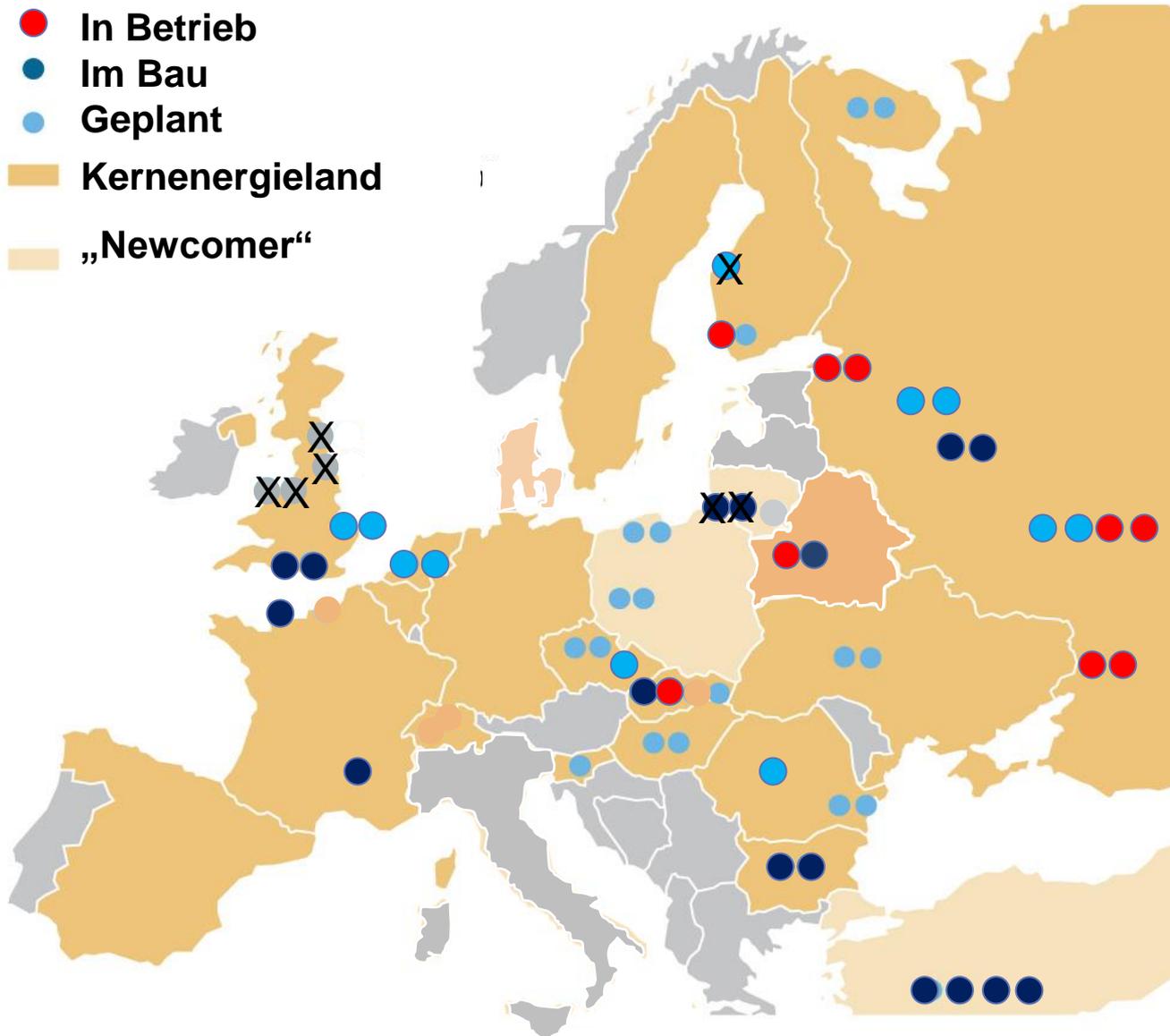


- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Kernkraftwerksprojekte in Europa



- In Betrieb
- Im Bau
- Geplant
- Kernenergieland
- „Newcomer“



Kernkraftwerke in der Ukraine

2021: 55% Kernenergie



2021: 15 Blöcke, Russische WWER
6 Blöcke teilweise mit Westinghouse- Brennstoff

Tschernobyl



- **Angriff (unvorbereiteter) russischer Truppen am 24.2.2022**
 - **Aufwirbelung von kontaminiertem Staub**
 - **Typische Dosis: 6 mSv (Grenzwert: 20 mSv/a)**
 - **Bewegungsverbot für das Schichtpersonal**
 - **Netztrennung**
 - **Kühlung Nasslager (18.000 Brennelemente) auf Diesel- Notstrom umgestellt**
 - **Diesel ausreichend vorhanden (bei Kühlausfall nur geringer Temperaturanstieg, da nur wenige kW Leistung)**
 - **Trockenlager (2000 Brennelemente, Baujahr 2021) nicht betroffen, da Passivkühlung**
 - **14. 3. 2022 Wiederherstellung Netzanschluss**
-
- **20.3. 2022 Erlaubnis zum Verlassen des Geländes für die Hälfte des Personals**
 - **Ca. 120 M€ Schaden, u.a. Plünderung des Labors am 24.3.2022**
 - **31.3.2022 Abzug aller russischen Truppen**



Saporoschje (nach EU Stresstest 2011)



- 6 Blöcke 1000 MW, größtes KKW Europas
- Nur Block 4 in Betrieb (Eigenversorgung?)
- Angriff russischer Truppen am 4.3.2022 (500 Mann, 50 Panzer, 3 Soldaten tot, 2 Verletzte)
- Ausfall 2 von 5 Hochspannungsleitungen, Internet, Safeguards- Verbindung zur IAEA;
- Eine Telefonleitung und Handy ok.
- Beschuss des Schulgebäudes
- Bewegungsverbot für das Schichtpersonal („Folter“)
- Zusätzliches russisches Aufsichtspersonal
- 7.3.2022: Kampfbedingter Trafokurzschluss mit Trafobrand Block 6, Löschen nicht erlaubt
- 16.3.2022: Ausfall der 3. Netzanbindung; Synchronisation der Ukraine mit EU- Netz
- 27.3.2022: Reparatur Trafo abgeschlossen
- Trockenlager (US- Bauart mit 36 Behältern mit Betonumhausungen) hat 6m hohe 30cm- Wände, kein Dach) wohl nicht beschädigt
- 1. 6. 2022: Blöcke 2 und 4 am Netz
- Netzgrenze Ukraine/ Russland unklar



[#Nuclear](#) safety at the [#Zaporizhzhya](#) NPP has been broken. We are doing everything possible, but the fire is going on, firefighters are not allowed. There are great risks. Fightings are going on at the plant. The [#reactors](#) are in danger", Igor Murashov, head of the NPP.



Südukraine (Yushno- Ukrainsk, Mijkolaev, Nikolajew)



- 3 Blöcke a 1000 MW
- Im ukrainischen Bereich
- Mehrfacher Überflug von Lenkflugkörpern
- 16.3.2022: Synchronisation der Ukraine mit dem westeuropäischen UCTE- Netz
- 1. 6. 2022: Blöcke 1 und 2 am Netz, (insgesamt 7 in der ganzen Ukraine)
- Teil des ukrainischen Strom**exports in die EU**

- **Nach dem Krieg:**
- Errichtung „3. Perimeter“ (Graben?) gegen Panzer und Artillerie
- Vollständiger Umstieg auf Westinghouse-Brennstoff
- Fertigstellung von Kmelnitzki 3-4 mit AP-1000
- Bau von 7 weiteren Reaktoren westlicher Bauart, u.a. Südukraine-4, Rowno-5, Chybysin (Tscherkassy) 1-4



Russische (WWER-1200) Exportprojekte (Stopp)



Name	Land		Auftrag	In Betrieb	Bemerkungen
1 Mochovce 3-4	Slowakei		87	22-23	Skoda- Liz, WWER-440
2 (Kaliningrad 1-2)	Russland		10		14 Baustopp, konserviert
3 Ostrovets 1-2	Belarus		13	20-22	
4 Temelin 3-4	Tschechien		-	-	Ausschreibungsstopp 13
5 Phuoc Dinh 1-4	Vietnam		-	-	Projektstopp 13
6 Paks 5-6	Ungarn		13	-	Verzögert, 5/22 Baustart
7 Rooppur 1-2	Bangladesh		17	23-24	
8 Kudankulam 3-6	Indien		17,22	22-23,27	WWER-1000
9 Akkuyu 1-4	Türkei		18-21	23-26	WWER-1300 TOI
10 Buser 2-3	Iran		19	22-?	WWER-1000, Eigenfinz.
11 Hanhikivi 1	Finnland		19		Verzögert, 5/22 storniert
12 Tianwan 7-8	China		20-21	27-28	Turbosätze: China
13 Xudabao 3-4	China		20-21	27-28	Turbosätze: China
14 El Dabaa 1-4	Ägypten		11.7.22	28-30	Turbosätze: Südkorea
15 Tudakul 1-4	Usbekistan		(18-19)	29-30	

Beispiel Exportprojekte: Akkuyu (WWER-1300)



- 4 WWER-1300 V509T (AES 2006 TOI)
- BOO Build- Own- Operate
- 100% russisch finanziert, bis zu 49% zum Verkauf (Türkei 5/22: Kein Geld)
- 4 x 6,25 G\$ (5610 \$/kW) 5,92 G€, 5314 €/kW
- Festpreis 0,1235 \$/kWh: In 20a abbezahlt
- Lebensdauer 100a
- Baubeginn 2018,19,20,21
- In Betrieb 2023,24,25,26
- Bauzustand 6/2022:
 - Akkuyu-1: Primärkreis, Kran, Turbogenerator installiert
 - Akkuyu-4: Fundament gegossen (im Zeitplan)
- 2026: 10% der türkischen Elektrizität



Beispiel Exportprojekte: Akkuyu (WWER-1300)



- Doppelcontainment (1,2m + 1,5m = 400t Flugzeug)
- Erdbebenverstärkt (0,33g = Intensität 9)
- 4 Trafos, 4 Diesel, Kernfänger, Wasserstoffabbausystem, Notwarte
- Kernschadensfrequenz mit $5,15 \times 10^{-06}$ /a
- Lastfolgefähigkeit nur 100-75-100 % N_{NOM} mit 5%min
- Vollständiger Uran- Brennstoffbetrieb (kein Pu-Mischoxid- Einsatz)

Beispiel Exportprojekte: Paks II (2 x WWER-1200)



- 2014 Absichtserklärung Orban/ Putin
- 2016: EU akzeptiert Fehlen einer Ausschreibung
- 2017: EU erkennt Finanz.modell (80% russ. Kredit) an, keine Staatssubvention
- 2019: Genehmigungsverfahren
- 22. 5. 2022: Auftrag zur Baugrundvorbereitung (Spundwand)

Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Entwicklungsstufen



Fusion

Generation IV

Neue Konzepte, Hydrogen, Brüter, HTRs

Generation III (III+)

EPR, ESBWR, AP-1000, PBMR, WWER-392

Generation II

PWR, WWER, BWR, CANDU, AGR, RBMK

Generation I

Test Reaktoren, GGR, SNR



1950

1970

1990

2010

2030

2050

Reaktoren für den Weltmarkt 2022 (Vorgängerbaureihen)



	Name	MWel	Developer		Betrieb	Im Bau	Geplant
PWR	EPR	1650	Framatome/ EdF/ (Siemens/KWU)		3	3	10
	Atmea 1	1150	Framatome/ Mitsubishi		-	-	(4)
	AP-1000	1100	Brookfield (CAN)/ Westinghouse		-	2	-
	CAP-1000	1100	CNNC (China)/ Westinghouse		4	10	18
	CAP-1400	1300	CNNC		-	2	-
	ACPR-1000	1000	China GN/ CNPC		24	6	-
	Hualong- 1	1150	China GN/ CNNC		3	7	4+
	WWER- 1000	1000	Atomenergoprojekt, OKB Gidropress		36	5	-
	MIR- 1200	1200	Atomenergoprojekt, OKB Gidropress		5	10	13
	TOI 1300	1300	Atomenergoprojekt, OKB Gidropress		-	6	12
APR	1400	Korea Electric		7	3	0	
BWR	ABWR	1380	General Electric, Hitachi (Toshiba)		5	2	4
	ESBWR	1600	General Electric		-	-	2
CANDU	E-CANDU-6	600	SNC Lavalin/ China GN		2	-	1
	IPHWR-700	700	Nuclear Power India		1	5	8
GEN IV	HTR-PM200	200	China NEC		2	0	2
	CFR-600	600	TerraPower		-	1	1
SMR	CAREM	27-100	CNEA (Arg.)/ INVAP		-	1	1
	KLT-40	35	Atomenergoprojekt		1x2	-	4
	Linglong 1	100	CNNC-CNEC New Energy/ NPIC		-	2	-

Zusammenfassung Weltmarkt für Kernkraftwerke

14 Druckwasserreaktoren (6 Hersteller)
4 Siedewasserreaktoren (4 Hersteller)
4 Schwerwasserreaktortypen (2 Hersteller)

Außerdem:

Hochtemperaturreaktoren
Schnelle Brüter
Kleine Reaktoren (z.T. mobil)

Langfristig:

GENERATION- IV- Programm (US- Energieministerium 2002)

Argentinien, Brasilien, Kanada, Frankreich, Japan, Südkorea, Südafrika, Schweiz, Großbritannien, EURATOM

Sechs fortgeschrittene Reaktortypen:

- Verbesserte Sicherheit,
- Zuverlässigkeit,
- Wirtschaftlichkeit,
- Geringerem Proliferationsrisiko



Ca. 20 Druckwasserreaktoren
Ca. 5 Leichtwasserreaktoren mit
superkritischen Dampfparametern
Ca. 10 Hochtemperaturreaktoren
Ca. 10 Schnelle Flüssigmetallgekühlte R.
Ca. 10 Salzschnmelze- Reaktoren

