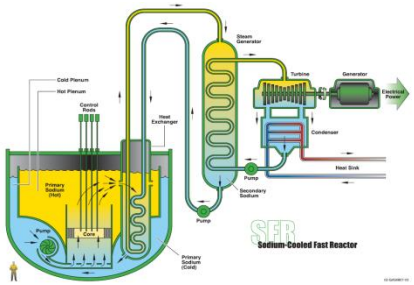
Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Hat Kernenergie eine Zukunft?

Dr. Christoph Pistner

HM Lectures for Future

Zoom, München, 23.05.2022



Agenda

1 Kernenergie heute – ein paar Zahlen zum Start

2 Nuclear Physics Fundamentals

3 Safety, Security, Waste, Costs – and War

4 „Nachhaltige“ Atomkraft – Die EU-Taxonomie

5 „Neue“ Reaktorkonzepte – GEN IV, SMRs

1

Kernenergie heute – ein paar Zahlen zum Start

Nuclear Energy and Climate Change

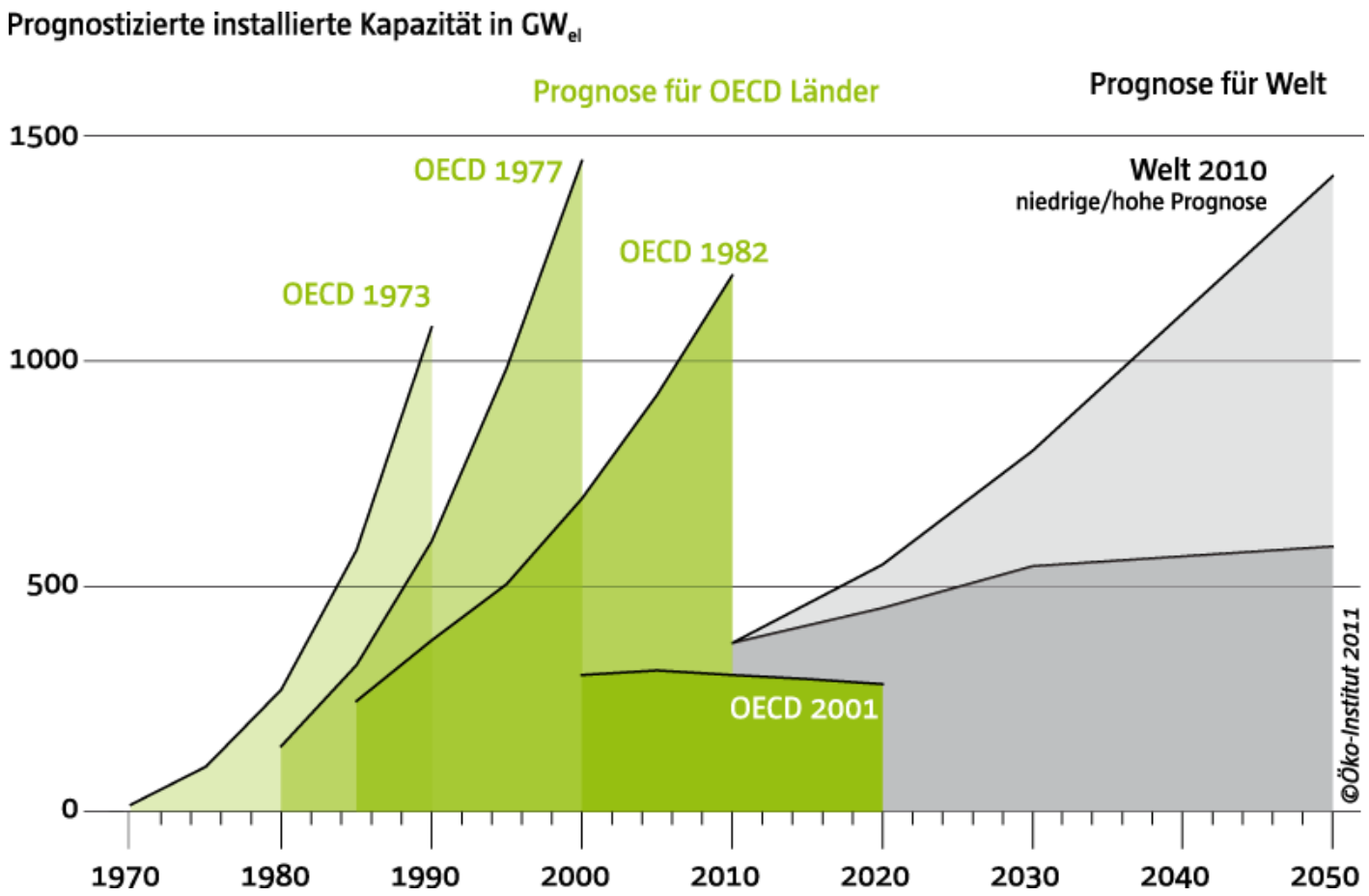
- FAZ online, 02.12.2019: „Nuclear Power is part of the solution“
- Der Spiegel, 14.12.2019: „Will nuclear power save us from climate collapse?”

- CO_2-Emissions from Nuclear:
  - 3,7-110 g $CO_{2,equiv}$ /kWh [IPCC]
  - 68 g $CO_{2,equiv}$ /kWh for Germany [UBA]
  - Much less than Coal/Oil …
  - Comparable to Wind/Sun … ?

→ Is nuclear therefore a (good) solution?

