

Die Rolle der Kernenergie in der Welt

- März 2018 -

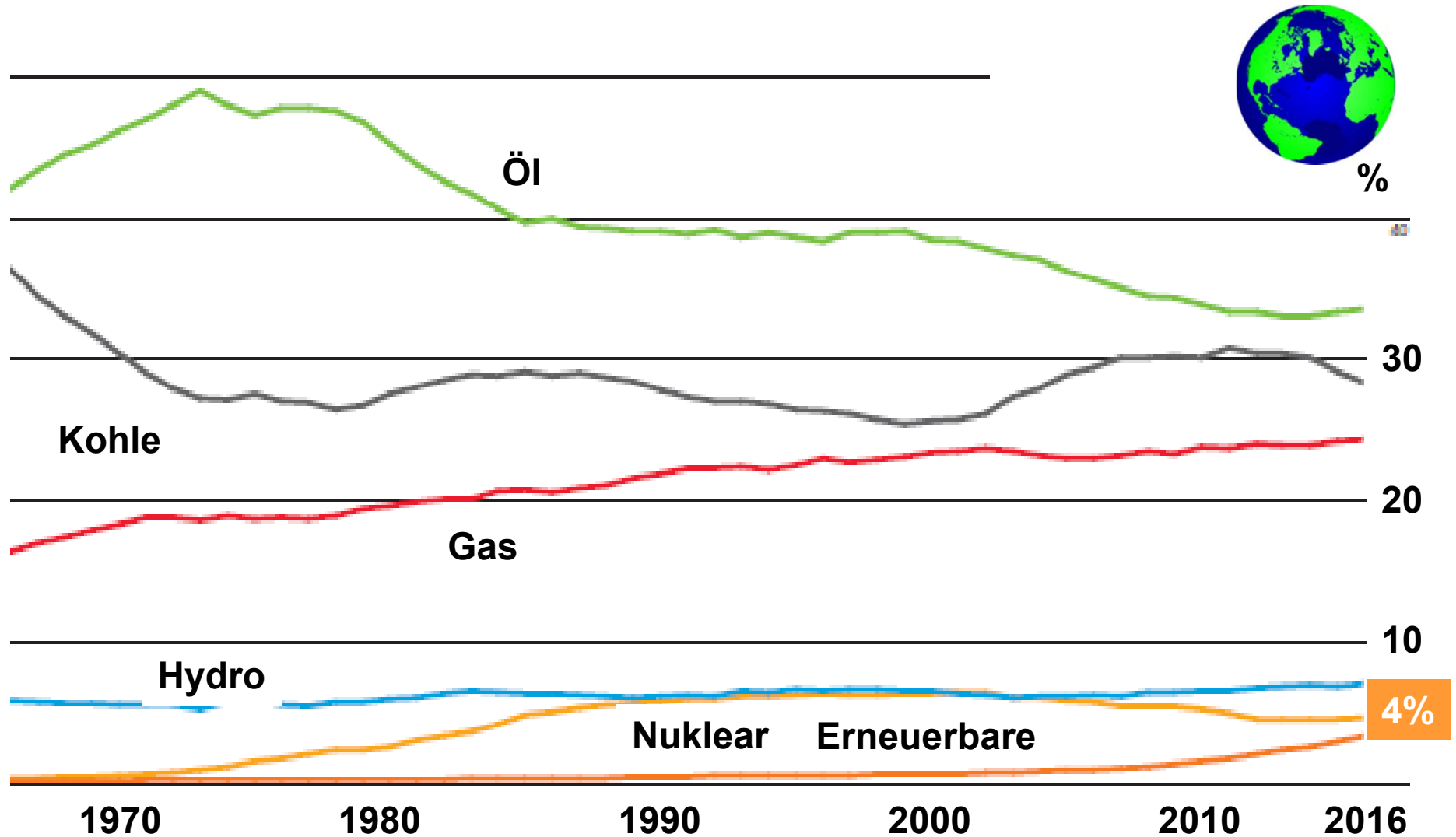
Dr.- Ing. L. Mohrbach



- **Kernenergie und Klima**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (LMR)**
 - **Hochtemperaturreaktoren (HTR)**
 - **Fortgeschrittene Konzepte**
- **Kleine Modulare Reaktoren (SMR)**
- **Kernenergie in der Welt**
 - **Schweiz, Kanada, USA, Japan, Finnland, China, Indien**

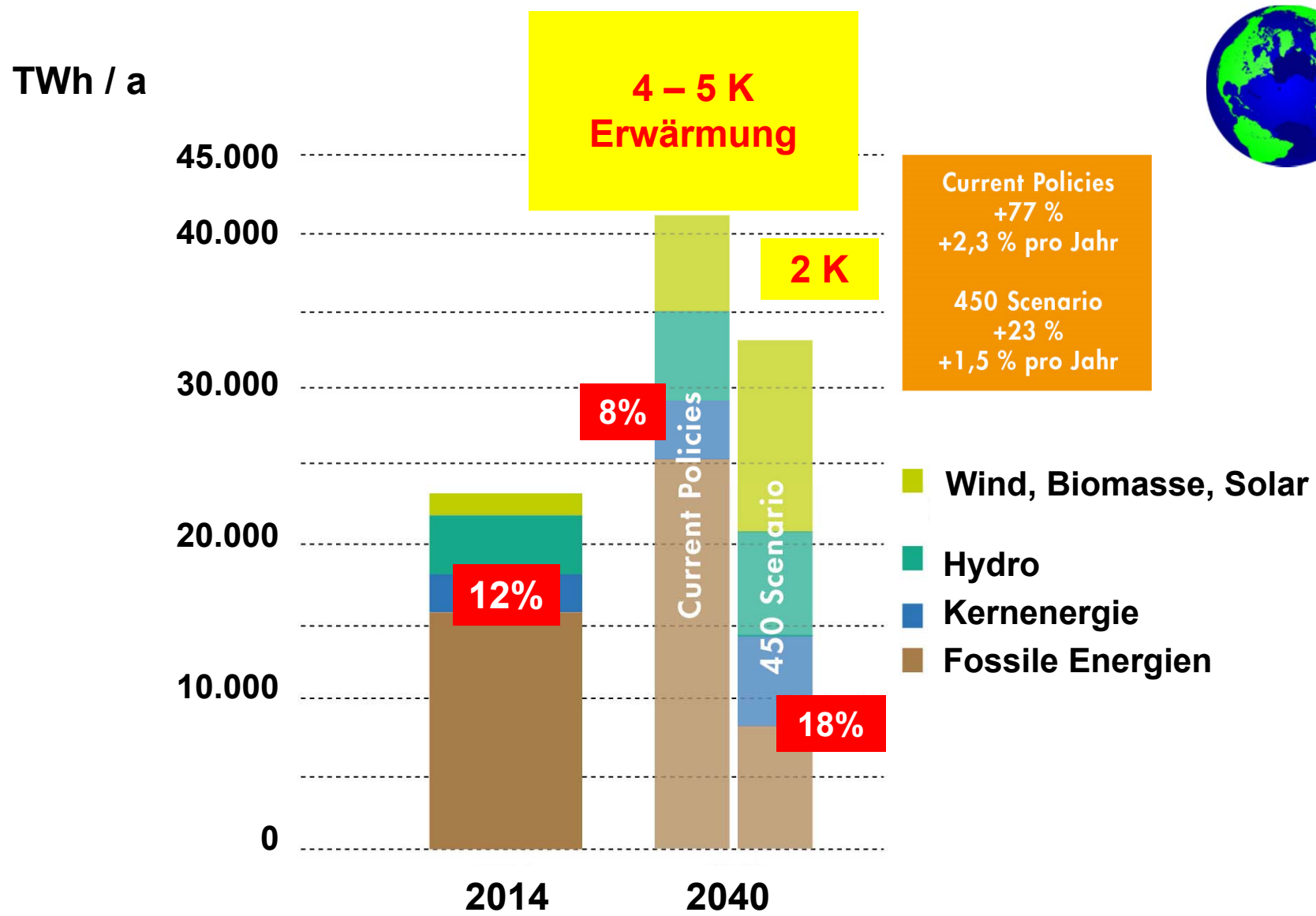


Primärenergieträger- Anteile weltweit



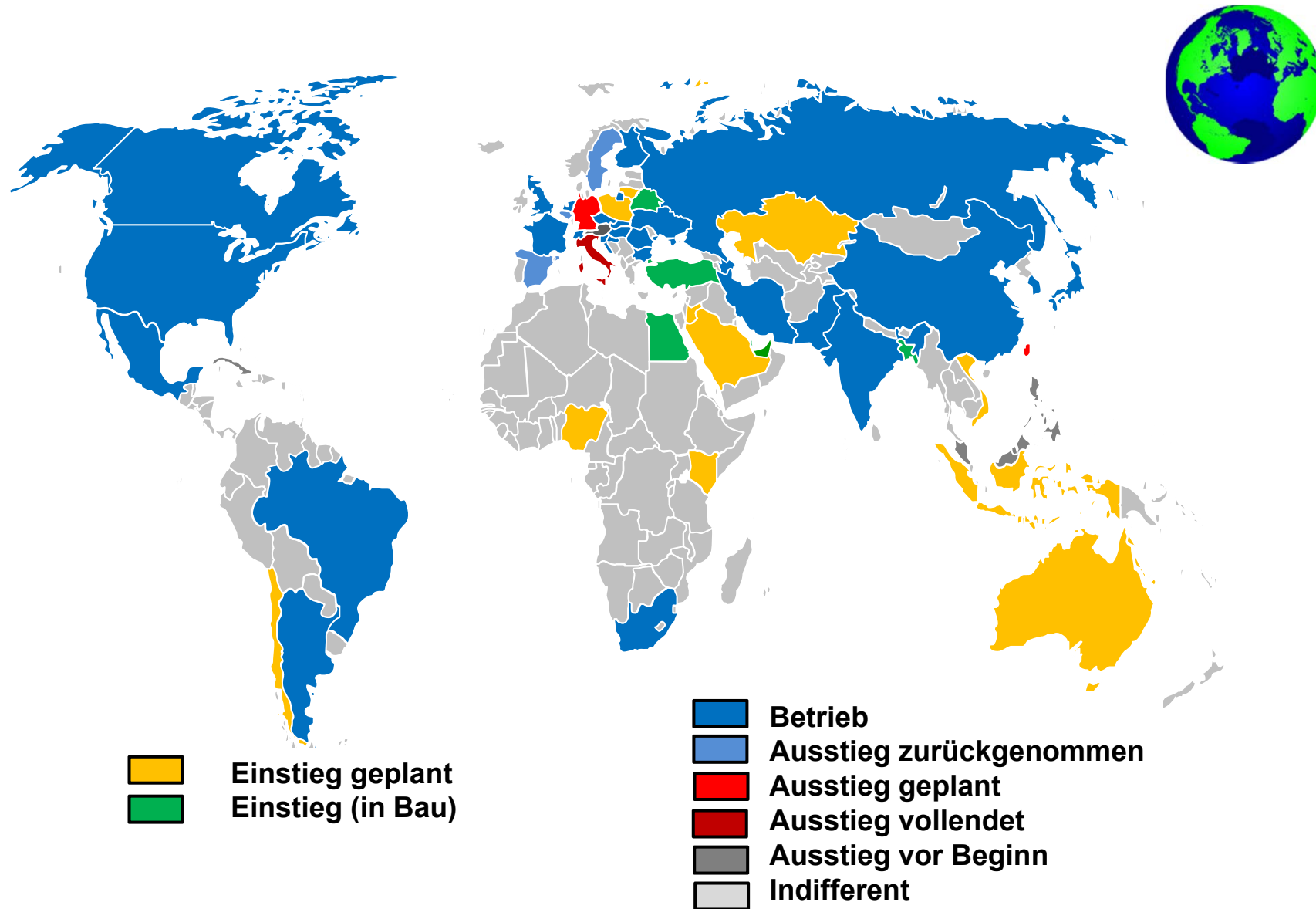
www.bp.com/.../energy...2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-re...

Stromerzeugung weltweit: Pariser Klimaabkommen 2017










- **450 Kernkraftwerke liefern ca. 12% der weltweiten elektrischen Energie.**
- **Sie sparen pro Jahr rd. 2 Mrd. t CO₂- Emissionen.**
- **Dies entspricht etwa 6% der weltweiten anthropogenen CO₂- Emissionen.**

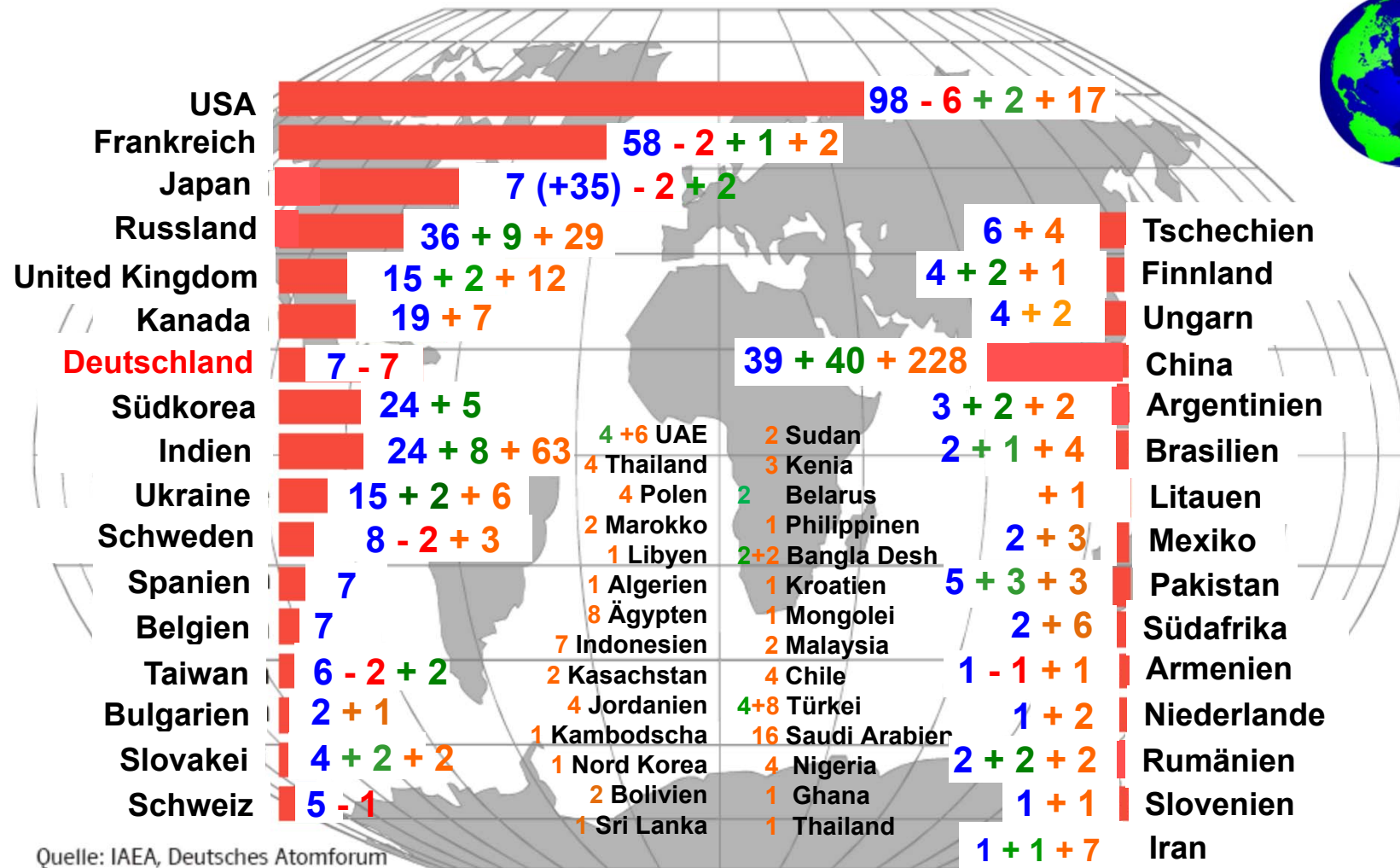




Folgen	Land
Kernenergie- Einstieg	 UAE  PO  BY  TR  SA  EG  BD  JO
Neubauprojekte	 AR  BR  CN  RU  SE  GB  IN  US
Unveränderte Weiterentwicklung	 BG  CZ  FI  HR  HU  IR  KR  MX  PK  RO  SK  TW  UA
Neubaumoratorium	 CA  FR  LT  NL  ZA
Umkehrung des Ausstiegs	 CH  JP
Restlaufzeiten verlängert	 BE  ES
Ausstieg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



450 Kernkraftwerke in 31 Ländern (12/2017)



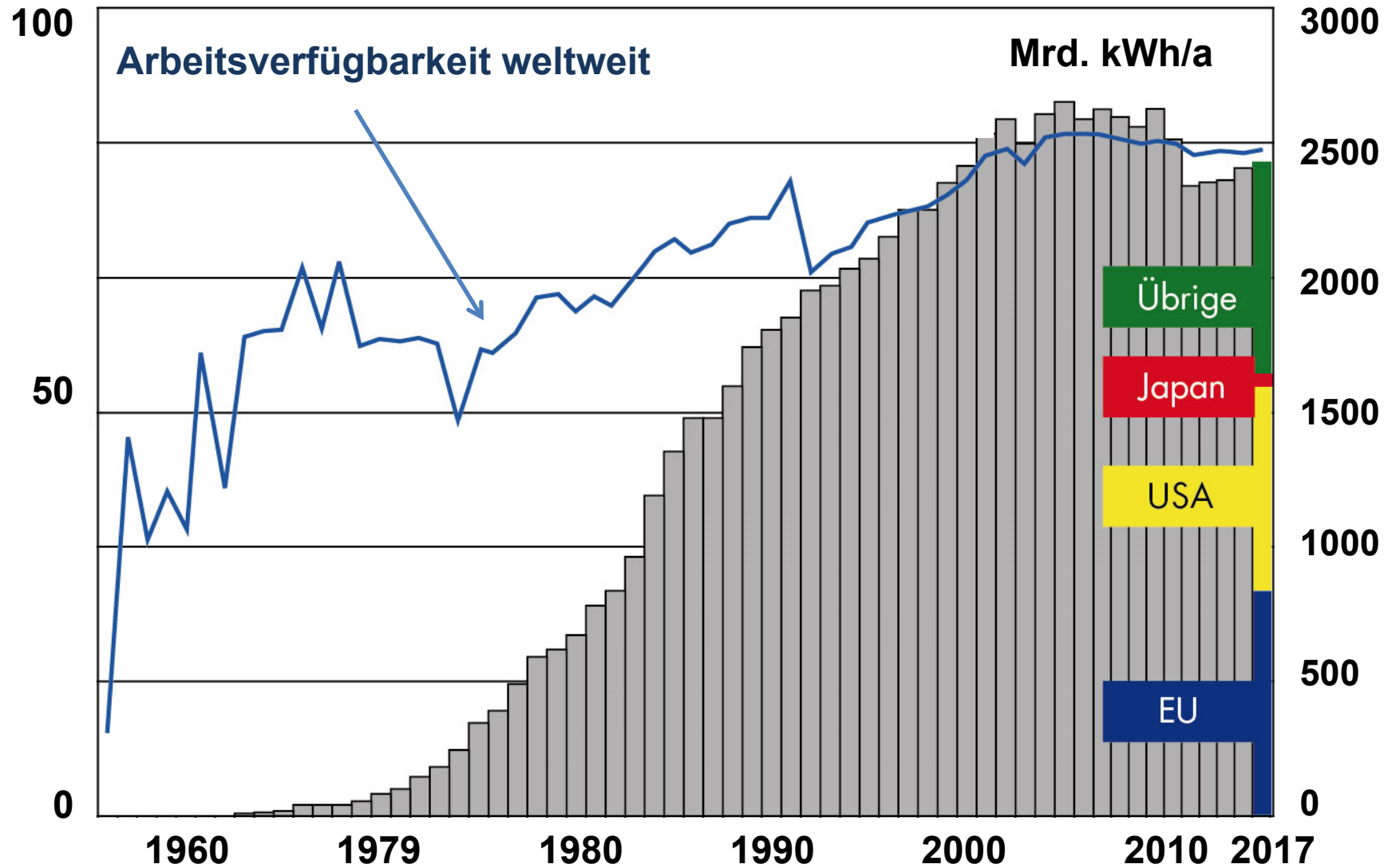
Quelle: IAEA, Deutsches Atomforum

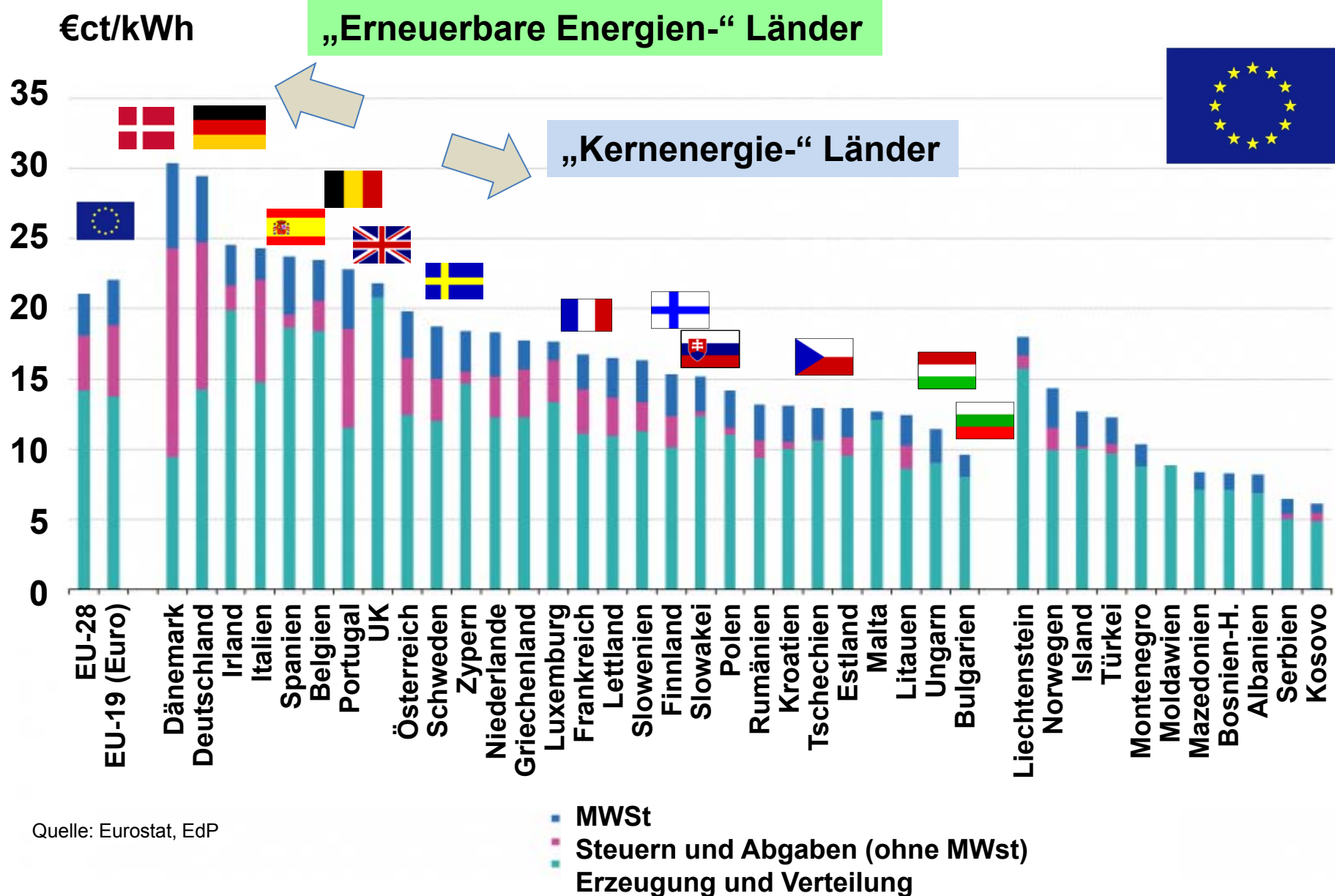
Stilllegung geplant: 21

Im Bau: 89 (IAEA: 57)