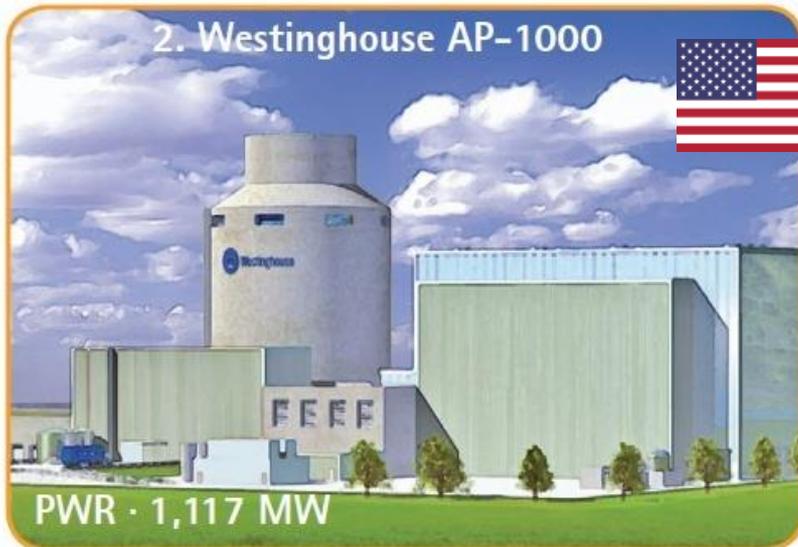


Inhalt

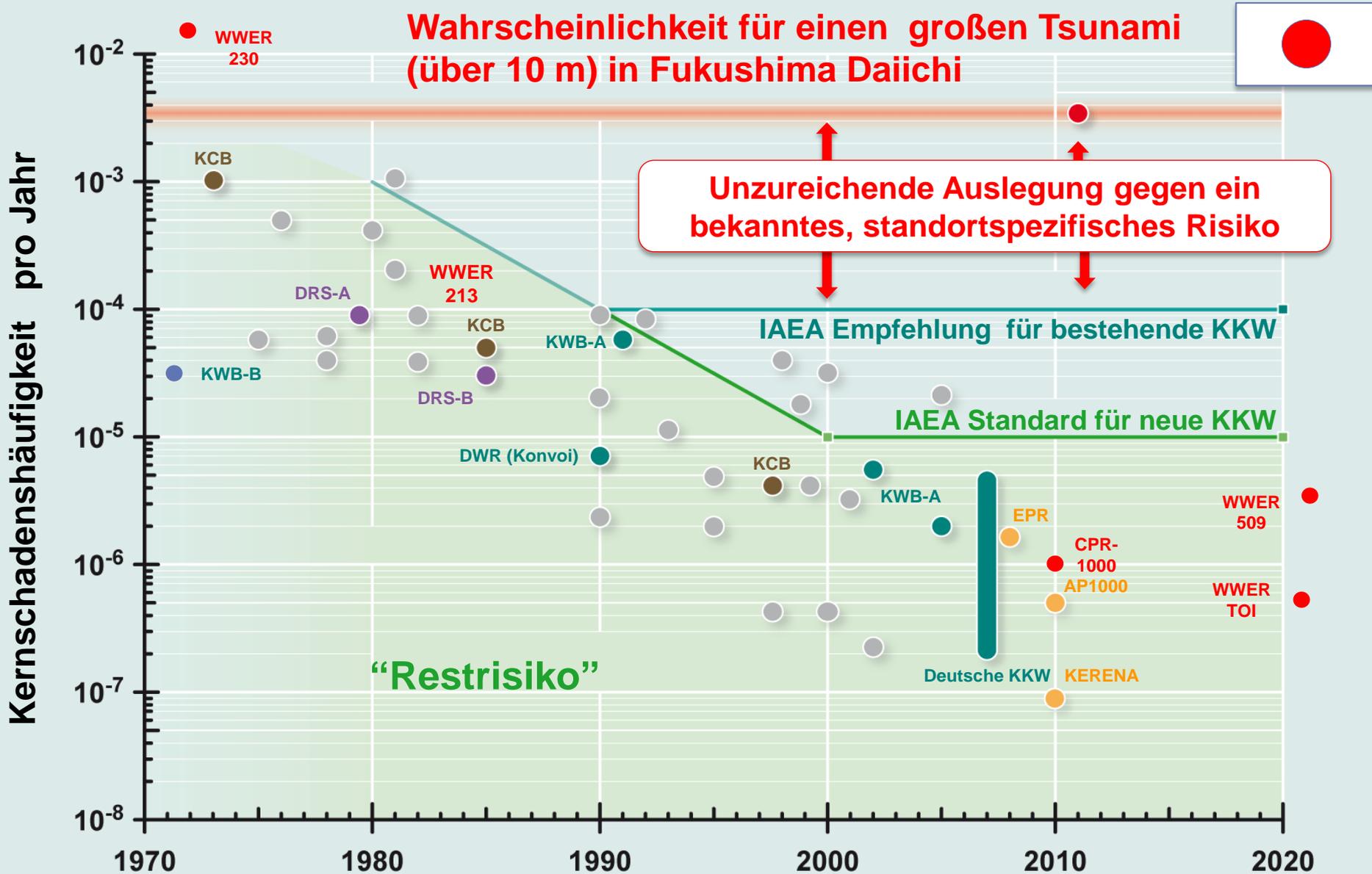


- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Kernkraftwerke für den Weltmarkt



Ergebnisse Probabilistischer Sicherheitsanalysen („PSA“)



Hochwasser KKW Fort Calhoun Juni 2011 (Missouri)



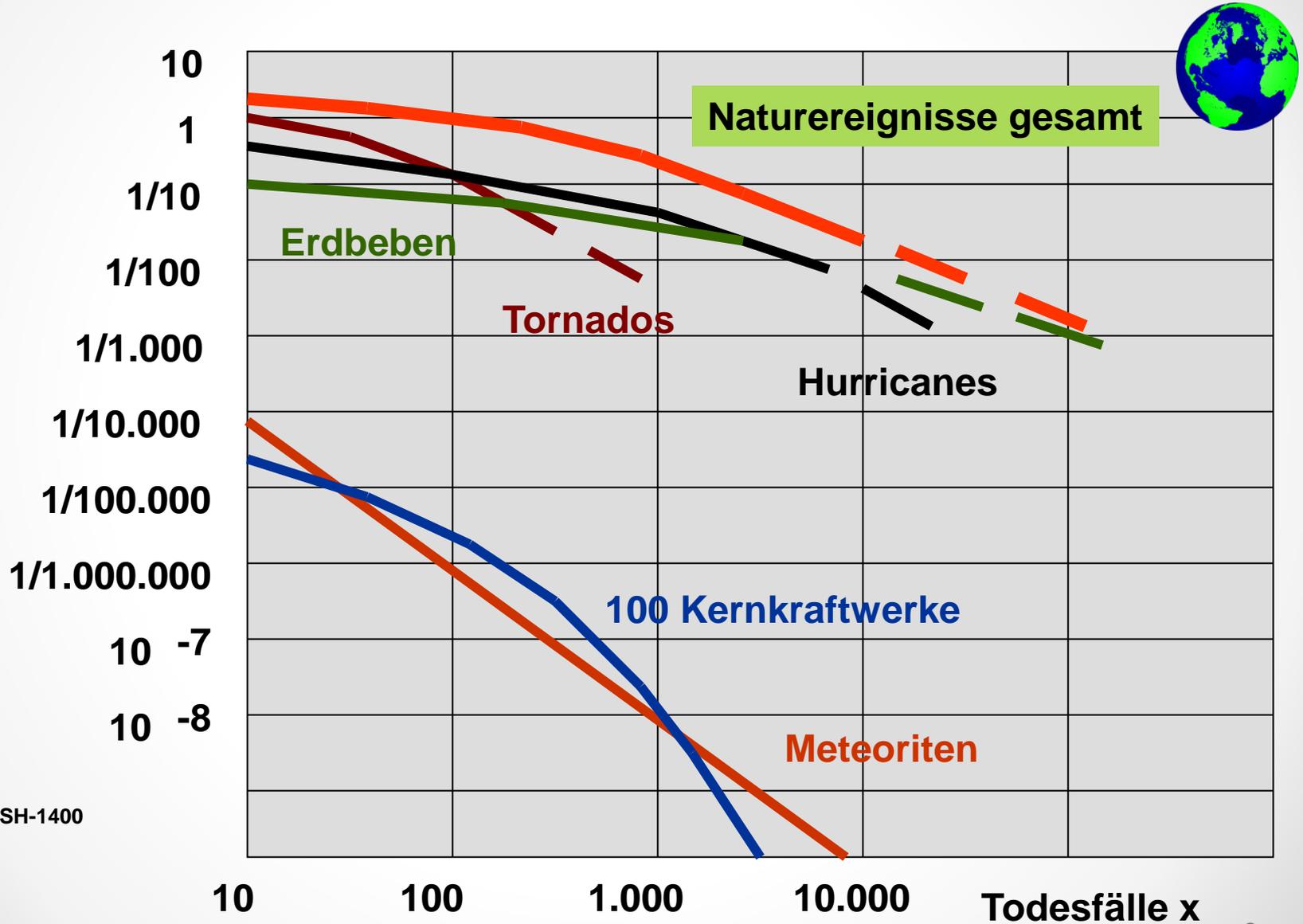
Druckwasserreaktor 476 MW_{el}:

- Mehrwöchiges Hochwasser
- **keine Beschädigung.**



Quellen: U.S. Army Corps of Engineers (großes Foto) un
Associated Press (kleines Foto)

Häufigkeit von Naturkatastrophen



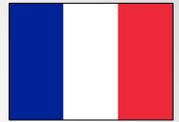
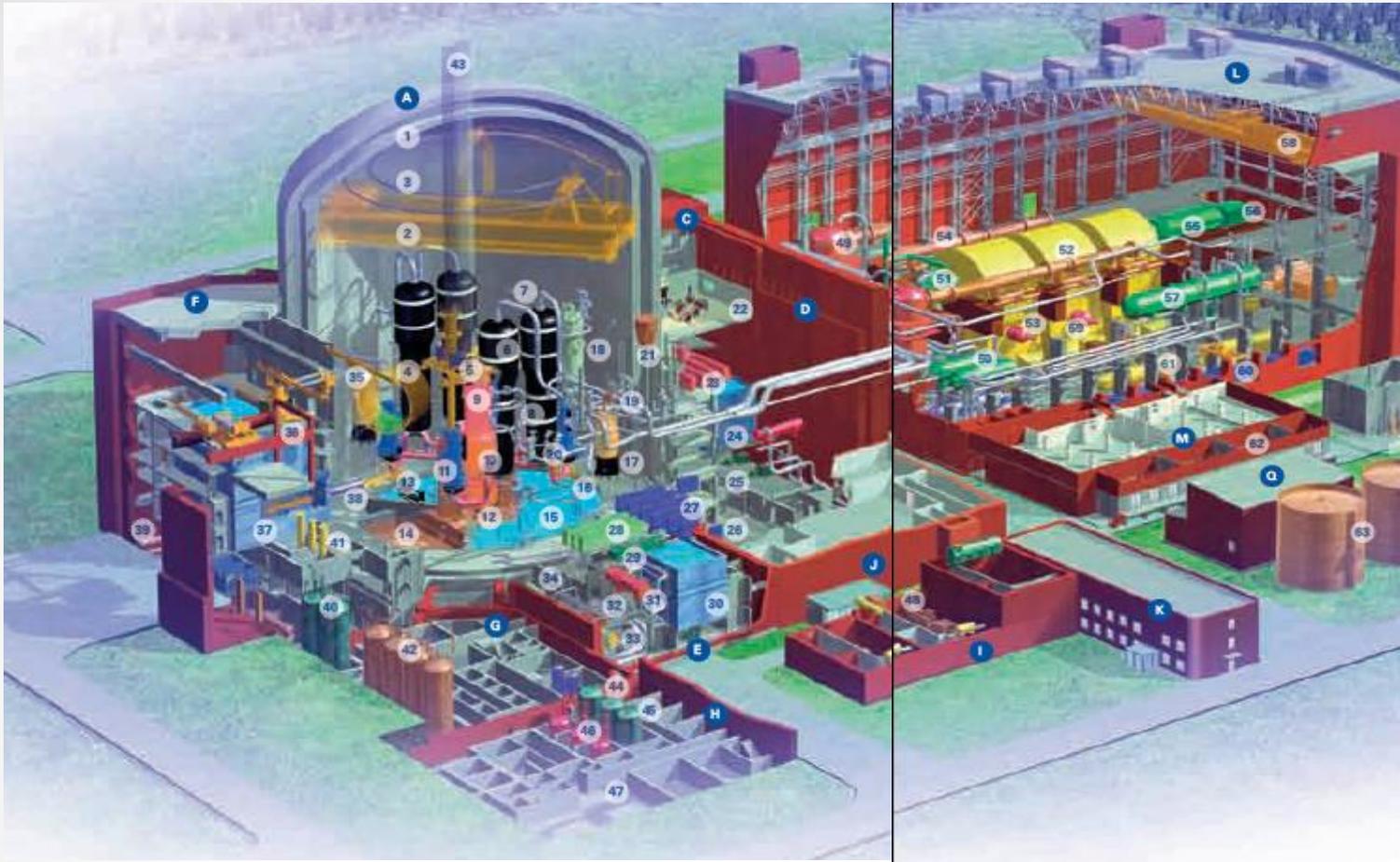
Quelle: WASH-1400

Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - **Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Small Modular Reactors (SMR)**
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - **Energiedichte**
 - **Kosten**
 - **Reichweite**
- **Projekte in der Welt**
 - **Canada, USA, Japan, Indien, China**
- **Fazit**

EPR European Pressurized Water Reactor



In Betrieb: Taishan 1-2 (China)

Olkiluoto- 3 (Finnland),

Im Bau: Flamanville- 3 (Frankreich),

Hinkley Point II 1-2 (UK)

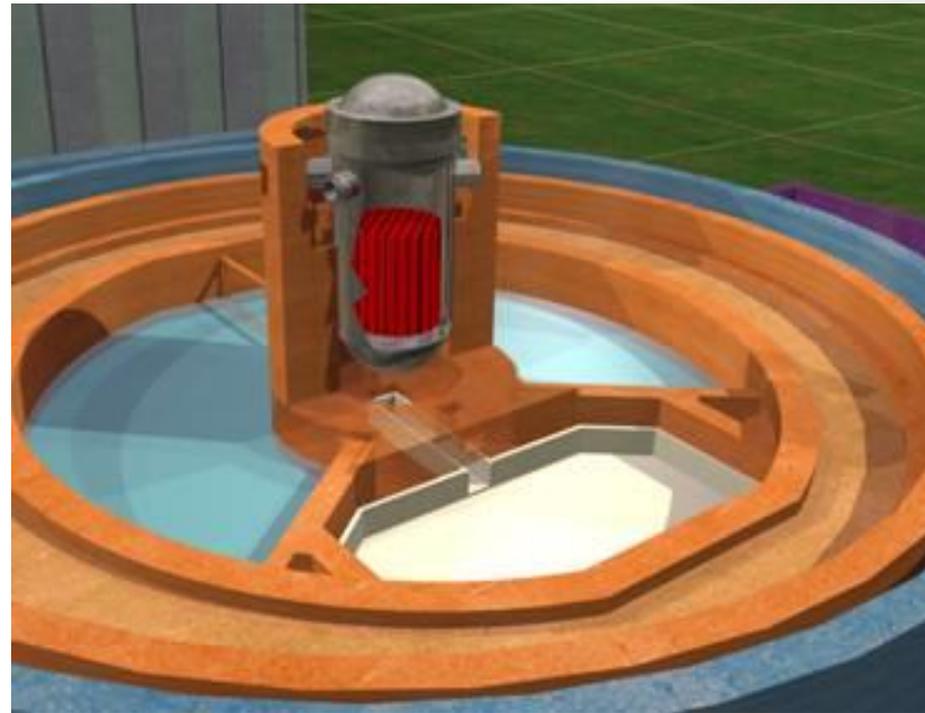
Projekte: Sizewell C 1-2 (UK), Jaitapur 1-6 (Indien), Taishan 3-4 (China)

EPR™-Reaktor Sicherheitskonzepte Vermeidung schwerer Störfälle

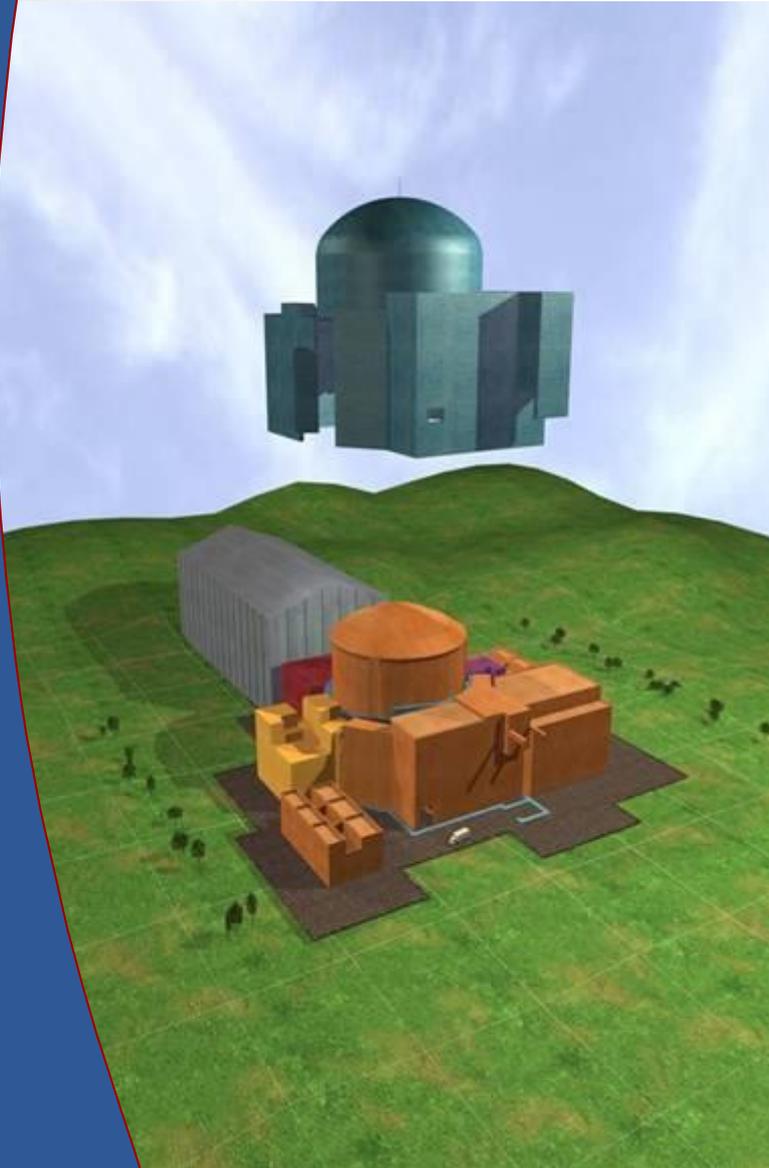
Kurz- und Langzeitfunktion des Containments ist sicherzustellen:



- Keine Leckagen durch spezielle Auslegung des Containments
- Postulierte Kernschmelze kann innerhalb des Containments sicher beherrscht werden

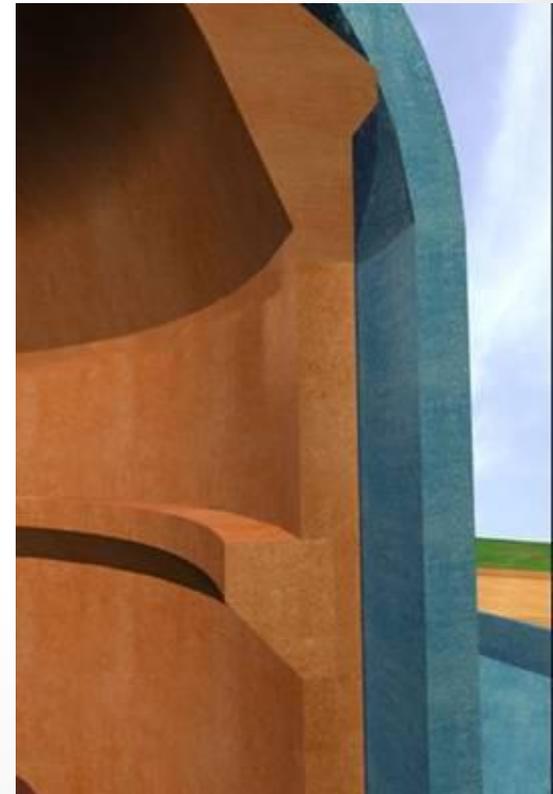


Erster Reaktor weltweit, bei dem die Beherrschung einer Kernschmelze sichergestellt werden kann!