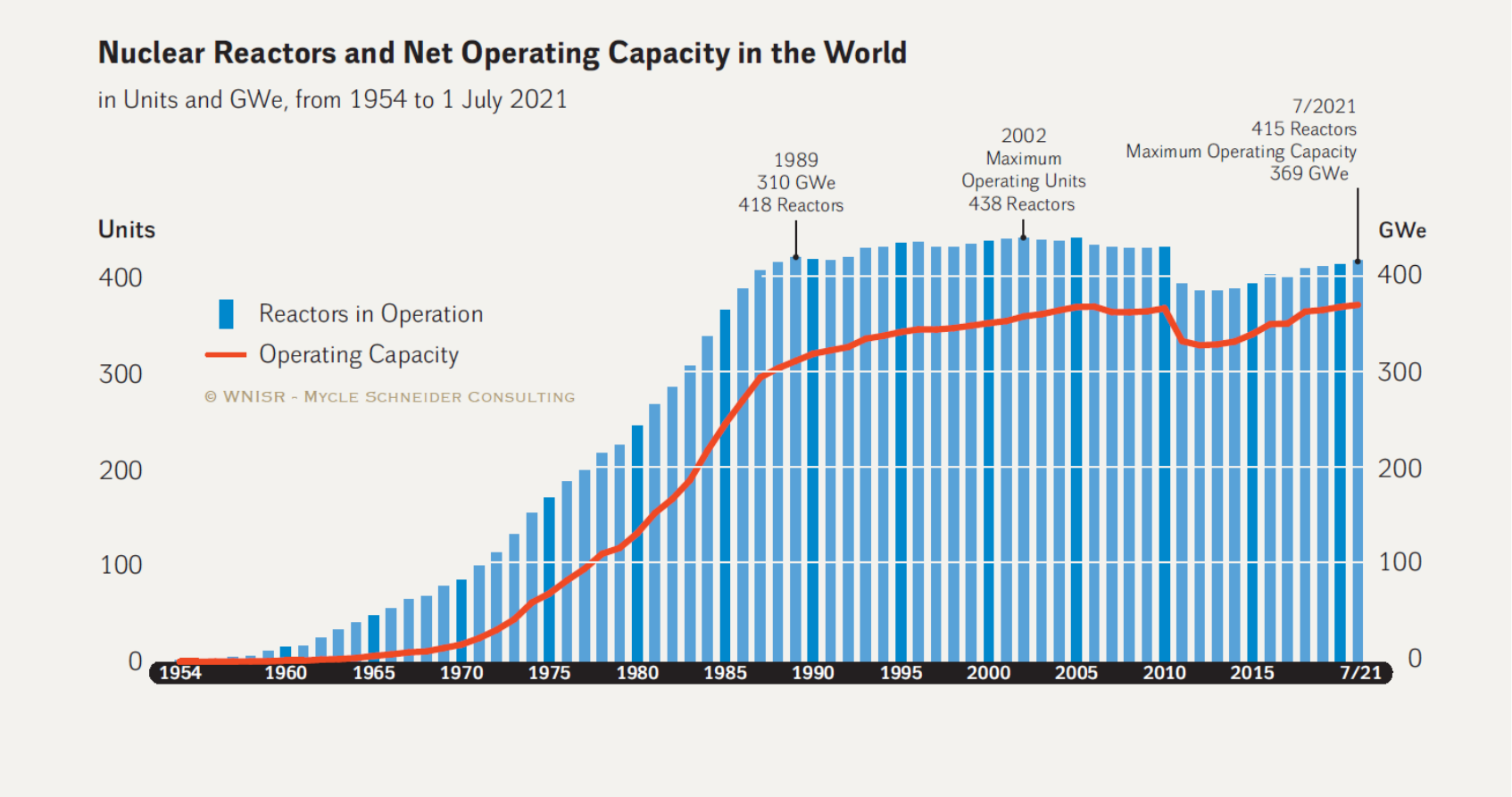
Data: IPCC, UBA

Historical Perspectives on Nuclear Energy Production



Source: International Panel on Fissile Materials IPFM

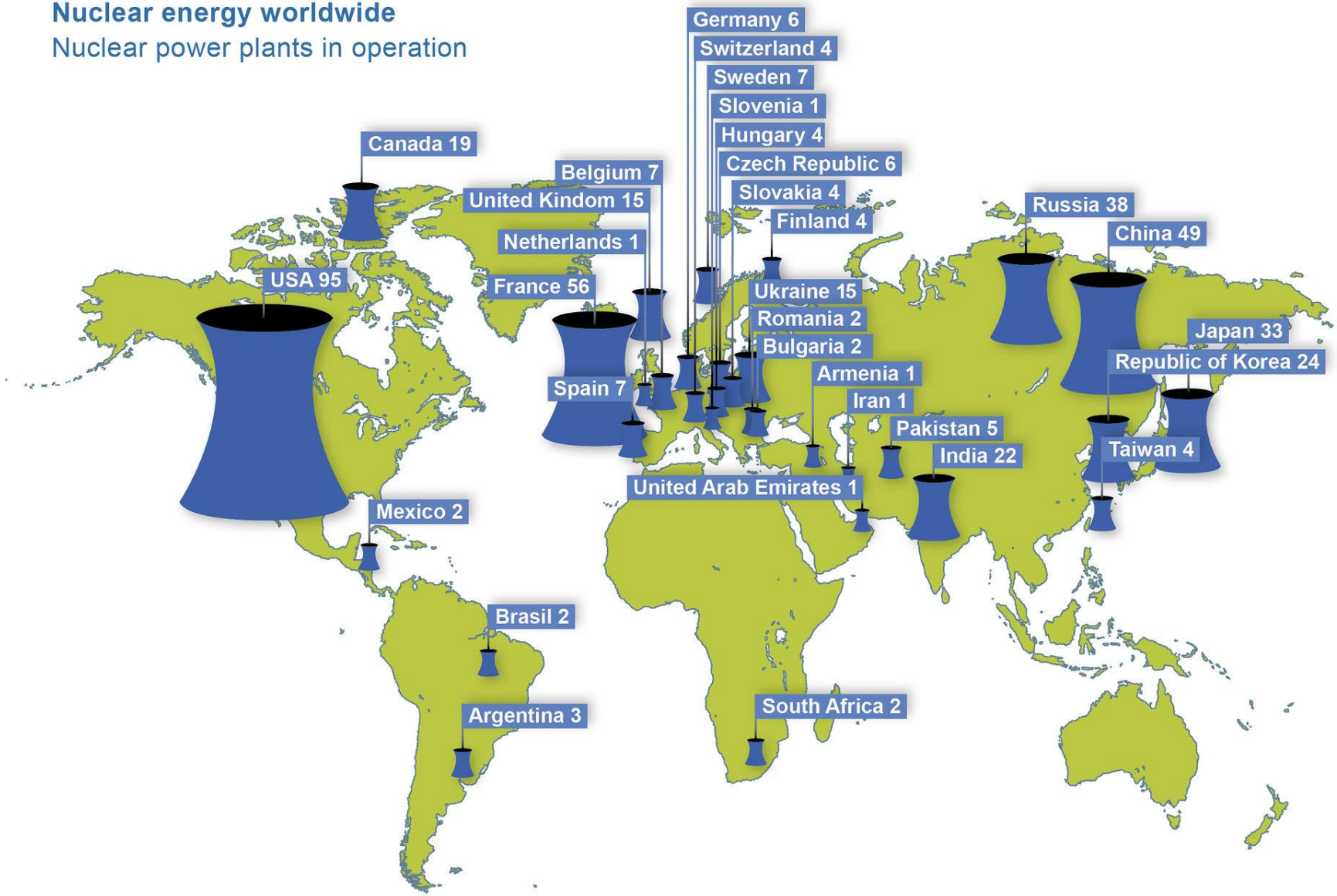
Nuclear Reactors 1954-2021



Source: World Nuclear Industry Status Report WNISR 2021

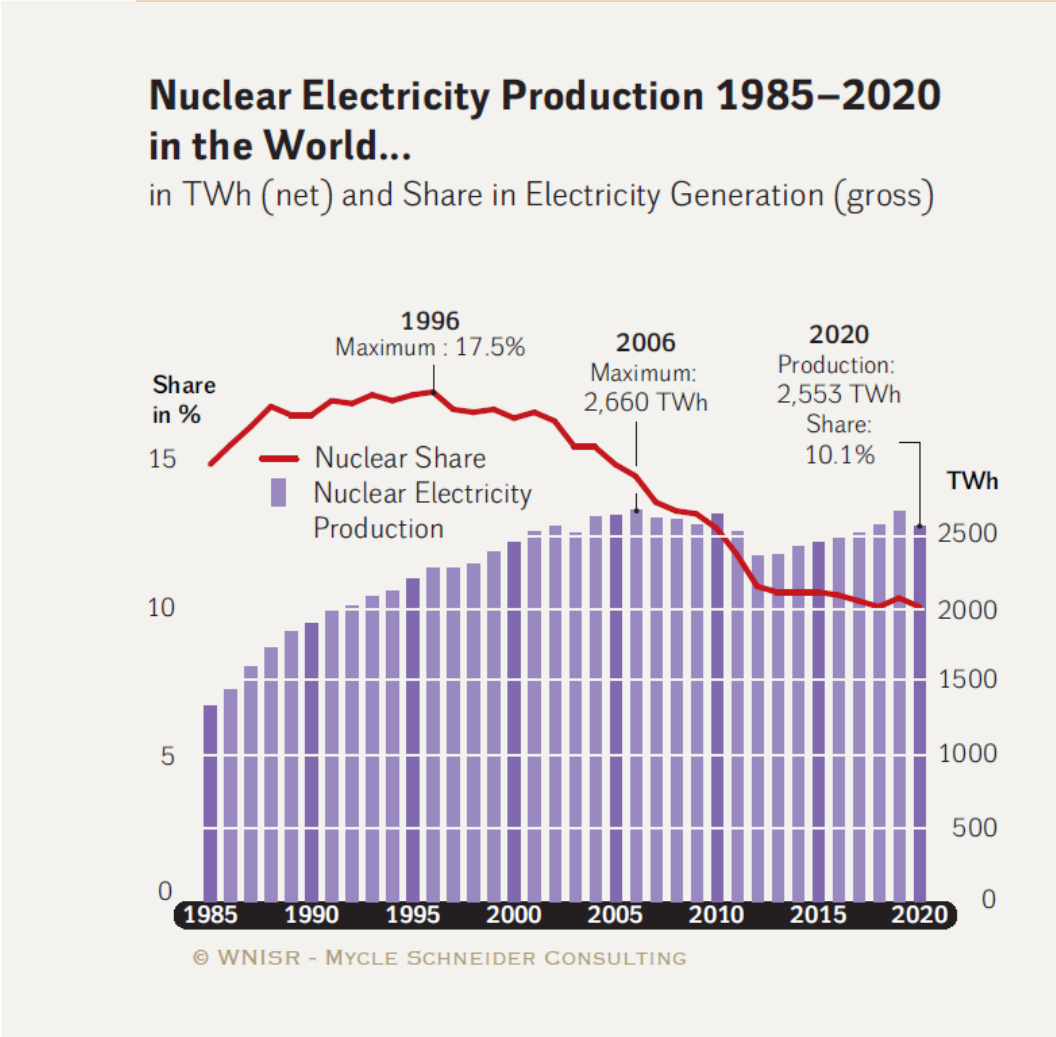
Nuclear energy worldwide

Nuclear power plants in operation



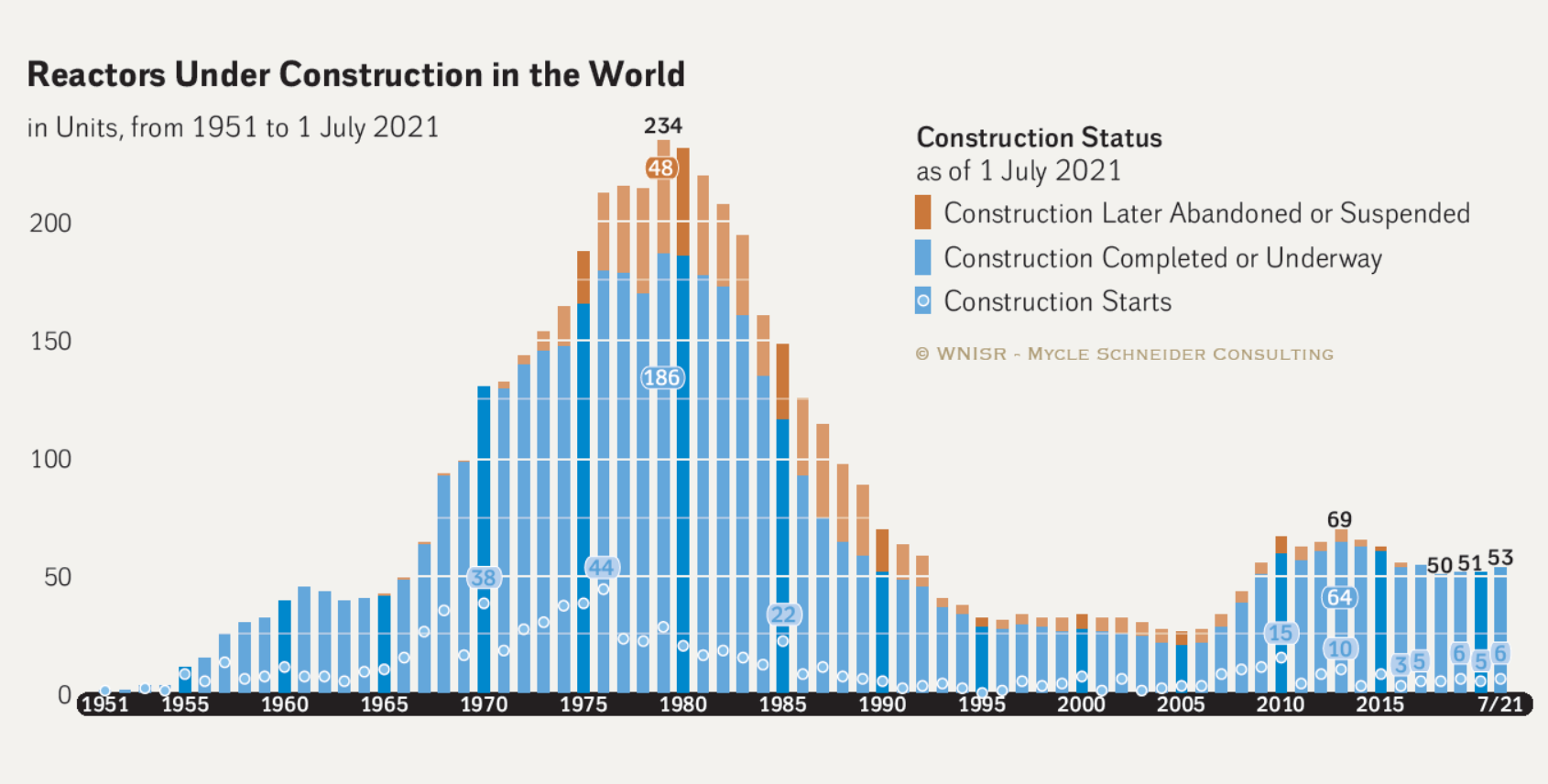
SOURCE: BASED ON IAEA PRIS 09/2020, OEKO-INSTITUT 2020, CC BY-SA 2.0

World Electricity Production



Source: WNISR 2021

NPPs under Construction



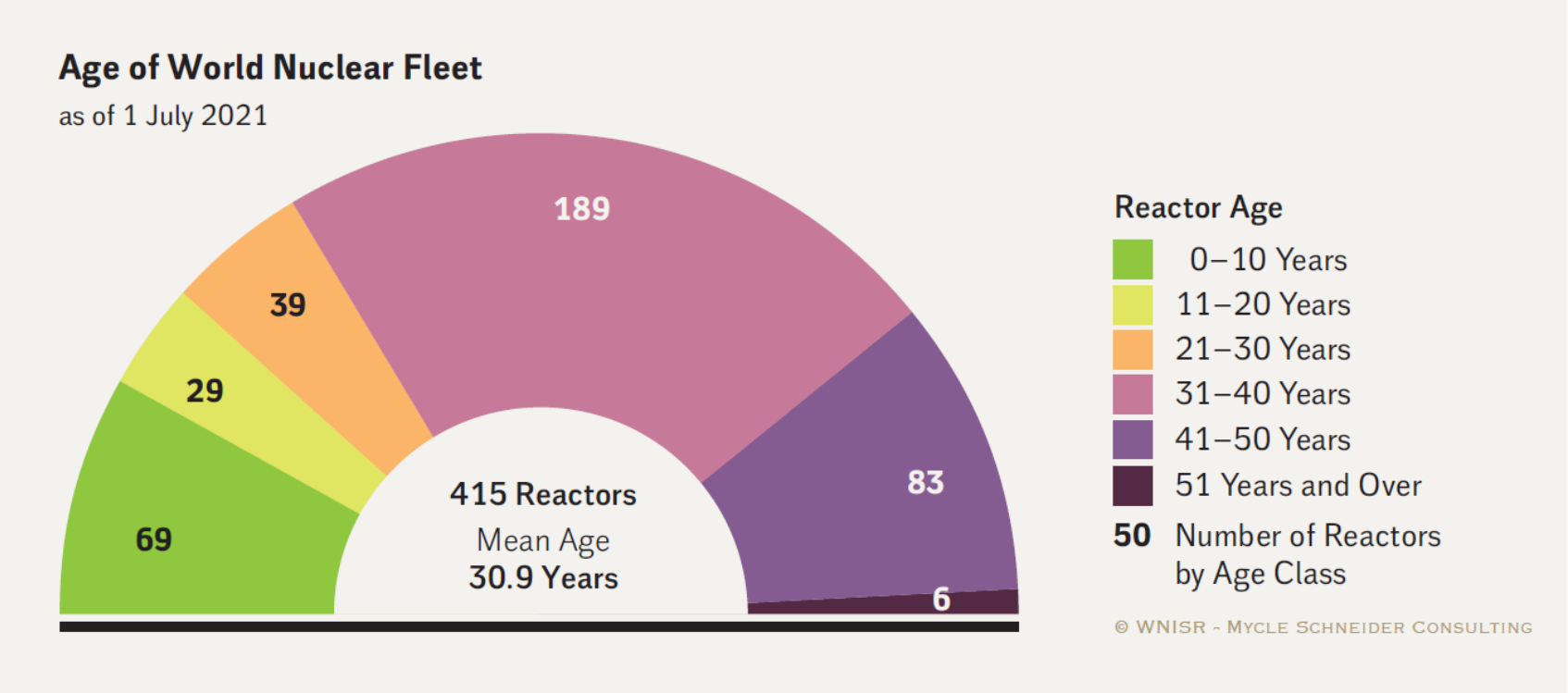
Source: WNISR 2021

Construction Times

Construction Times of 63 Units Started-up 2011–2020				
Country	Units	Construction Time (in Years)		
		Mean Time	Minimum	Maximum
China	37	6.1	4.1	11.2
Russia	10	18.7	8.1	35.1
South Korea	5	6.4	4.2	9.6
India	3	11.5	8.7	14.2
Pakistan	3	5.4	5.2	5.6
Argentina	1	33.0	33.0	
Belarus	1	7.0	7.0	
Iran	1	36.3	36.3	
UAE	1	8.1	8.1	
USA	1	42.8	42.8	
World	**63**	**9.9**	**4.1**	**42.8**

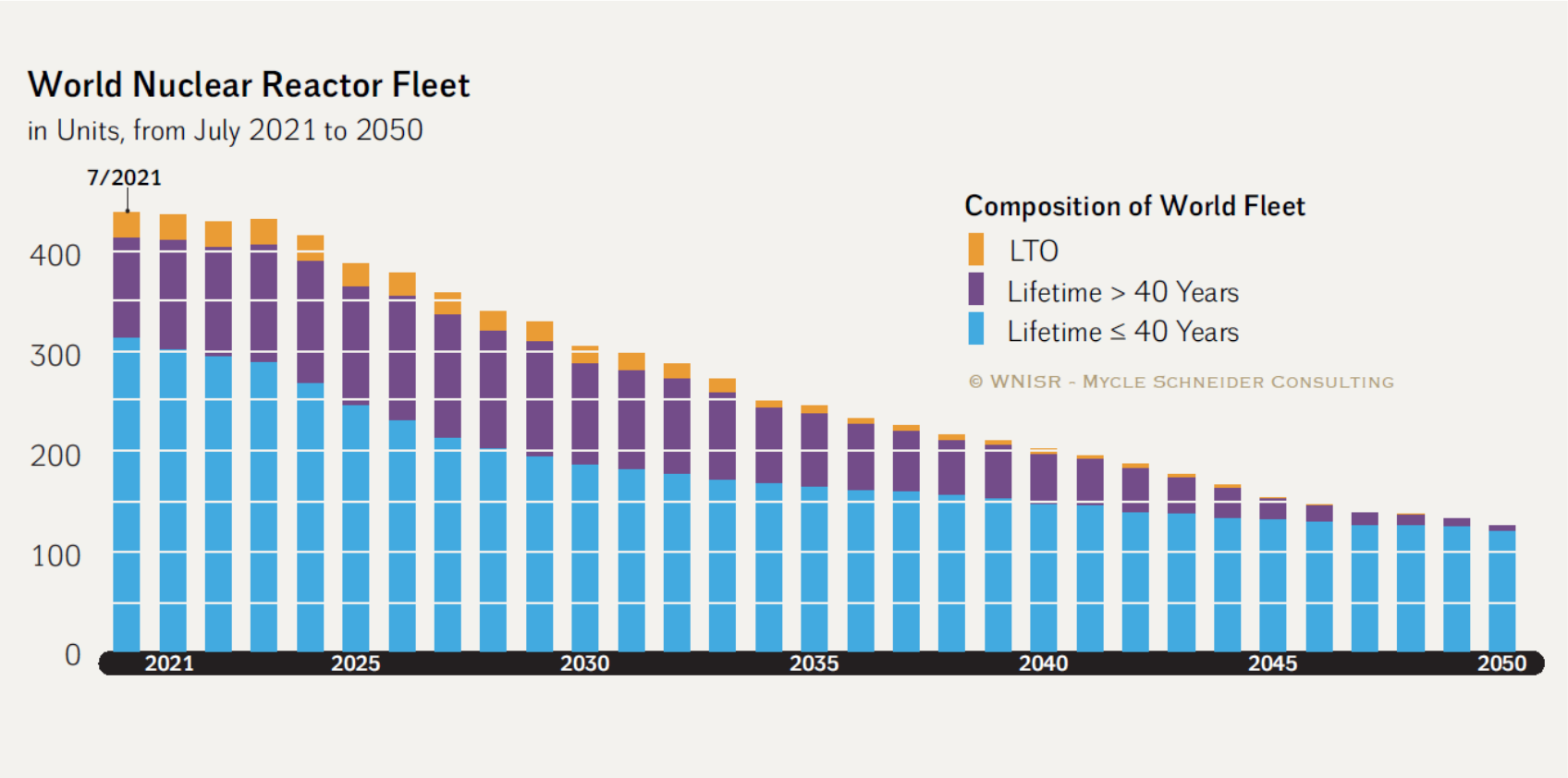
Source: WNISR 2021

NPPs by Age



Source: WNISR 2021

Lifetime Projections



Source: WNISR 2021

Kernenergie heute (Mai 2022)

- Globaler Anteil an der Energiebereitstellung (2019): 606 EJ
  - Fossile: 80,9%
  - Nuklear: 5,0% (ca. 10% der weltweiten Stromproduktion)
- 441 Kernkraftwerke (Nuclear Power Plants, NPPs) „in Betrieb“
- 394 GW installierter Netto-Gesamtleistung
- 33 Länder mit NPPs „in Betrieb“ (incl. Taiwan)
  - Von diesen 23 Länder mit weniger als 10 NPPs
- 118 NPPs > 40 Jahre, 13 NPPs > 50 Jahre
- Durchschnittsalter > 30 Jahre

Data: IEA, IAEA PRIS, WNISR

Kernenergie heute (Mai 2022)

- 53 NPPs „in Bau“
  - Vor allem China (15), Indien (8), Russland (4), Südkorea (4)
  - Aber auch einige „Einsteigerstaaten“: Türkei (3), VAE (2), Bangladesch (2), Belarus (1)
- In Bau befindliche Reaktoren sind praktisch ausschließlich Leichtwasserreaktoren (Light Water Reactors, LWRs) der Generationen II und III, nur wenige „Gen IV“ (3 FBR China, Indien, Russland; 2 SMR Argentinien, China)

→ Ohne Verlängerung von Laufzeiten existierender Reaktoren wird die Stromproduktion aus Kernkraft abnehmen

→ Neubauvorhaben sind nicht ausreichend, um die gegenwärtige installierte Leistung aufrecht zu erhalten

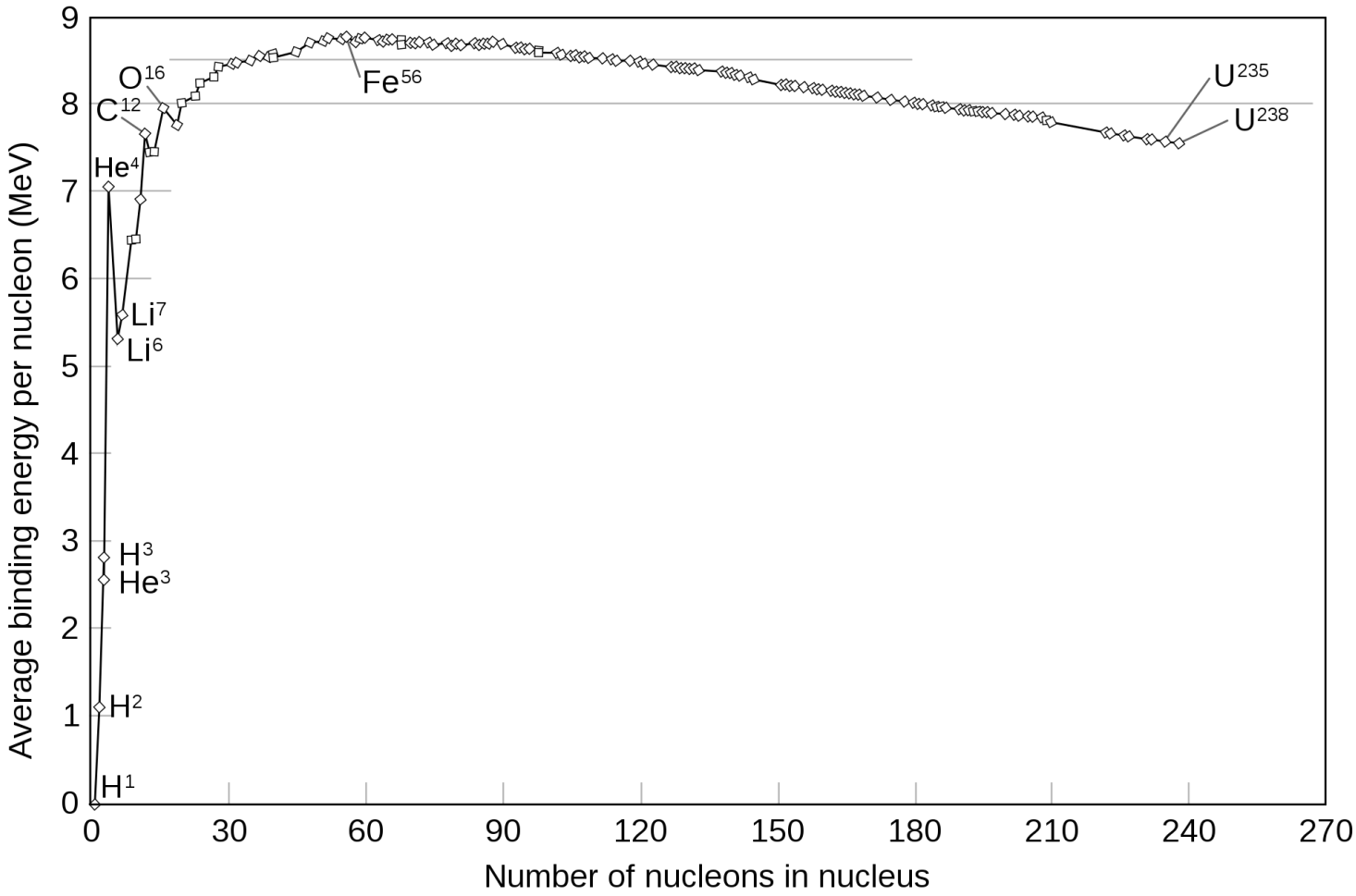
→ Aber auch: „Einsteigerstaaten“ kommen hinzu