Projekte: 414 + 90

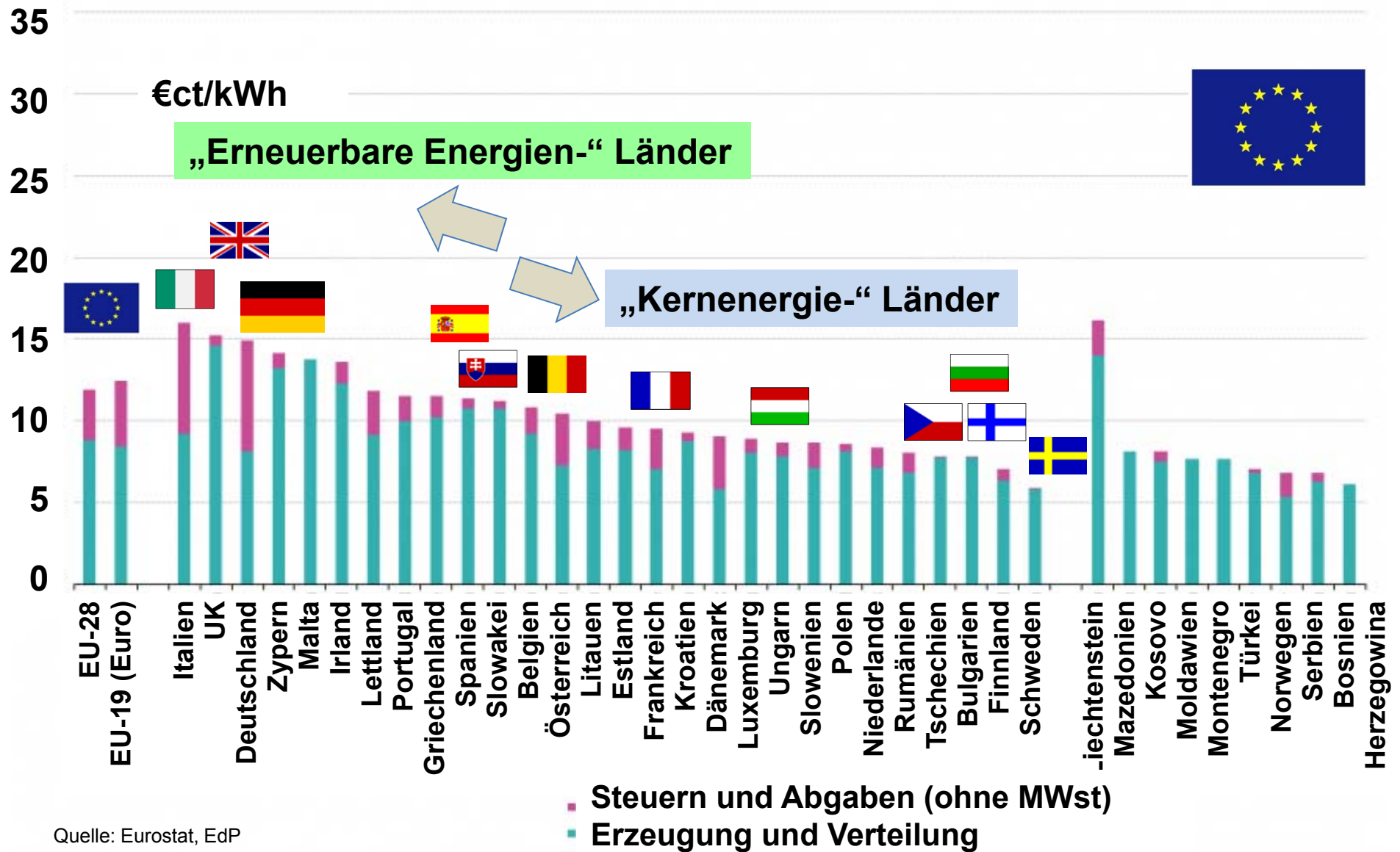






Quelle: Eurostat, EdP

Industriestrompreise in Europa

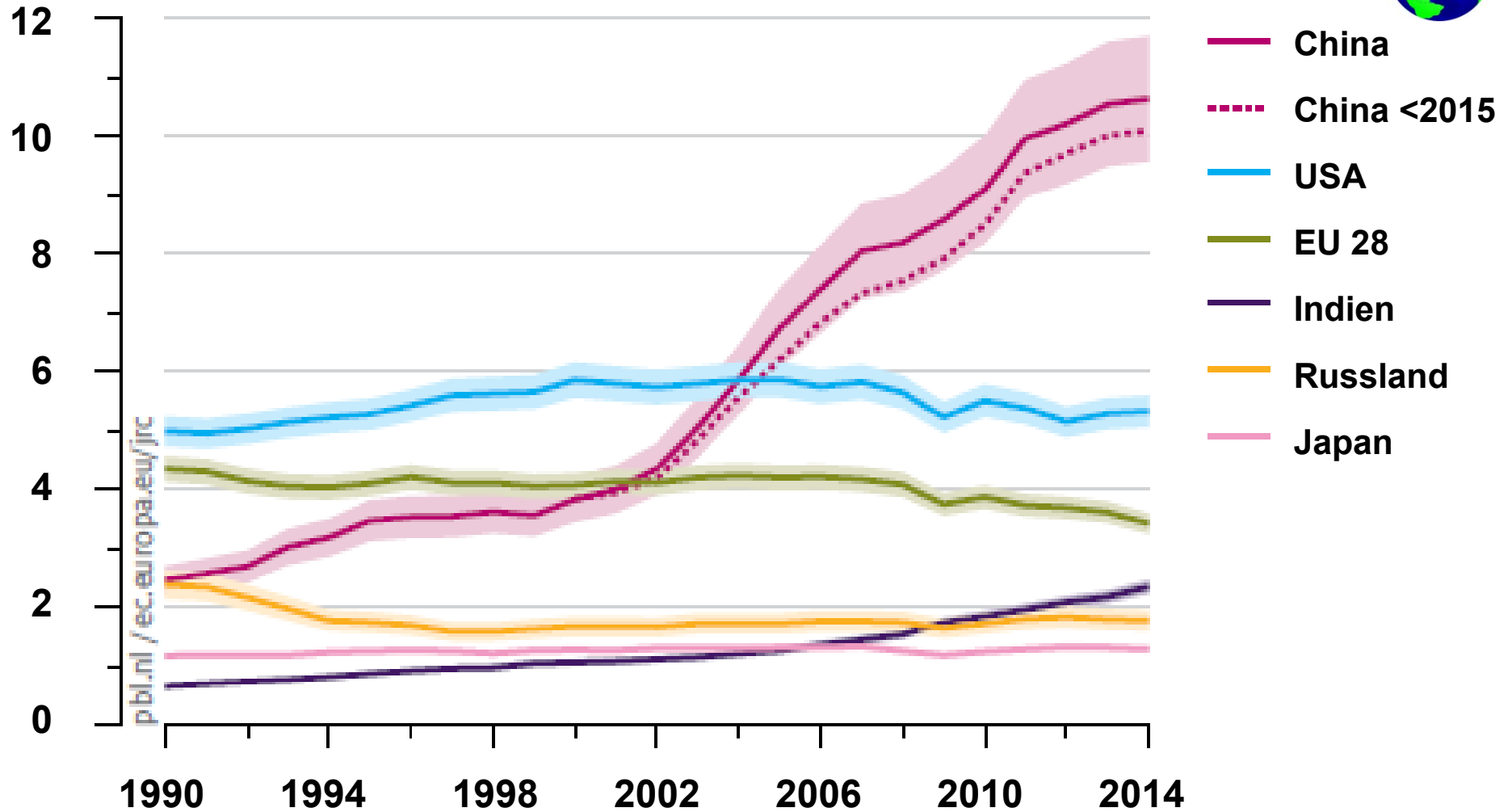


Quelle: Eurostat, EdP

CO₂- Emissionen aus Verbrennung plus Zementproduktion



Gt CO₂ /a

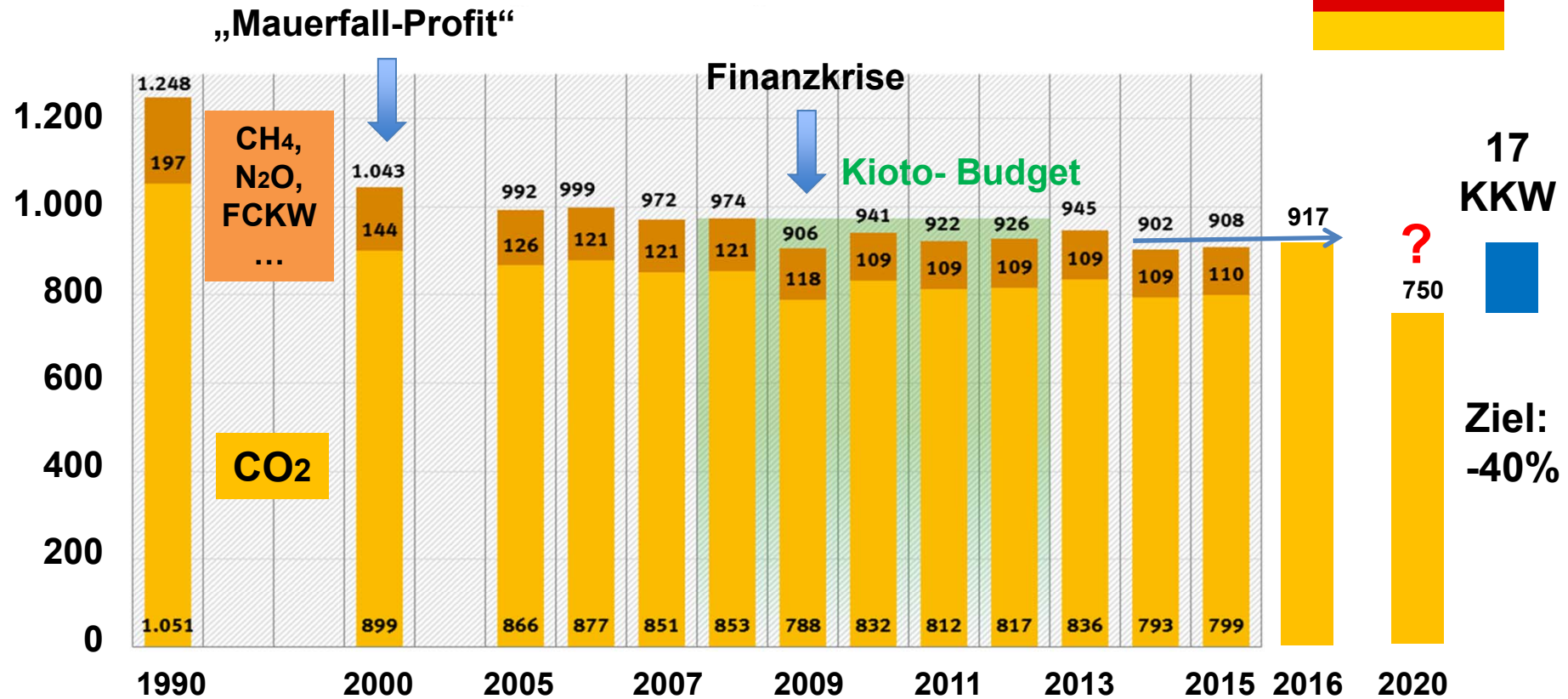


Quelle: http://edgar.jrc.ec.europa.eu/img/part/co2_report_2015_009g_muc15.png

Treibhausgasemissionen (CO₂- Äquivalente)



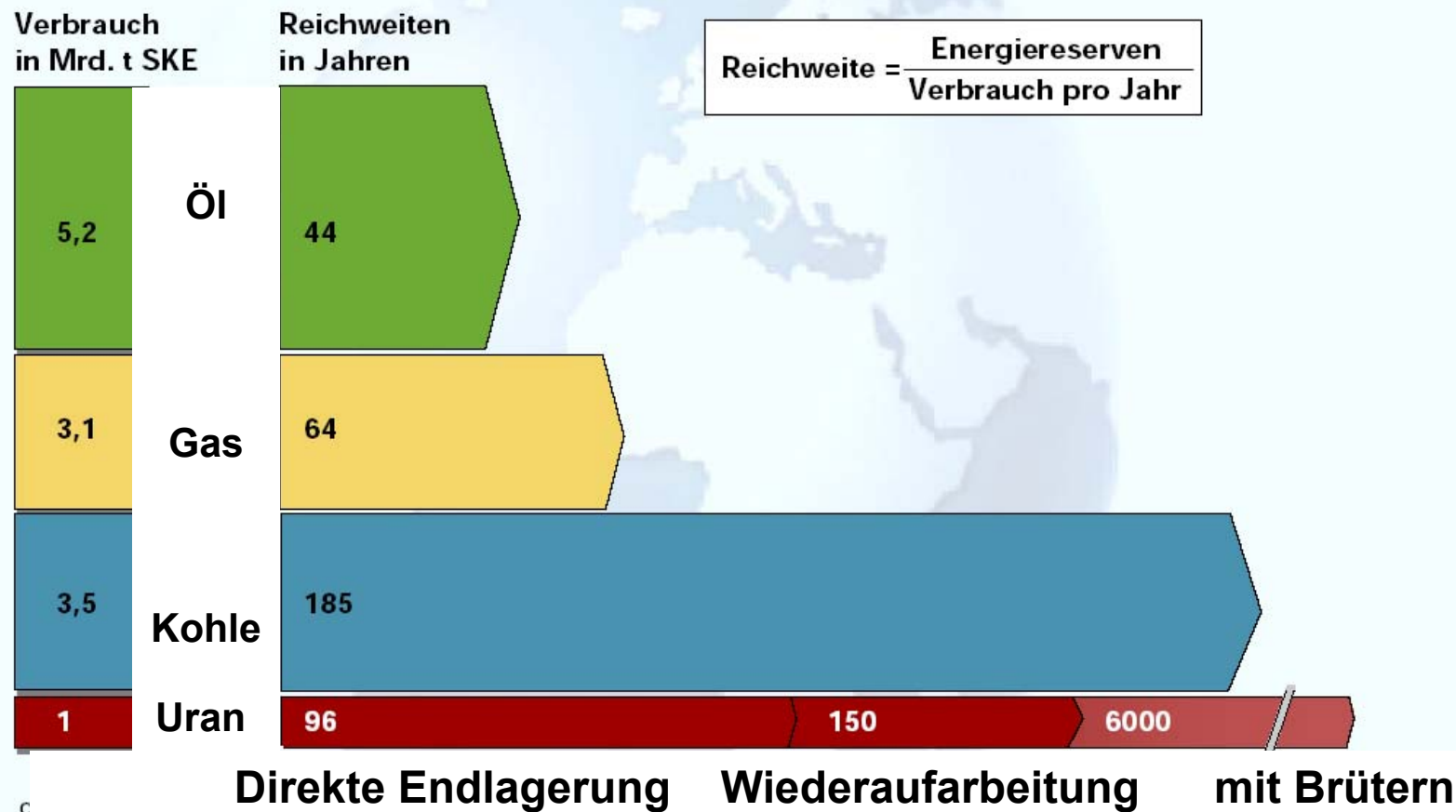
Mio t/a



Quelle: Umweltbundesamt Emissionssituation 2016, Energie-Infodienst 2017

Reichweiten von Primärenergieträgern

Uran (und Thorium) in großen Mengen in der Erdkruste vorhanden
 Quasi unbegrenzte Mengen im Meerwasser gelöst
 Brüter strecken Uranvorräte ca. um den Faktor 60



Quelle: Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe



- **Kernenergie und Klima**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (LMR)**
 - **Hochtemperaturreaktoren (HTR)**
 - **Fortgeschrittene Konzepte**
- **Kleine Modulare Reaktoren (SMR)**
- **Kernenergie in der Welt**
 - **Schweiz, Kanada, USA, Japan, Finnland, China, Indien**



**Westinghouse
4-Loop**

1965

**Siemens- KWU
Vorkonvoi**



1995



**Framatome
EPR**

2010

**INVAP (Arg)
CAREM**



2030

Generation I Generation II Generation III Generation III+ Generation IV

Frühe
Prototypen

(~100 MW)
DWR,
SWR,
Magnox

Kommerzielle
Leistungs-
reaktoren

(600 –
1200 MW)
CANDU,
AGR,
RBMK

Evolutionäre
Anlagen

(<1300 MW)

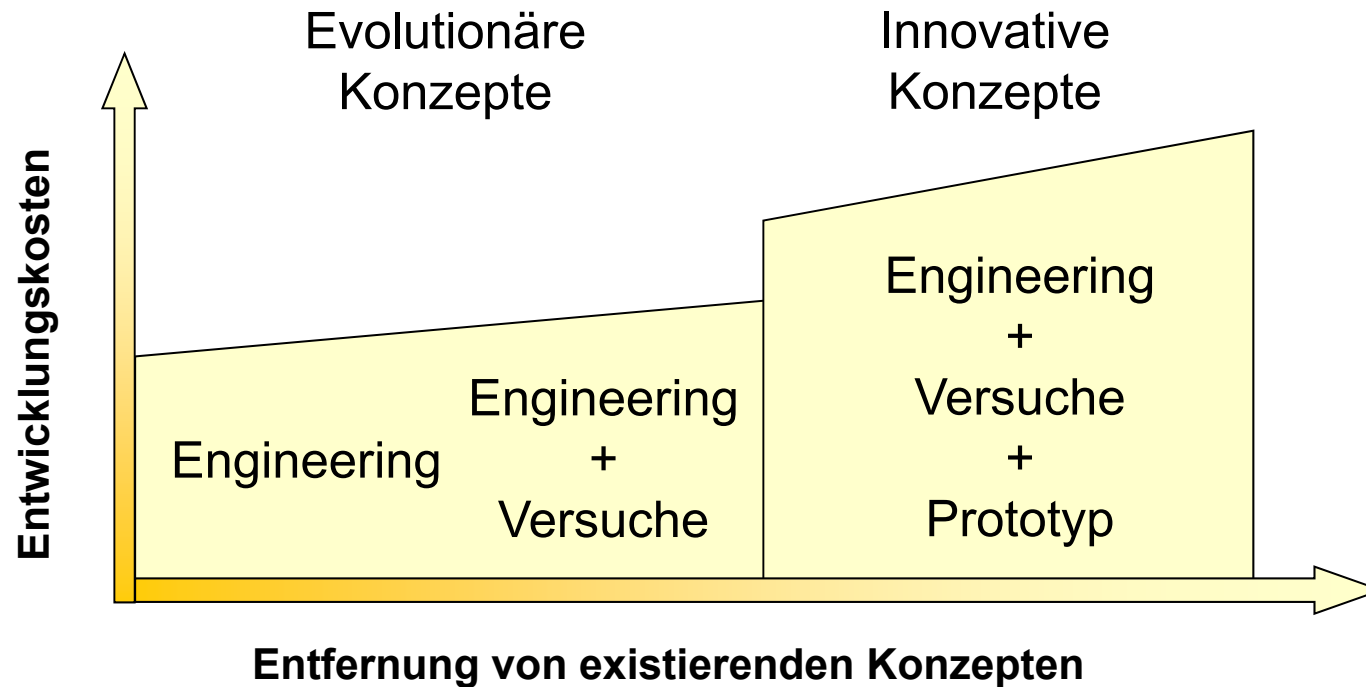
Weitere
Steigerung der
Wirtschaftlichkeit

(1150 –
1650 MW)

Verbesserung von
Wirtschaftlichkeit,
Sicherheit,
Abfallökonomie

Brüter,
Hochtemperaturreaktoren,
Flüssigbrennstoffreaktoren
Dampfüberhitzung

Modul- Kleinreaktoren („SMR“)



Moderate, ggf. mit Versuchen abgesicherte Veränderungen unter Beibehaltung einer bewährten konstruktiven Auslegung

Weitaus umfangreichere Forschung und Entwicklung, ggf. mit Prototypenbau

„Evolutionär“: Economy of Scale + Core Catcher + Beton

EPR



“Revolutionär”: Vereinfachung durch mehr passive Sicherheit
AP-1000

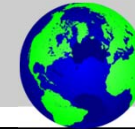





























„Dezentral“: Kleine Einheiten (Wärmeauskopplung, Prozessdampf...)

KLT-40 S



Reaktoren für den Weltmarkt 2018 (Vorgängerbaureihen)



	Name	MWeI	Entwickler		In Betrieb	Im Bau	Geplant
DWR	EPR	1650	Framatome/ EdF		 -	6	10
	Atmea 1	1150	Framatome/ Mitsubishi		 -	-	4
	AP-1000	1100	Brookfield (CAN)/ Westinghouse		-	2	-
	CAP-1000	1100	CNNC (China)/ Westinghouse		 -	8	18
	CAP-1400	1300	CNNC		-	-	2
	ACPR-1000	1000	China GN/ CNPC		 24	6	-
	Hualong- 1	1150	China GN/ CNNC		-	6	4
	WWER- 1000	1000	Atomenergoprojekt, OKB Hidropress		36	5	-
	MIR- 1200	1200	Atomenergoprojekt, OKB Hidropress		2	13	13
	TOI 1300	1300	Atomenergoprojekt, OKB Hidropress		-	2	-
	APR	1400	Korea Electric		1	9	3
SWR	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		-	6	8
GEN IV	HTR-PM200	200	China NEC		-	2	2
	CFR-600	600	TerraPower/ CNNC		 -	-	2
SMR	CAREM	27-100	CNEA (Arg.)/ INVAP		-	1	1
	KLT-40	35	Atomenergoprojekt		-	1x2	4
	Linglong 1	100	CNNC-CNEC New Energy/ NPIC		-	-	2

8 Druckwasserreaktoren	(5 Hersteller)
2 Siedewasserreaktoren	(1 Hersteller)
2 Schwerwasserreaktoren	(2 Hersteller)



GENERATION- IV- Programm GIF (US- Energieministerium 2002)

Sechs fortgeschrittene Reaktortypen mit verbesserter/m

- **Sicherheit,**
- **Wirtschaftlichkeit,**
- **Proliferationsrisiko**

Kleine modulare Reaktoren:

- Ca. 20 Druckwasserreaktoren**
- Ca. 5 Leichtwassereaktoren mit überkritischen Dampfparametern**
- Ca. 10 Hochtemperaturreaktoren**
- Ca. 10 Flüssigmetallgekühlte (schnelle) Reaktoren (incl. Brüter)**
- Ca. 10 Salzschmelzereaktoren**

2 x 1600 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)**
(günstiger als Gas, Wind, Kohle...)
- (**-3 £/MWh wenn Sizewell C folgt**)
- Inflations- indexiert
- Incl. Brennstoff, Entsorgung, Abriss
- Anlagenlebensdauer 60a +
- Errichtungskosten 16 G£
- Gerechnete **payback time** (24 TWh/a): **7.2 a**
- Investoren: EdF (66.5%) + CGN China General Nuclear (33.5%)
- 900 permanente Jobs, + 5600 während Errichtung (57% UK)



Okt. 2014: Zustimmung der Europäischen Kommission (heute: Brexit?)