Zweite Betonstruktur:

**Großes Passagierflugzeug oder schnelle
Militärmaschine**



Hinkley Point C (EdF Energy)



2 x 1650 MWe AREVA- EPR (4th-of-a-Kind)

Erstes privat finanziertes Kernkraftwerksprojekt in UK

2012: EPR Design Certification („GDA“)

2012: „Contract for Difference“:

- Strike Price: **92.50 £/MWh (35a)**
(preisgünstiger als Gas, Wind, Kohle...)
- (**-3 £/MWh wenn Sizewell C folgt**)
- Inflations-indiziert
- Incl. Brennstoff, Entsorgung, Abriss
- Lebensdauer 60a +
- Baukosten 16 G£ (2016)
- Berechnete **Payback Time** (24 TWh/a): **7.2 a**
- Investoren: EdF (66.5%) + CGN China General Nuclear (33.5%)
- 900 Dauerjobs, + 5.600 Bauphase (57% UK)



Okt. 2014: Genehmigung durch Europäische Kommission (heute: Brexit?)

Okt. 2015: Baugenehmigung

28. Juli 2016: EdF Energy Investitionsentscheidung

2023 - 25: In Betrieb (7% der UK Stromproduktion)

9 geplant: 2 APR Moorside, 2 EPR Sizewell, 4 ABWR Wylfa+Oldbury, 1 Hualong Bradwell

Inhalt

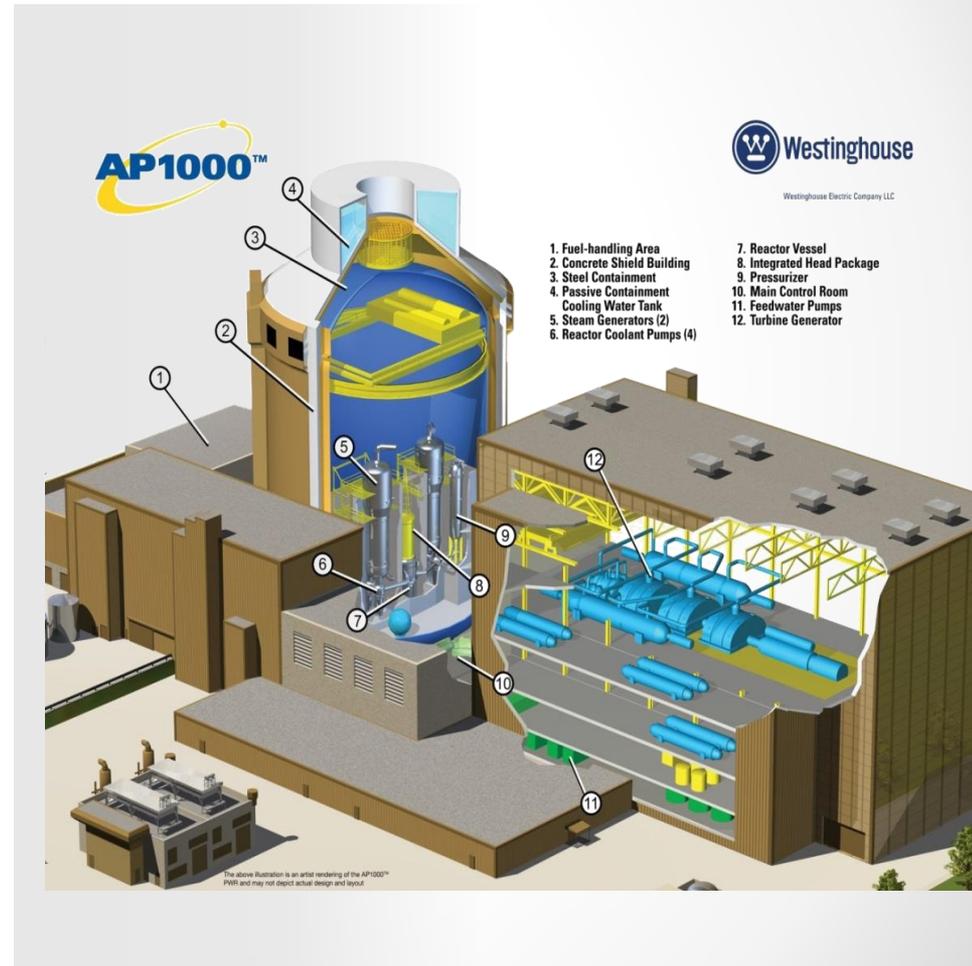


- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - **Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Small Modular Reactors (SMR)**
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - **Energiedichte**
 - **Kosten**
 - **Reichweite**
- **Projekte in der Welt**
 - **Canada, USA, Japan, Indien, China**
- **Fazit**

Gen III+: Light Water- (PWR) Konzepte: AP-600/ AP-1000



- **Westinghouse: Hersteller von ca. ¾ aller DWRs weltweit**
- Revolutionär
- Konsequente Vereinfachung
- Erweiterte Passivsysteme
 - (z.B. keine „nuklearen“ Diesel nötig)
- **1999: AP-600 zertifiziert d. US-NRC**
 - Betreiber: Zu klein
- **2005: AP-1000 zertifiziert (UK: 2011)**
 - Lizenz für China, 4 Blöcke
- **2012: 4 Blöcke in USA**
- **2016: USA: Verzögerungen**
- **2017: Insolvenz von Westinghouse, Abbruch von VC Summer 2-3**
- **2018/19: Betrieb von Sanmen 1-2 und Haiyang 1-2 (China)**
- **8 Nachfolgeprojekte in China?**
- **2023/24: Betrieb von Vogtle 3-4**

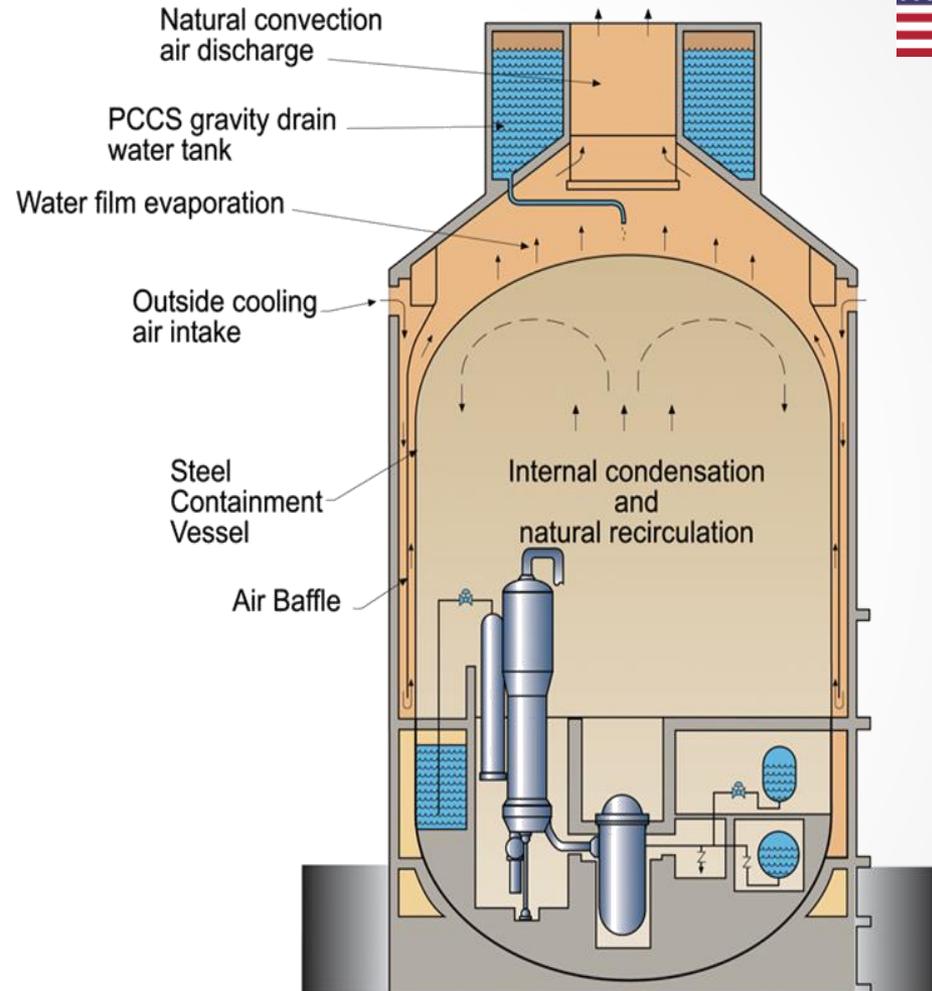


Westinghouse AP- 1000



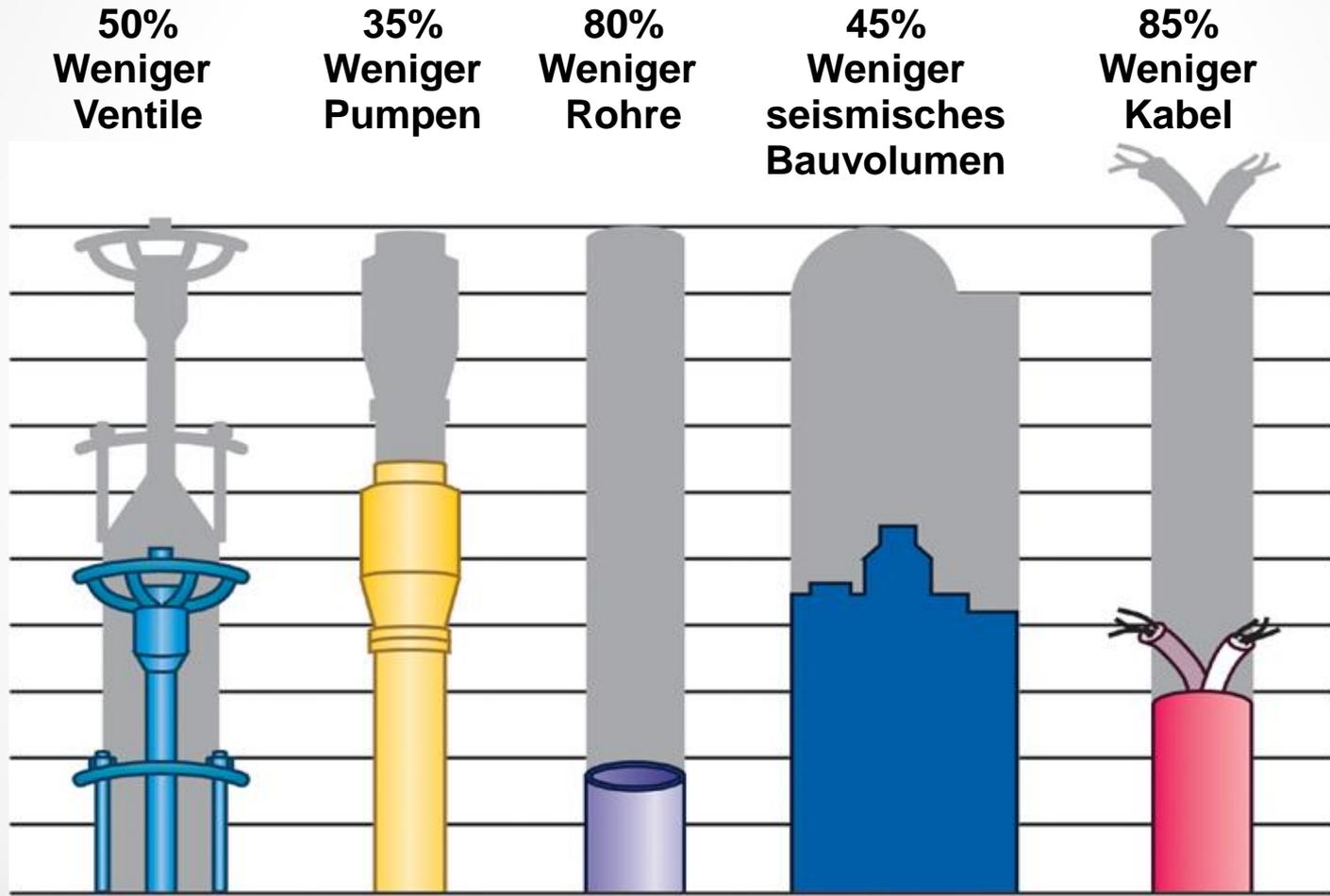
■ Containment:

- Internes Stahl-Containment
- Betoncontainment zum Schutz von „Einwirkungen von Außen“
- Passives Containment-Kühlsystem (PCS) = Wärmesenke bei Störfällen
- Funktion: Begrenzung Innendruck
- Naturkonvektion
- Zusätzliche Verdampfungskühlung von außen (aktiv)
- Keine Notstromdiesel nötig



AP1000 Passive Containment Cooling System
Westinghouse, USA

AP-1000 Passives Sicherheits- System Design



Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Generation IV



US Department of Energy 2002:

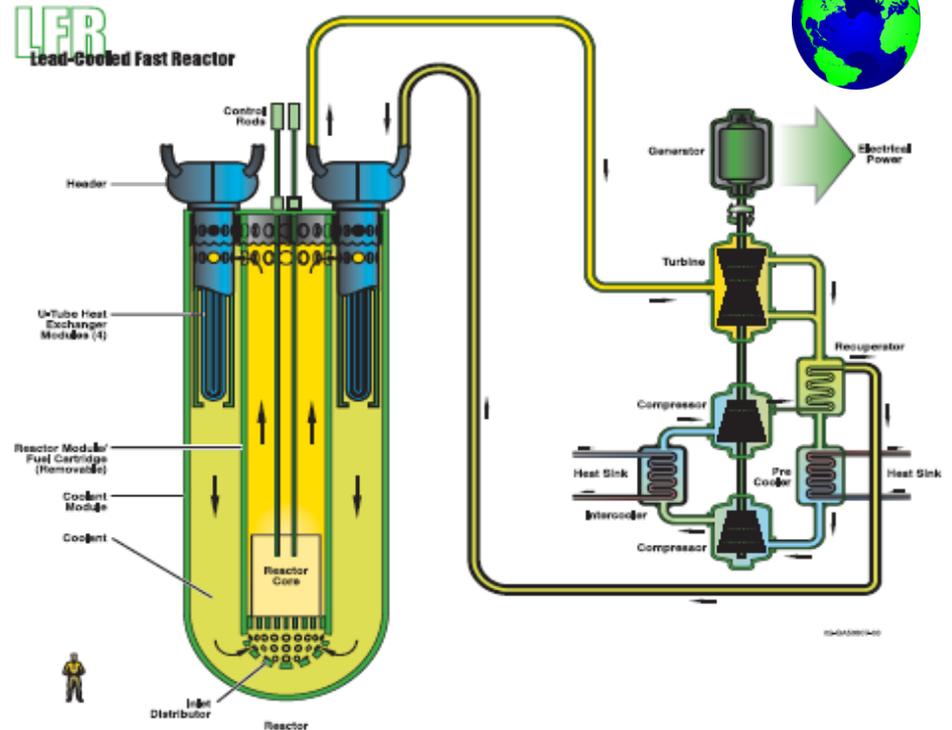
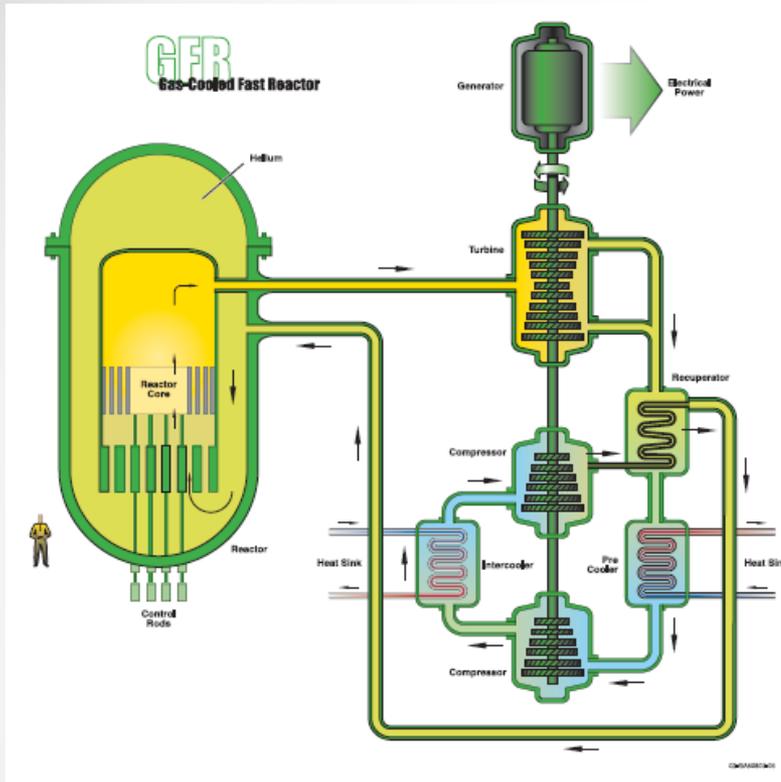
Entwicklung von sechs fortgeschrittenen Reaktortypen mit

- **verbesserter Sicherheit,**
 - mehr “passiv” (z.B. Naturumlauf)
- **verbesserter Zuverlässigkeit,**
 - weniger Komponenten (z.B. Pumpen)
- **verbesserter Wirtschaftlichkeit,**
 - Fließbandproduktion
- **geringerem Proliferationsrisiko**
 - Mehrjahreszyklen (3 – 20 Jahre)



<http://gen-iv.ne.doe.gov>

Generation IV (1 – 2)



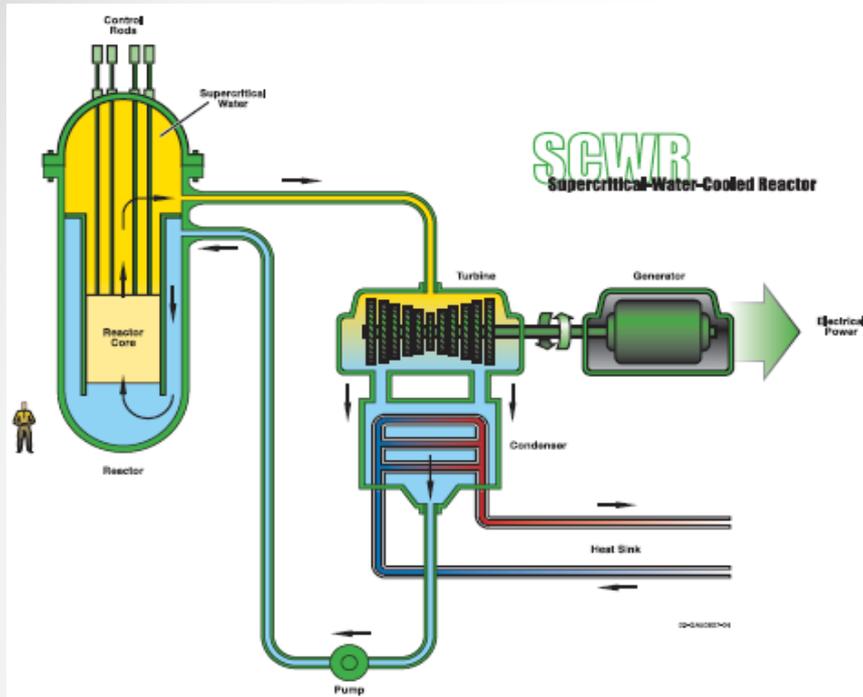
GFR Gasgekühlter schneller Reaktor

- 600 MWth, Wirkungsgrad 48%
- Keramischer Brennstoff, U/ Pu (20%)
- Heliumgekühlt (Brayton Cycle)
- Geschlossener Brennstoffkreislauf (Aktinidenverbrennung)
- 850 °C- Prozesswärme (H₂- Erzeugung)

LFR Bleigekühlter schneller Reaktor

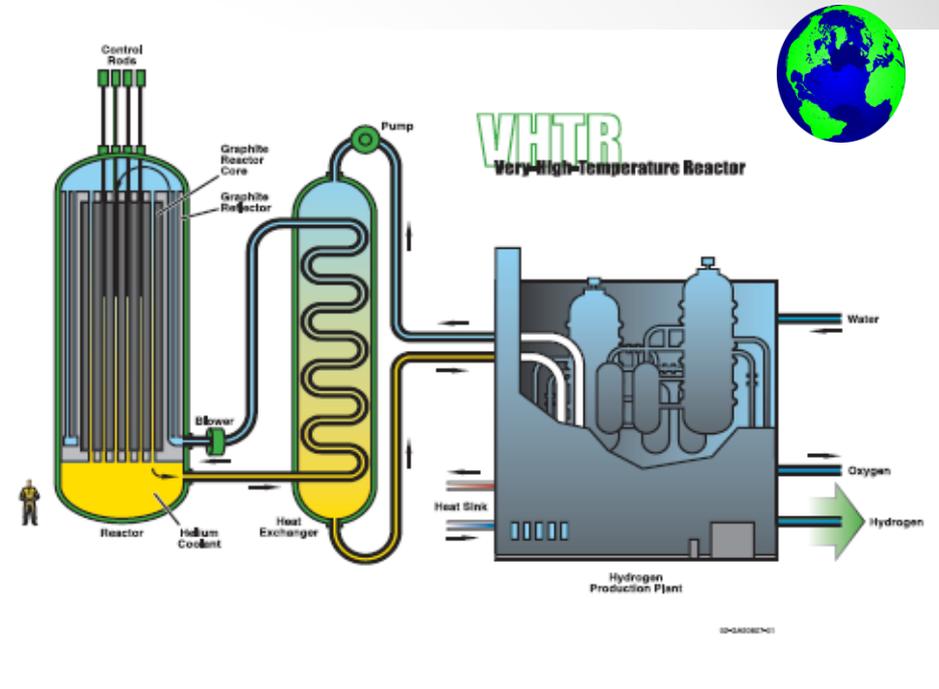
- 50 - 1200 MWe, drucklos, Naturumlauf
- Metallischer o. Nitrid- Brennstoff, U/ Pu
- Pb- oder Pb/Bi- Kühlung für 550 °C
- Geschlossener Brennstoffkreislauf
- Meerwasserentsalzung, H₂- Erzeugung
- 15 – 20 Jahreszyklen

Generation IV (3 – 4)



SCWR Superkritischer wassergekühlter Reaktor

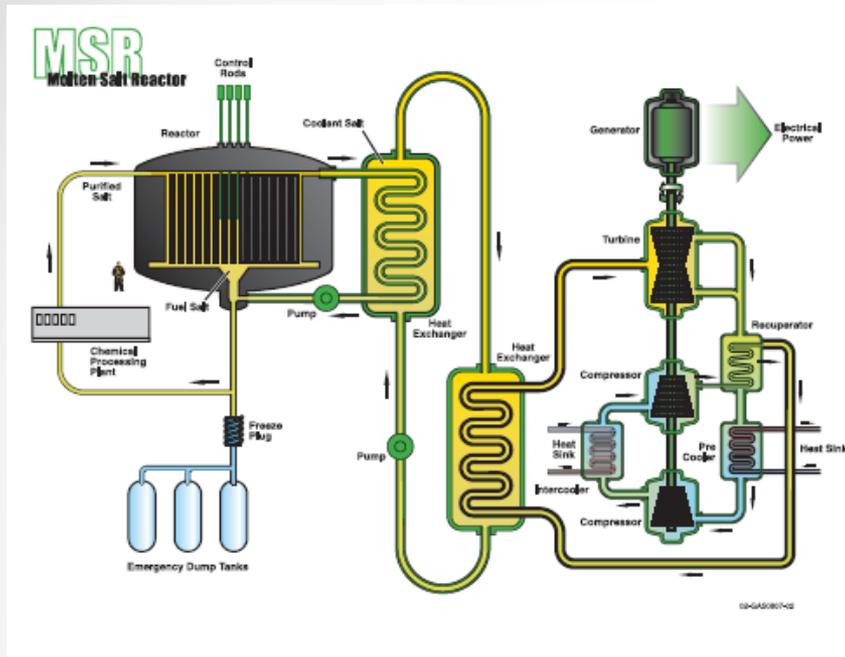
- SWR mit überkritischen Dampfparametern
- 250 statt 70 bar,
- Aufwärmspanne 280 bis 510 °C
- Thermisches oder schnelles Neutronenspektrum
- 1700 MWe, Wirkungsgrad 44 - 50%
- Kostengünstig (900 \$/kW)
- Offener Brennstoffkreislauf



VHTR Höchsttemperaturreaktor

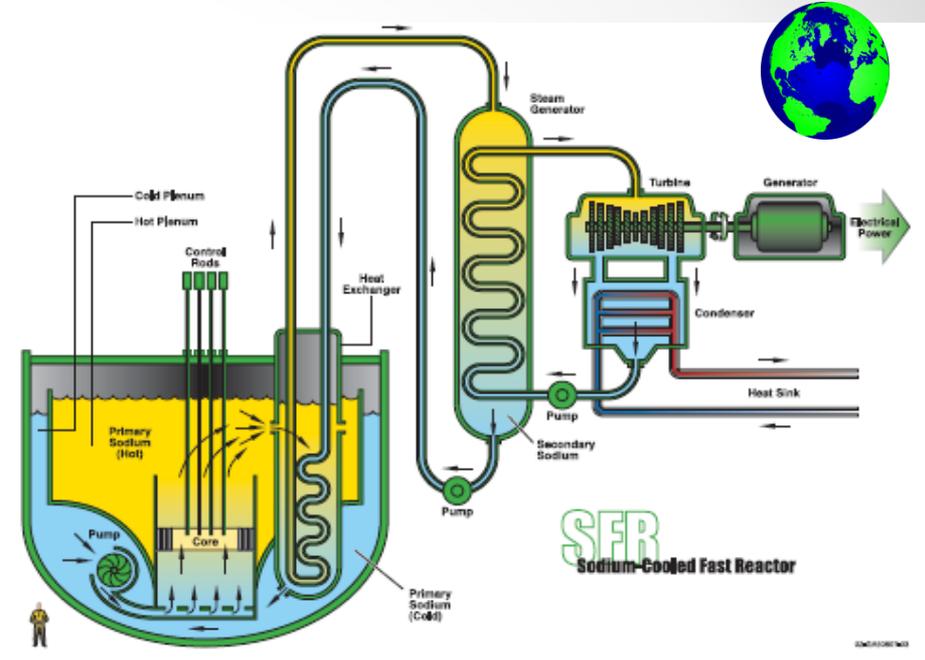
- 1000 °C- Prozesswärme (H₂- Erzeugung, Metallind.)
- Graphitmoderiert
- Kugelhaufen oder prismatischer Kern (SiC, ZrC)
- 600 MWth, Wirkungsgrad 50%
- Heliumturbine (Brayton Cycle) oder indirekt
- Direkte Endlagerung/ offener Brennstoffkreislauf

Generation IV (5 – 6)



MSR Salzschnmelzegekühlter Reaktor

- Th/ U- Fluorid in NaF/ ZrF₄- Salzschnmelze gelöst
- Graphitmoderiert
- 1000 MWe, Wirkungsgrad 44 - 50%
- Zwischenkreislauf nötig
- Heliumturbine (Brayton Cycle)
- Geschlossener Brennstoffkreislauf
- 700 °C- Prozesswärme (H₂- Erzeugung)



SFR Natriumgekühlter schneller Reaktor

- Aktinidenverbrennung (Brutrate bis 1,3)
- MOX oder Metallischer Pu- U- Brennstoff
- bis zu 1700 MWe, Wirkungsgrad 44 - 50%
- Primärkreis drucklos
- Zwischenkreislauf nötig
- Dampfturbine (Rankine Cycle)
- Geschlossener Brennstoffkreislauf
- 550 °C- Prozesswärme

Inhalt



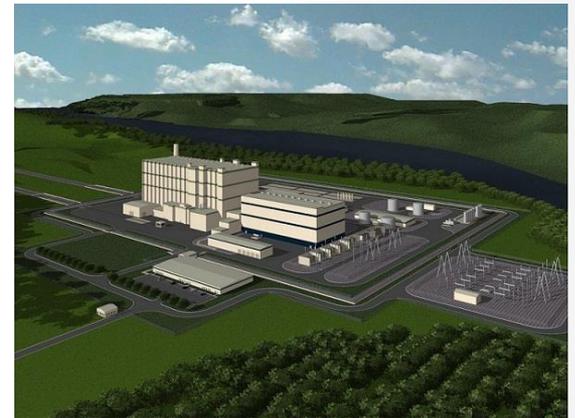
- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - **Small Modular Reactors (SMR)**
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Kleine Modulare (Small Modular) Reaktoren (SMR)



Akademik Lomonosov, Pevek, Russland, 2x35 MW DWR, 2019

Shidaowan, China, 2x105 MW HTR, 2022



CAREM, Argentinien, 10 (100) MW DWR, 2023

Kemmerer, Travelling Wave Reactor (USA), 600 MW, geplant



FLEXBLUE, Frankreich, 160 MW DWR, Studie

HOLOS, USA, 5 MW, Projektvorschlag

Kleine Modulare (Small Modular) Reaktoren (SMR) II



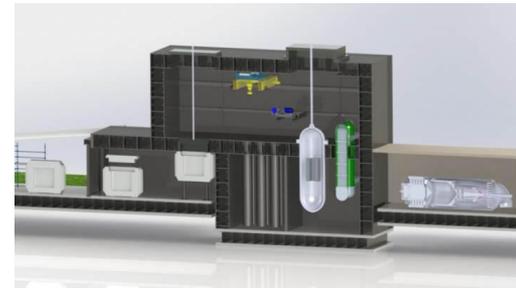
ACPR 50S, China, 40 MW DWR, 2022



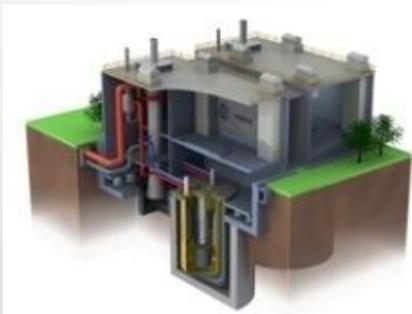
BREST OD-300, Russland, 300 MW , Pb/ Nitrid ca. 2024