Data: IAEA PRIS, WNIRS

2

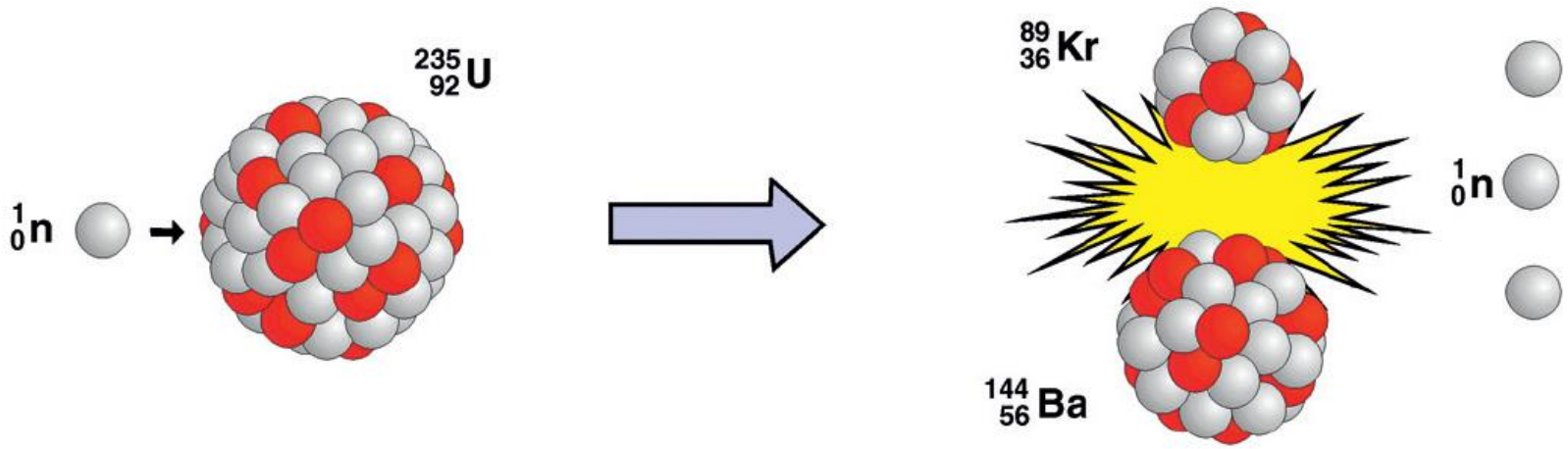
Nuclear Physics Fundamentals

Nuclear binding energy



Source: Wikipedia

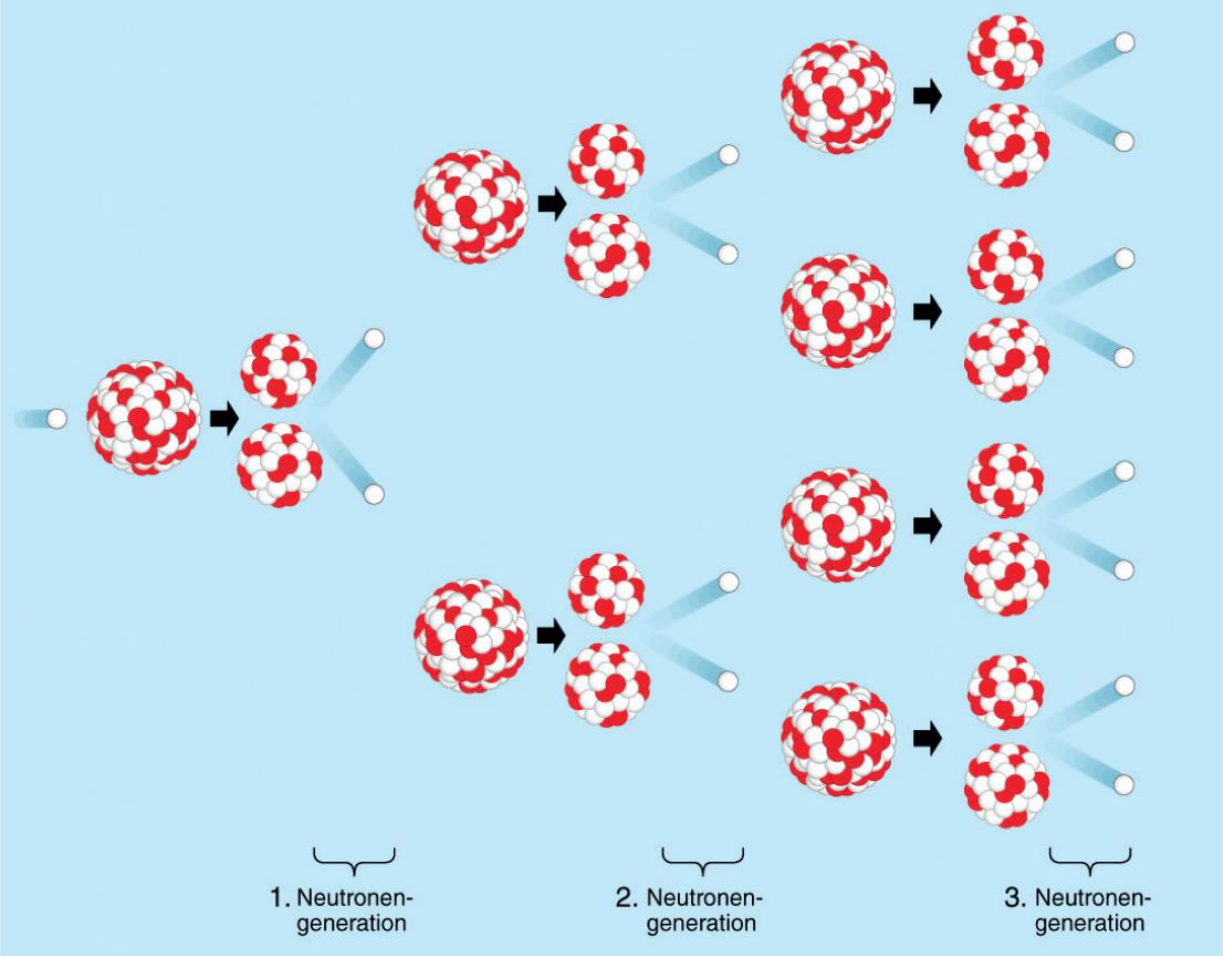
Nuclear fission



$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{89}_{36}Kr + ^{144}_{56}Ba + 3\,^{1}_{0}n + 210\ MeV$$

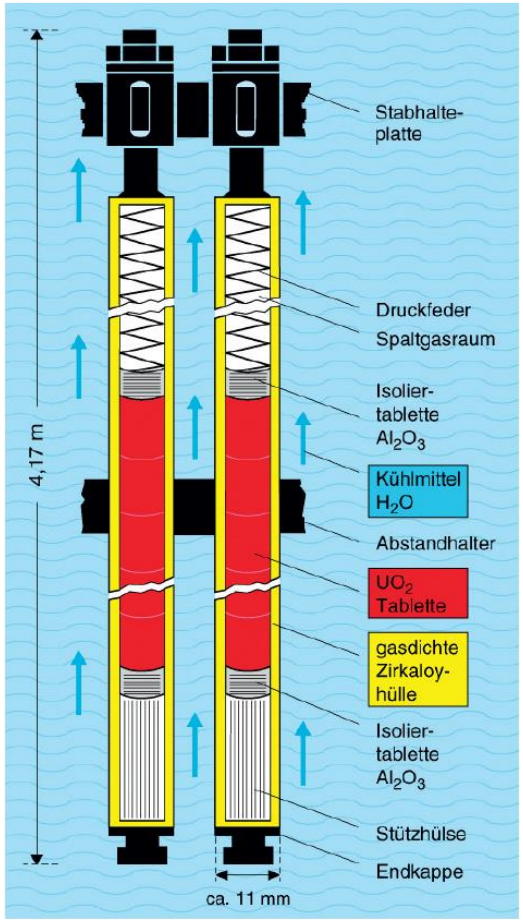
Source: Koelzer, Lexikon zur Kernenergie

Nuclear chain reaction



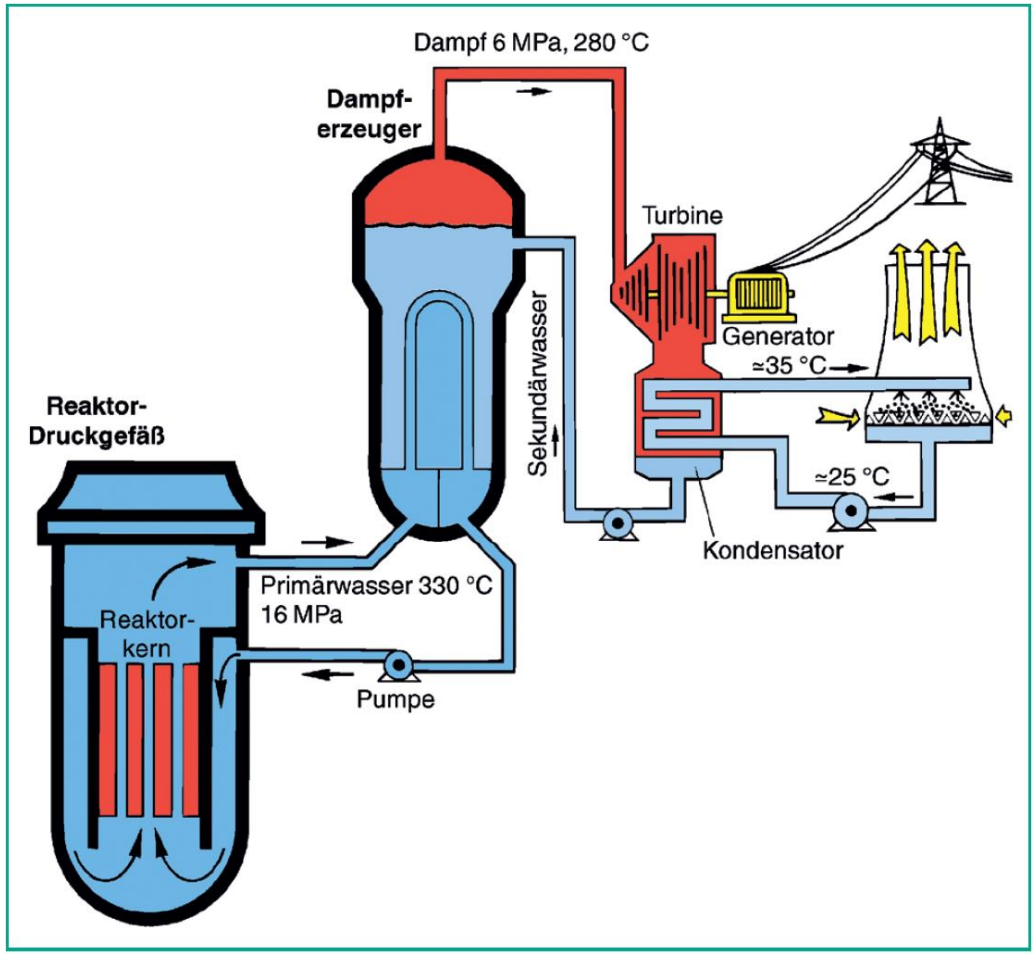
Source: Koelzer, Lexikon zur Kernenergie

Fuel pins / Fuel elements



Source: Koelzer, Lexikon zur Kernenergie,
Picture: Pistner

Druckwasserreaktor (DWR)



Quelle: Koelzer, Lexikon zur Kernenergie

3

Safety, Security, Waste, Costs – and War

3.1

Safety

Fundamental Aspects of Reactor Safety

High Power Density:

- Nuclear vs. chemical energy per reaction
  Factor one million (eV → MeV)

Due to long operating cycles (typicall one year or more):

- High initial reactivity
- High radioactive inventory

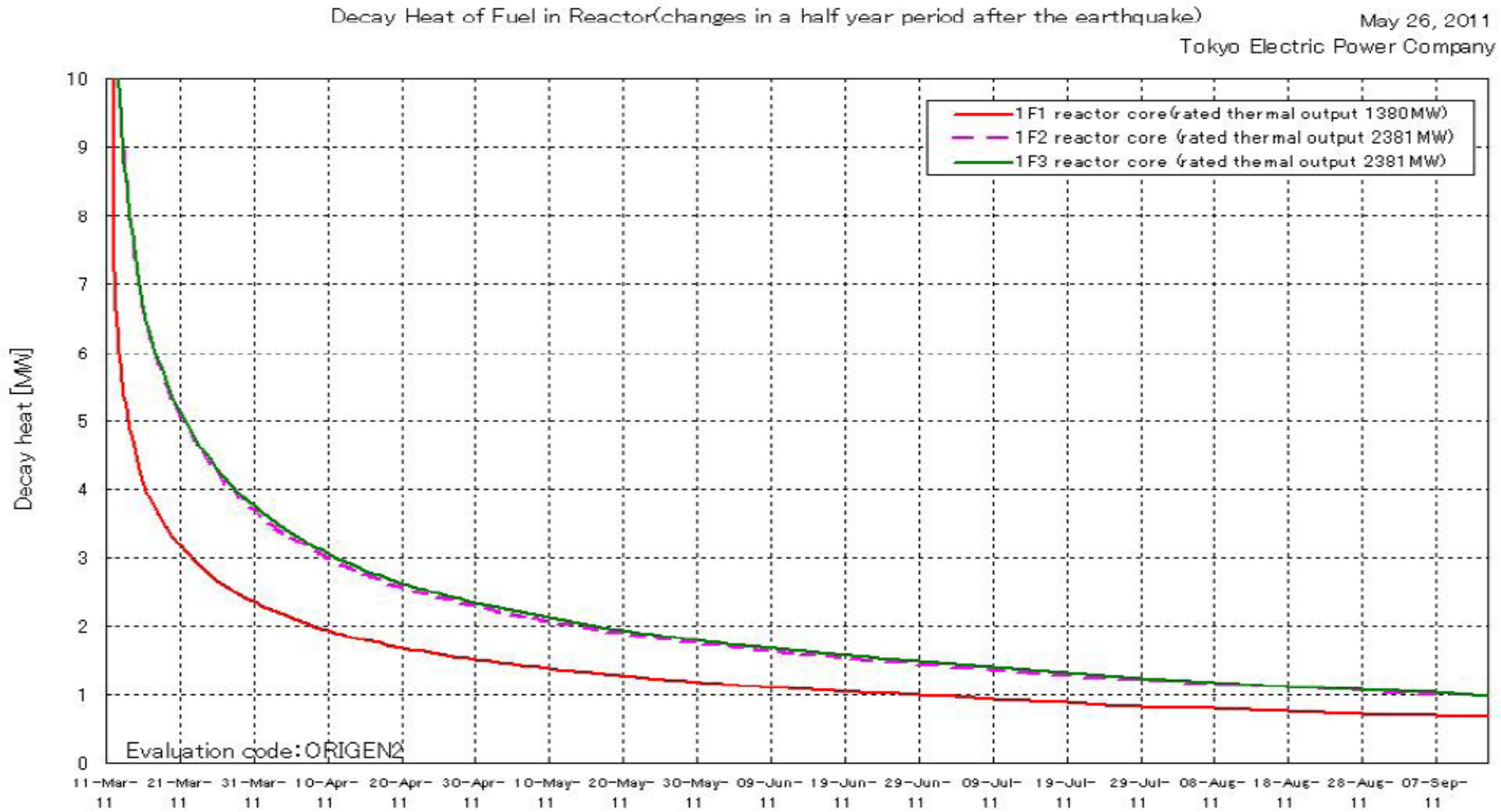
Decay Heat:

- Even after Shutdown of reactor, considerable heat generation from radioactive decay of fission products

Energy from nuclear fission

Kinetic energy of fission products	175 MeV	83,3 %
Kinetic energy of fission neutrons	5 MeV	2,4 %
Energy from Gammy decays (immediate)	7 MeV	3,3 %
Energy from radioactive decay (delayed)	13 MeV	**6,2 %**
Energy from neutrinos	10 MeV	4,8 %
Total	**210 MeV**	

Decay Heat: The Example of Fukushima Dai-ichi Six Month after Shutdown



Source: TEPCO

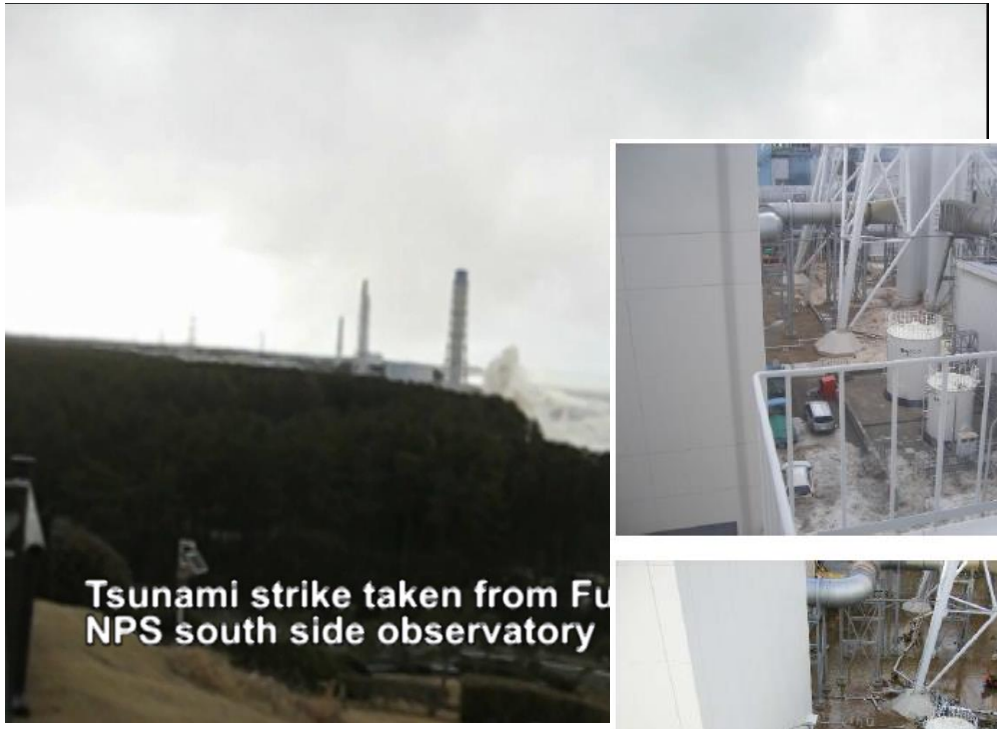
What does it mean?

Unit 1, Fukushima Dai-ichi, thermal Power 1.380 MW, Cooling by water evaporation:

- After one hour approx. 22 MW
  → 31 tonnes of water per hour
- After one day approx. 11 MW
  → 15 tonnes of water per hour
- 1. July 2011 ca. 1 MW
  → 1,4 tonnes of water per hour

- 19.02.2015, cooling without steam generation
  → 315 m^3 per day

Tsunami: Total Station Blackout

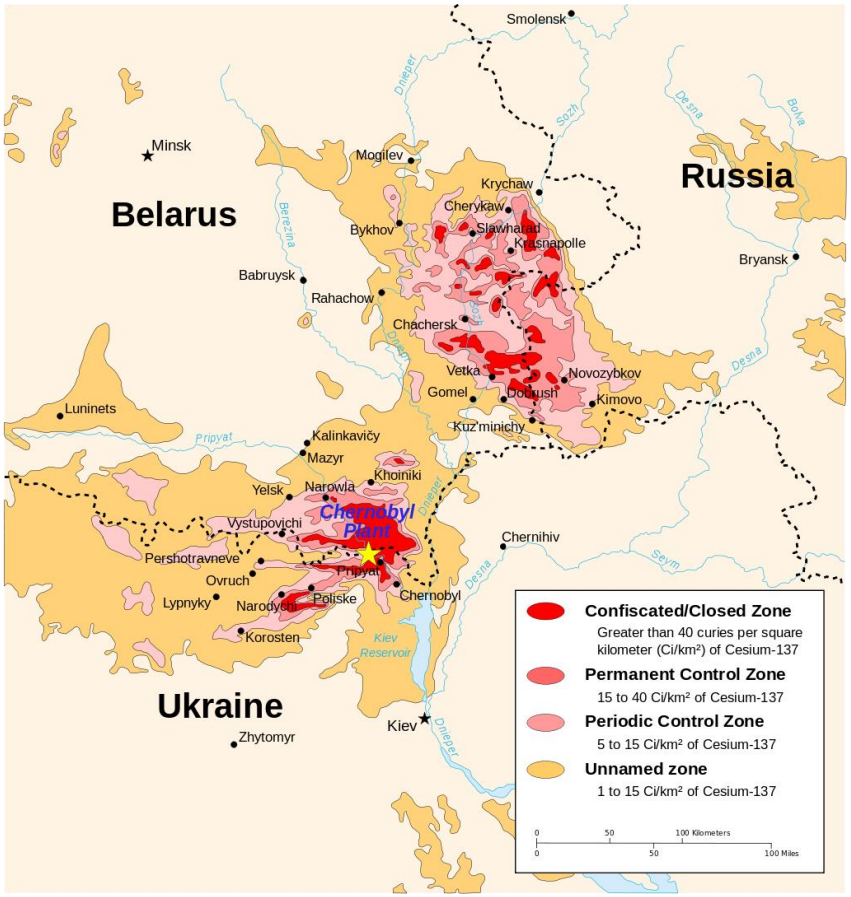


Source: TEPCO/MEXT

Fukushima Daiichi, March 2011

Source: TECPO

Consequences of severe accidents – The Case of Tschernobyl



- Areas of several hundred square kilometres would have to be evacuated and remain uninhabitable in the long term
- Follow-up costs for an accident in Europe are estimated, for example, at 100 to 1000 billion euros (France, IRSN)

Picture: Wikipedia

3.2

Security

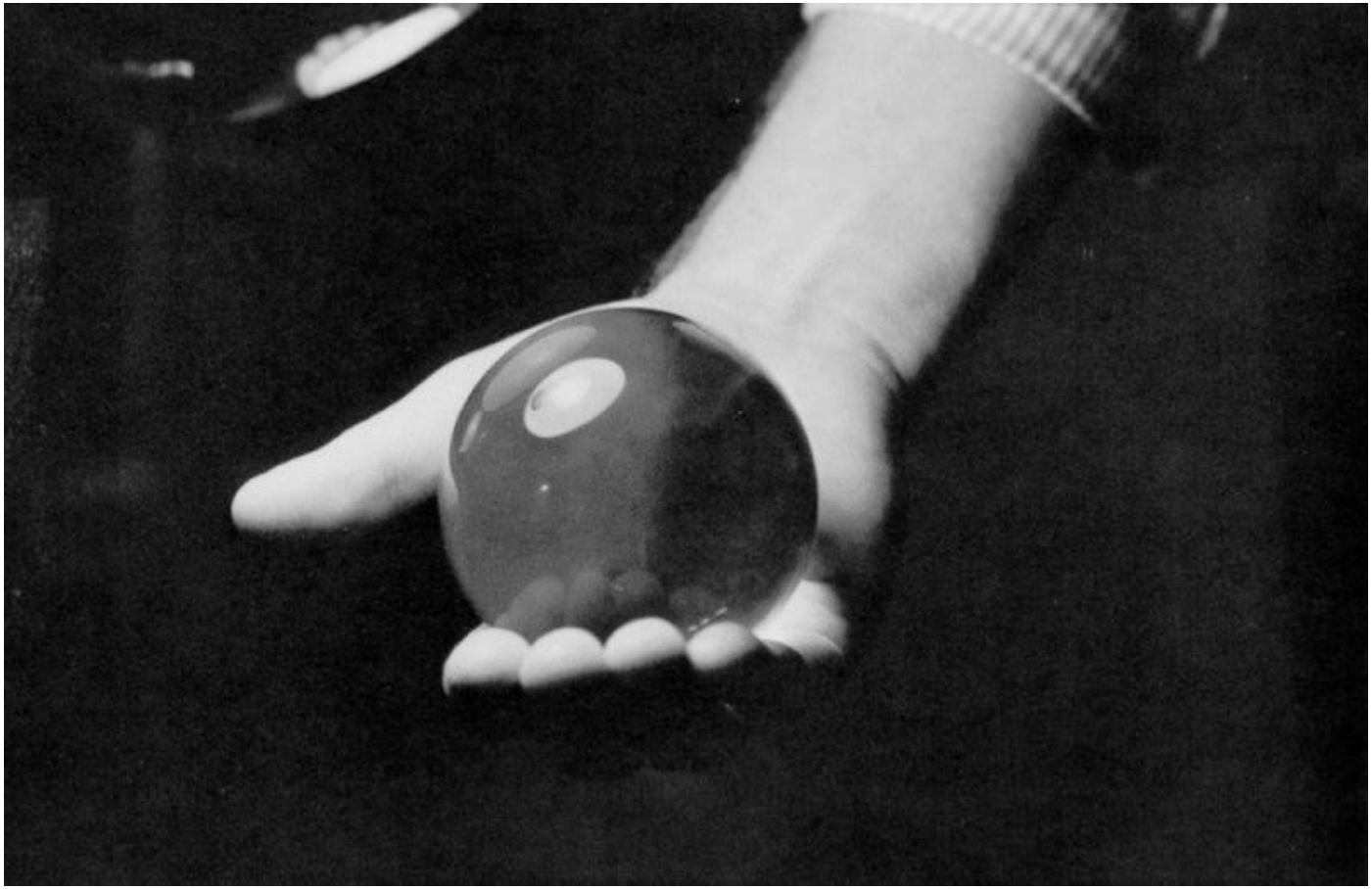
Nuclear weapons materials

	(Reflected) Critical mass	Neutron Rate [n/ms]	Heat Rate [W]
Uranium (HEU) 95% U-235	19,2 kg	< 0,04	-
Uranium (LEU) 20% U-235	360 kg	7,2	-
Plutonium (WPu) 94% Pu-239	4,6 kg	246	11,6
Plutonium (RPu) 60% Pu-239	5,8 kg	1882	77,3

The Nuclear Part of the Trinity Test Nuclear Weapon

Source: DoE

Size of the Plutonium Core of the Nagasaki-Weapon



Source: IPPNW

Nuclear Nonproliferation

- Access to nuclear weapons-related materials key to nuclear weapons ownership
- Essential materials/technologies:
  - Plutonium / Reprocessing
  - Highly enriched Uranium (HEU) / Enrichment
  - Possibly others (Tritium, U-233, Np-237 …) / …
- Main possibilities/necessities of control for:
  - Stocks of existing materials
  - Technologies for the production of new materials

Mohamed ElBaradei (ehem. IAEA-General director)

„Some estimates indicate that *40 countries or more now have the know how to produce nuclear weapons*. (…) We are relying primarily on the continued good intentions of these countries, which … could … be subject to rapid change.“

„Information and expertise on how to produce nuclear weapons has become more accessible. This places extra emphasis on the importance of controlling access to weapon-usable nuclear material.“

„And under the current regime, there is nothing illicit for a non-nuclear state to conduct uranium-enrichment activities … or even to possess military-grade nuclear material.“

IAEO-Konferenz 20.9.2004, Speech UN-GA 3.11.2003, Interview in Le Monde 31.10.2003

3.3

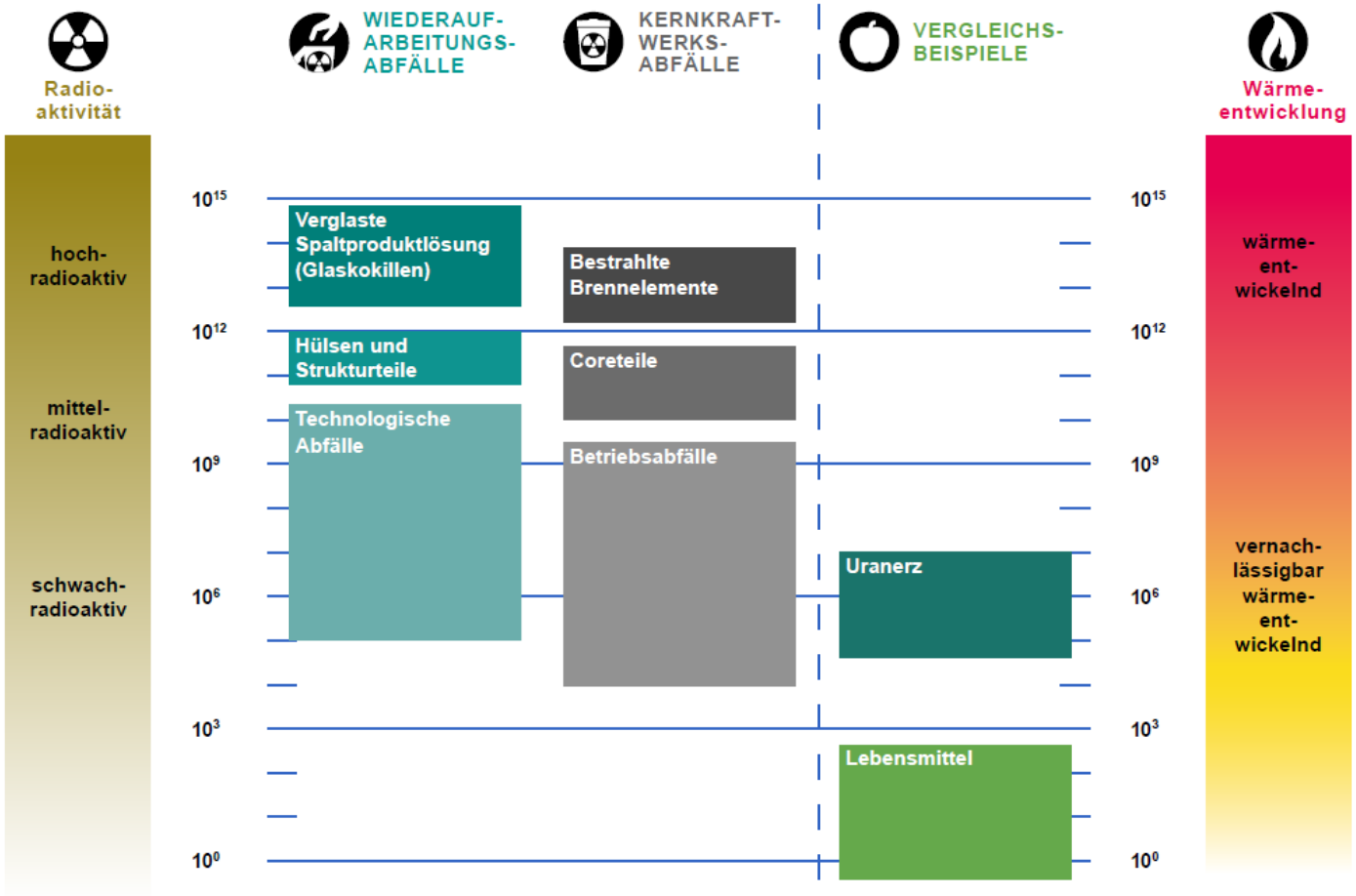
Waste

Öko-Institut e.V.