Okt. 2015: Standort- Genehmigung

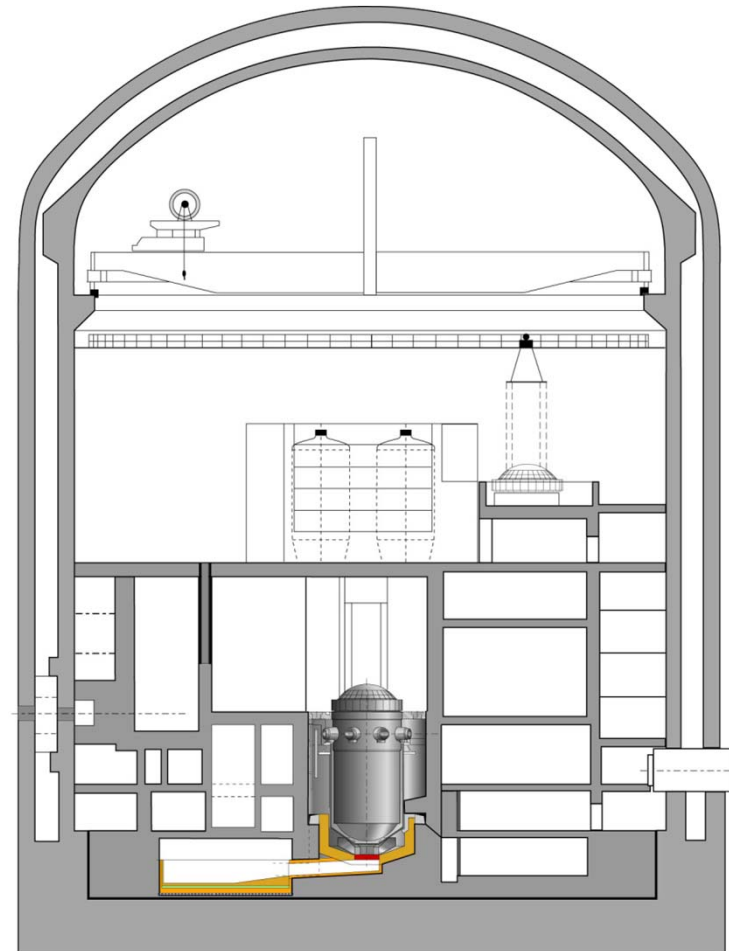
28. Juli 2016: EdF Investitionsentscheidung (verzögert d. franz. Gewerkschaften), Baubeginn

15 Sept. 2016: Re- Evaluierung neue Regierung Theresa May („Brain Drain nach China?“)

2023 - 25: In Betrieb (7% UK Stromerzeugung)

10 in Planung: 2 APR Moorside, 2 EPR Sizewell, 4 ABWR Wylfa+Oldbury, 2 Hualong Bradwell

- Evolutionäre Entwicklung aus der deutschen Konvoi- und der französischen N4- Baulinie
- Designphilosophie:
 - Weitere Verbesserung der Störfallvermeidung
Eintrittswahrscheinlichkeit für Kernschmelzen $<1 \cdot 10^{-7}/a$
 - Beherrschung schwerster, extrem unwahrscheinlicher Störfälle.
Begrenzung der Auswirkungen auf die Anlage selbst
 - Wirtschaftlich konkurrenzfähige Stromerzeugung






■ Technische Daten:

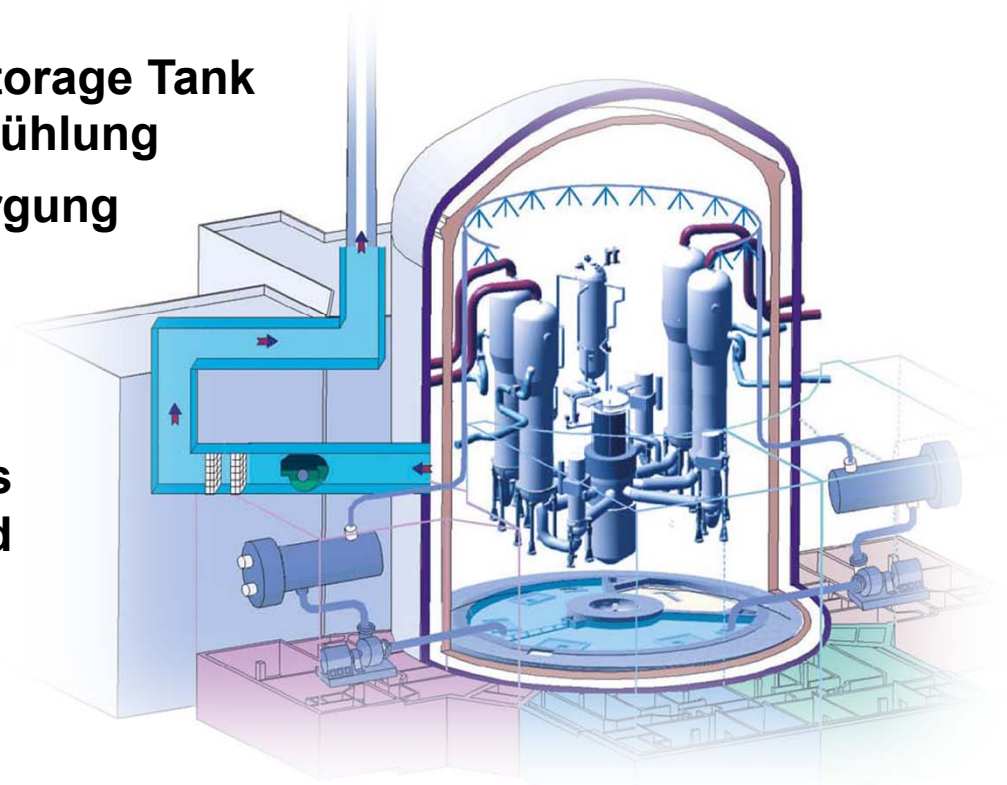
- **Leistung** **4272 MWth, 1525 MWeI**

- **Primärsystem** **4 Kühlkreisläufe mit je 1 Pumpe im kalten Strang und 1 U-Rohr-Dampferzeuger
155 bar Arbeitsdruck**

- **Kern** **241 BE 17x17
aktive Höhe 420 cm
Kühlwassereintrittstemperatur 291,5°C
Kühlwasseraustrittstemperatur 326,5°C
Kühlwassermassenstrom 21 t/s**

 npi, Frankreich

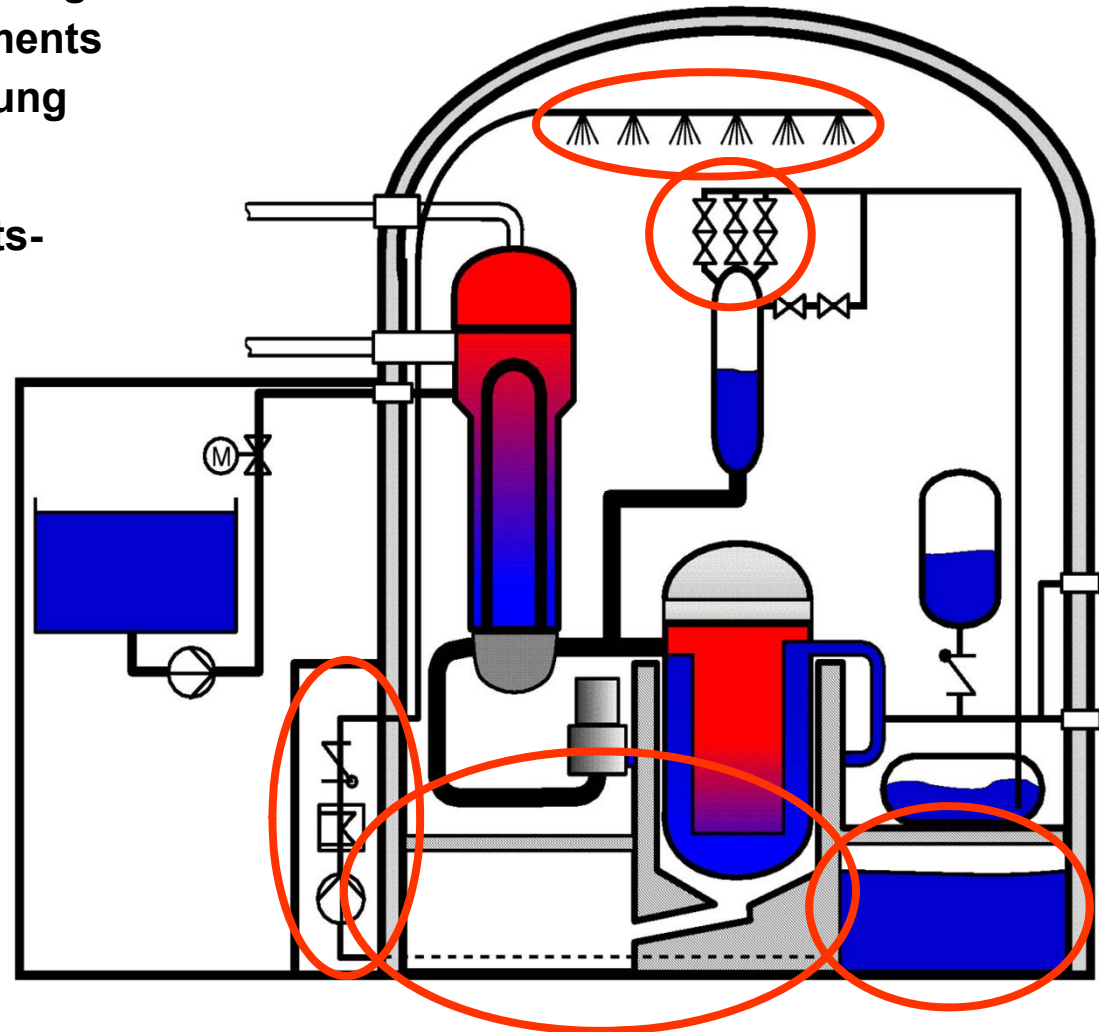
- Gefilterte Druckentlastung
- Wasserstoff- Rekombinatoren
- Doppelschalen- Containment
- Core Catcher
- In- Containment Refueling Water Storage Tank für Noteinspeisung und Schmelzekühlung
- Notkühlsystem mit Notstromversorgung und Backup-Notstromdieseln
- Druckhalter mit Entlastungs-
einrichtung auf < 20 bar
- 2 Residual Heat Removing Systems mit Containment-
Sprühsystem und Core Catcher Kühlung



Quelle: TVO, Nuclear Power Plant Unit Olkiluoto 3

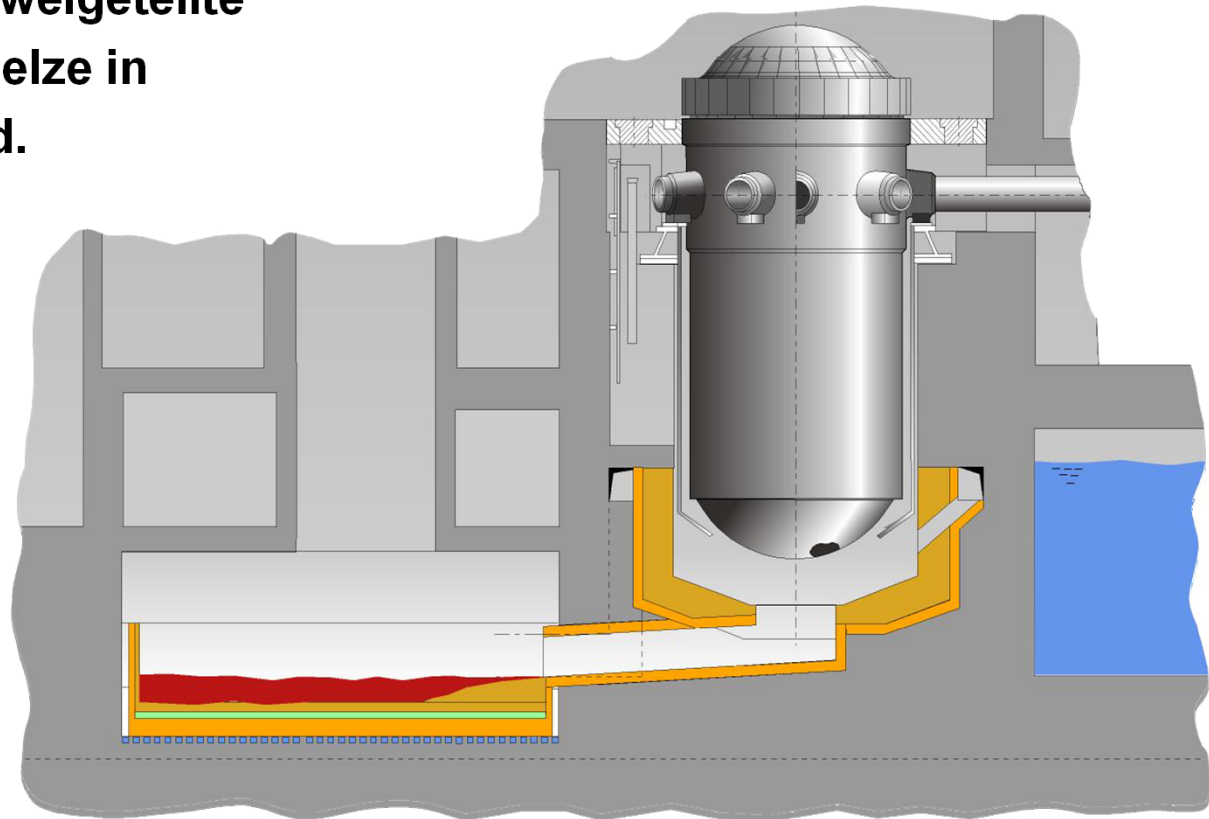


- Sprühsystem zur Druckbegrenzung im Containment (in Betoncontainments wg. geringerer Wärmeübertragung erforderlich).
- IRWST stellt großes Flüssigkeitsvolumen bereit, Sammlung von Sumpfwasser.
- Spezielle Abblaseventile zur schnellen Druckentlastung des Primärsystems.
- Ausbreitungsfläche zur Begegnung auslegungsüberschreitender Störfälle mit Kernschmelzen.





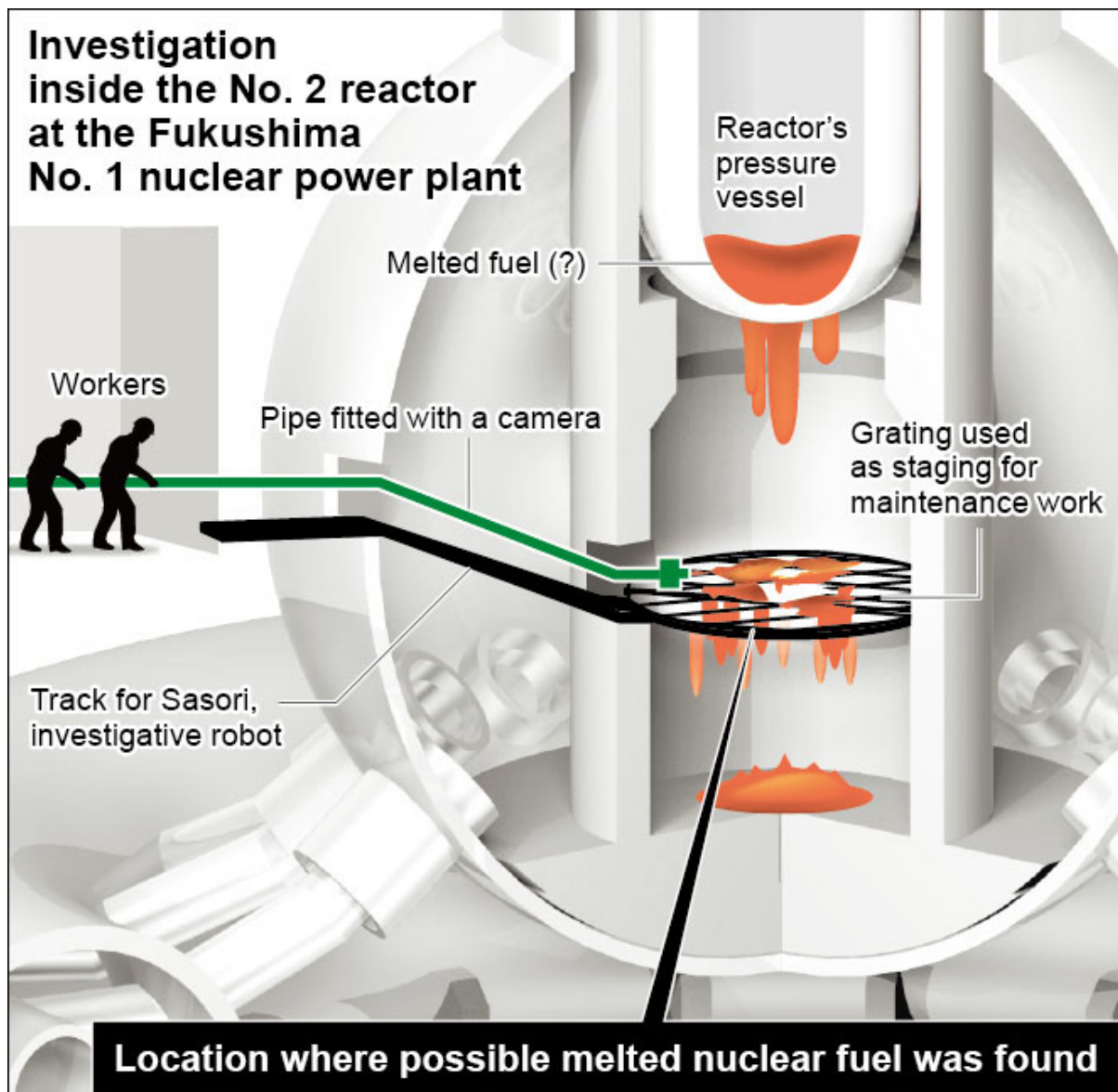
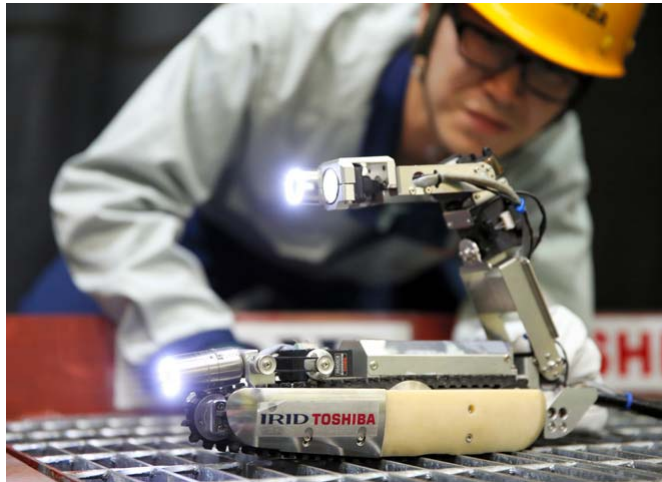
- **Kernfängerkonzept**
- **Zeitlich und räumlich zweigeteilte Überführung der Schmelze in einen sicheren Zustand.**
- **Mehrschichtige Ausbreitungsfläche.**
- **Langfristige Kühlung von unten sowie**
- **Flutung von oben aus dem IRWST**





Feinfragmentierte Schmelzmasse (Versagen des Reaktordruckbehälters unter Überdruck?)

Bodengrätting auf ca. 1 m aufgeschmolzen und abgestürzt



Quelle: Asahi Shimbun



Erstarrtes Corium mit Brennelementkopfbügel

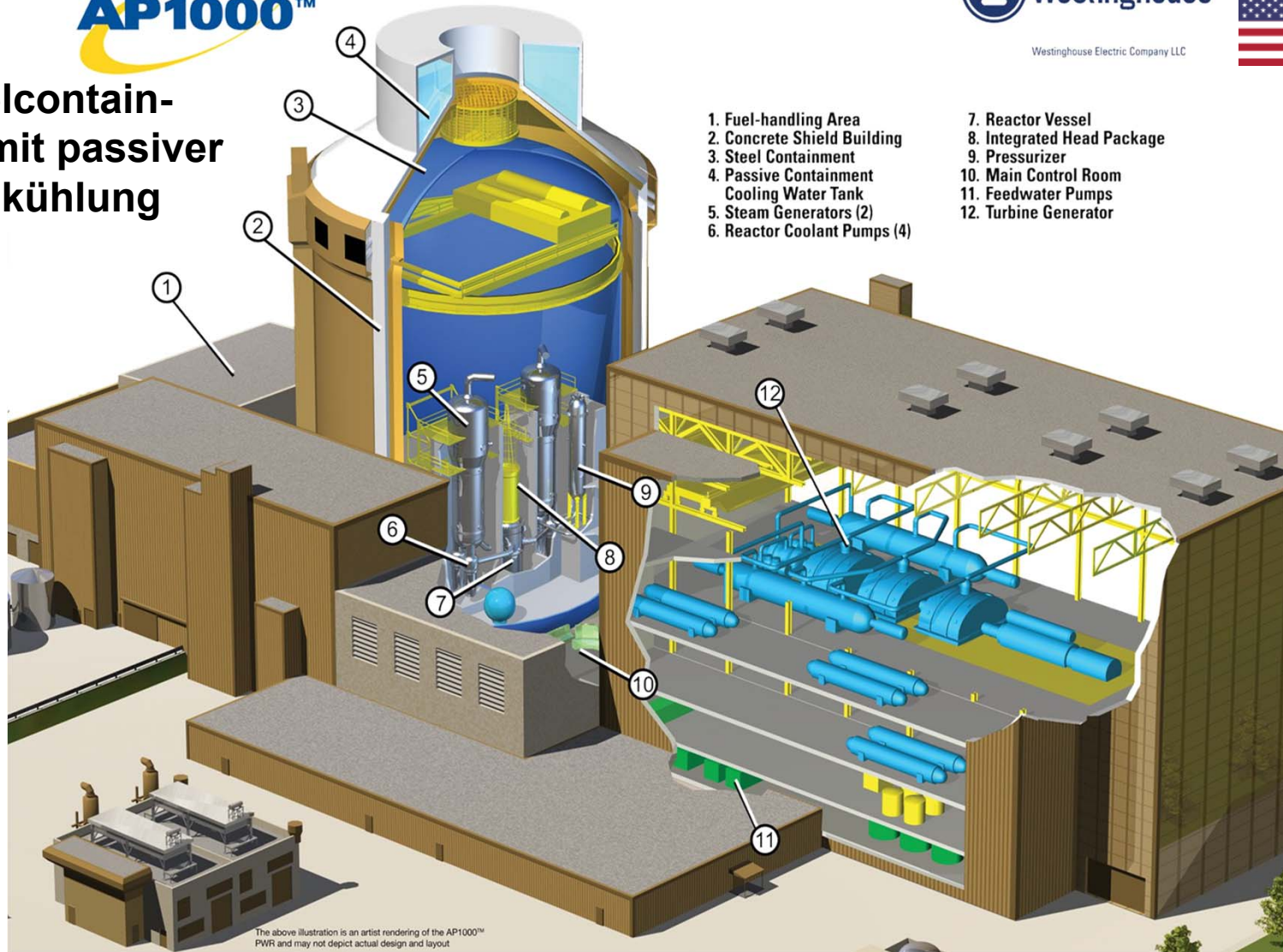
Gen III+: Leichtwasser- (DWR-) Konzepte: AP-600/ AP-1000