Rolls- Royce, UK, 220- 440 MW DWR, Entwicklung



URENCO- Battery, UK/Can, HTR, 4 MW, 2025



PRISM, USA, 165 MW Schneller Brüter, Projekt



Moltex Stable Salt Reactor, UK/ Can., 300 MW, MSR, Entwurf

CAREM Baustelle Dezember 2019

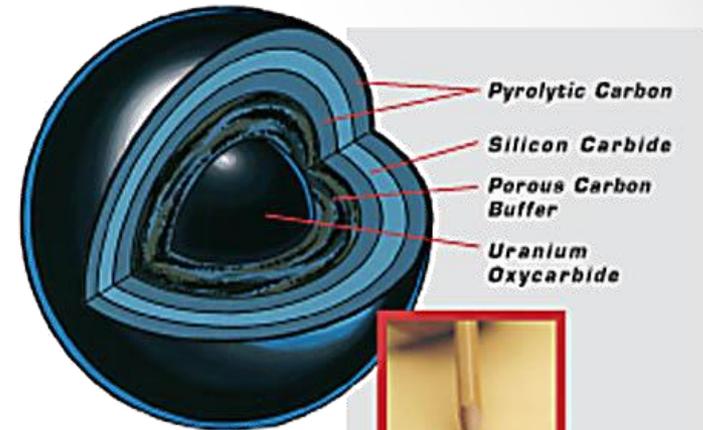


GT- MHR: General Atomics, OKBM (Russland), Fuji, Framatome



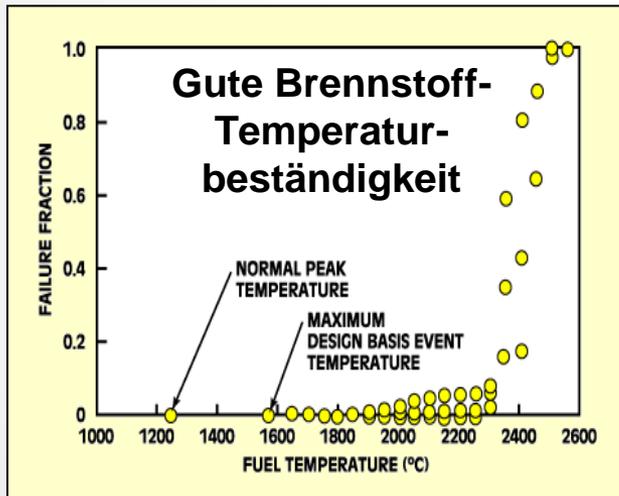
Keramische TRISO- Partikel
Ø 800 µm

Gasgekühlt



Oder:

Prismatische
(hexagonale)
Grafit- Brenn-
elemente

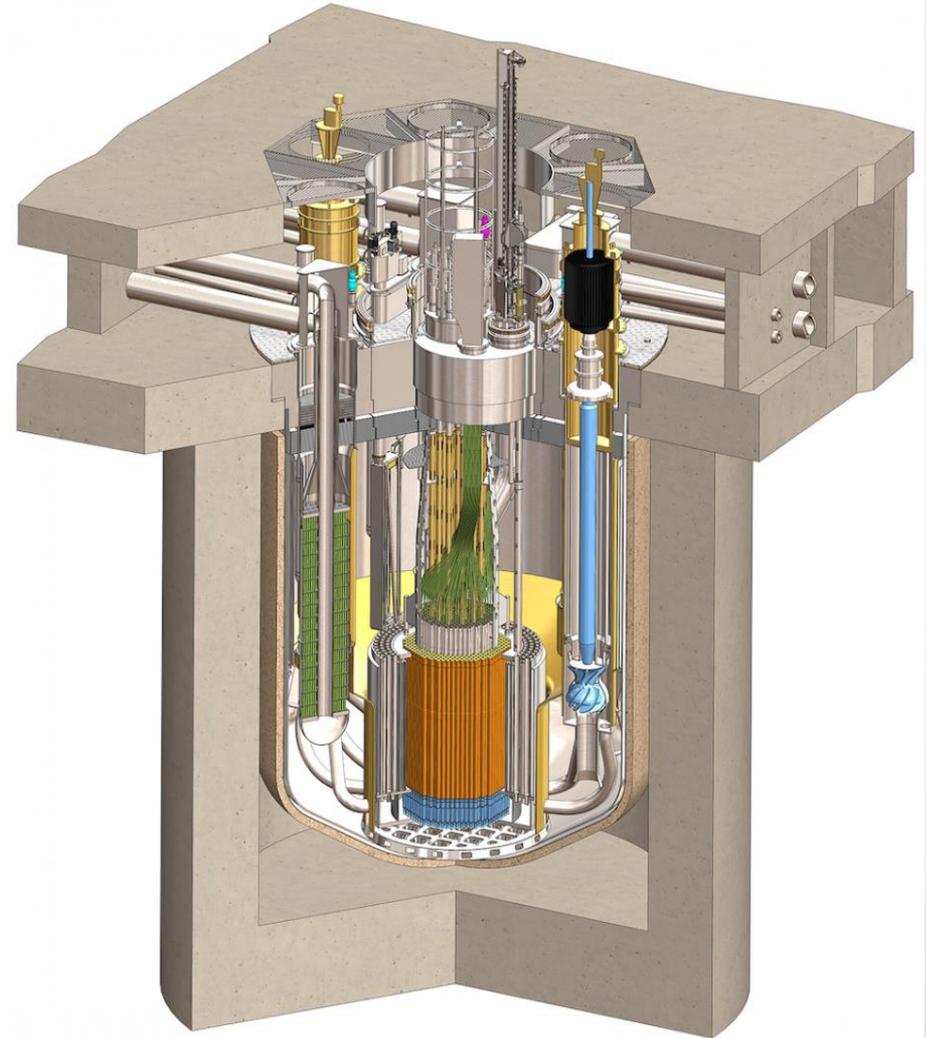


- **Kugelbett:**
 - 1 Urandioxid
 - 2 Poröser Grafit: Spaltgasrückhaltung
 - 3 Silikonkarbid: Diffusionsbarriere für Spaltprodukte
 - 4 Pyrolytisches Grafit: Mechanische Stabilität

Terrapower/ GE Travelling Wave Reactor (Bill Gates)



- „Schneller Brüter“ + Salzspeicher
- **Radial wandernde Brutzone**
- Mehrjahreszyklen
- Abgereichertes U-238 → Pu-239
- Metallischer Brennstoff
- Keine Wiederaufarbeitung
- Verbesserte Nonproliferation
- **Gasoffene drucklose Brennstäbe**
- Effiziente Kühlmittelreinigung
- Kemmerer, Wyoming
- 345 MWe
- Bau: 2023 - 2030



Source: www.terrpower.com

Gen IV: MCFR Salzschnmelzereaktor

Southern Co., EPRI, ORNL TerraPower, X-energy



- Vorteile (konzeptabhängig):
 - Weniger Abfall, bessere Brennstoffausnutzung
 - Geringer Reaktivitätsüberschuss im Kern
 - Konzeptabhängig: Hoher Sicherheitsstandard möglich

- Nachteile:

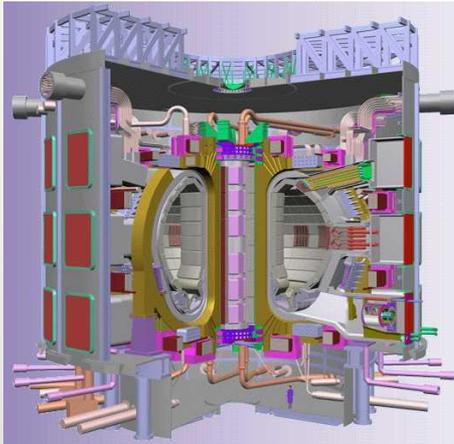
- Technische Herausforderung
- Hochtemperaturmaterialien
- Kontrollsystem
- Brennstoffchemie, Korrosionsmanagement



ITER Internationaler Thermonuklearer Experimental- Reaktor



- EU, **Russland**, Japan, Kanada, Korea
 - neu: USA (wieder), China
- 
- Tokamak
 - ca. 500 MW Fusionsleistung,
 - Ausreichend für 200 MWe
 - Im Bau (2022: Ca: 75%)
-
- Kosten (1989): 5500 M\$ (2020: 24G€?)
+ 3760 M\$ für 20 Betriebsjahre
 - Bauzeit acht (20!) Jahre
 - Letzter Schritt vor DEMO

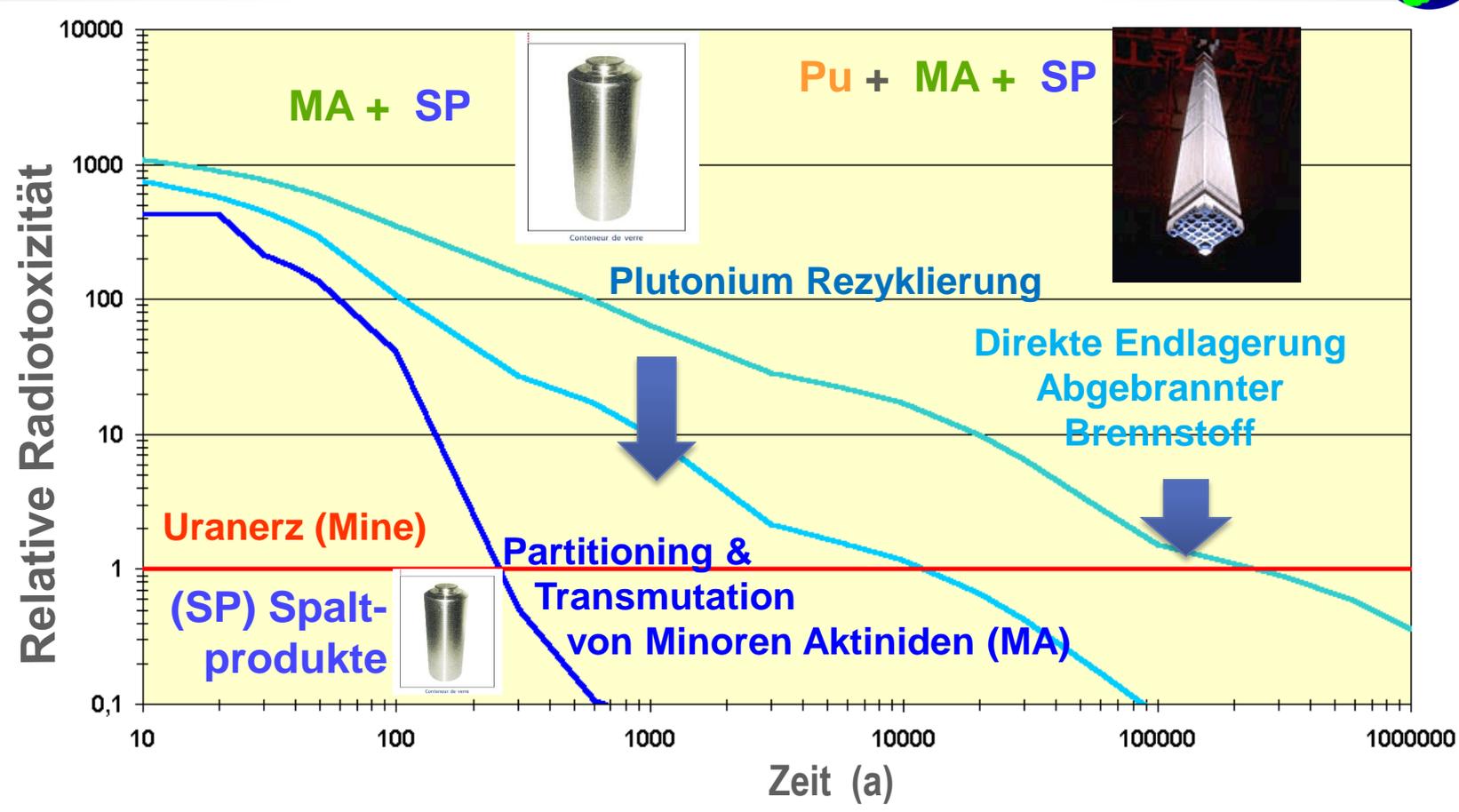


Standortbeschluss 2005:
- Cadarache, Frankreich

- **Betrieb 2025 (2028?)**
- **Deuterium/ Tritium 2035**



Schnelle Reaktoren: Reduktion der Langzeit- Radiotoxizität



Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

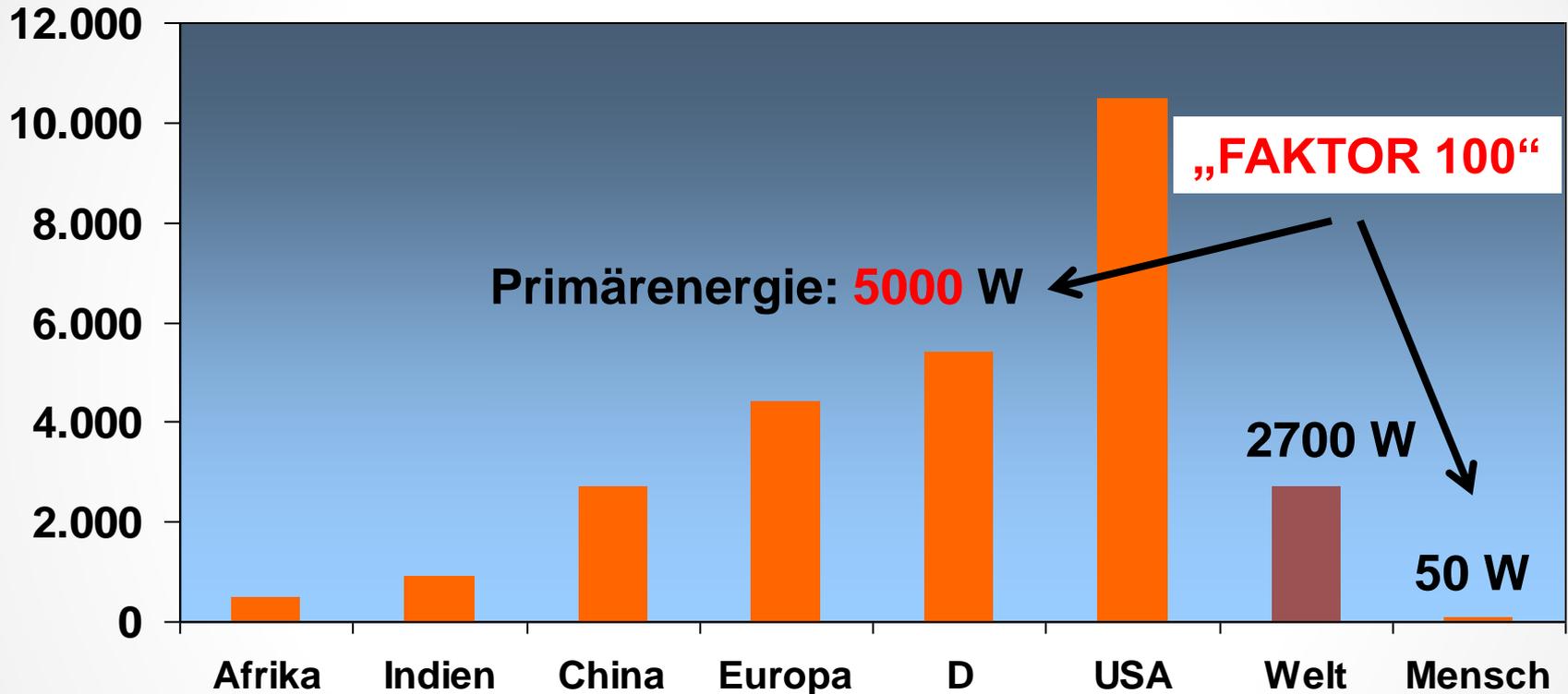
Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - **Energiedichte**
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Durchschnittlich beanspruchte Primärenergieleistung

Watt / Kopf



Quelle: Statistisches Bundesamt/ IEA

Primärenergieverbrauch pro Kopf

Weltdurchschnitt: 2700 W



Deutschland: 4900 W (24 h/d; 365d/a)



Mensch: 50 W



Jeder: **Hundertfache** Körperkraft,
oder hundert (unermüdliche) „Energiesklaven“,