Radioaktive Abfälle - Entstehung, Arten und Mengen

Klassen und Eigenschaften radioaktiver Abfälle

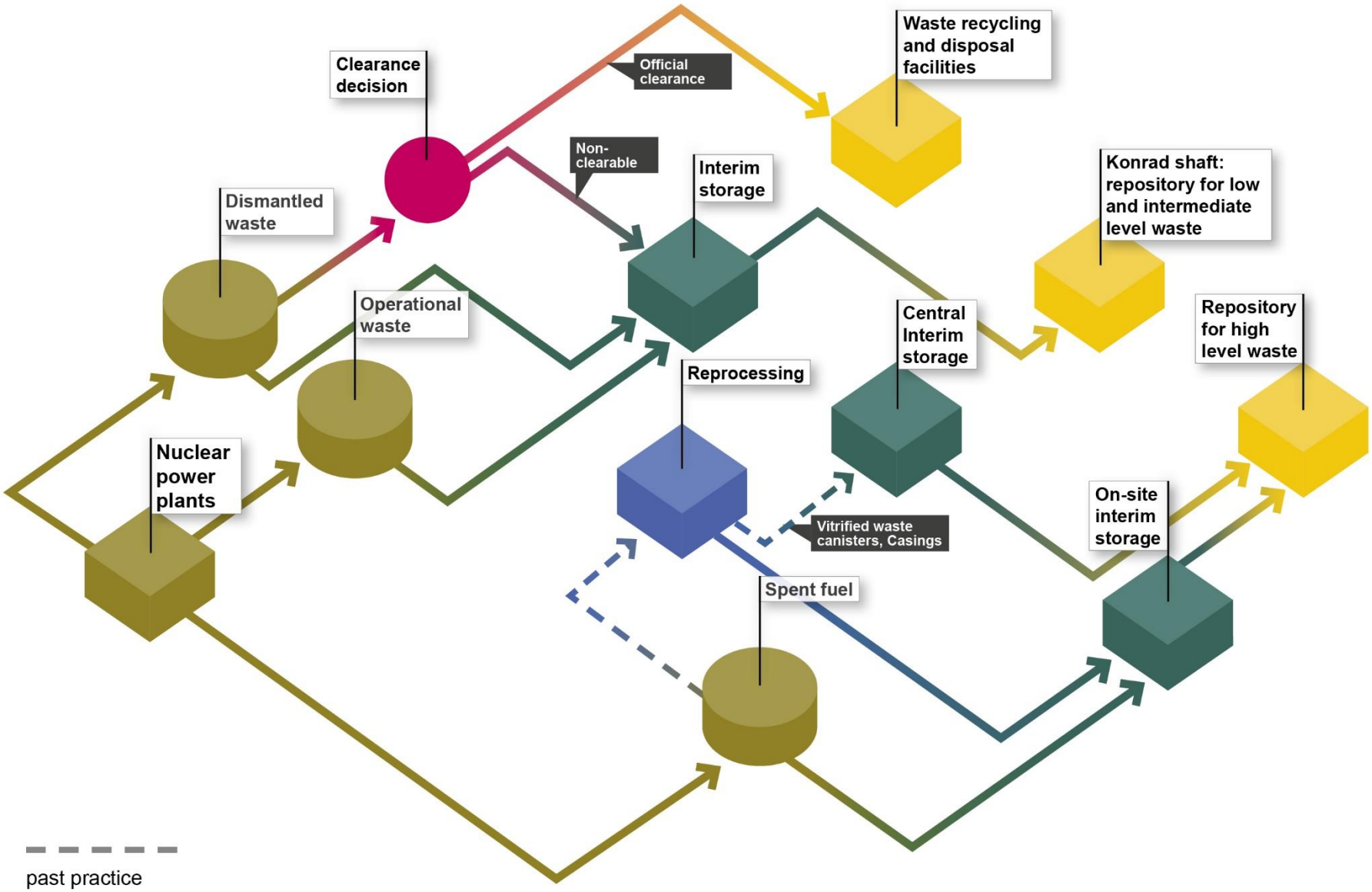
Aktivität und Wärmeentwicklung im Überblick



Radioaktivität in Becquerel pro Kilogramm oder Becquerel pro Liter (Bq/kg oder Bq/L)

Quelle: Öko-Institut

From nuclear power plant to repository: The paths of radioactive waste



Öko-Institut e.V.

Endlagerung – Konzept, Risiken und Langzeitsicherheit

Wirtsgesteine im Vergleich

modifiziert nach BGR 2007

Gesteinseigenschaften

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein (z. B. Granit)
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	durchlässig bis gering durchlässig (Abhängig von Klüftung
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr schlecht	sehr gut	bestenfalls mittel bis schlecht
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch
Hohlraumstabilität	hoch (Eigenstabilität)	gering (Ausbau notwendig)	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)

Quelle: nach BGR

günstig

mittel

ungünstig

Steinsalz

Tonstein

Granit

3.4

Costs

Example:
Areva European Pressurised Reactor (EPR)

- Olkiluoto, Finland:
  - 2002: plant approved, cost €2.5bn
  - 2005: construction start, cost €3bn, completion 2009
  - 2019: cost €11.4bn, completion 2020+
- Flamanville, France:
  - 2005: plant approved, cost €3bn
  - 2007: construction start, cost €3.3bn, completion 2012
  - 2019: cost €10.9+bn, completion 2022-24
- Hinkley Point C x 2, UK:
  - 2008, cost £4bn
  - 2013 when power purchase price set, cost £14bn
  - 2019 construction start, completion 2025-27, cost £21.5-22.5bn

Source: Steve Thomas, Vienna, 2019

Example: Westinghouse AP1000

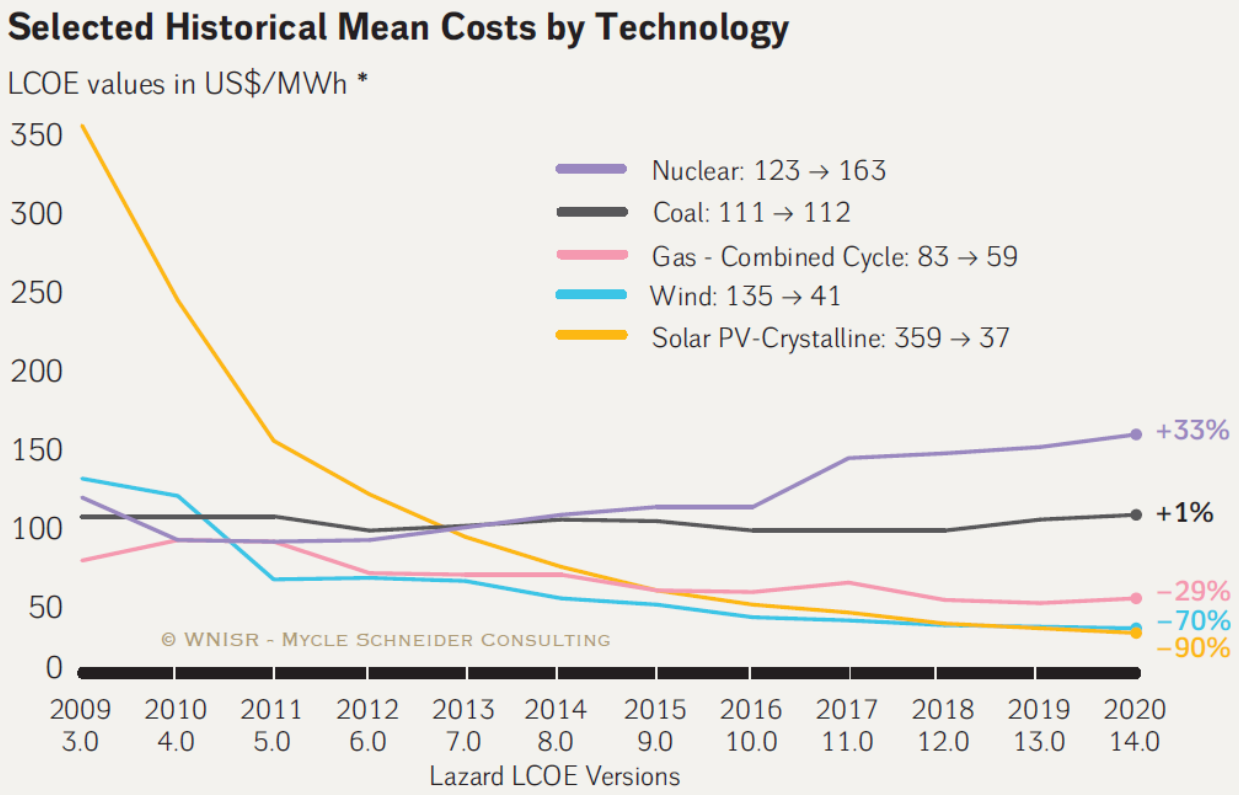
- Summer x 2, US:
  - 2012: construction/operation license, cost $9.8bn
  - 2013: construction start, expected completion 2017-18
  - 2017: project abandoned, cost estimates up to $25bn+

- Vogtle x 2 (US):
  - 2008, estimated cost $14.2bn
  - 2012: construction/operation license
  - 2019, construction cost $23-27bn, completion late 2021, late 2022
- 2017, Westinghouse files for bankruptcy due to losses on Vogtle & Summer, now owned by Canadian company

Source: Steve Thomas, Vienna, 2019, Photo Courtesy of High Flyer © 2017

Öko-Institut e.V.

Historical Cost Development

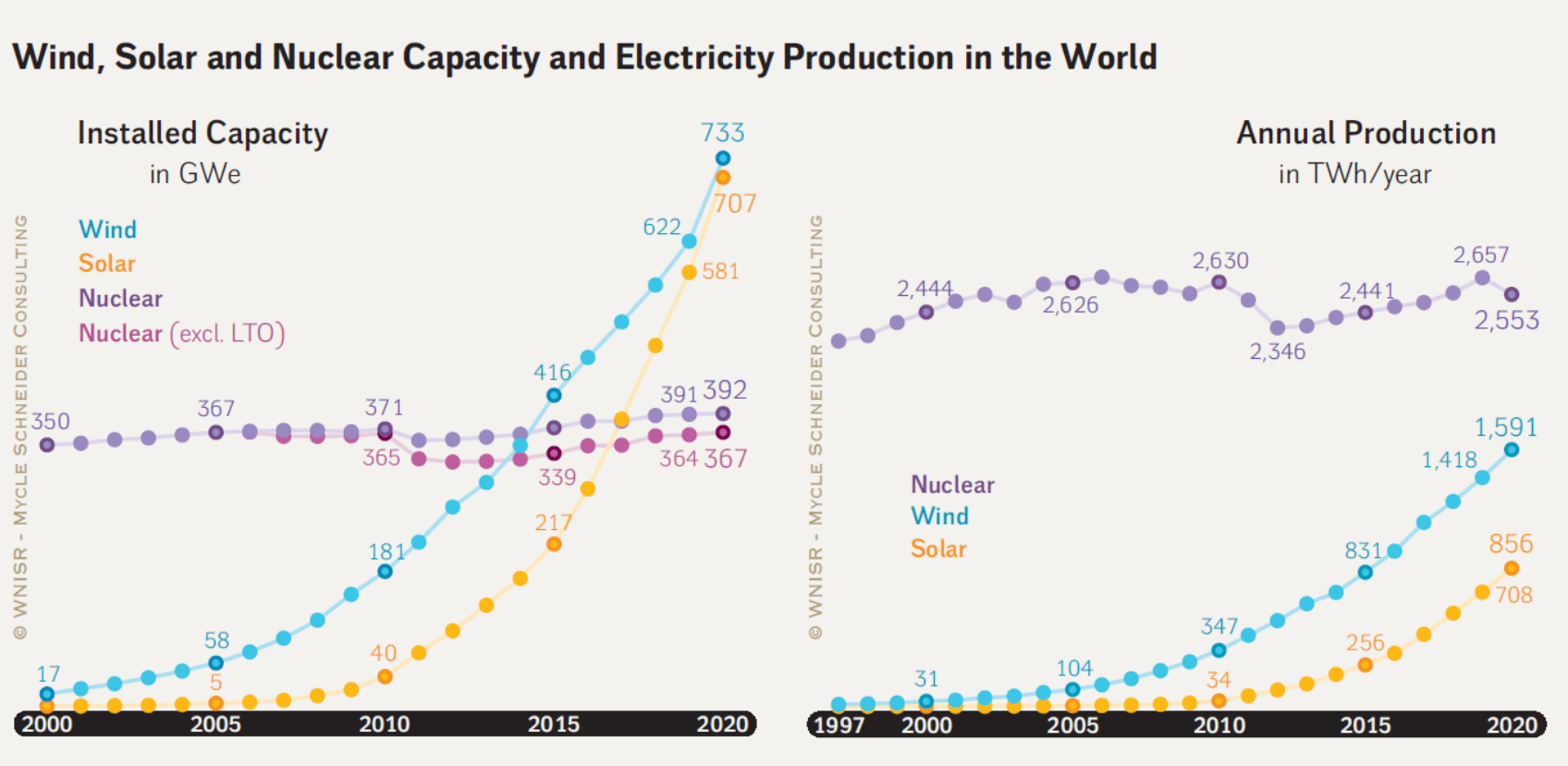


* Reflects total decrease in mean LCOE since Lazard's LCOE VERSION 3.0 in 2009.

Source: WNISR 2021 based on Lazard 2020

Öko-Institut e.V.