Doppelcontainment mit passiver Außenkühlung



Westinghouse Electric Company LLC



- 1. Fuel-handling Area
- 2. Concrete Shield Building
- 3. Steel Containment
- 4. Passive Containment Cooling Water Tank
- 5. Steam Generators (2)
- 6. Reactor Coolant Pumps (4)

- 7. Reactor Vessel
- 8. Integrated Head Package
- 9. Pressurizer
- 10. Main Control Room
- 11. Feedwater Pumps
- 12. Turbine Generator

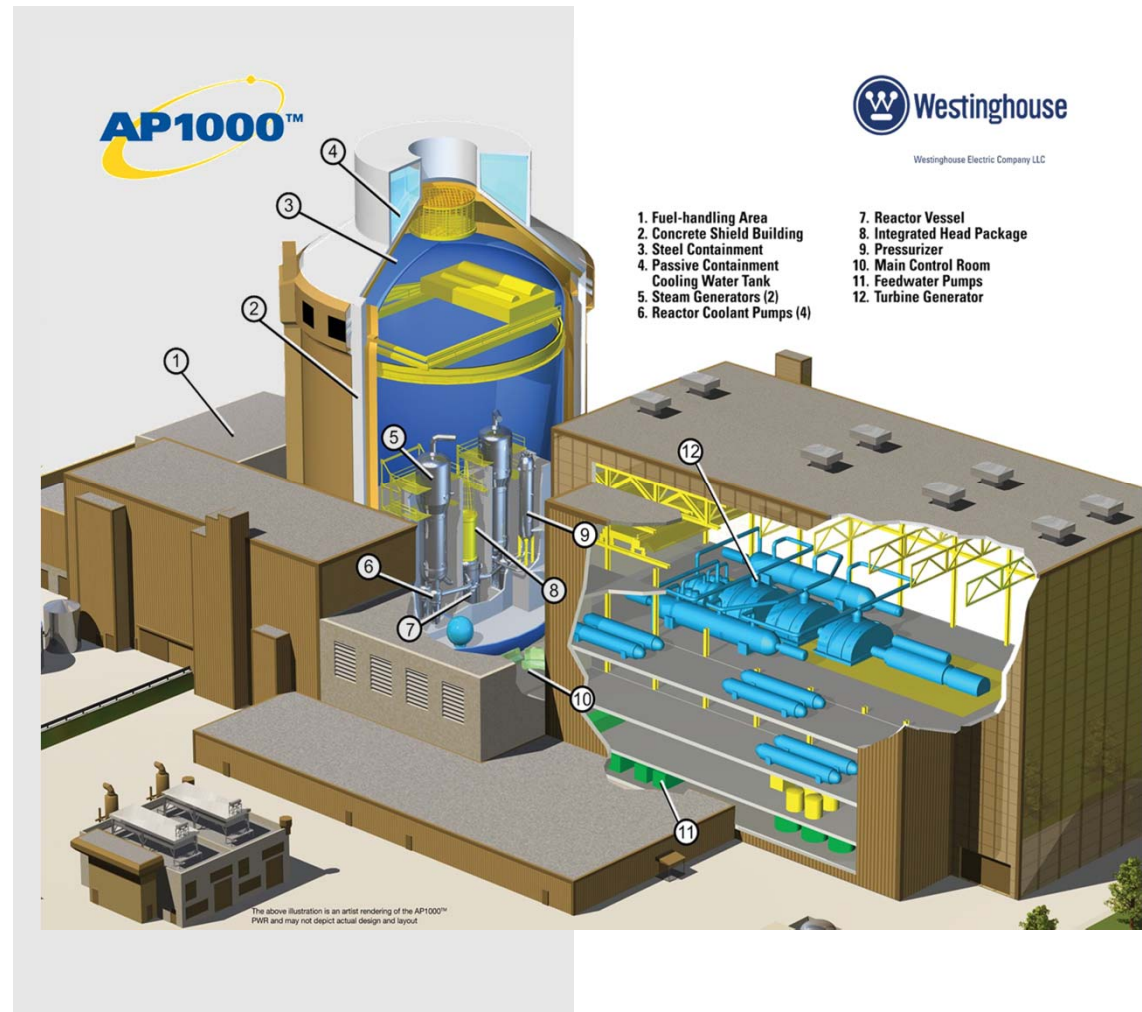
The above illustration is an artist rendering of the AP1000™ PWR and may not depict actual design and layout

Westinghouse, USA





Westinghouse Electric Company LLC



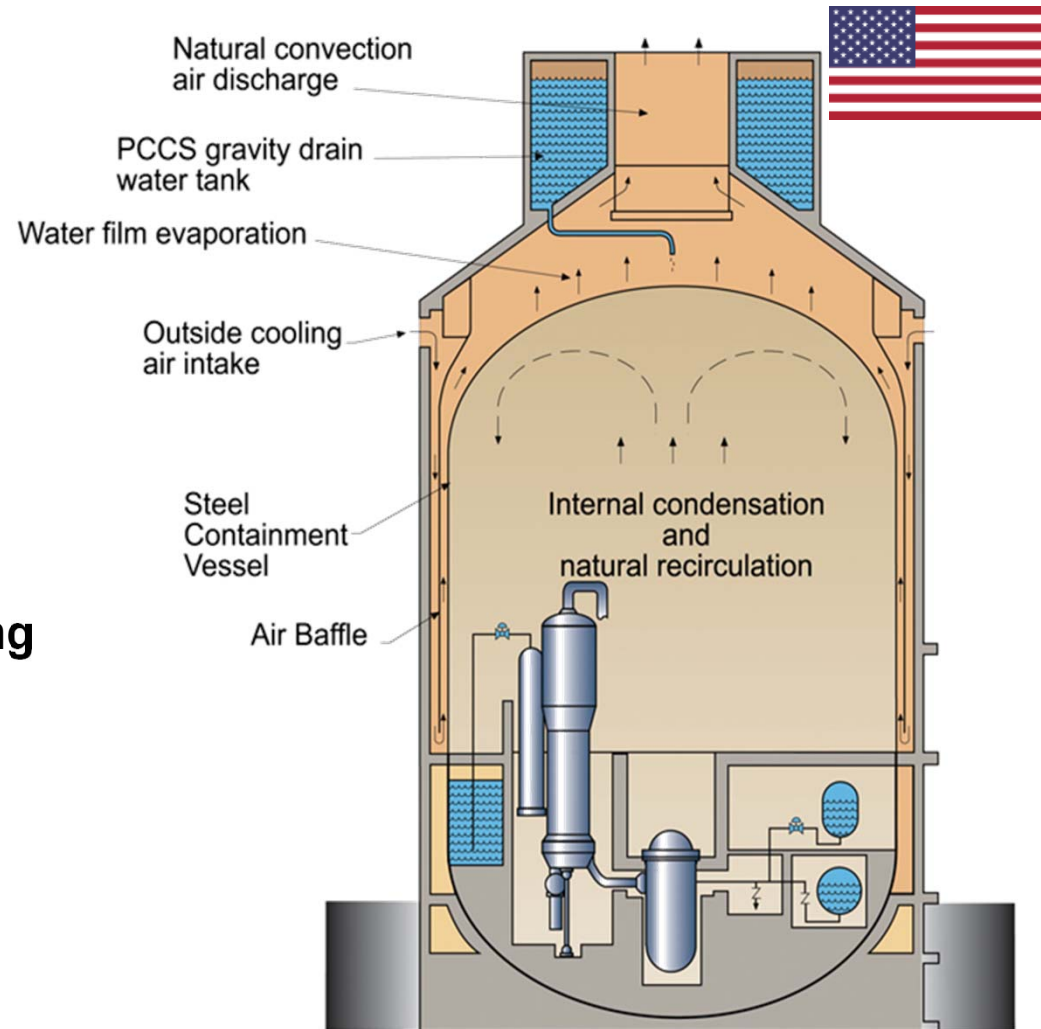
- Westinghouse ist Hersteller von ca. $\frac{3}{4}$ aller DWR weltweit.
- Evolutionäre Technik
- Konsequente Vereinfachungen
- Erweiterte passive Systeme (u.a. keine „nuklearen“ Diesel erford.)
- AP-600 in 1999 durch die US-NRC zertifiziert
- Betreiber: Zu kleine Leistung
- AP-1000 in 2005 zertifiziert, 2011 in UK
- Lizenz für China, Bau von 4 Blöcken
- 2012: Baubeginn 4 Blöcke in US
- 2016: USA: Bauverzögerungen
- 2017: Insolvenz Westinghouse, Abbruch VC Summer 2-3
- 2018: Inbetriebnahme Sanmen-1
- 2023: Inbetriebnahme Vogtle-3

- **Technische Daten AP-600 (AP-1000):**



Primärkreis	2 Kühlkreisläufe mit je 1 Hot Leg, 1 Dampferzeuger, 2 Cold Legs, 2 Kühlmittelpumpen.
Leistung	1940 MW_{th}, 600 MW_{el} (AP-1000: 1117 MW_{el})
Kern	Brennelement: 17x17, AP-600: 145 Elemente, niedrige Kernleistungsdichte, AP-1000: 157 Elemente, hohe Leistungsdichte. Zyklen: 18 oder 24 Monate (AP-1000: 18 Monate).
Dampferzeuger	U-Rohr-Dampferzeuger mit internem Wasserabscheider. Je 2 Kühlmittelpumpen direkt unterhalb Dampferzeuger.
Anwendung konventioneller Komponenten – kein Prototyp erforderlich.	

- **Containment:**
 - Inneres Stahlcontainment.
 - Äußeres Containment mit Schutzfunktion (Einflüsse von Außen).
 - Passives Containment Kühlsystem (PCS) = Wärmesenke im Störfall
 - Funktion: Druckbegrenzung im Containment
 - Naturkonvektion.
 - Zusätzlich kann das Containment durch Wasser gekühlt werden (aktive Auslösung)



AP1000 Passive Containment Cooling System

Westinghouse, USA



- **Kernenergie und Klima**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (LMR)**
 - **Hochtemperaturreaktoren (HTR)**
 - **Fortgeschrittene Konzepte**
- **Kleine Modulare Reaktoren (SMR)**
- **Kernenergie in der Welt**
 - **Schweiz, Kanada, USA, Japan, Finnland, China, Indien**



Generation III („Evolutionär“):

PWR – Pressurized Water Reactor

BWR – Boiling Water Reactor

CANDU – Heavy Water Reactor

Generation IV (Revolutionär“):

VHTR – Very-High-Temperature Reactor

GFR – Gas-Cooled Fast Reactor

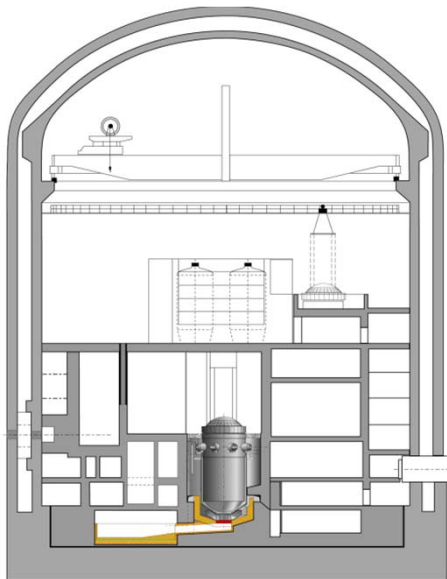
SFR – Sodium-Cooled Fast Reactor

LFR – Lead-Cooled Fast Reactor

SCWR – Supercritical Water-Cooled Reactor

MSR – Molten Salt Reactor

Z.T. auch zur H₂- und Prozesswärmeerzeugung.



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

VHTR	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
GFR		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
SFR			◆	◆	◆			◆	◆
LFR		◆		◆	◆				◆
SCWR	◆	◆		◆	◆				◆
MSR		◆	◆						◆

◆ Co-Chair im Steering Committee 📖 Roland Schenkel, EC, 23.11.2005, Berlin



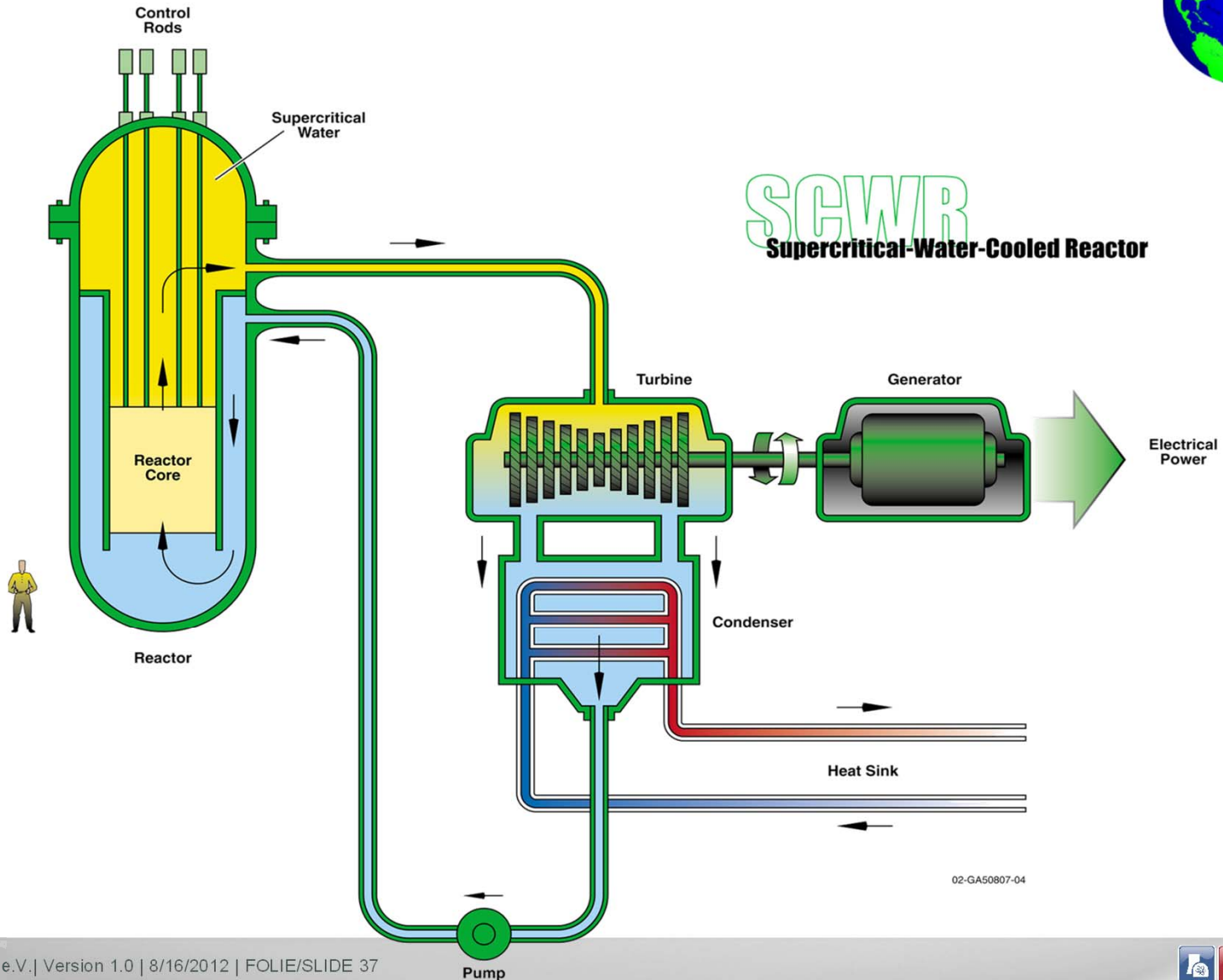
Weiterentwicklung (nach GEN III):

- **Wirtschaftlichkeit**
- **Sicherheit und Zuverlässigkeit**
- **Minimierung der Rückstände (Partitioning + Transmutation)**
- **Ausweitung der Brennstoffbasis (U, Pu Recycling, Th)**
- **Safeguards (Proliferations- Beständigkeit)**

Weitere Anwendungen:

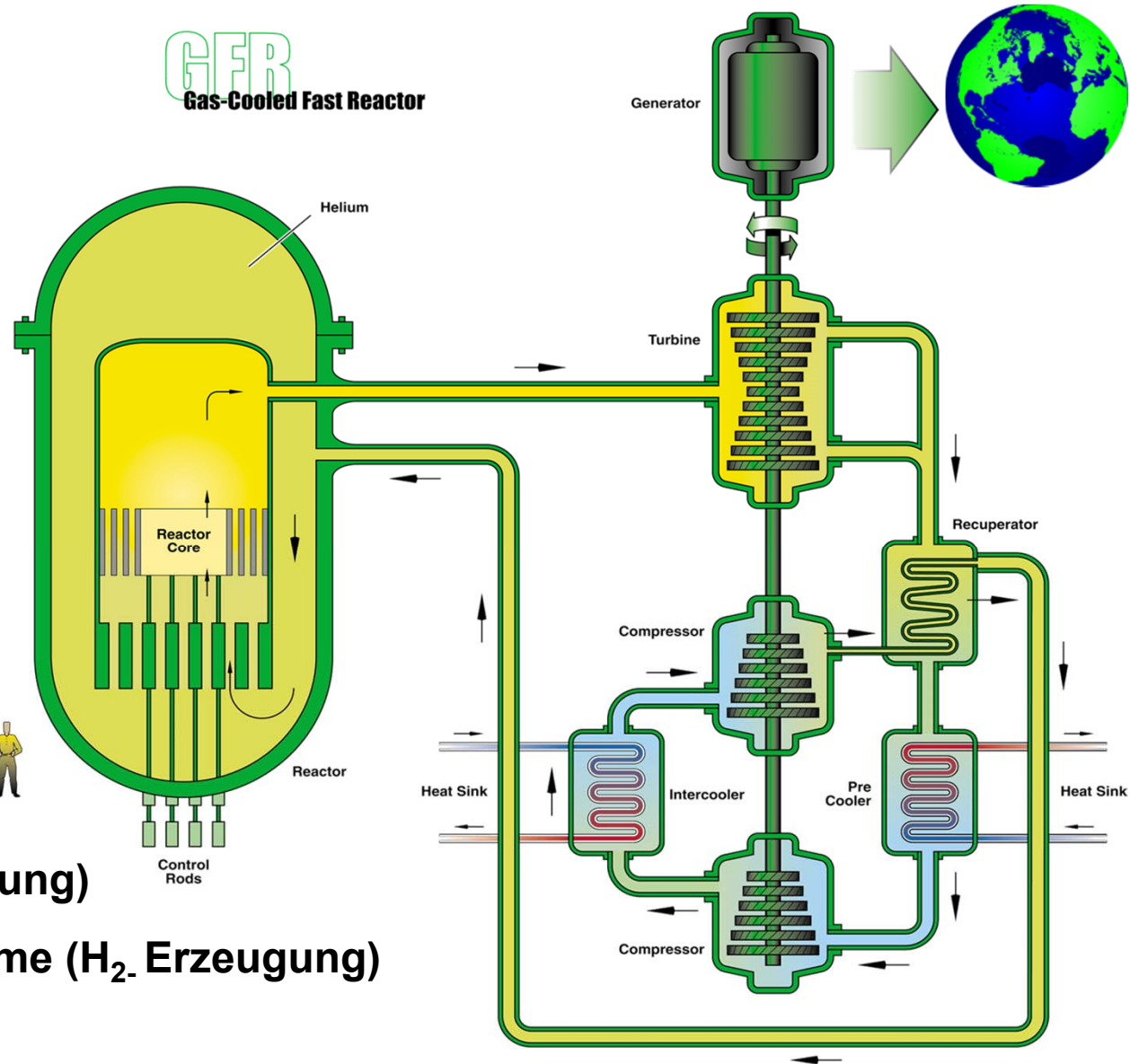
- **Elektrolytische Wasserstoffproduktion**
- **Synfuel- Herstellung**
- **Meerwasserentsalzung**
- **Prozesswärme**