Jeder ist so stark wie ein Römischer Kaiser

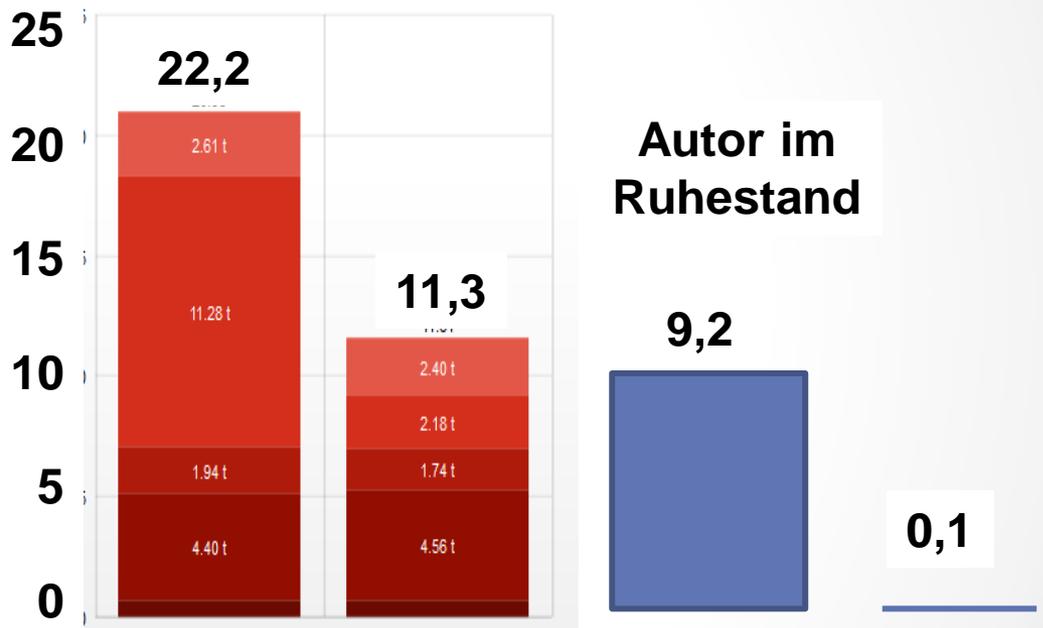


Treibhausgas- Fußabdrücke (t/a)



**Autor
im
Beruf** **Deutscher
Durchschnitt**

	CO ₂ -Ausstoß	Deutscher Durchschnitt
Heizung	1,36 t	1,64 t
Strom	1,26 t	0,76 t
Mobilität	11,28 t	2,18 t
Ernährung	1,94 t	1,74 t
Sonstiger Konsum	4,40 t	4,56 t
Öffentliche Emissionen	0,73 t	0,73 t
Ergebnis	20,96 t	11,60 t



Wie Sie Ihre CO₂-Bilanz für die Zukunft optimieren, erfahren Sie in [Mein CO₂-Szenario](#).
 Weitere Ideen und Hinweise finden Sie im UBA-Portal [Umwelttipps für den Alltag](#).

1 : 100 !!!

**Nachhaltig
erforderlich
(Biologischer
Umsatz)**

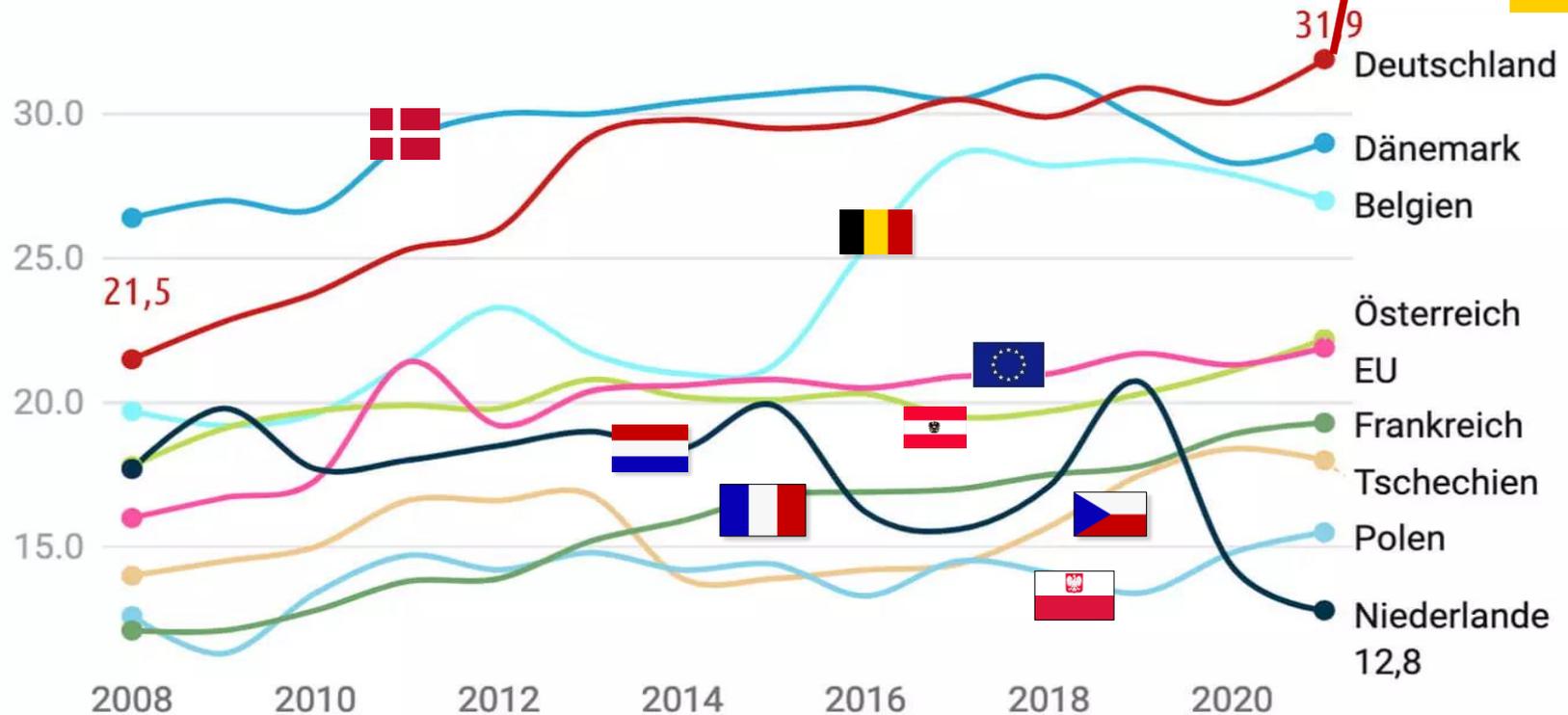
Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - **Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Small Modular Reactors (SMR)**
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - **Energiedichte**
 - **Kosten**
 - **Reichweite**
- **Projekte in der Welt**
 - **Canada, USA, Japan, Indien, China**
- **Fazit**

STROMPREISE IN EUROPA 2008 - 2021

Strompreise für Haushaltskunden in Deutschland und den Nachbarländern inklusive Steuern & Abgaben in Cent | kWh

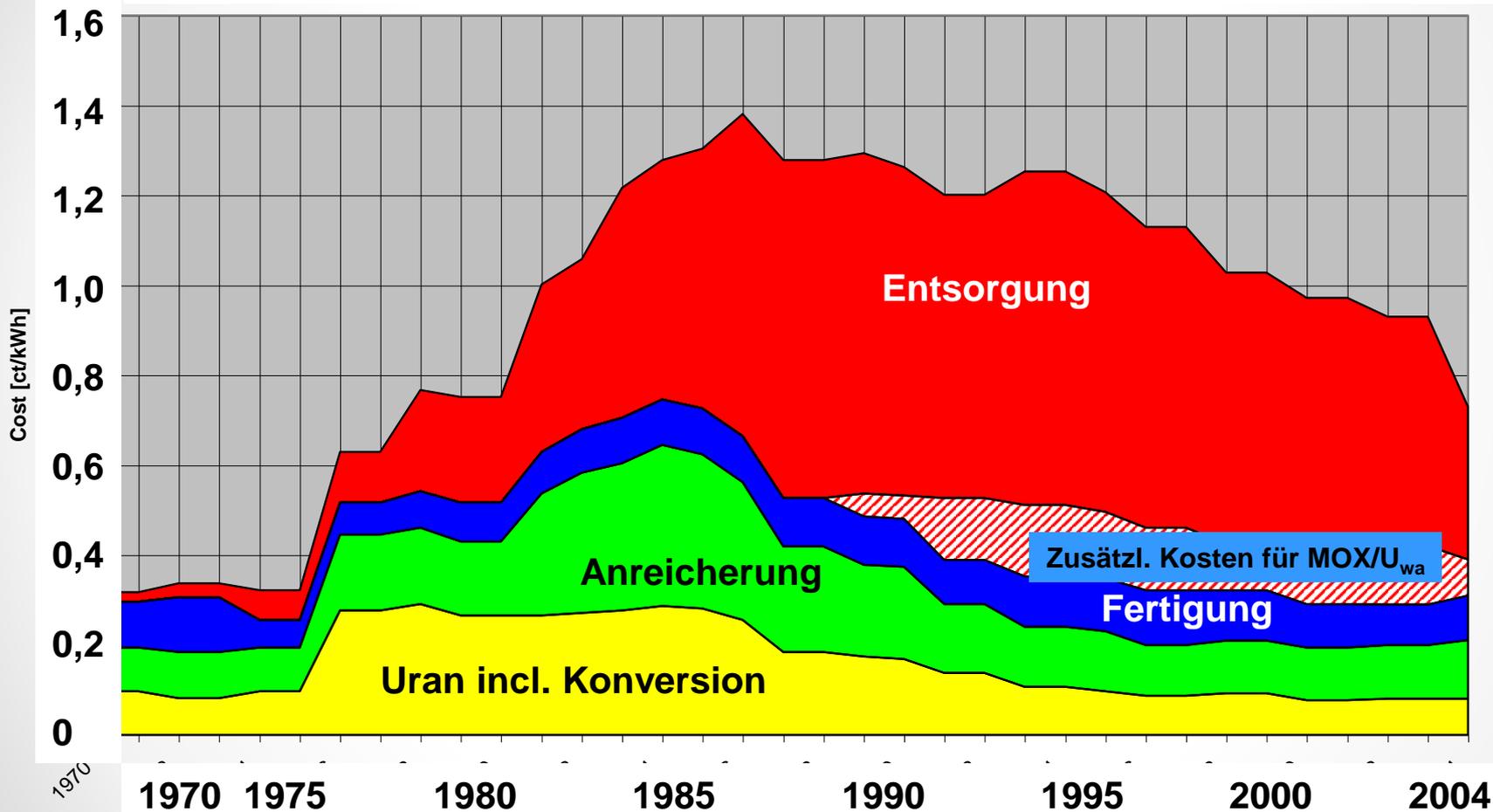


Die Grafik zeigt die Strompreise, die den privaten Endverbrauchern in Rechnung gestellt werden mit einem Jahresverbrauch zwischen 2500 und 5000 kWh. Die Daten wurden von Eurostat erfasst.

Historie der Kernbrennstoffkreislaufkosten in Deutschland 1970 - 2004



€ ct / kWh



EEG- Umlage



Vergütungszahlungen nach EEG

€ct/kWh

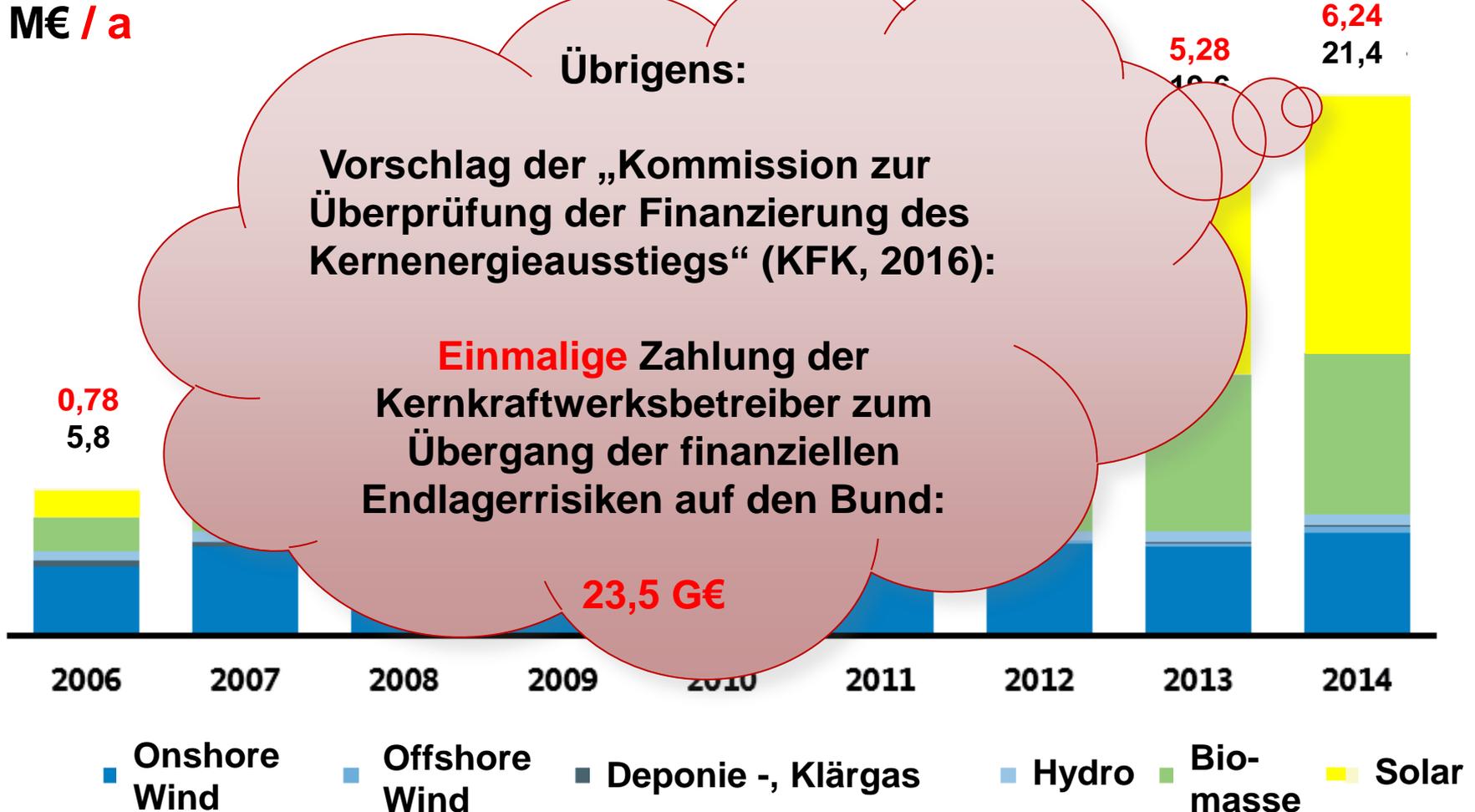
M€ / a

Übrigens:

Vorschlag der „Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs“ (KFK, 2016):

Einmalige Zahlung der Kernkraftwerksbetreiber zum Übergang der finanziellen Endlagerrisiken auf den Bund:

23,5 G€



Für Herrn Lindner:



**Die Entsorgung
aus 50 Jahren
kostet so viel
wie ein Jahr
EEG- Förderung**

Abhängigkeiten



Steigende Preise -> Anstieg „Stromarmut“

(ca. 400.000 Haushalte, die ihre Stromrechnungen nicht mehr bezahlen)

- **Mindestlohn???**
- **Rentenerhöhung....???**
- **Mietpreisbremse....???**
- **BAFöG- Erhöhung....???**

Kostenvergleich Kernenergieausstieg - Fukushima

Deutschland:



$$\begin{array}{l} \text{Grundlast der 17 KKW} \\ 167 \text{ TWh/a} \end{array} \quad \times \quad \begin{array}{l} \text{angenommener Kostenvorteil} \\ 0,04 \text{ €/MWh} \end{array} \quad \times \quad \begin{array}{l} \text{Restlaufzeit} \\ 30\text{a} \end{array} \quad = \quad 200 \text{ G€}$$

Japan:

TEPCO: Entschädigungen + Verlust + Ersatzstrom = 100 – 200 G€



**Unser Kernenergieausstieg kostet mindestens so viel wie ~~Fukushima~~
COVID**

ICRP Internationale Strahlenschutzkommission:

- Keine Todesfälle, hochwahrscheinlich keine strahlenbedingten Langzeitschäden)

Für Herrn Scholz:



Die Kosten des Ausstiegs:

Mehr als der Schaden in Japan

oder

Zwei mal Bundeswehraufrüstung

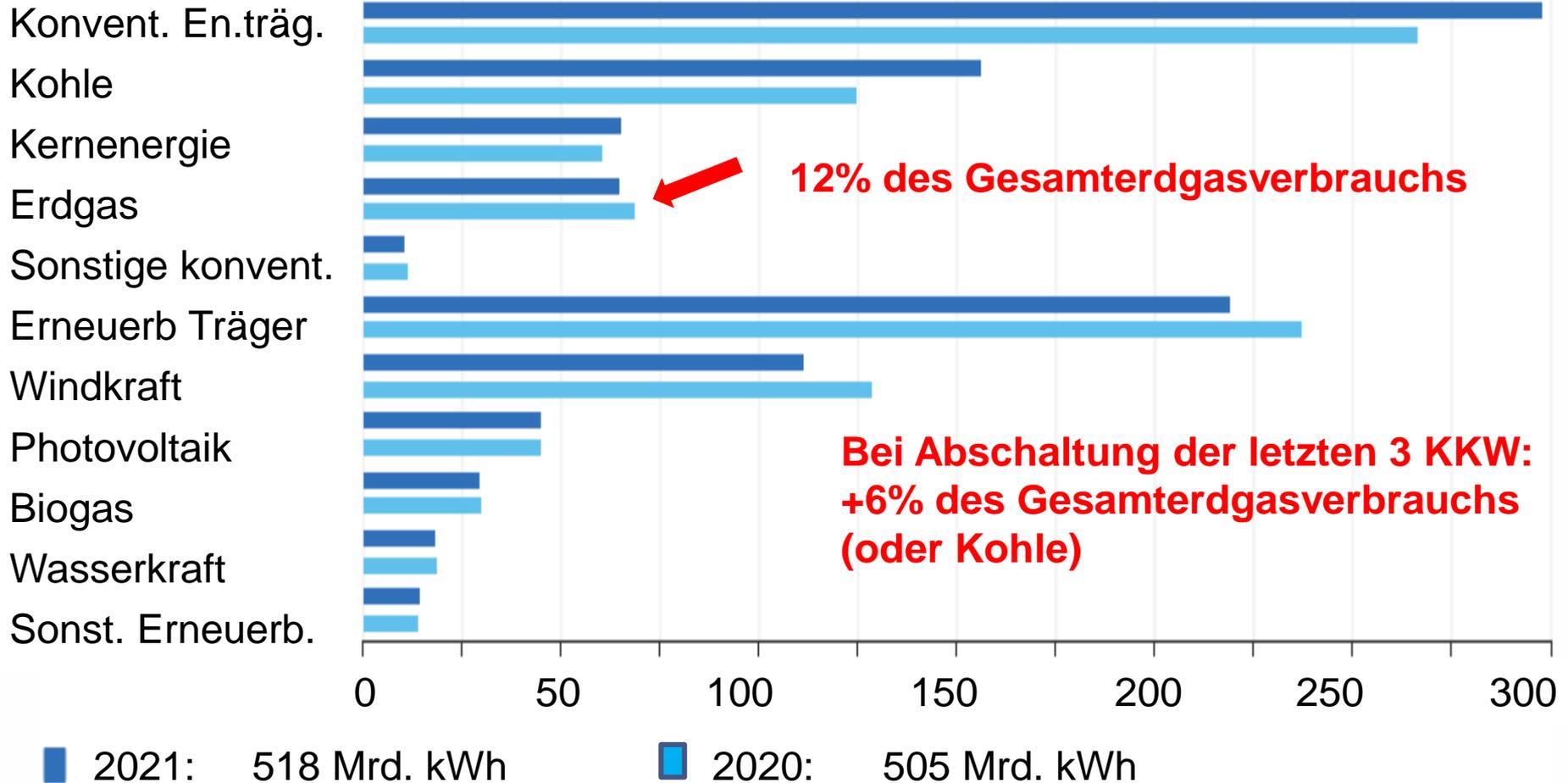
oder

Ein Drittel des Bundeshaushalts

oder

6% des Bruttonationalprodukts

Stromeinspeisung nach Energieträgern 2021/2020



12% des Gesamterdgasverbrauchs

**Bei Abschaltung der letzten 3 KKW:
+6% des Gesamterdgasverbrauchs
(oder Kohle)**

**Bisherige Kürzung der russischen Lieferungen: 30%
= 14% der Gesamtmenge**

Für Herrn Habeck:



**Der Weiterbetrieb von
6 Kernkraftwerksblöcken
würde die Gaskrise lösen**

und Milliarden einsparen

Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - **Reichweite**
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

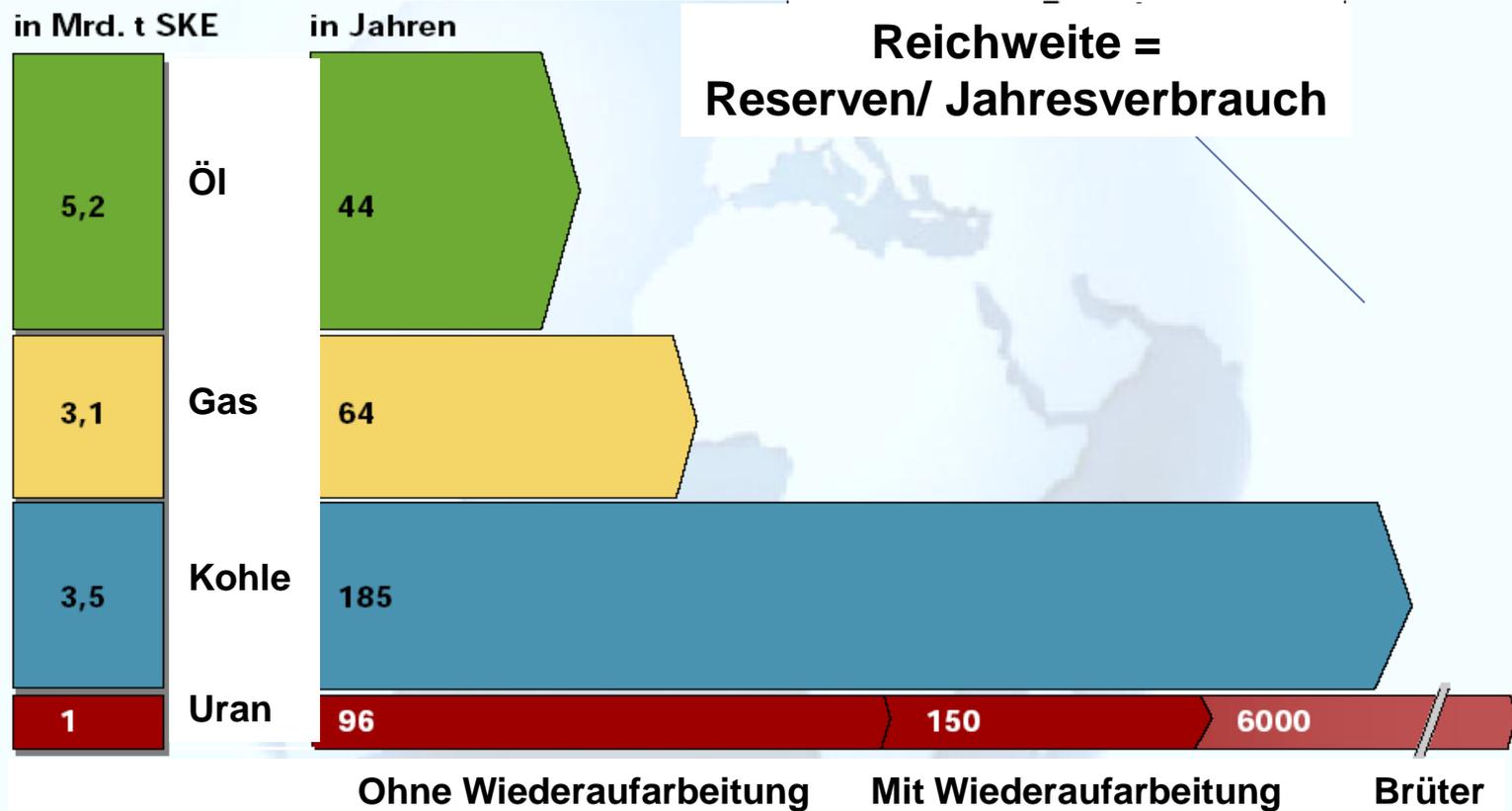
Reichweiten von Primärenergieträgern

Uran: In großen Mengen in der Erdkruste vorhanden

Thorium: Vierfach mehr als Uran

Quasi unbegrenzte Mengen im Meerwasser gelöst

Brüter strecken die Uranvorräte ca. um den Faktor 60





Reichweite

Uran: 200 Jahre aus bekannten Quellen
Große Explorationsreserven, Thorium
Mehrfach- und Waffenernennung

Förderländer

Breit gestreut,
50% aus Australien, Kanada, USA

Speicherbarkeit

Vernachlässigbarer Aufwand
(1 kg Uran = 80.000 kg Kohle)
Ca. 3 Jahre Vorlauf Brennelementfertig.

Kostenstruktur

Nur 1/5 der Brennstoffkosten für das U
Pu- Rezyklierung als Mischoxid
Wertschöpfung: Inland

Einfluss auf Gesamtkosten

Verdopplung der Urankosten steigert
Erzeugungskosten nur um 4 - 5%

Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Small Modular Reactors (SMR) in Kanada in Feb. 2018

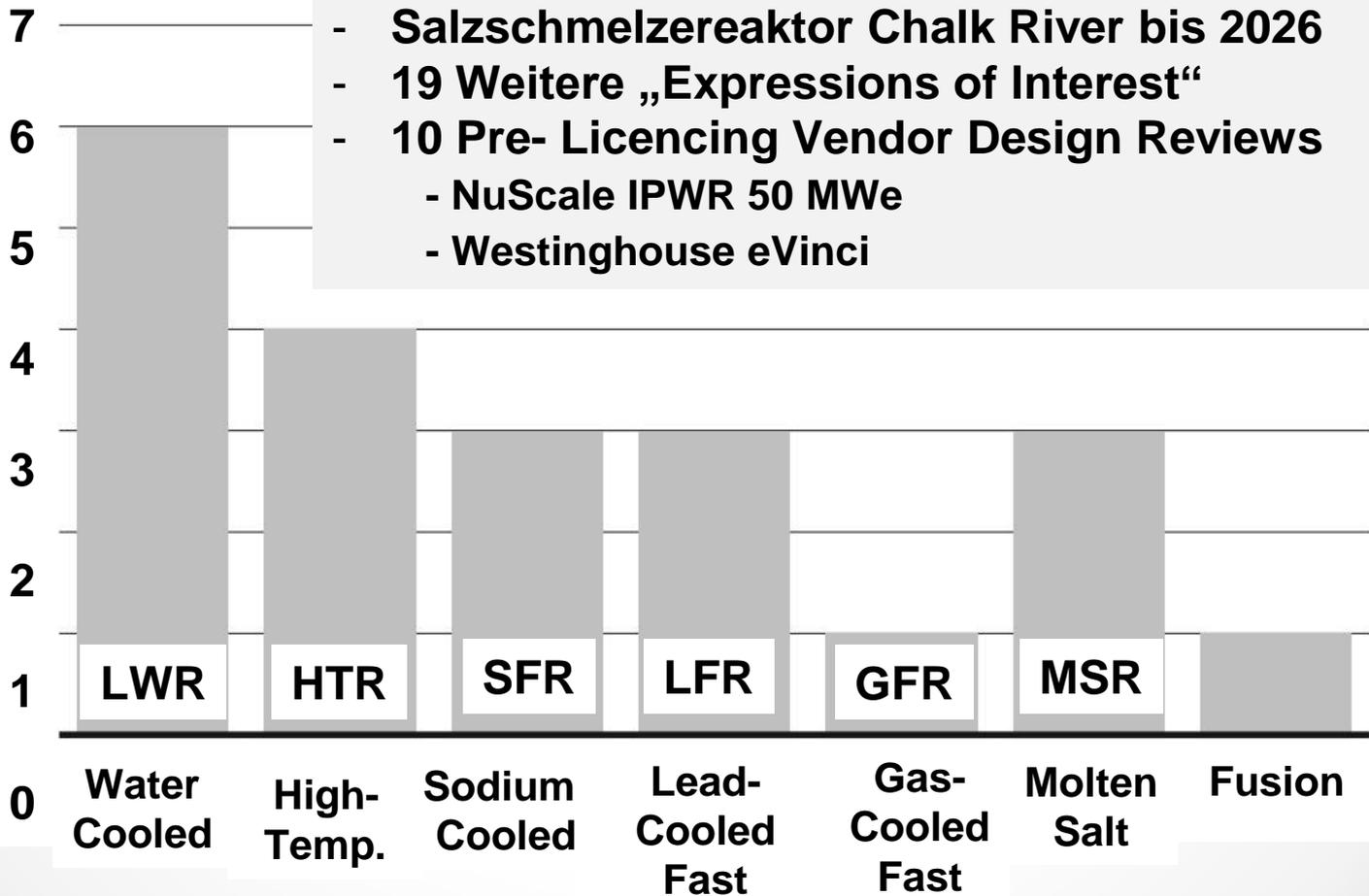


Anzahl
Reaktoren

SMR- Roadmap Jan.- Sept. 2018

(Can. Nuclear Association):

- Salzschnmelzereaktor Chalk River bis 2026
- 19 Weitere „Expressions of Interest“
- 10 Pre- Licencing Vendor Design Reviews
 - NuScale IPWR 50 MWe
 - Westinghouse eVinci



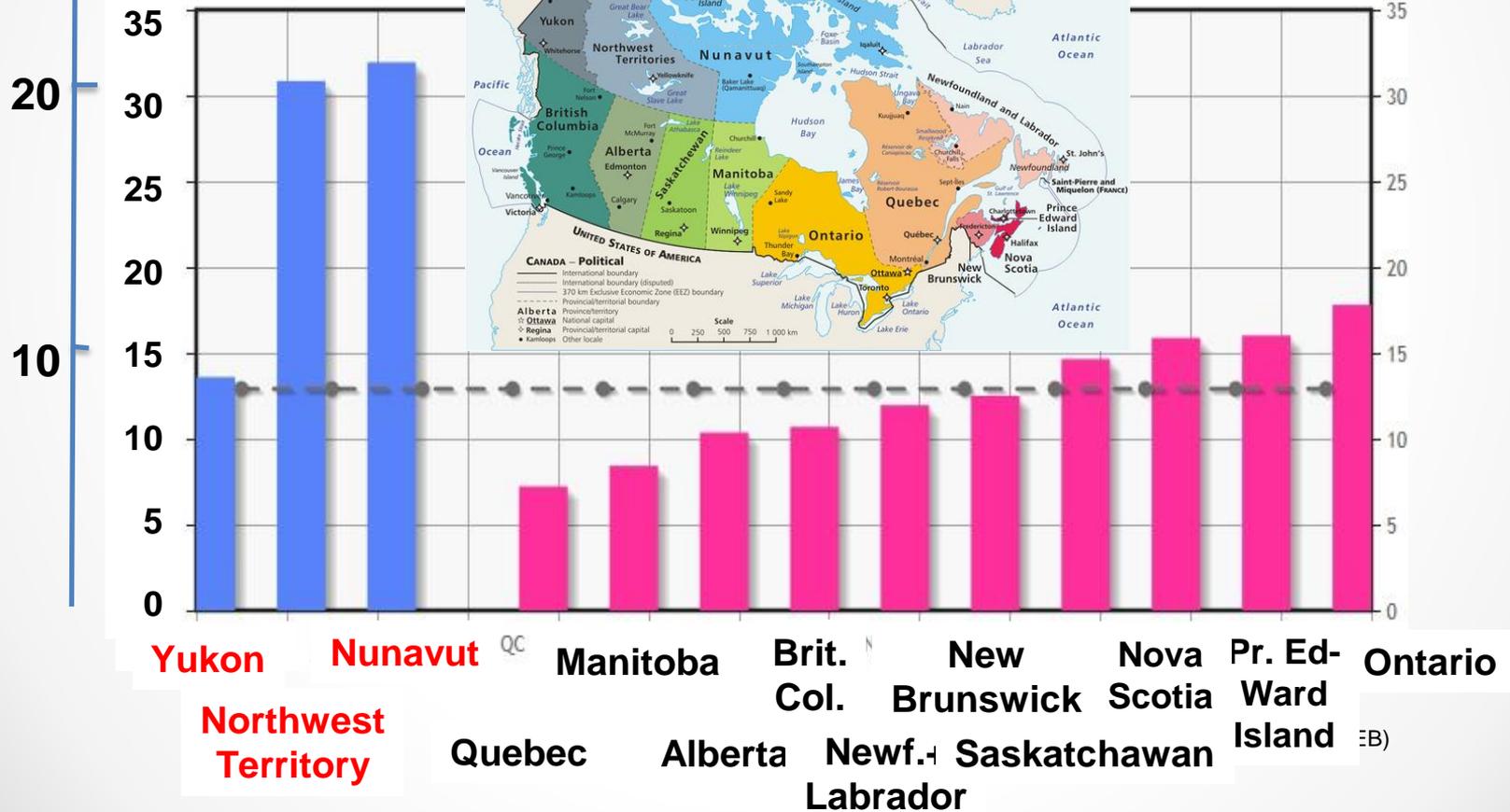
Strompreise in Kanada



Source: Canada's National Electricity Board 2018

€ct/kWh

CAN\$ ct/kWh





Verlängerung von 40 auf **60** Jahre:

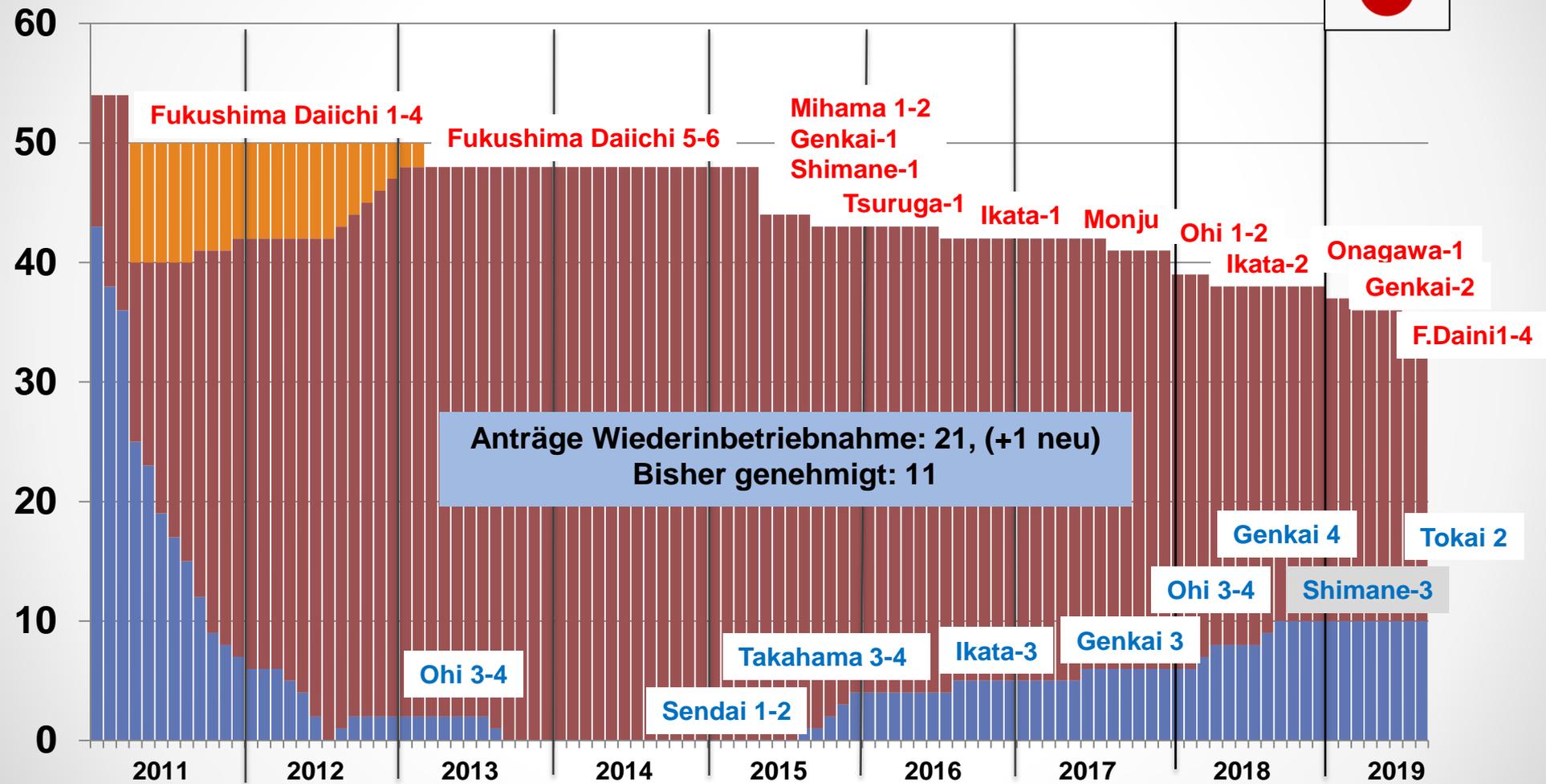
- Bewilligt für ca. 90 Reaktoren,
- Verbleibende sechs folgen

Verlängerung von **60** auf **80** Jahre:

- Erste zwei Genehmigungen erteilt 2019 (Turkey Point 3-4)
- Sechs weitere in Bearbeitung
- Dutzende geplant

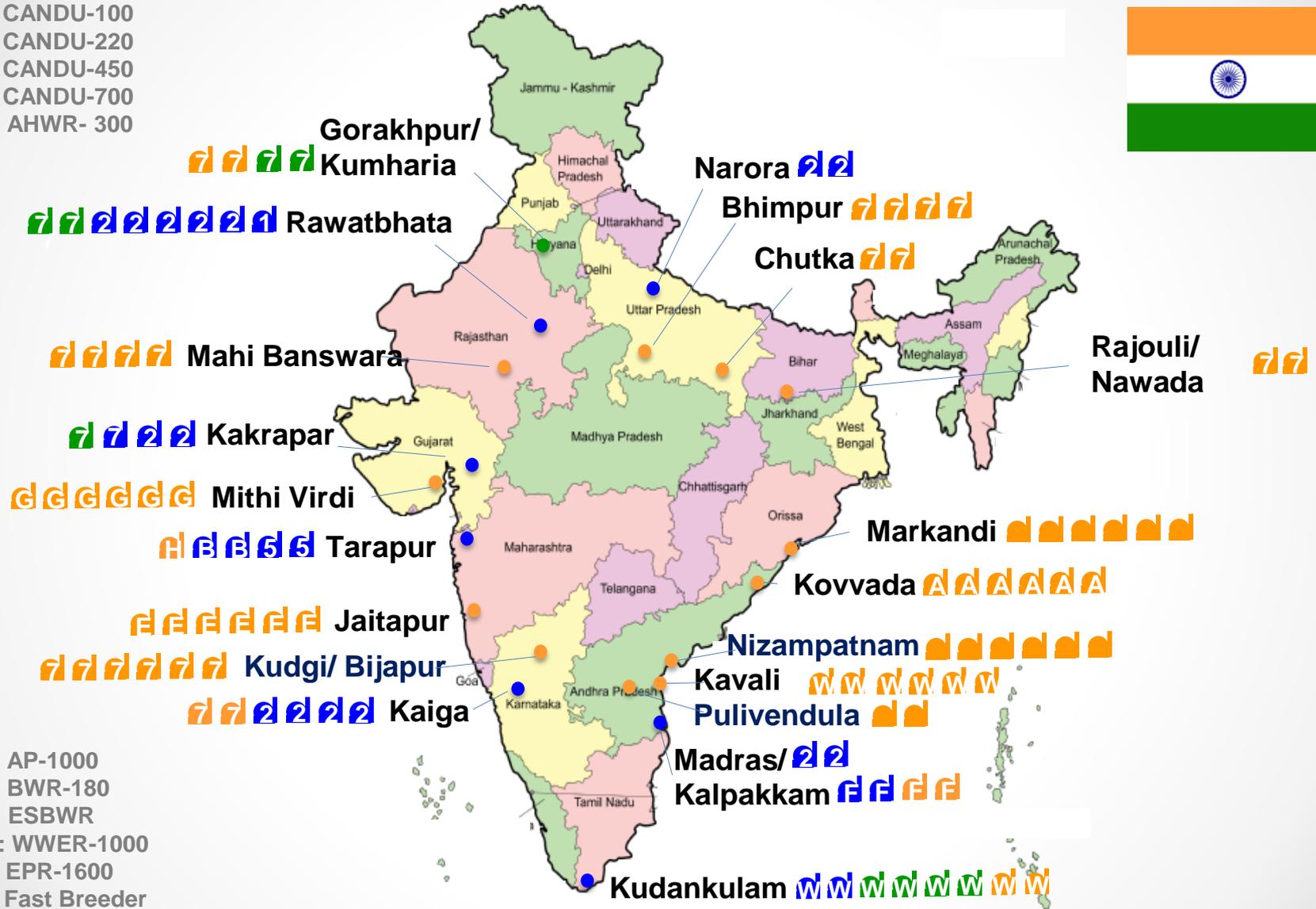
Anzahl der Kernkraftwerksblöcke in Japan

■ In Betrieb ■ Vorhanden ■ Beschädigt



Indien: 25 in Betrieb, 7 im Bau, 63 geplant (<2035)

- 1: CANDU-100
- 2: CANDU-220
- 5: CANDU-450
- 7: CANDU-700
- H: AHWR- 300



- A: AP-1000
- B: BWR-180
- G: ESBWR
- W: WWER-1000
- E: EPR-1600
- F: Fast Breeder

Inhalt



- **Kernenergie in der Welt**
- **Projekte in Europa**
 - Ukraine, Russische Exporte, Türkei, Ungarn
- **Generation I – III**
 - Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)
 - Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)
- **Generation IV**
 - Small Modular Reactors (SMR)
- **Basisdaten der Kernenergie**
 - Energiedichte
 - Kosten
 - Reichweite
- **Projekte in der Welt**
 - Canada, USA, Japan, Indien, China
- **Fazit**

Strom- Wärme- Treibstoffversorgung (jeweils):

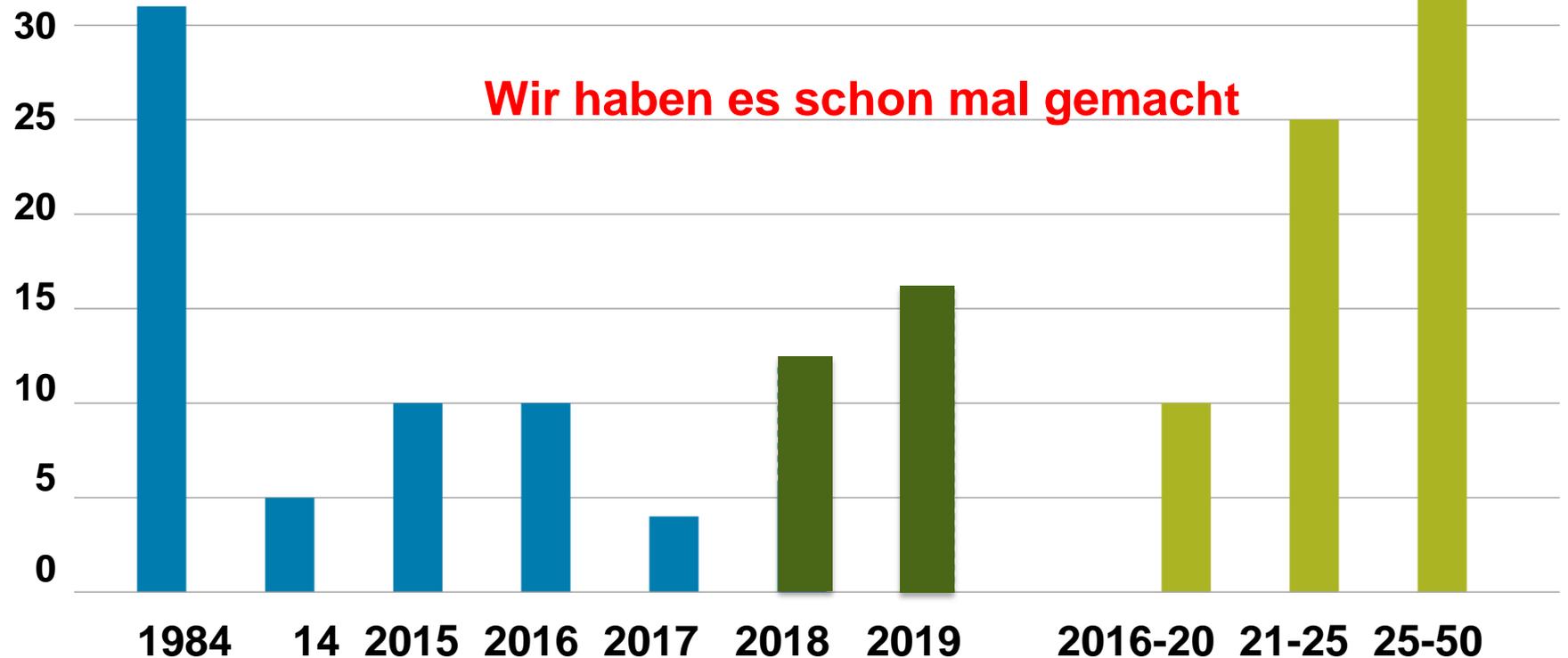


Vierblockanlagen an 10 Standorten

**100% versorgungssicher (Ausland)
98% Heimische Wertschöpfung
98% CO₂- frei (1,5 K-Ziel)
zu „alten“ Kosten (sozialverträglich)
Industrie- Standortvorteil
Ohne Landschaftsverbrauch
Arten- und umweltfreundlich
für 100 Jahre**

Nötige Kernkraftwerks- Neubauraten für das Szenario „Harmony“

GW/a



Source: WNA, IAEA

Zehn Thesen als Zusammenfassung (I)



1. **Wir haben unsere Körperkräfte ver Hundertfacht**
2. **Globales Wachstum führt zu Verdopplung des Energieverbrauchs**
3. **Klimaerwärmung findet statt, Anpassung reicht nicht**
4. **CO₂ ist Haupt-Verursacher und Hebel zur Lösung**
5. **Engpass auf der Entsorgungs-, nicht auf der Versorgungsseite**
 - Wasserkraft und Effizienz wo immer möglich,
 - CCS verdoppelt Kosten, 25% mehr Kraftwerke, Verdreifachung Masse,
 - Zentrale Stromerzeugung („Economy of Scale“)
 - Gas statt Kohle für Schwellenländer,
 - Kernenergie so viel wie nötig,
 - Erneuerbare (umsonst, aber diffus) nur so viel wie Speicher/ Reserve.
6. **Strom ersetzt Brennstoffe (auch Synfuel), bei CCS negative Emissionen!**
7. **Deutschlands Klimabedeutung entspricht 2%, aber Exportweltmeister**
8. **Niemand folgt uns, keine Stilllegungen wegen Fukushima**
9. **Die De-Industrialisierung Deutschlands hat begonnen**



10. Kernenergie könnte alle angesprochenen Probleme lösen (sogar ohne neue Standorte)

- Vollständige Dekarbonisierung bis 2050
- Sektorübergreifend (Synfuels)
- Keine schwierigen „Einsparungen“ nötig
- Rückführung der Strompreise
- Kostengünstige Weiternutzung der Stromnetz- und Treibstoff- Infrastrukturen
- Erhalt der Fahrzeugindustrie
- Sanierung der öffentlichen Haushalte
- Freimachung erheblicher finanzieller Ressourcen für Soziales, Verteidigung
- Freimachung der Gasreserven für weniger weit entwickelte Länder
- Friedensstiftend, Migrationsdämpfend

Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Dr.- Ing. L. Mohrbach
Kirschblütenweg 4
D-45892 Gelsenkirchen**

Ludger.Mohrbach@T-online.de

Tel.: xx49 209 797597

Mobil: xx49 173 5678438