Capacity and Electricity – Nuclear vs. Renewables



Source: WNISR 2021

3.5

War

Kernkraftwerke und Krieg I

- Kurzfristige Folge der Ukraine-Krise
  - Diskussion um Energieunabhängigkeit von Russland (Öl, Kohle, Gas … Atom??)
  - Abwägung des Nutzens und der Kosten eines (befristeten) Weiterbetriebs noch laufender Kernkraftwerke durch BMWI und BMUV:
    „Im Ergebnis einer Abwägung von Nutzen und Risiken ist eine Laufzeitverlängerung der drei noch bestehenden Atomkraftwerke auch angesichts der aktuellen Gaskrise nicht zu empfehlen“

Kernkraftwerke und Krieg II

- Mittelfristige Fragestellungen:
  - Verwundbarkeiten der Kernenergie in Krisen-/Kriegsgebieten?
- IAEA („seven indispensable pillars of nuclear safety”):
  - physische Unversehrtheit
  - Sicherheits- und Sicherungssysteme funktionsfähig
  - Betriebspersonal
  - externe Stromversorgung
  - ununterbrochene logistische Versorgungsketten
  - Strahlungsüberwachung
  - Kommunikation

Kernkraftwerke und Krieg II

- Mittelfristige Fragestellungen:
  - Verwundbarkeiten der Kernenergie in Krisen-/Kriegsgebieten?
- IAEA (während Ukraine-Krieg beeinträchtigt):
  - physische Unversehrtheit
  - Sicherheits- und Sicherungssysteme funktionsfähig
  - Betriebspersonal
  - externe Stromversorgung
  - ununterbrochene logistische Versorgungsketten
  - Strahlungsüberwachung
  - Kommunikation

4

„Nachhaltige“ Atomkraft – Die EU-Taxonomie

Taxonomie I

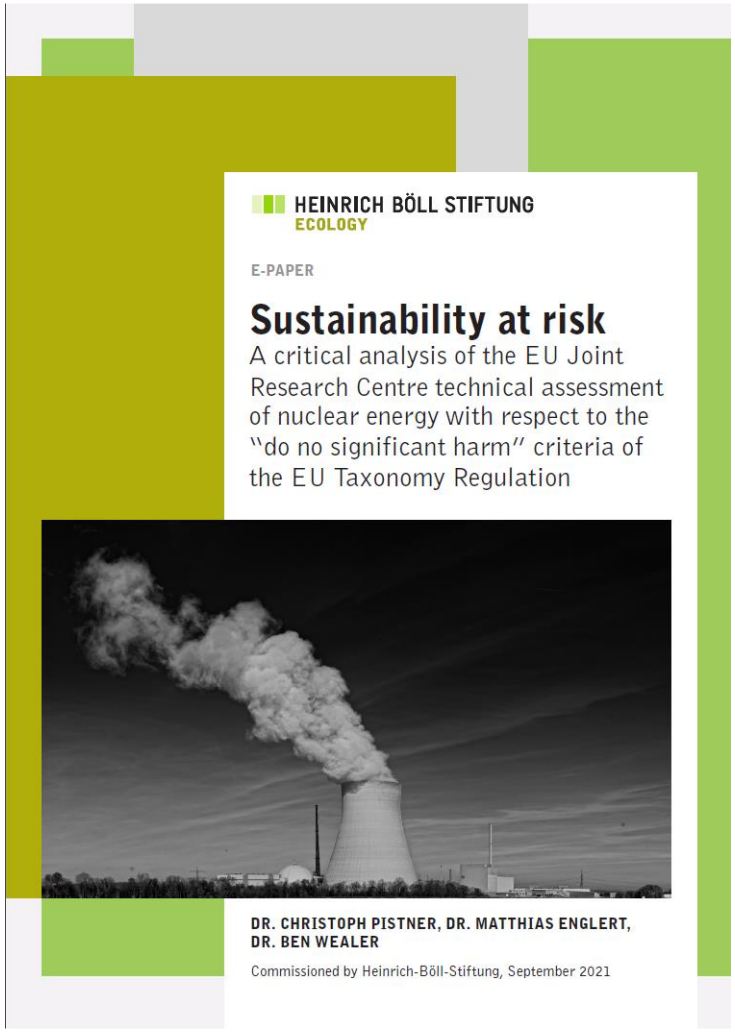
- „Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance" März 2020
  - Substantially contribute to at least one of six environmental objectives
  - Do no significant harm to any of the other five environmental objectives
  - Comply with minimum safeguards
  - Annex:

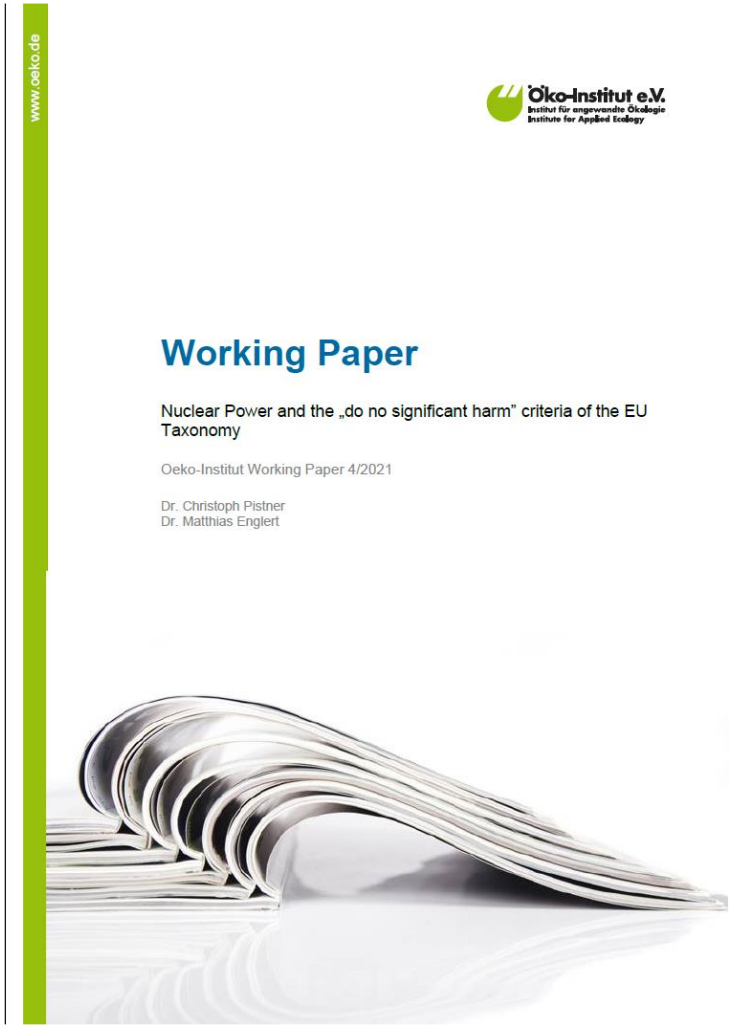
"Given these limitations, it was not possible for TEG, nor its members, to conclude that the nuclear energy value chain does not cause significant harm to other environmental objectives on the time scales in question. The TEG has therefore not recommended the inclusion of nuclear energy in the Taxonomy at this stage."

Taxonomie III

- 29.03.2021:
  - JRC report “Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 (‘Taxonomy Regulation’)”

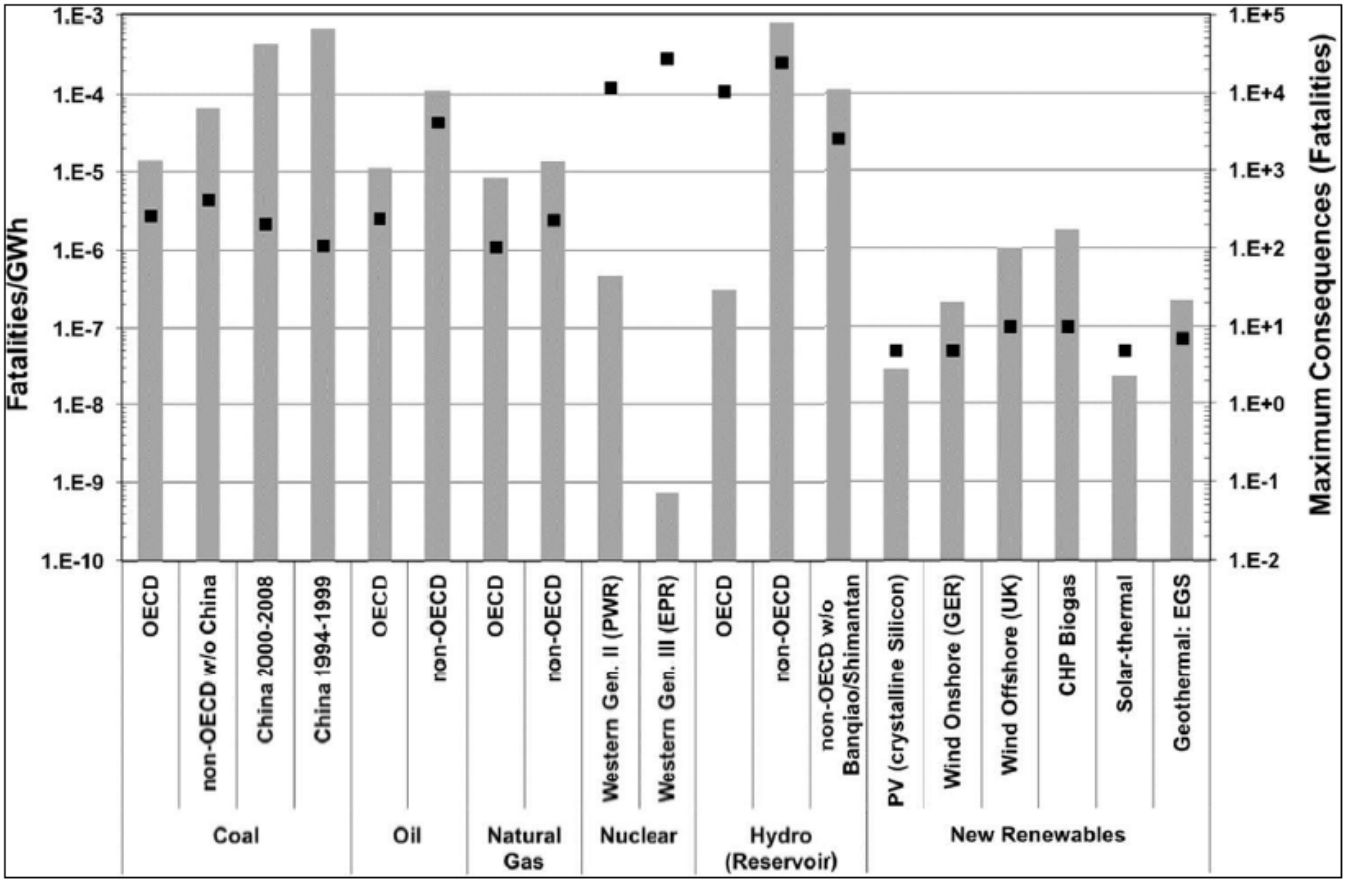
Kurzstudie im Auftrag der Böll-Stiftung (Brüssel)





Maximum number of fatalities

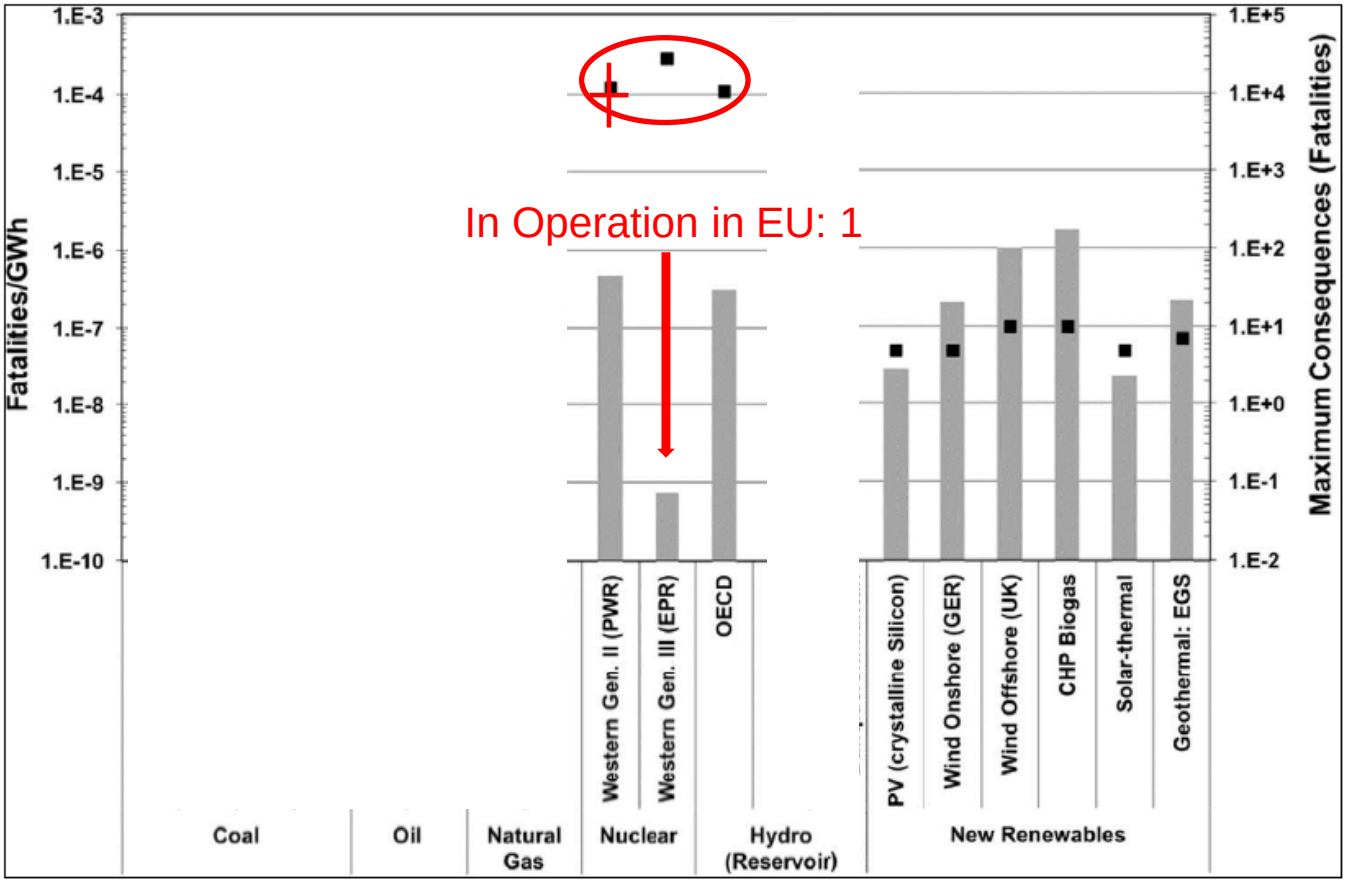
Figure 3.5-1. Severe accident fatality rates and maximum consequences (black points) assessed for selected electricity supply technologies with the associated energy chains



Source: Hirschberg et al [3.5-1]

Maximum number of fatalities

Figure 3.5-1. Severe accident fatality rates and maximum consequences (black points) assessed for selected electricity supply technologies with the associated energy chains

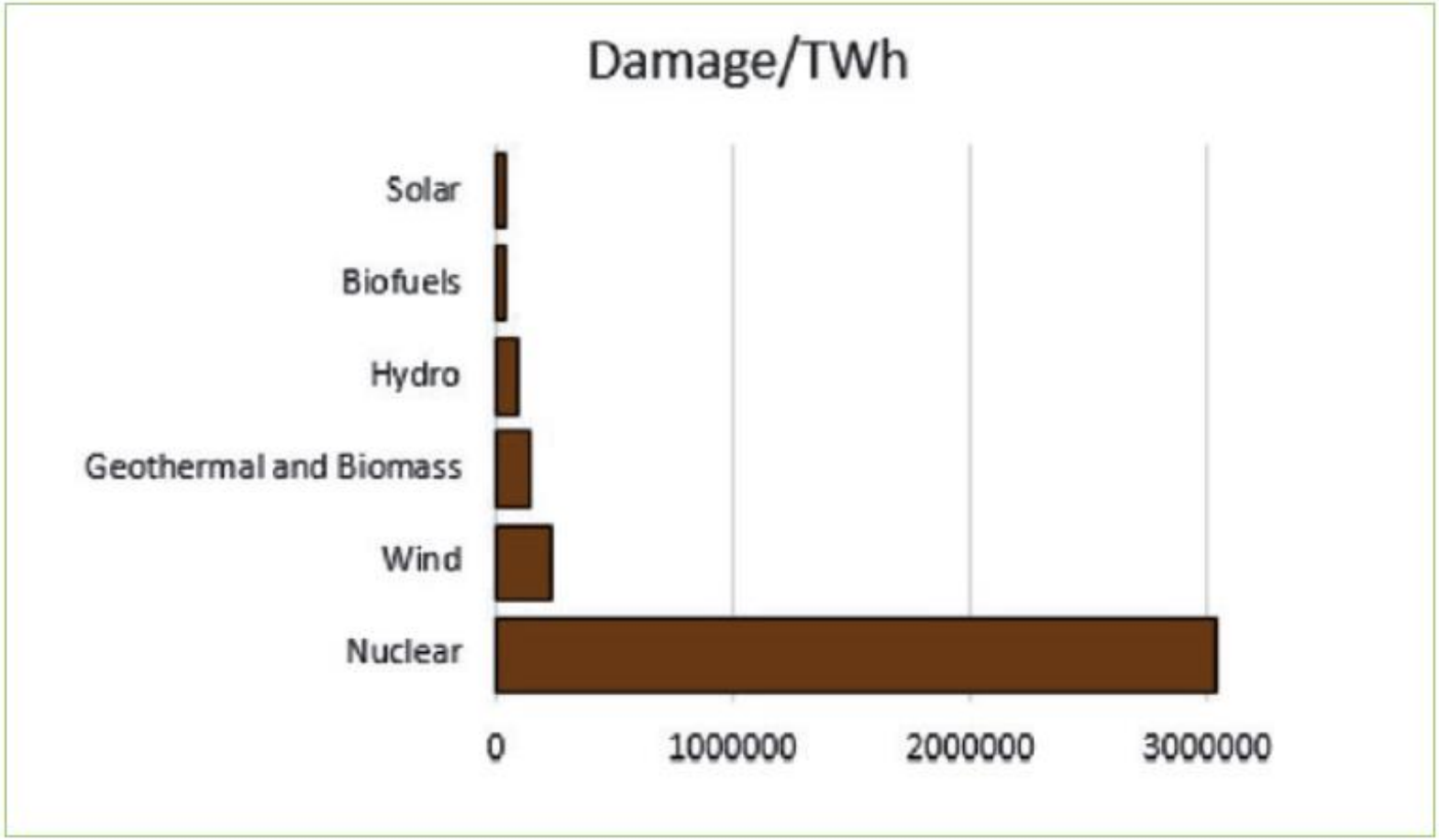


Source: Hirschberg et al [3.5-1]

Other indicators – Examples

- Human health aspects (besides fatalities)
  - Ashley et al.: 335.000 evacuees from Chernobyl, 160.000 people after Fukushima
- Land and water contamination
  - Hirschberg et al.: lost land of 3.500-4.500 km^2
- Damage and external costs
  - IRSN: grave accidents 50-250 billion Euros, major accidents: 200-1000 billion Euros
  - Sovacool et al.: normalised risk in terms of damage per TWh amounts to 3 million US$ for nuclear

Other indicators



Source: Sovacool et al. 2016.