Gen IV (1): Supercritical- Water- Cooled Reactor = HPLWR



GFR Gasgekühlter schneller Reaktor

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



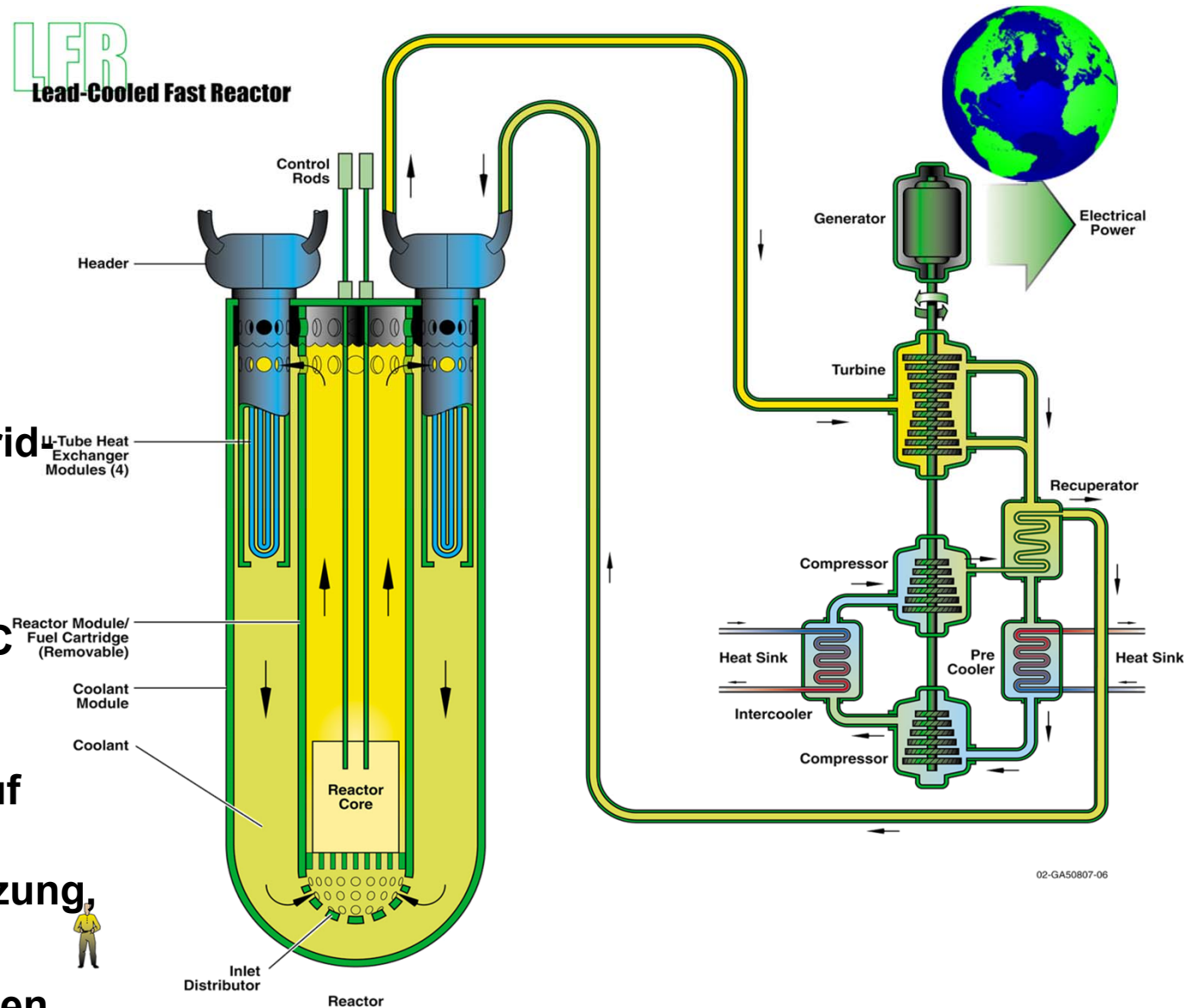
02-GA50807-05

Gen IV: Lead- Cooled Fast Reactor

LFR
Bleigekühlter
schneller Reaktor

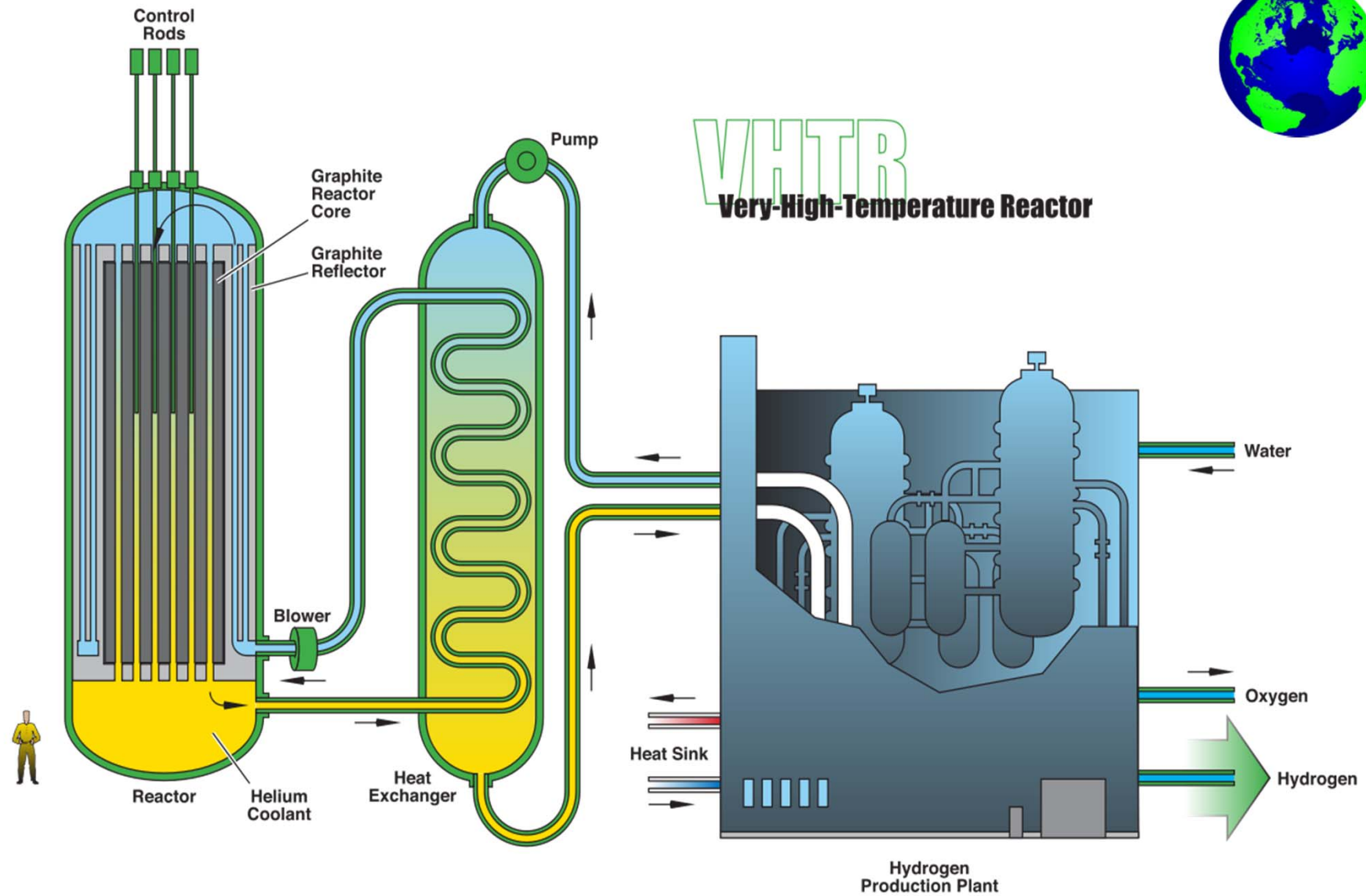
LFR
Lead-Cooled Fast Reactor

- 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 Jahre- Zyklen

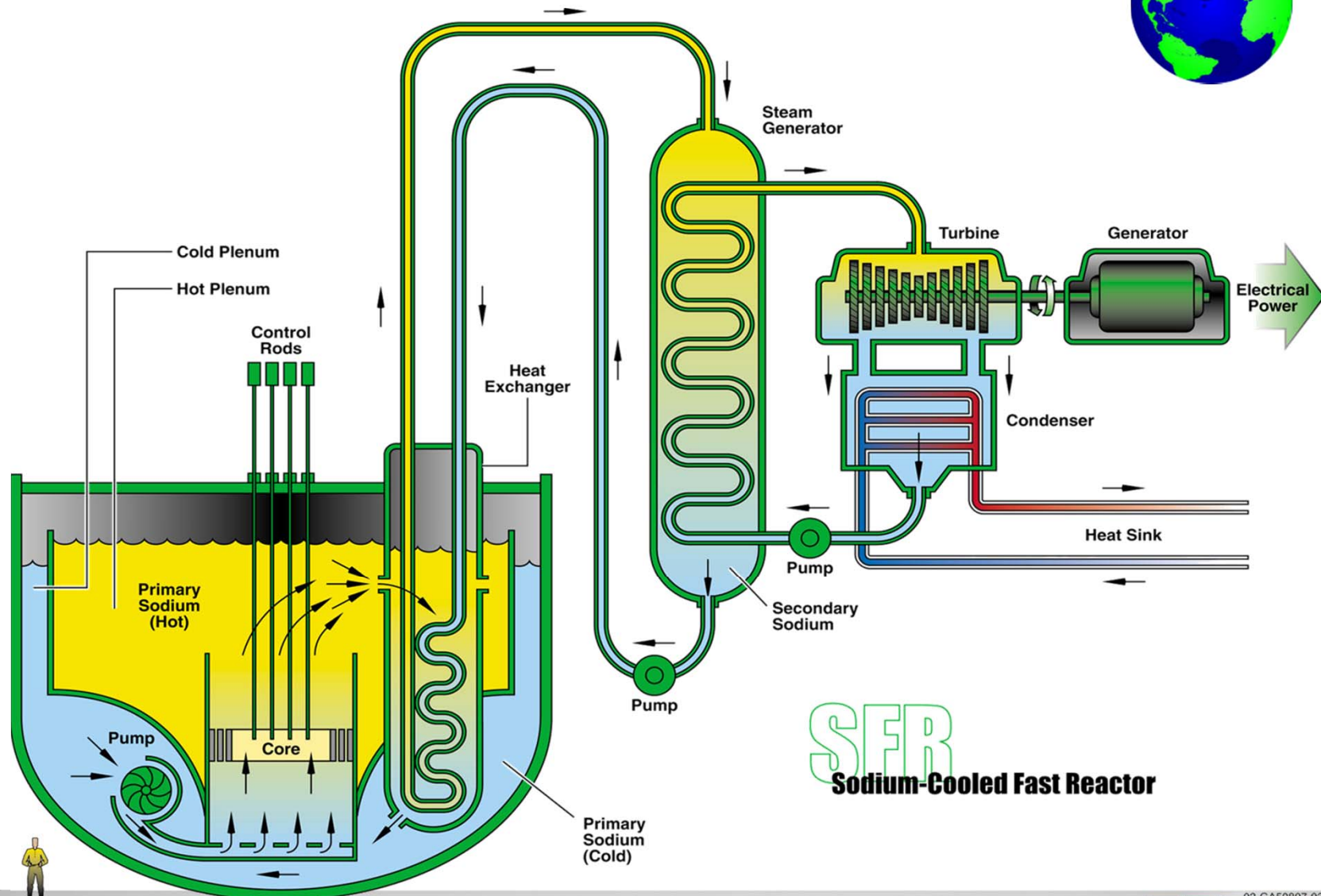


02-GA50807-06

Gen IV(4): Very- High- Temperature Reactor



Gen IV (5): Sodium- Cooled Fast Reactor

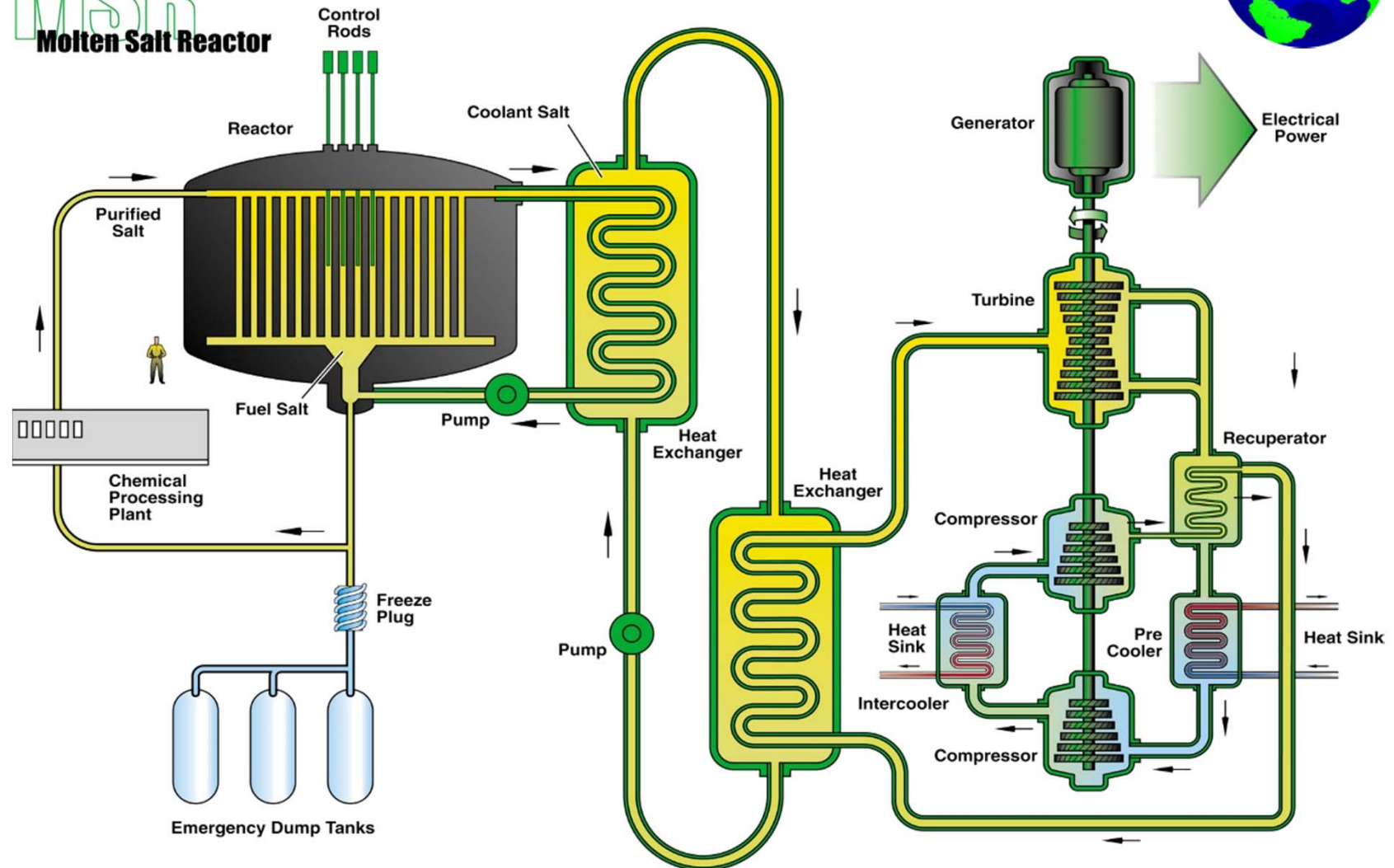


SFR
Sodium-Cooled Fast Reactor



Gen IV (6): Molten Salt Reactor

MSR
Molten Salt Reactor



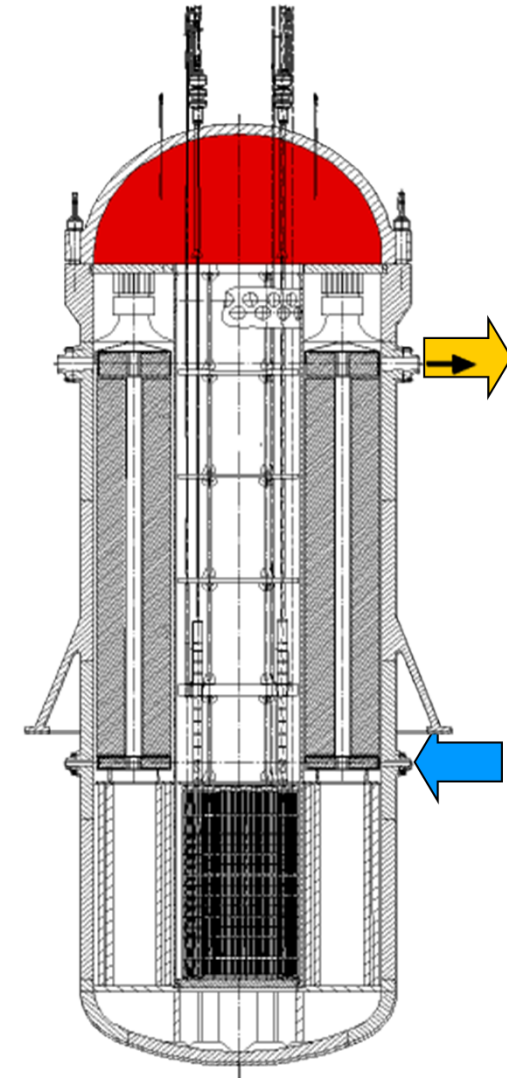


- **Kernenergie und Klima**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (LMR)**
 - **Hochtemperaturreaktoren (HTR)**
 - **Fortgeschrittene Konzepte**
- **Kleine Modulare Reaktoren (SMR)**
- **Kernenergie in der Welt**
 - **Schweiz, Kanada, USA, Japan, Finnland, China, Indien**



International Reactor Innovative and Secure

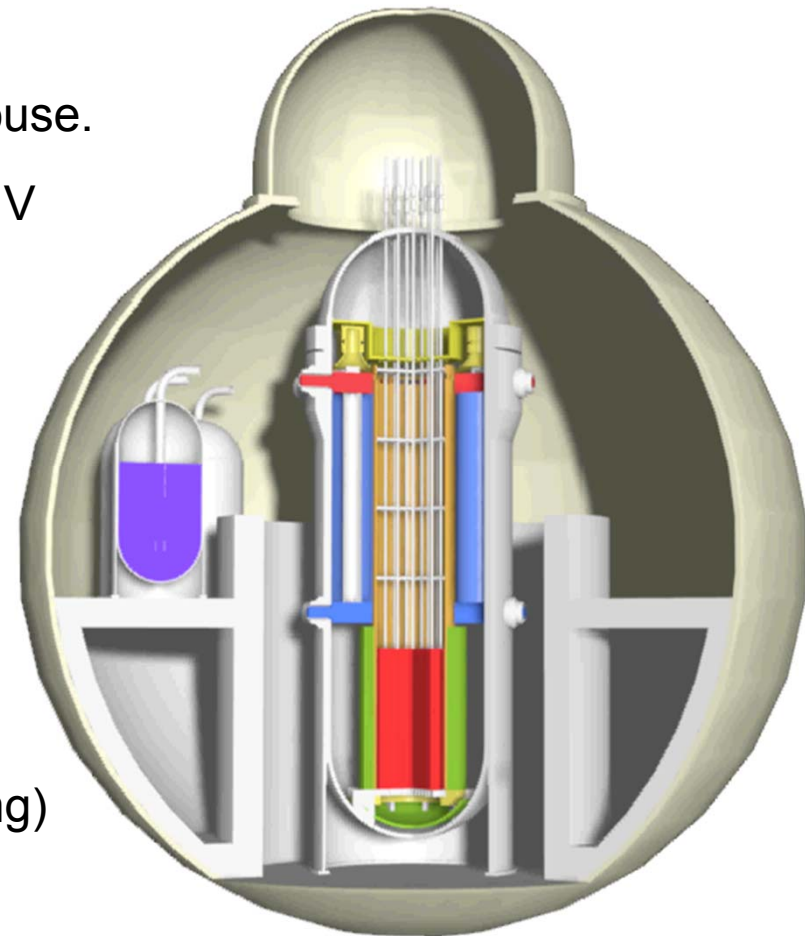
- Entwicklung seit 1999, Konsortium unter Leitung von Westinghouse.
- Review innerhalb von NERI-Generation IV (US-DOE).
- Modulares System mit 100-300 MW_{el}.
- DWR mit Integraldruckbehälter:
 - Kern
 - Steuerstäbe
 - Kühlmittelpumpen (4)
 - Dampferzeuger (8 in Paaranordnung)
 - Druckhalter





International Reactor Innovative and Secure

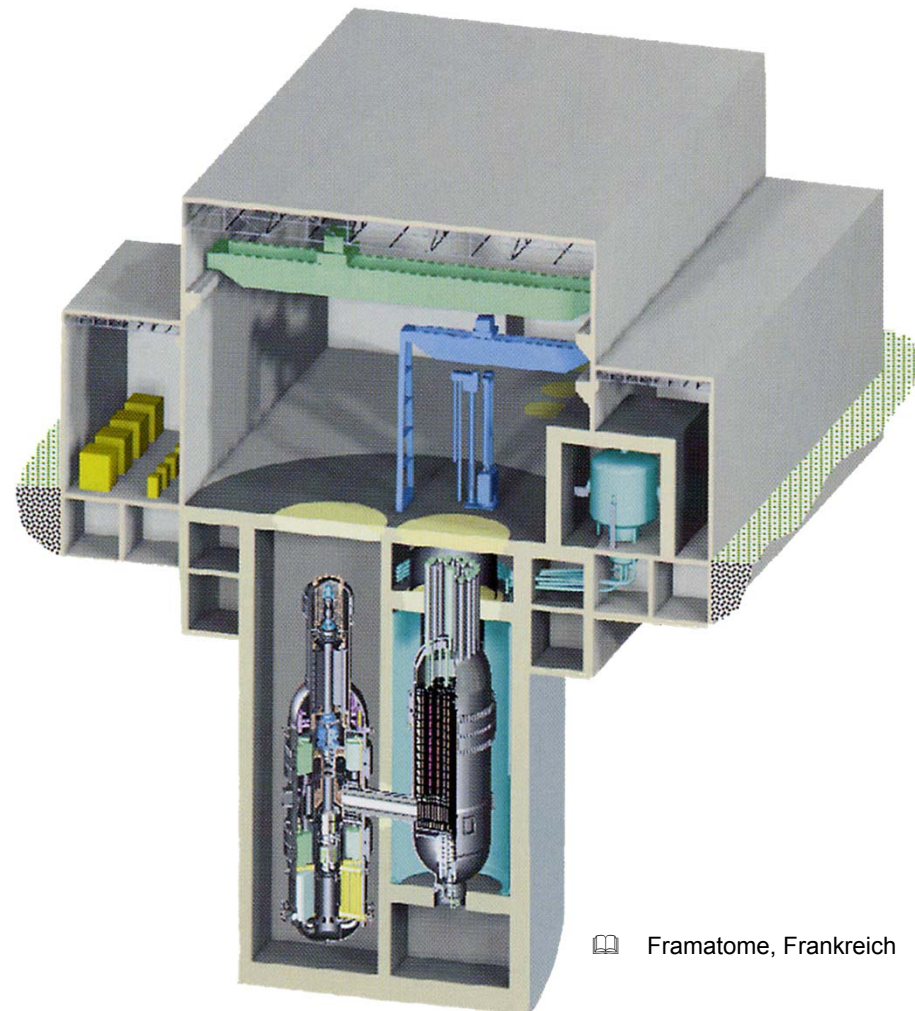
- Entwicklung seit 1999, Konsortium unter Leitung von Westinghouse.
- Review innerhalb von NERI-Generation IV (US-DOE).
- Modulares System mit 100-300 MW_{el}.
- DWR mit Integraldruckbehälter:
 - Kern
 - Steuerstäbe
 - Kühlmittelpumpen (4)
 - Dampferzeuger (8 in Paaranordnung)
 - Druckhalter
- Hochdruckcontainment.