Overall Conclusions on Severe Accidents

- JRC:
  - *„Severe accidents with core melt did happen in nuclear power plants …"*
  - *"Severe accidents are events with extremely low probability but with potentially serious consequences and they cannot be ruled out with 100% certainty"*
  - *"The consequences of a severe accident at a nuclear power plant can be significant both for human health and the environment."*

→ Severe accidents in nuclear power plants can happen and they do have significant consequences for human health and the environment

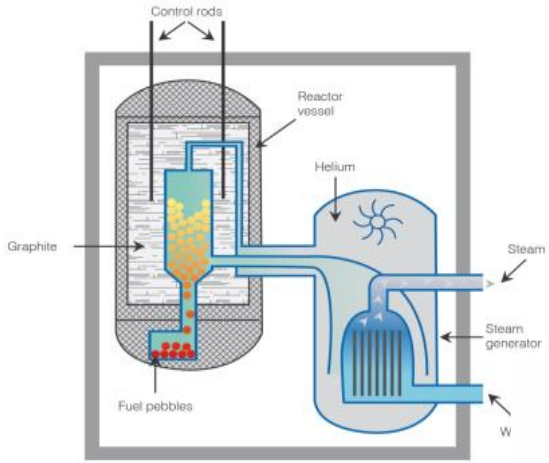
→ Thus, taking into account all consequences of severe accidents, nuclear power clearly violates any possible meaningful definition of a "do no significant harm" criterion

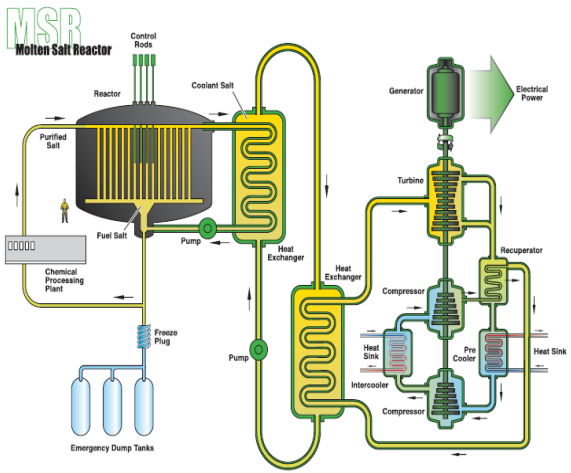
JRC, Executive Summary, p. 10

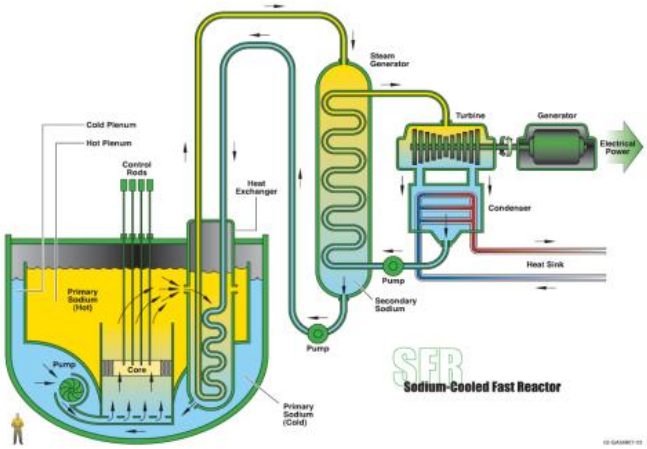
5.1

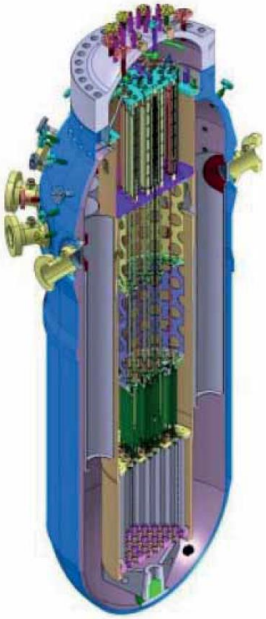
„Generation IV“ – Was ist das?

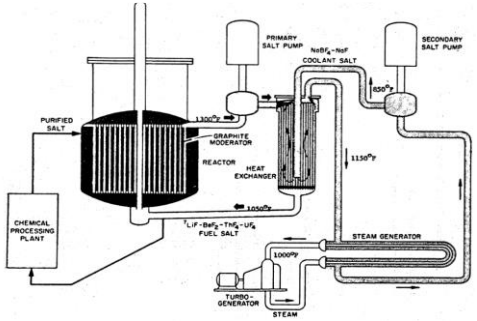
Neue Reaktorkonzepte („GEN IV“ / SMRs)?











Source: Generation IV International Forum (GIF), AEC 1972

Medien zu „Neuen Reaktorkonzepten“ (in CH in 2016)

- „10.000 mal weniger Abfälle“ wie gängige Kernkraftwerke
- Diese Abfälle bereits „nach 1.000 Jahren“ ungefährlich
- Stromproduktion „so billig, dass sich sogar Schwellenländer die Technik leisten können“,
- Die sind Reaktoren „inhärent sicher“, schwere Unfälle werden somit unmöglich
- Aufgrund des verwendeten Thoriums als Brennstoff bieten solche Reaktoren „keine Möglichkeit, Waffen herzustellen“
- Bereits „in 15 bis 25 Jahren“ am Markt verfügbar

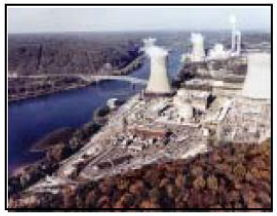
NZZ vom 09.10.2016, Basler Zeitung vom 12.10.2016, Die Weltwoche vom 03.11.2016, Zofinger Tagblatt vom 22.11.2016 und Schweiz am Sonntag vom 04.12.2016

Was sind „neue Reaktorkonzepte“?

- In 2000 Gründung des „Generation IV International Forum“

Generation I

Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Commercial Power Reactors

- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- AGR

Generation III

Advanced LWRs

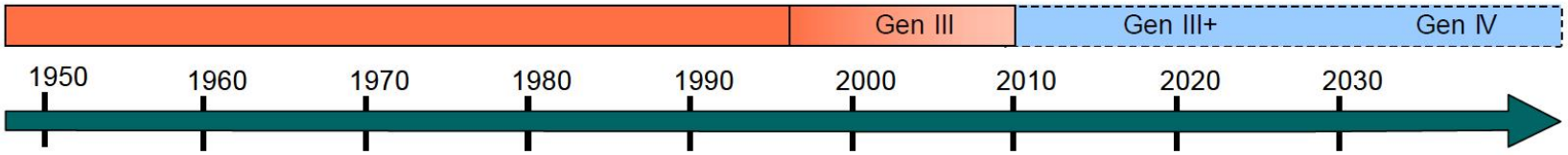
- ABWR
- System 80+

Generation III +

Evolutionary Designs Offering Improved Economics for Near-Term Deployment

Generation IV

- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant



Source: GIF 2002

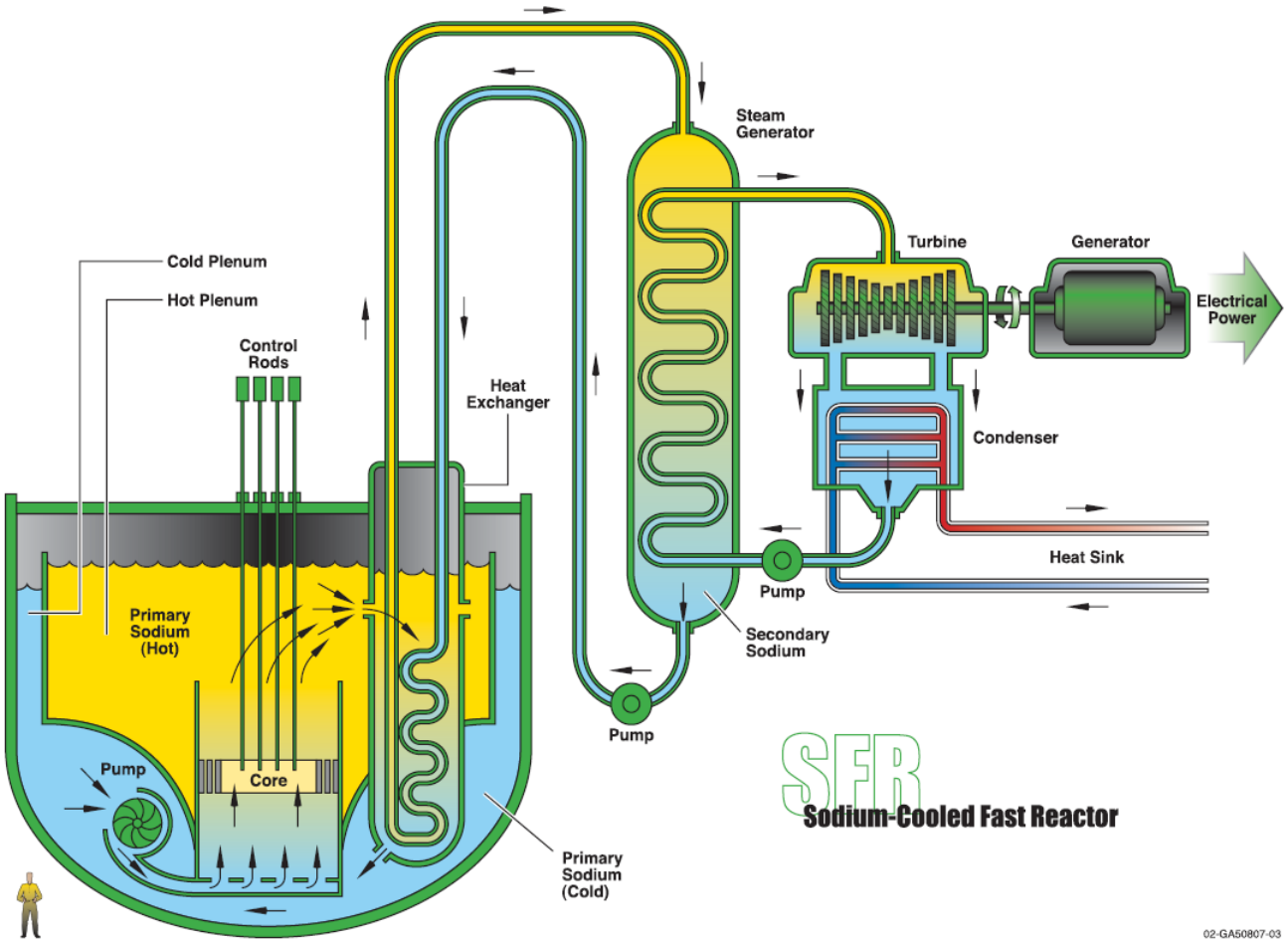
Gen IV „New Reactor Concepts“

- Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)
  - Only concept claimed to be commercially available
- (Very) High Temperature Reactor – (V)HTR
  - Currently under development espescially in China
- Gas-cooled Fast Reactor (GFR, not discussed in the following)
- Molten Salt Reactors, MSR
  - Only reactor concept with liquide fuel
- Lead-cooled Fast Reactor (LFR, not discussed in the following)
- SuperCritical Water-cooled Reactor (SCWR, not discussed in the following)

Gen IV „New Reactor Concepts“

- Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)
  - Only concept claimed to be commercially available
- (Very) High Temperature Reactor – (V)HTR
  - Currently under development espescially in China
- Gas-cooled Fast Reactor (GFR, not discussed in the following)
- Molten Salt Reactors, MSR
  - Only reactor concept with liquide fuel
- Lead-cooled Fast Reactor (LFR, not discussed in the following)
- SuperCritical Water-cooled Reactor (SCWR, not discussed in the following)

Sodium-cooled Fast Reactors (SFR)



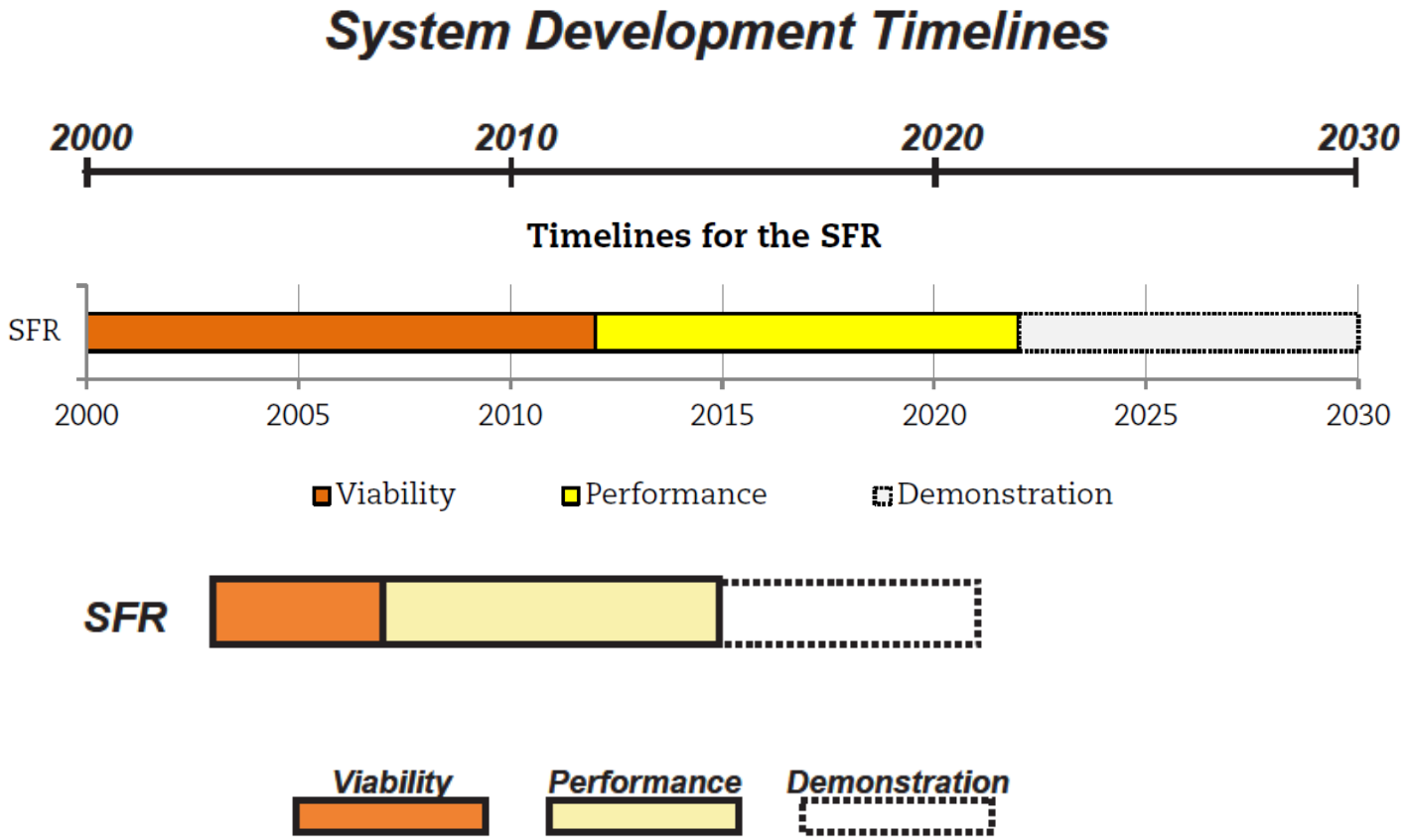
Quelle: GIF 2002

(Zentrale) Vor-/Nachteile

- Bessere Ausnutzung von Uran
- Niedrige Drücke bei gleichzeitig höheren Temperaturen

- Problematik der Reaktivitätskontrolle (positive Rückkopplungseffekte)
- Chemisch reaktives Kühlmittel (Natriumbrände)
- Proliferationsgefahren im Zusammenhang mit Plutoniumnutzung

SFR Timelines (2002/2014)



- Le Monde, 29.08.2019: la France abandonne la quatrième génération de réacteurs (ASTRID)

Source: GIF 2002, GIF 2014

SFR - Conclusions

- Status: More than 20 prototype reactors and 400 years of operational experience since 70 years of R&D, still no commercially viable system
- Fuel utilization: Fundamental aspect of breeding new fissile material not needed in the forseeable future
- Safety: Specific advantages as well as disadvantages, but safety/performance record is bad up to now
- Proliferation: Potentially significant disadvantage, as very high quality of fissile materials can be produced, but strongly depending on actual technical layout

5.1

„SMR“ – Was ist das?