- He- gekühlter, graphitmoderierter Hochtemperaturreaktor
- Unterirdisch
- Entwicklung seit 1985 von General Atomics, Framatome, Fuji Electric, OKBM/ MINATOM (Russland).
- Helium-Hochtemperatorturbine
- Brayton Cycle
- Kernschmelzresistent:

Nachwärmeabfuhr durch Wärmeabstrahlung

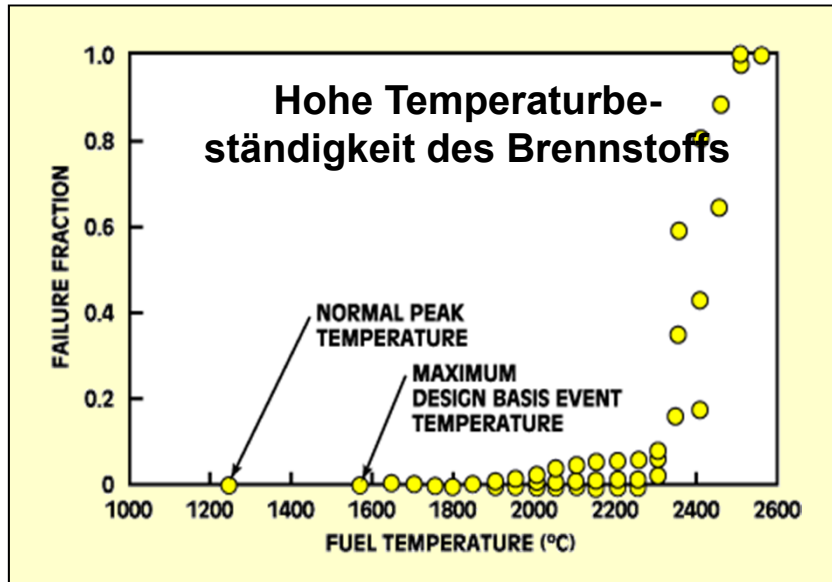
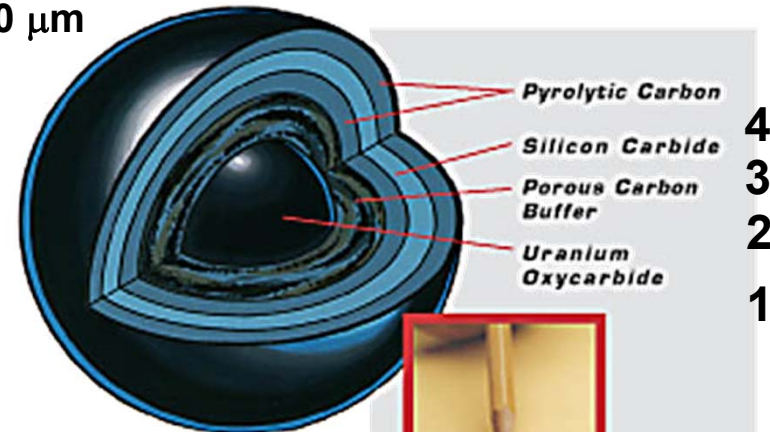


📖 Framatome, Frankreich

Gasgekühlte Konzepte – GT-MHR



Keramische Brennstoffpartikel,
Ø 800 µm



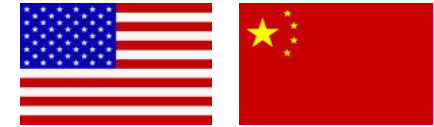
Hohe Temperaturbeständigkeit des Brennstoffs

Brennstäbe aus Brennstoffpartikeln

Brennstäbe werden in hexagonale Graphit-BE eingesetzt

- **Brennstoffschichten:**
 - 1 Urandioxid
 - 2 Poröses Graphit: Puffer für Spaltgase
 - 3 Siliziumkarbid: Diffusionssperre für feste Spaltprodukte
 - 4 Pyrolytisches Graphit: Mechanische Stabilität (Druck der Spaltgase)

Terrapower Travelling Wave Reactor (Bill Gates)

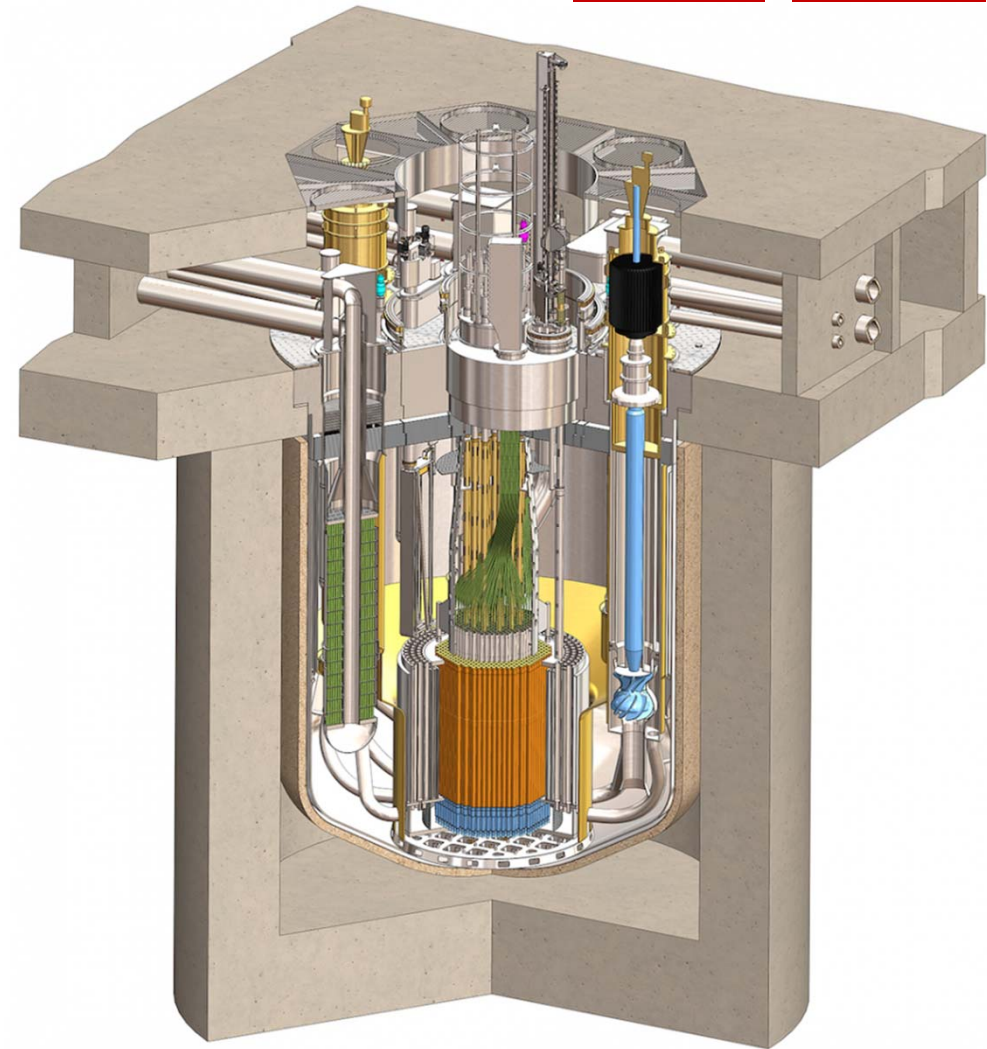


- „Schneller Brüter“
- **Radial wandernde Brutzone**
- Multijahrzyklen
- Abgereichertes U-238 → Pu-239
- Metallischer Brennstoff
- Keine Wiederaufarbeitung
- Verbesserte Safeguards

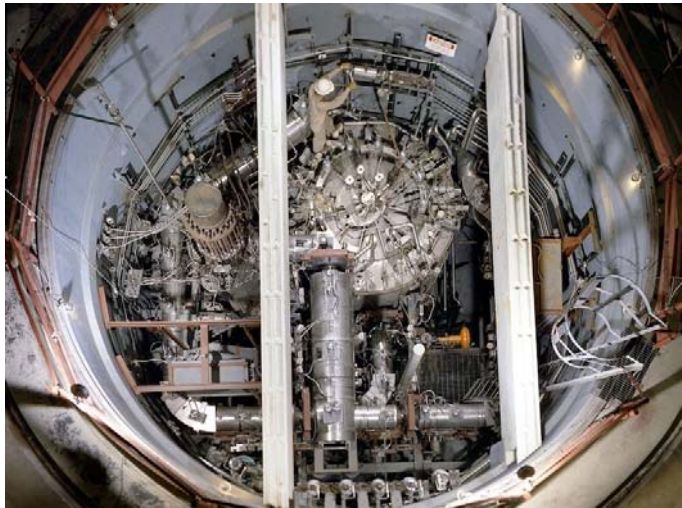
- Offene Brennstäbe?
- Effiziente Kühlmittelreinigung

- Xiapu- 2 (Fujian, China)
- 600 MWe
- In Betrieb 2023

Quelle: www.terrapower.com



Terrapower Molten Chloride Fast Reactor MCFR (Bill Gates)



1966-73: Testprojekt,
eingestellt wegen nicht
beherrschbarer Korrosion



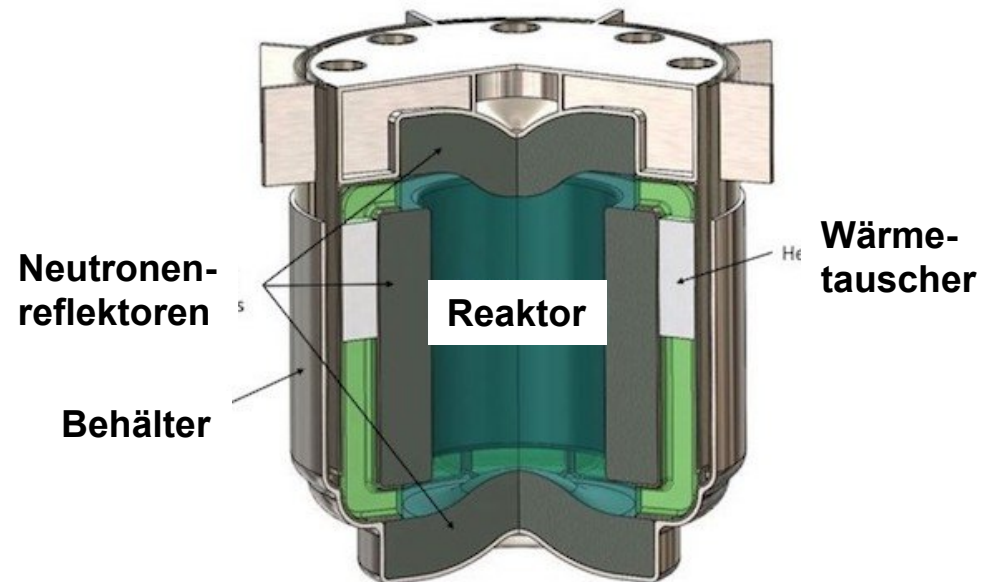
Brennstoff in Salzschnmelze gelöst

Januar 2016: 40 M\$ Förderung (5a)
U.S. Department of Energy

Southern Company,
Oak Ridge National Laboratory,
Electric Power Research Institute
Vanderbilt University

Im Entwurf
Komponententests

Quelle: www.terraperpower.com





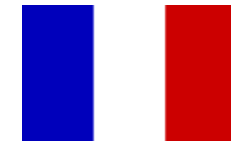
- **Vorteile (Konzeptabhängig):**
 - **Verringerte Abfallmengen, größere Brennstoffausnutzung**
 - **Geringeres Brennstoffinventar im Kern**
 - **Konzeptabhängig hohes Sicherheitsniveau möglich**



- **Nachteile:**
 - **Technische Herausforderungen**
 - **Hochtemperaturmaterialien**
 - **Steuerung**
 - **Brennstoffchemie, Brennstoffhandling...**

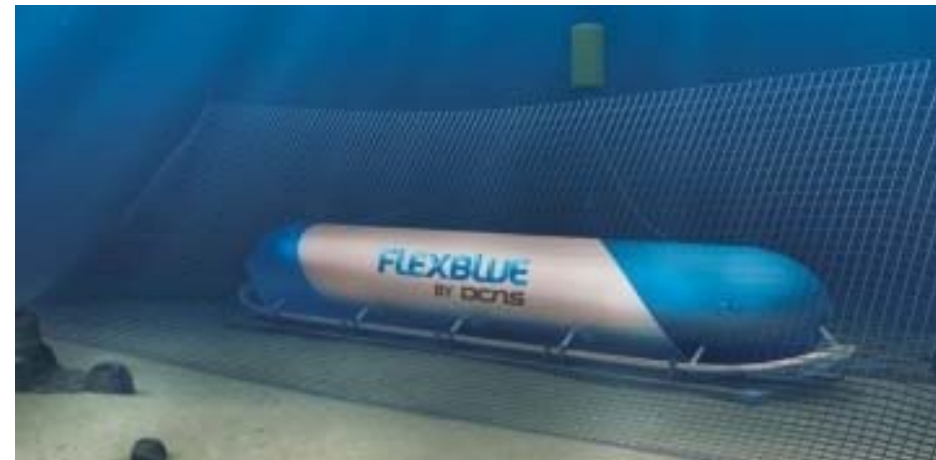


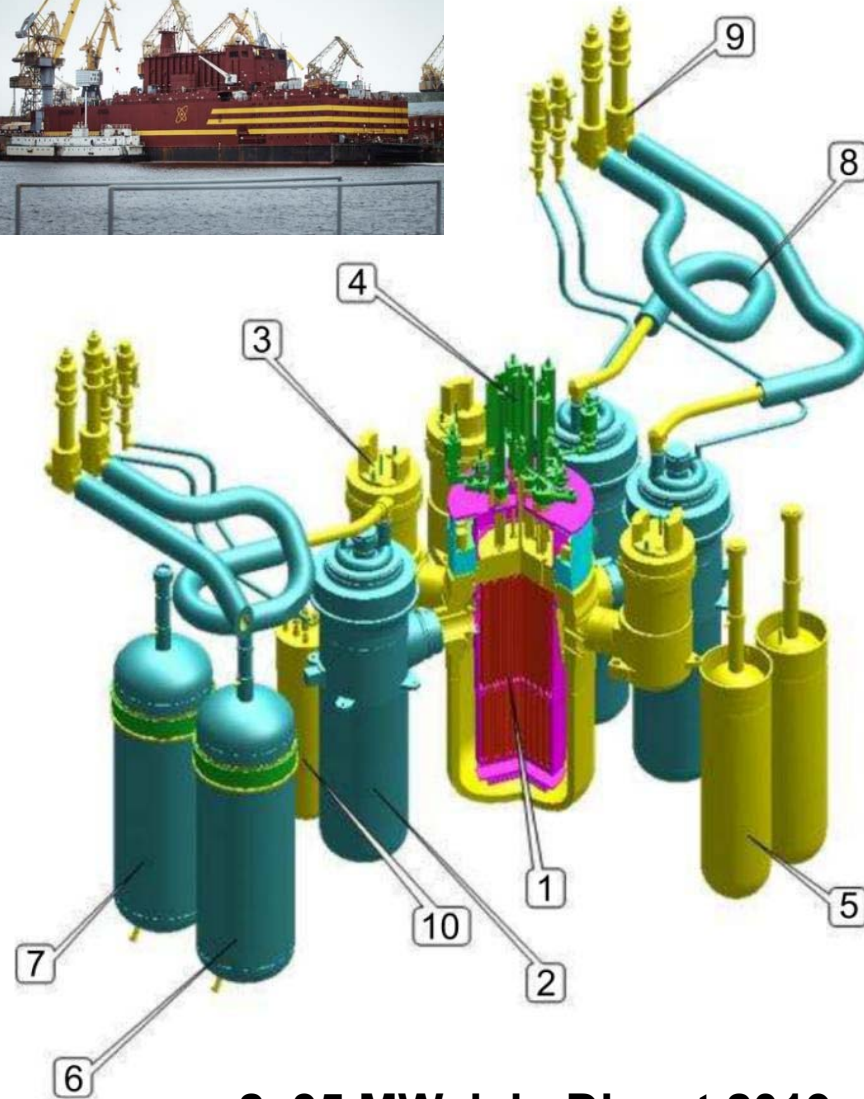
- **Kernenergie und Klima**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (LMR)**
 - **Hochtemperaturreaktoren (HTR)**
 - **Fortgeschrittene Konzepte**
- **Kleine Modulare Reaktoren (SMR)**
- **Kernenergie in der Welt**
 - **Schweiz, Kanada, USA, Japan, Finnland, China, Indien**



DCNS (Werft)/ Framatome/ CEA/ EdF
(Direction des Constructions Navales)

PWR 160 MWel, Gd- basierte Absorber



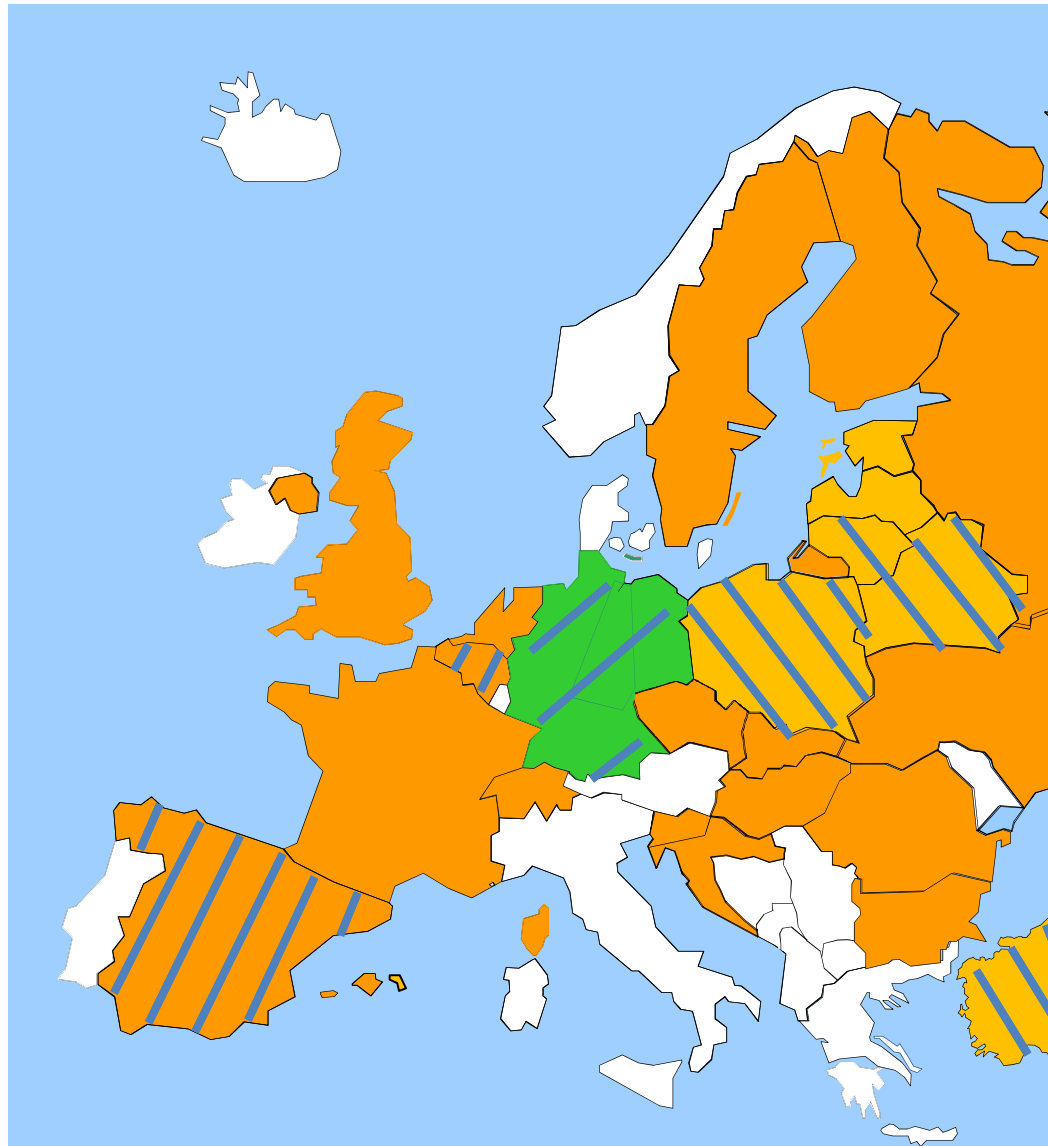


- 1 Reaktor
- 2 Dampferzeuger
- 3 Hauptkühlmittelpumpe
- 4 Steuerstabantriebe
- 5 Notkernkühlung Druckspeicher
- 6 Druckhalter (1. Behälter)
- 7 Druckhalter (2. Behälter)
- 8 Dampfleitungen
- 9 Absperrventile
- 10 Wärmeübertrager Nachkühlsystem

2x35 MWeI, in Dienst 2019



- **Kernenergie und Klima**
- **Generation I – III**
 - **Evolutionär: European Pressurized Water Reactor (EPR)**
 - **Revolutionär: Advanced Pressurized Water Reactor (AP-1000)**
- **Generation IV**
 - **Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (LMR)**
 - **Hochtemperaturreaktoren (HTR)**
 - **Fortgeschrittene Konzepte**
- **Kleine Modulare Reaktoren (SMR)**
- **Kernenergie in der Welt**
 - **EU, Schweiz, Kanada, USA, Finnland, Japan, Indien, China**



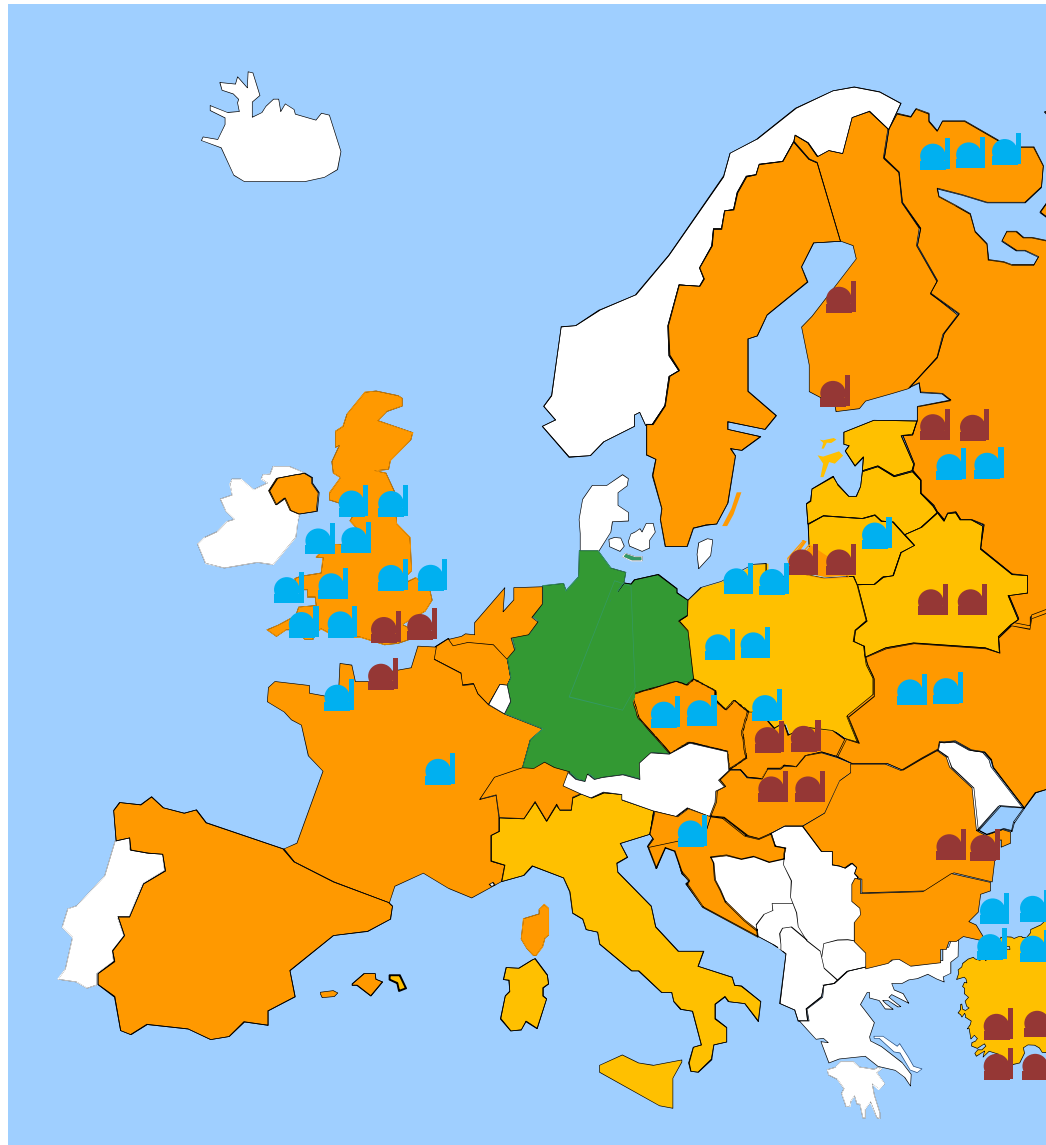
**191 Kernkraftwerke
In 18 Ländern**

(weltweit: 441 in 30 Ländern)

**4 Länder mit
Einstiegsprogrammen**

**3 Länder mit
Ausstiegsprogrammen**

Geplante Kernkraftwerksneubauten in Europa



**21 Kernkraftwerke
in 9 Ländern im Bau**



**32 Projekte
in 10 Ländern**

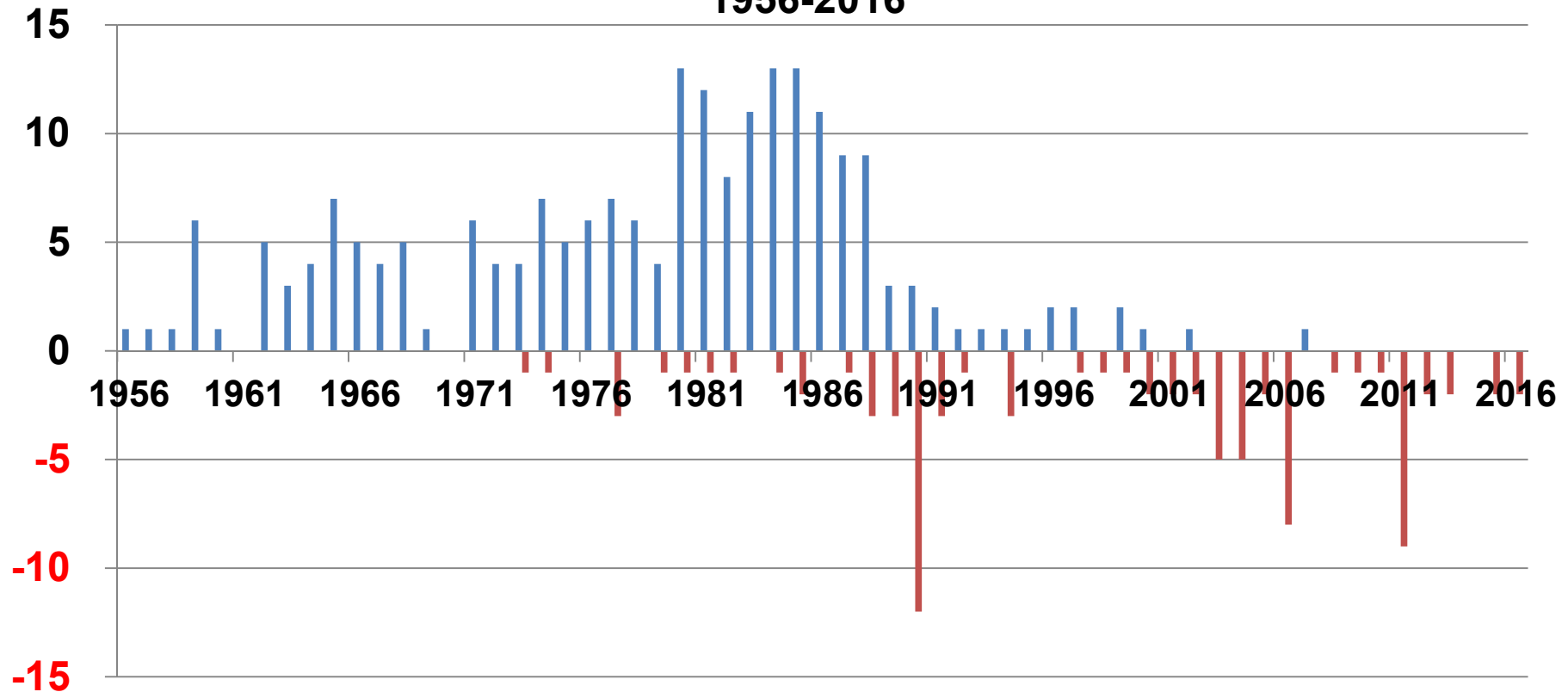


**11 Stilllegungen Europa
7 Stilllegungen Deutschl.**

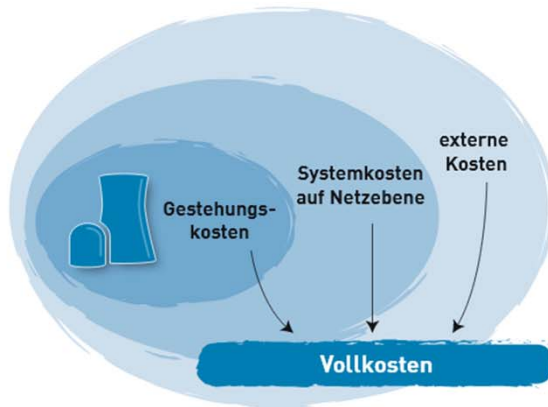
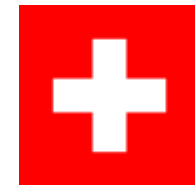




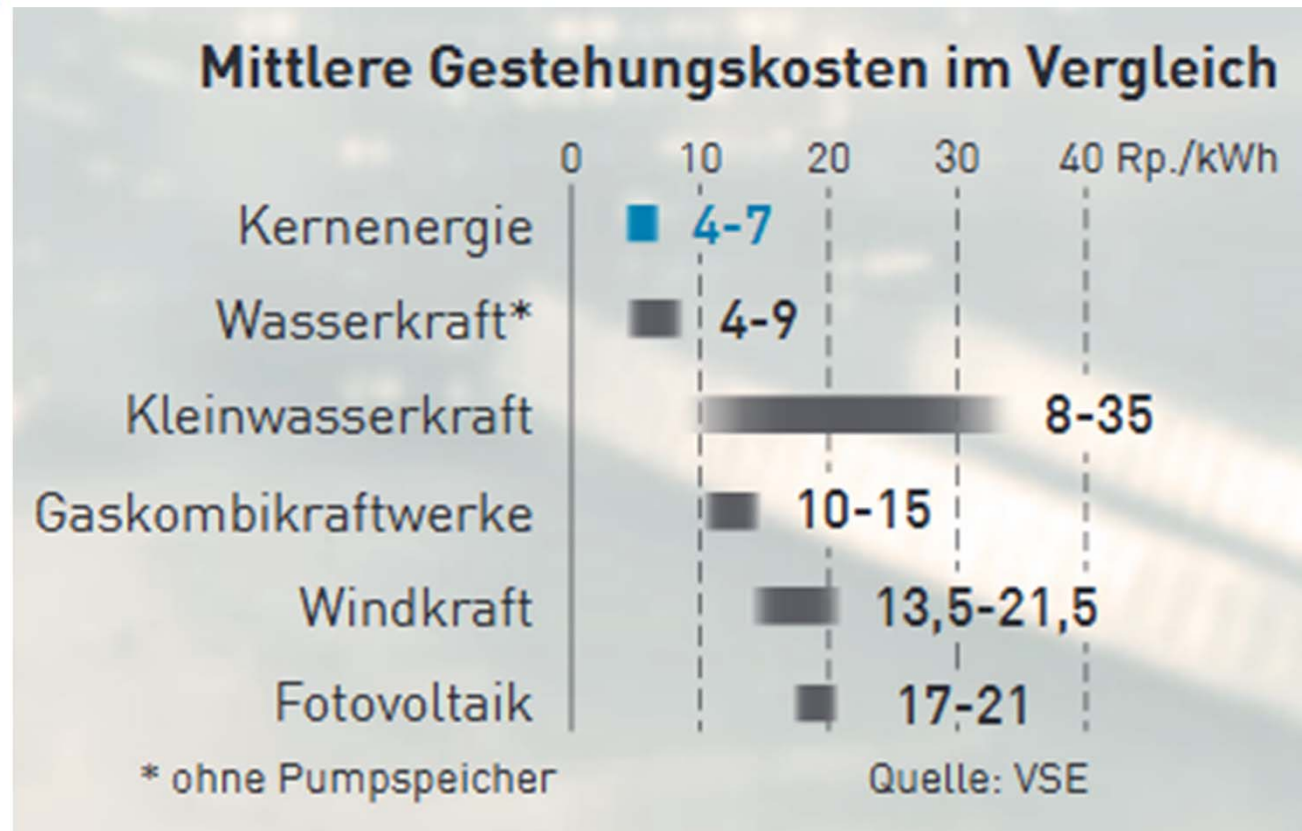
Inbetriebnahmen und Abschaltungen 1956-2016



Stand Juli 2016:
127 KKW In Betrieb → 1/3 der weltweiten nuklearen Flotte



1 € = 1,15 SFr

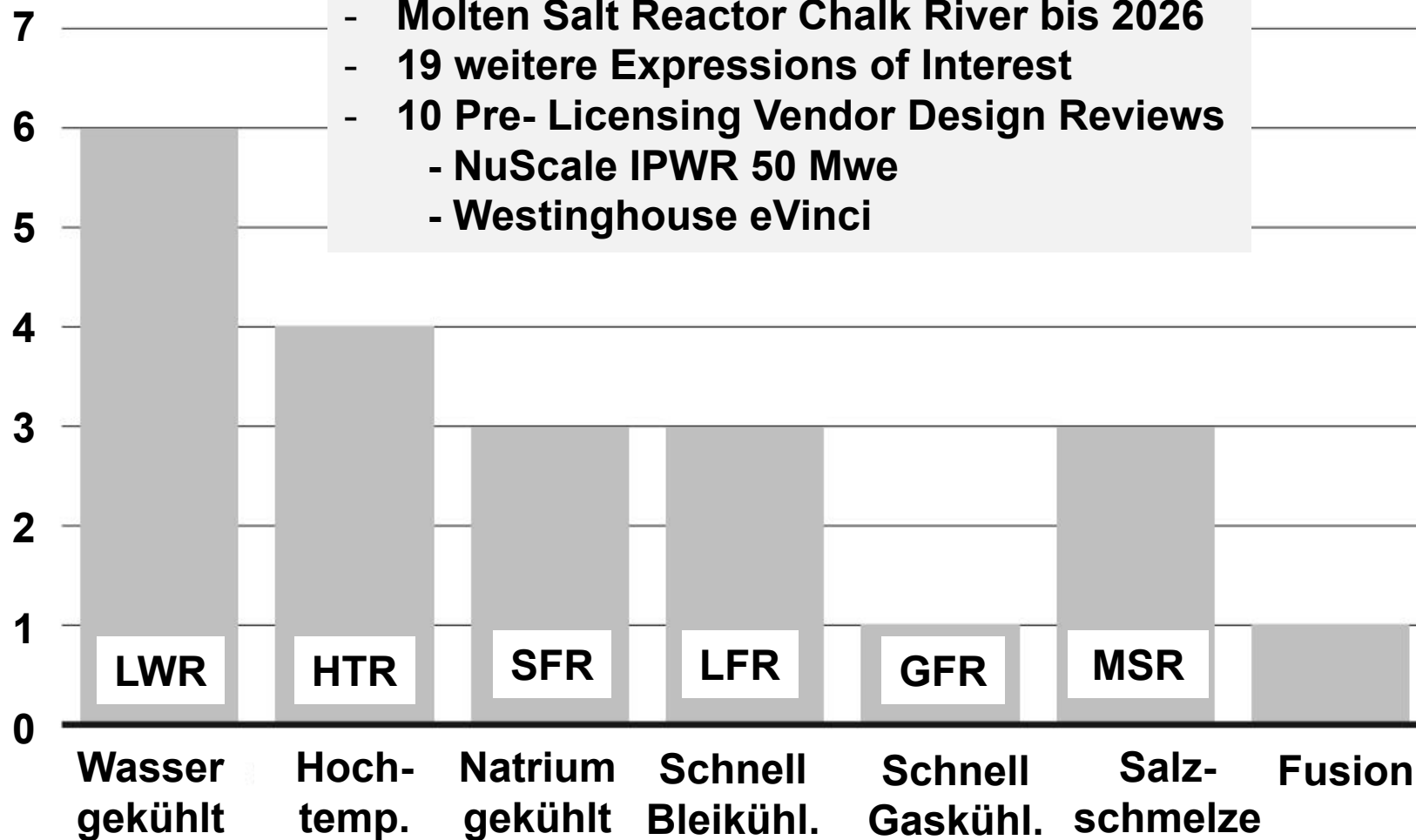




SMR- Roadmap Jan.- Sept. 2018 (Can. Nuclear Association):

- Molten Salt Reactor Chalk River bis 2026
- 19 weitere Expressions of Interest
- 10 Pre- Licensing Vendor Design Reviews
 - NuScale IPWR 50 Mwe
 - Westinghouse eVinci

Anzahl
Reaktoren



Genehmigungsstand Small Modular Reactors in Kanada Feb. 2018



Vendor	Name of design and cooling type	Approximate electrical capacity (MW electrical)	Applied for	Review start date	Status
Terrestrial Energy Inc.	IMSR Integral Molten Salt Reactor	200	Phase 1 Phase 2	Apr-16 Pending summer 2018	Phase 1 complete Service agreement under development
NuScale Power, LLC	NuScale Integral Pressurized Water Reactor	50	Phase 2*	Pending mid-2018	Service agreement under development
Ultra Safe Nuclear Corporation / Global First Power	MMR-5 and MMR-10 High Temperature Gas 5-10	200	Phase 1 Phase 2	Dec-16 Pending summer 2018	Assessment in progress Service agreement under amendment
Westinghouse Electric Company, LLC	eVinci Micro Reactor Solid core and heat pipes	Various outputs up to 25 MWe	Phase 2*	To be determined	Service agreement under development
LeadCold Nuclear Inc.	SEALER Molten Lead	3	Phase 1	Jan-17	Phase 1 on hold at vendor's request
Advanced Reactor Concepts Ltd.	ARC-100 Liquid Sodium	100	Phase 1	Fall 2017	Assessment in progress
URENCO	U-Battery High-Temperature Gas	4	Phase 1	Tentative Spring 2018	Service agreement under development
Moltex Energy	Moltex Energy Stable Salt Reactor Molten Salt	300	Series Phase 1 and 2	Dec-17	Phase 1 assessment in progress
SMR, LLC. (A Holtec International Company)	SMR-160 Pressurized Light Water	160	Phase 1	To be determined	Service agreement under development
StarCore Nuclear	StarCore Module High-Temperature Gas	10	Series Phase 1 and 2	To be determined	Service agreement under development

*Phase 1 objectives will be addressed within the Phase 2 scope of work.

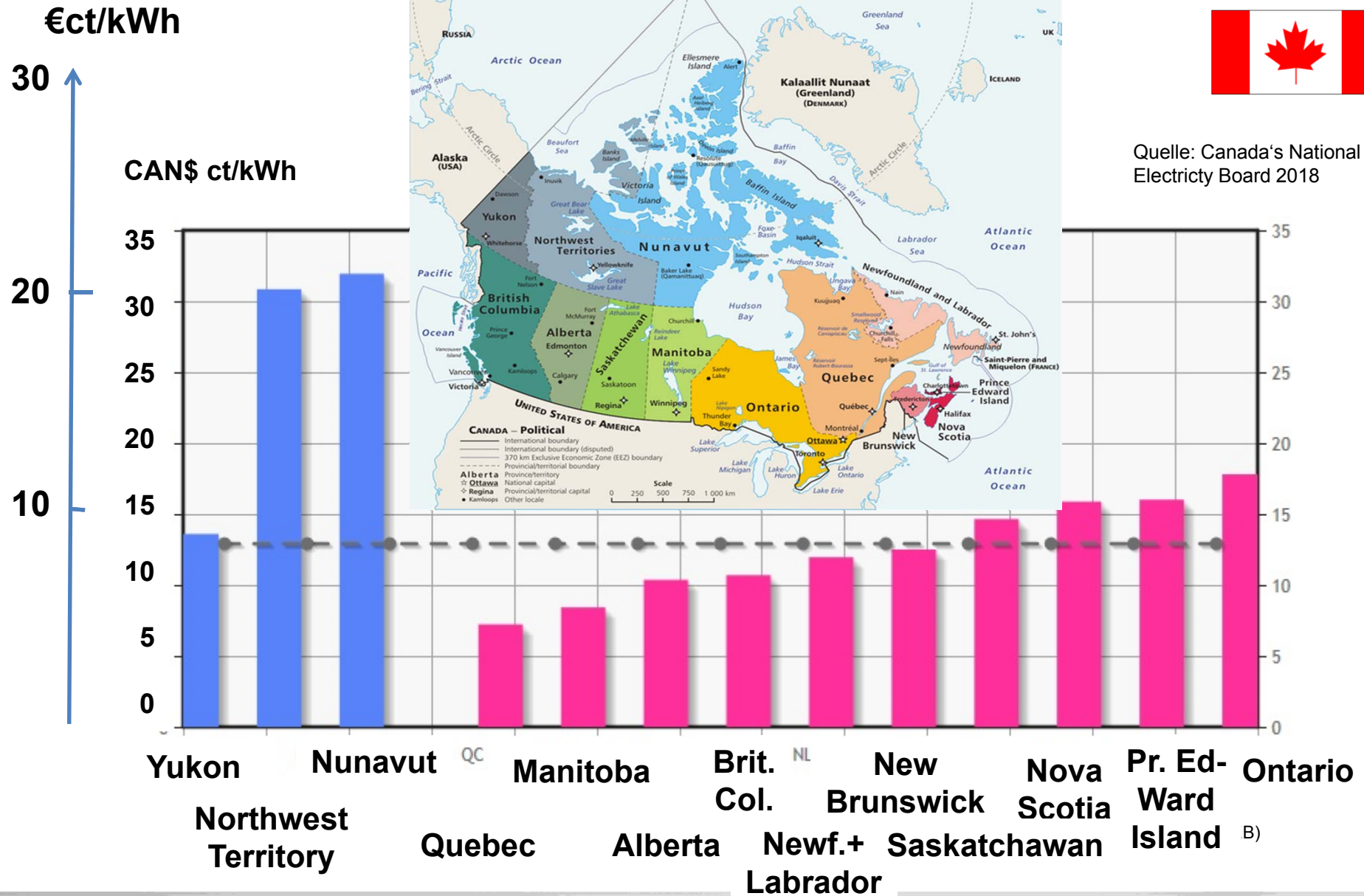
Quelle: nuclear.drupalfs.s3.amazonaws.com/cnsc_prelicensing_vendor_design_review_february_2018.jpg
Data source: Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), February 2018.



Strompreise in Kanada 2017



Quelle: Canada's National Electricity Board 2018





Laufzeitverlängerung auf 60 Jahre:

- Für ca. 90 Reaktoren erteilt,
- Rest folgt

Laufzeitverlängerung auf **80** Jahre:

- Beschluss zur Einreichung für die ersten zwei Reaktoren (Calvert Cliffs)

Design

Antragsteller

Status



[U.S. EPR](#)

AREVA NP, Inc.

Suspended

[U.S. Advanced Pressurized-Water Reactor \(US-APWR\)](#)

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Under Review

[ABWR Design Certification Renewal](#)

Toshiba Corporation Power Systems Company

Withdrawn

[ABWR Design Certification Renewal](#)

GE-Hitachi Nuclear Energy

Under Review

[Advanced Power Reactor 1400 \(APR1400\)](#)

Korea Electric Power Corporation and Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.

Under Review

[NuScale](#)

NuScale Power

Under Review



SMR Druckwasserreaktoren:

Design	Antragsart	Antragsteller
NuScale	Design Certification	NuScale Power
BWXT mPower™	Pre-Application	BWXT mPower, Inc.
SMR-160	Pre-Application	SMR Inventec (Holtec International Co.)
Clinch River Nuclear Site	Early Site Permit	Tennessee Valley Authority (TVA)

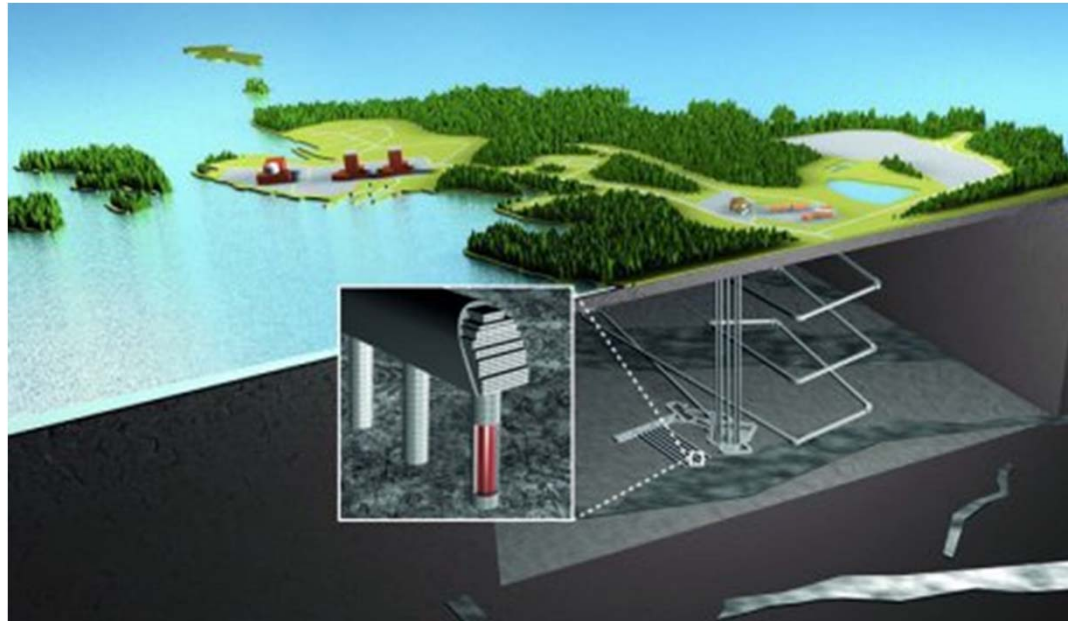
Andere fortgeschrittene Reaktoren (SMR):

Design	Antragsteller	Technik
Oklo	Oklo Inc.	Compact Fast Reactor
Transatomic	Transatomic Power	Molten Salt Reactor
Integral Molten Salt Reactor (IMSR)	Terrestrial Energy	Molten Salt Reactor
Xe-100	X-Energy	Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor
Molten Chloride Fast Reactor	TerraPower, LLC	Molten Salt Reactor

Weltweit erstes Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle aus KKW *



- 2000: Regierungsentscheidung für ein Endlager für verbrauchten Brennstoff
- 2001: Grundsatzentscheidung des Finnischen Parlaments
- 2012: Genehmigungsantrag von Posiva (TVO/FORTUM) für Standort Olkiluoto
- 2015: STUK** Bestätigung der Erfüllung aller Sicherheitskriterien
- **12. November 2015: Errichtungsgenehmigung** für 6,500 t verbrauchten Brennstoff*
- Nächste Schritte: Errichtung bis 2020
- Vor Inbetriebnahme: Antrag Betriebsgenehmigung



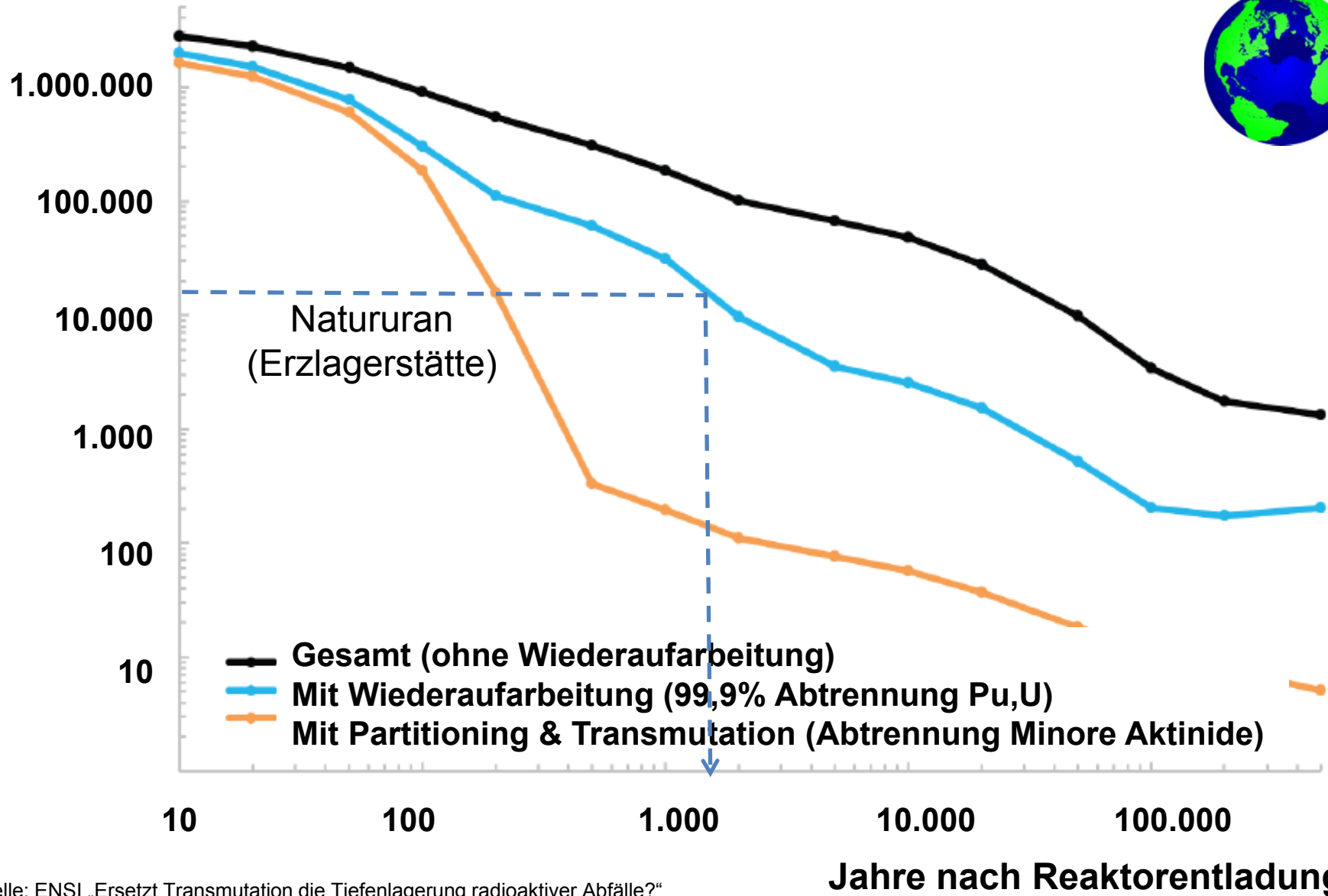
*: Ausreichend für mehr als 50 a Betrieb von 5 der 6 KKW

** STUK: Finnische Aufsichtsbehörde

Quellen: STUK, 02/2015, WNA 11/2015

Mit Wiederaufarbeitung muss Endlagerung nur 2.000 a „können“

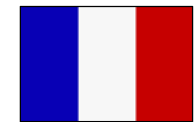
Radiotoxizität Sv/tSchwermetall



Quelle: ENSI „Ersetzt Transmutation die Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle?“

Unterschiedliche Gesteinsformationen (Auswahl):

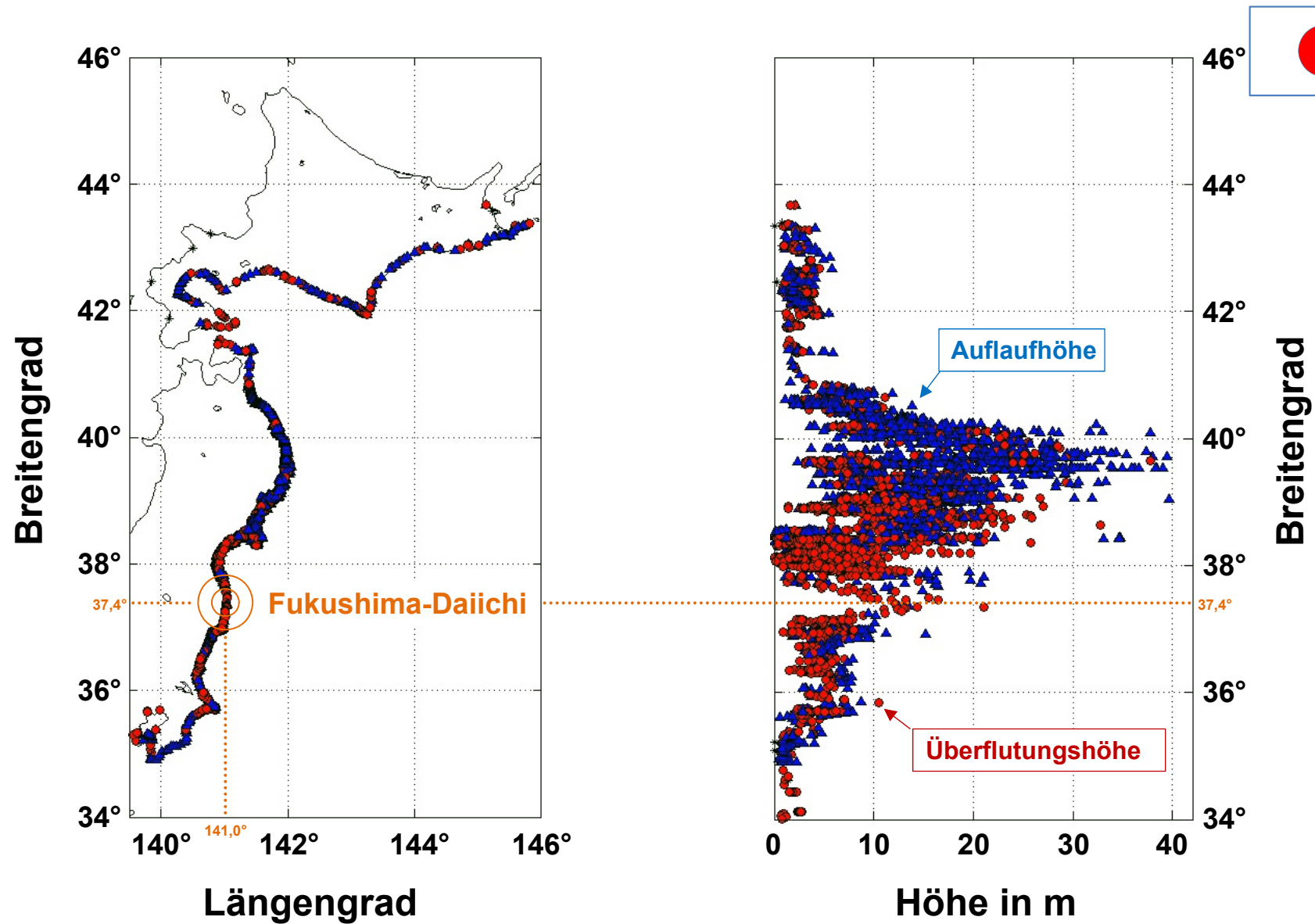
- **Forsmark, Schweden (Kristallin, Cu- Behälter)**
- **Sechs Auswahlstandorte, (Nord-) Schweiz (Ton?)**
- **Bure, Frankreich (Ton)**
- **Seversk (Tomsk), Russland (Bergstollen, Zwischenlager?)**
- **Yucca Mountain, Nevada, USA (Tuff, 200-450m, Erkundung eingestellt, Genehmigung fortgesetzt)**

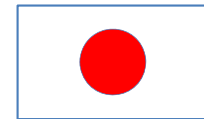


commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=100567

- Bis heute **keine** Gesundheitsschäden durch Radioaktivität (WHO)
- Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft keine (WHO)
- Unfallkosten bis heute ca. 120 G€ (TEPCO), davon 2/3 Entschädigungen
- Von ca. 160.000 umgesiedelten Personen bisher ca. 84.000 Rückkehrer
- 30km- Zone: Umfangreiche Dekontaminationsarbeiten (bis 3cm Tiefe)
- Ca. Hälfte wieder freigegeben, nach Nordwest ausgedehnt bis ca. 40km
- Dorf Iitate 2017 eingeschränkt wieder freigegeben
- Von 42 Reaktoren 7 wieder in Betrieb, weitere 19 beantragt







► War Fukushima Daiichi ein **Restrisikoereignis**?

Datum	Region	Magnitude	Tsunami
11.03.2011	Japan	M = 9.0	39 m
04.10.1994	Kuril Islands	M = 8.3	11 m
12.07.1993	Sea of Japan	M = 7.7	31.7 m
26.05.1983	Noshiro	M = 7.7	14.5 m
07.12.1944	Kii Peninsula	M = 8.1	10 m
02.01.1944	Kii Peninsula	M = 8.1	10 m
01.01.1944	Kii Peninsula	M = 8.1	10 m
07.01.1944	Kii Peninsula	M = 8.1	10 m
15.06.1896	Sanriku	M = 8.5	30 m
24.12.1854	Nankaido	M = 8.4	28 m
29.06.1780	Kuril Islands	M = 7.5	12 m
24.04.1771	Ryukyu Islands	M = 7.4	85 m
28.10.1707	Japan	M = 8.4	11 m
31.12.1703	Tokaido-Kashima	M = 8.2	10.5 m
02.12.1611	Sanriku	M = 8.0	25 m
20.09.1498	Nankaido	M = 8.6	17 m
Resultat		M ≈ 7.4	> 10 m

Selbst Erdbeben mit Magnituden um 7.4 können Tsunamis über 10 m zur Folge haben!

► Analyse Historischer Daten

16 große Tsunamis mit Wellenhöhen über 10 m in den letzten 513 Jahren.

► Berechnete Häufigkeit

$$f = \frac{16}{513 \text{ a}} \approx 0.0312 \text{ a}^{-1} \approx \frac{1}{30 \text{ a}}$$

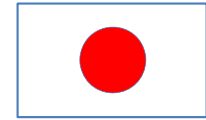
Alle **30 Jahre** trifft ein großer Tsunami eine japanische Küste!

► Ortsspezifische Frequenz

Innerhalb von **100 bis 1 000 Jahren** ist ein großer Tsunami an jeder Küste in Japan zu erwarten (**Fukushima: 300 bis 400 Jahre.**)

► **Nein, es war eine FAHRLÄSSIGE Unterschätzung eines hohen spezifischen Risikos!**



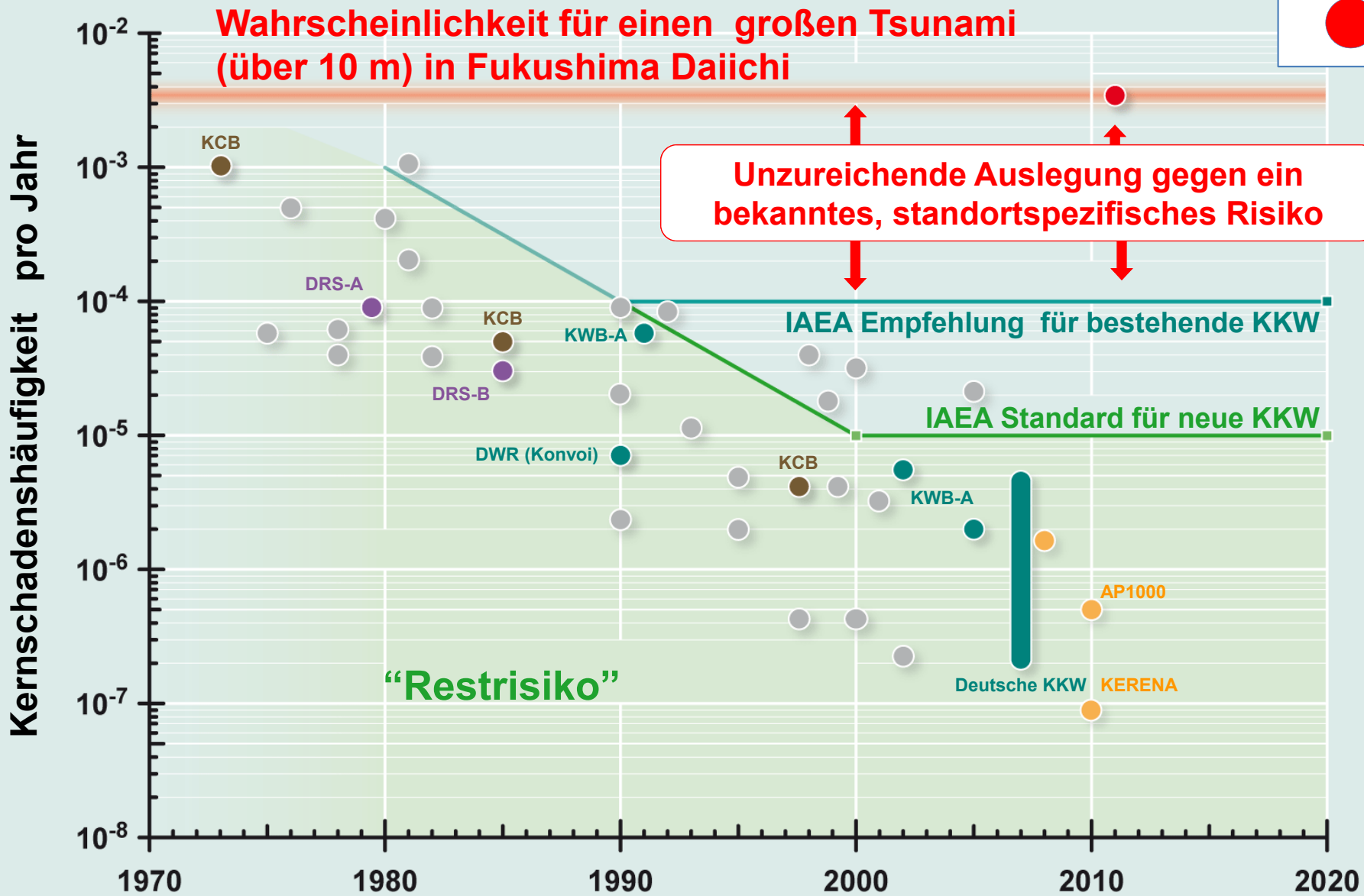
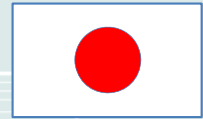


▶ Hunderte von Denksteinen

- „Baut nicht unterhalb dieses Steins!“
- „Bei Erdbeben, hüte Dich vor Tsunamis!“

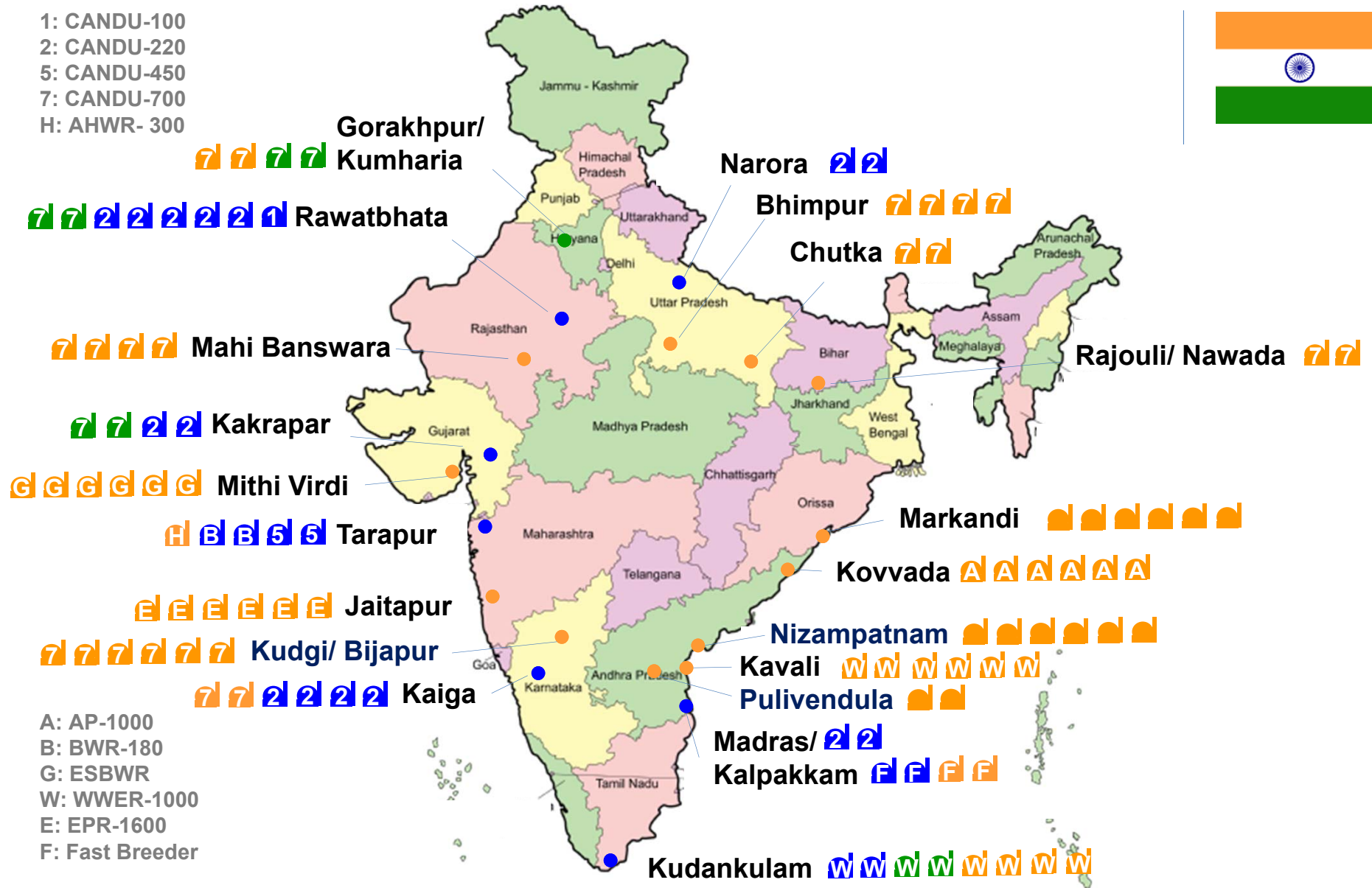
▶ Analyse historischer Aufzeichnungen

- 869 Jogan Erdbeben in NO Honshu.
- Kilometerweite Tsunami Überflutungen im Inland nördlich Fukushima Daiichi.
- Wissenschaftliche Veröffentlichungen in den 1980ern.



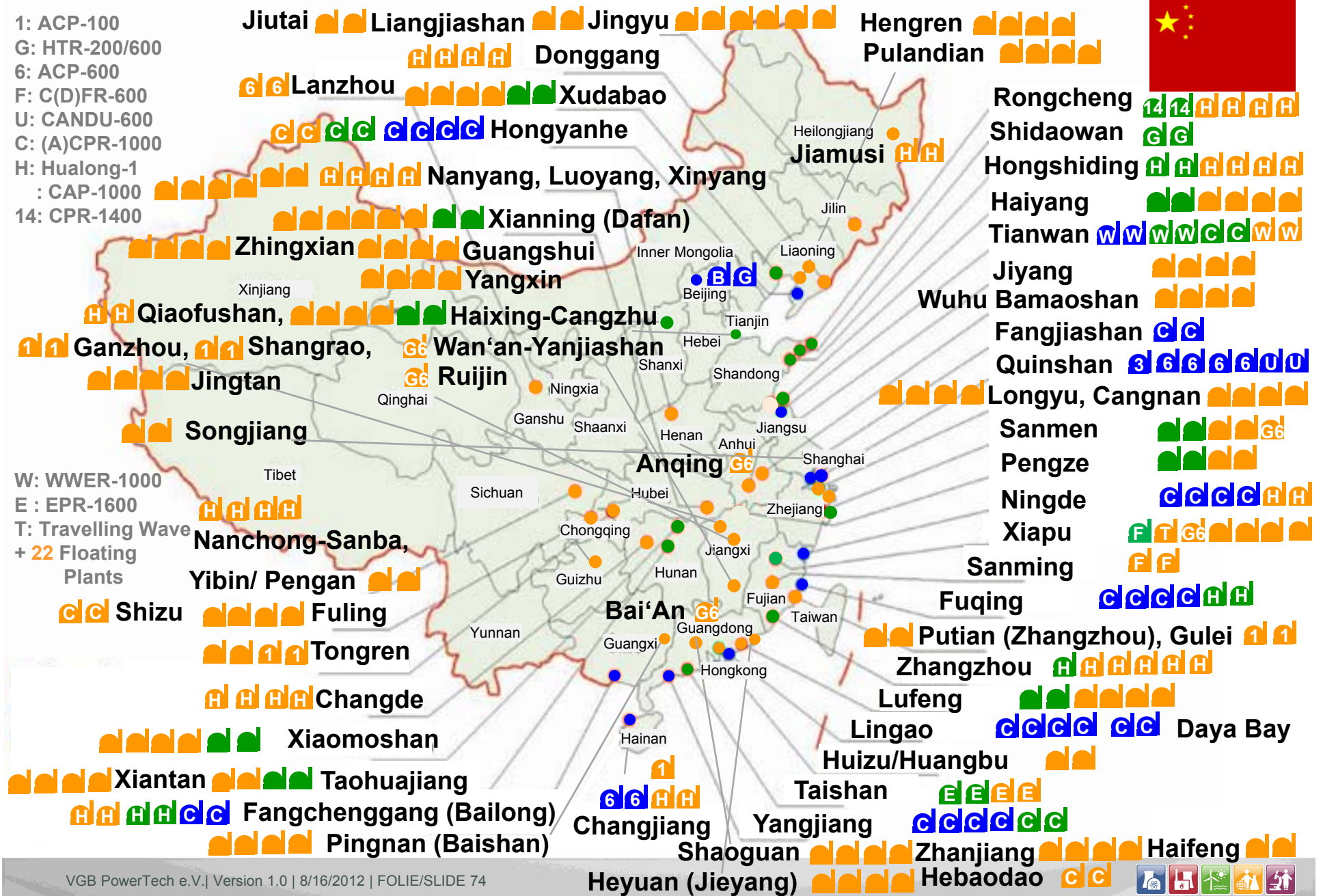
Indien: 24 in Betrieb, 8 im Bau, 63 in Planung (<2035)

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



China: 39 in Betrieb, 40 im Bau, 228 in Planung (<2035)

- 1: ACP-100
- G: HTR-200/600
- 6: ACP-600
- F: C(D)FR-600
- U: CANDU-600
- C: (A)CPR-1000
- H: Hualong-1
- : CAP-1000
- 14: CPR-1400



Schlussbemerkungen:



- 1. Hochentwickelte Technik, exportfähig**
- 2. Betriebsbewährt mit über 12000 Reaktorbetriebsjahren**
- 3. Akzeptanz: 90 % der Europäer leben in Staaten mit Kernenergie**
- 4. Fukushima war kein Restrisikoereignis, keine Strahlenschäden**
- 5. Kernkraftwerke altern nicht wie andere Kraftwerke,
Vorzeitiges Abschalten bedeutet gigantische Kapitalvernichtung**
- 6. Hochwirtschaftlich wenn technische Lebensdauer erreicht werden kann**
- 7. Quasiheimisch**
- 8. Klimaneutral**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Dr.- Ing. L. Mohrbach
VGB PowerTech e.V.
Deilbachtal 173
D-45257 Essen

Ludger.Mohrbach@VGB.ORG

Tel.: xx49 201 8128 221

Fax: xx49 201 8128 306

www.vgb.org