Definitionen „SMR“ – einige Beispiele

- IAEA ARIS:

  “advanced reactors that produce electric power up to 300 MW(e), designed to be built in factories and shipped to utilities for installation as demand arises”

- U.S. NRC (2020):

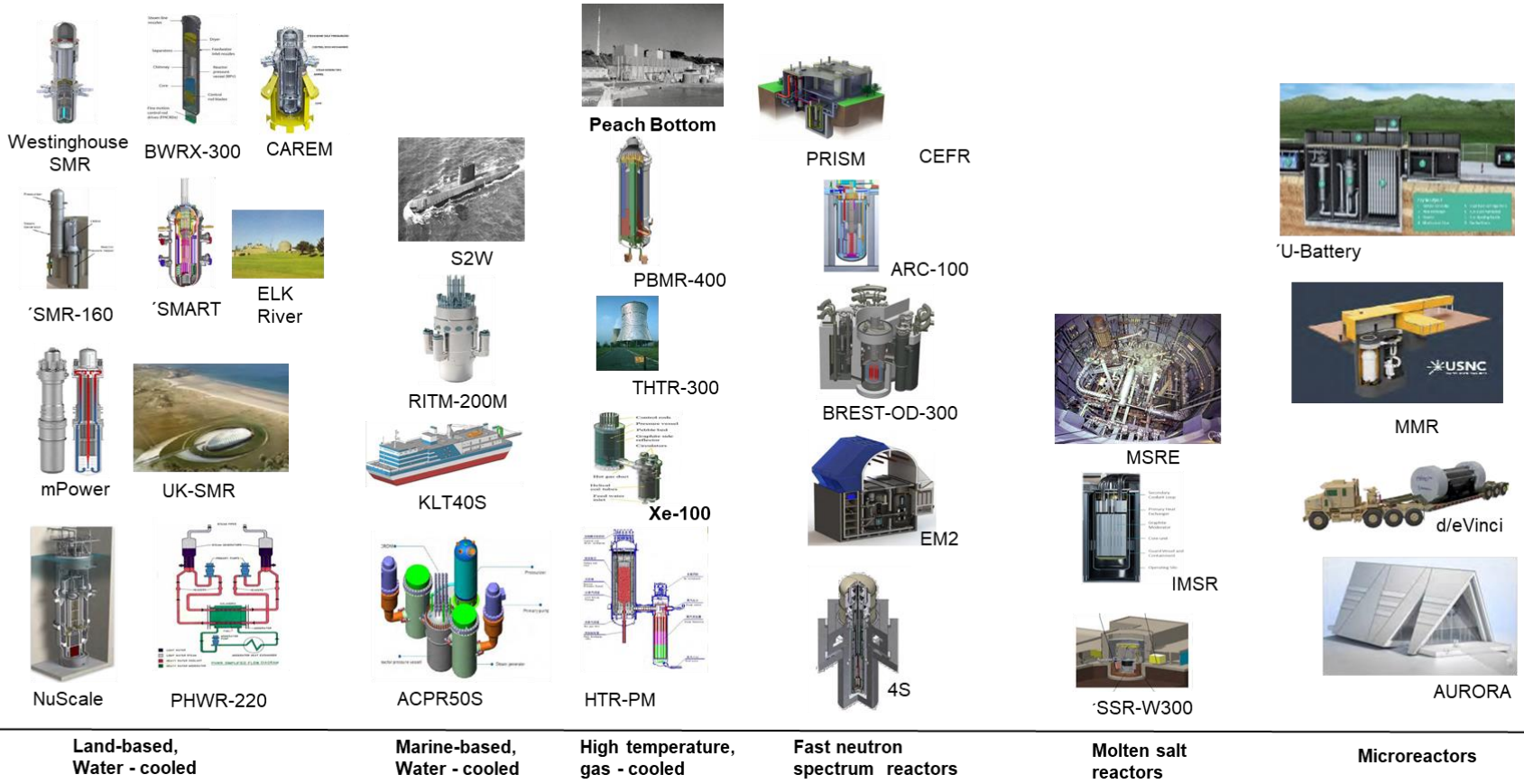
  “The NRC refers to light water reactor (LWR) designs generating 300 MWe or less as small modular reactors (SMRs).”

- WNA (2020):

  “Small modular reactors (SMRs) are defined as nuclear reactors generally 300 MWe equivalent or less, designed with modular technology using module factory fabrication, pursuing economies of series production and short construction times.”

Öko-Institut e.V.

Betrachtete SMR-Konzepte



NuScale (NuScale Power Inc., USA)

- Entwicklung seit 2003, In Betriebnahme 2026 geplant
- 50 MWe, Wassergekühlt und moderiert
- <4,5% angereichertes UO_2
- Passive Sicherheitssysteme
- Integraler RDB, kein LB-LOCA
- Strom/Prozesswärme
- skalierbar, 12 Module/Anlage, Industrielle Herstellung geplant
- Containment, passive Kühlung durch Pool
- Auslegung gegen Erdbeben (0,5 g), unterirdische Bauweise

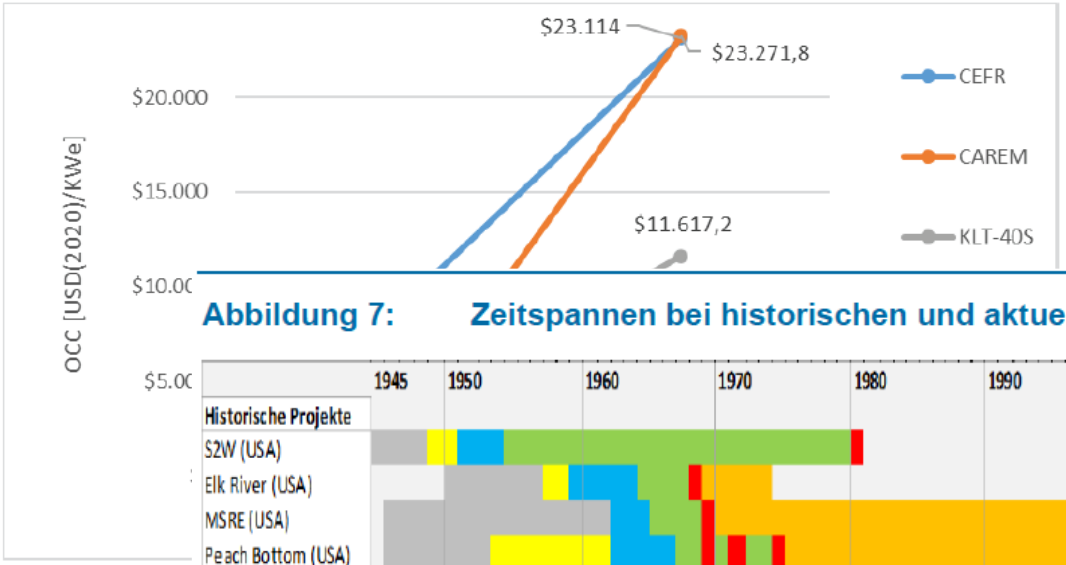
Quelle: IAEA ARIS 2018 nach Herstellerangaben

Einsatzbereich Klimaschutz

- Sofern SMR auch im Kontext der Bekämpfung der Gefahren des Klimawandels zur globalen Stromversorgung vorgeschlagen werden, ist die mit ihnen erzielte Stromproduktion relevant:
  - Heutige neue Atomkraftwerke: 1.000-1.600 MWe
  - SMR: 1,5-300 MWe
- Um weltweit dieselbe elektrische Leistung zu erzeugen wäre eine um den Faktor 3-1000 (typisch Faktor 10) größere Anzahl an SMR-Anlagen erforderlich
- Alleine zum Ersatz der heute circa 400 Reaktoren mit großer Leistung würde dies also den Bau von vielen tausend bis zehntausend SMR-Anlagen bedeuten

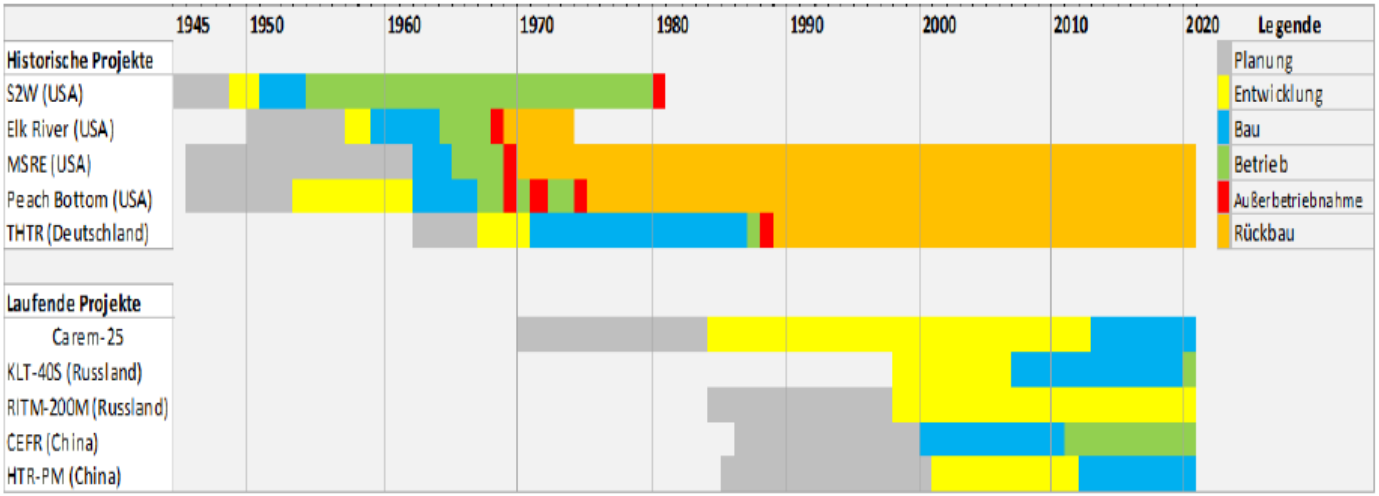
Ökonomie I

Abbildung 6: Kostensteigerungen beim Bau von SMRs



Quelle: Eigene Zusammenstell

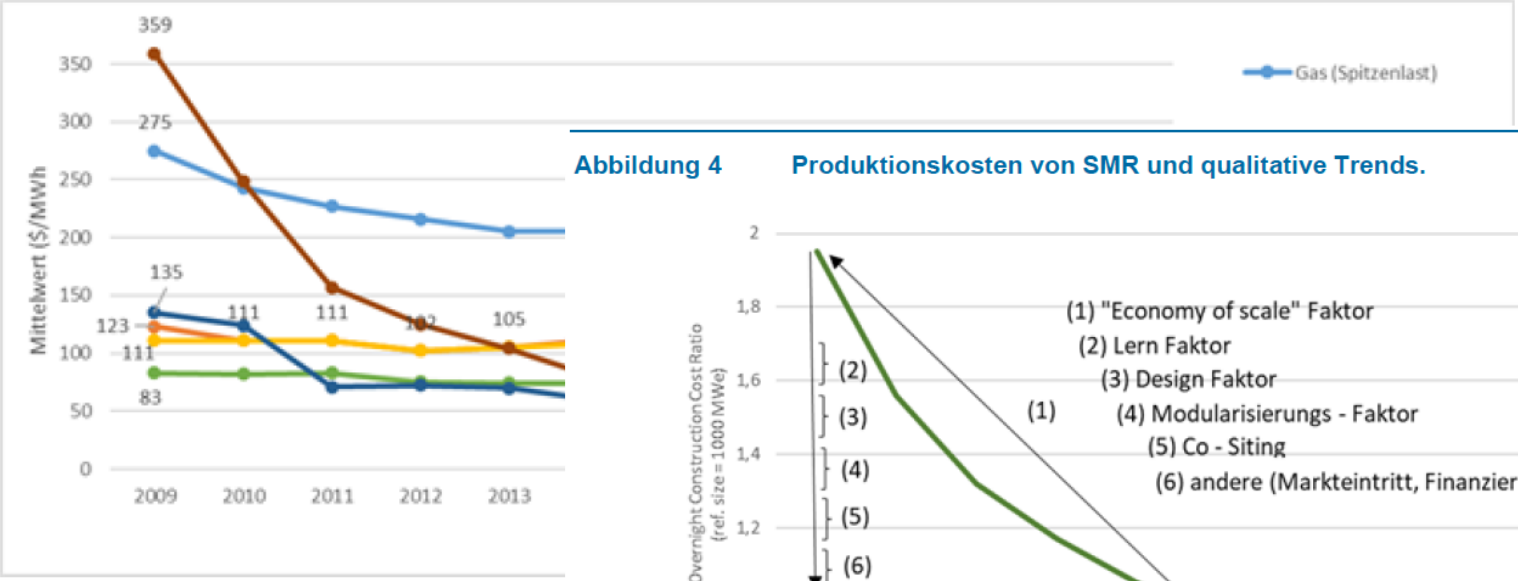
Abbildung 7: Zeitspannen bei historischen und aktuellen SMR-Konzepten



Quelle: Eigene Darstellung

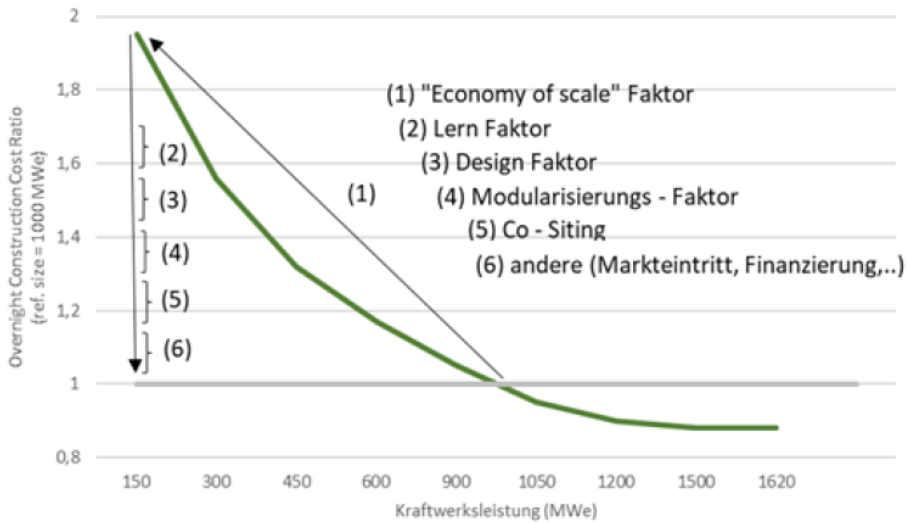
Ökonomie II

Abbildung 1: Stromgestehungskosten verschiedener Erzeugungstechnologien (2009-2020).



Quelle: (Lazard 2020)

Abbildung 4 Produktionskosten von SMR und qualitative Trends.



Quelle: (Boarin et al. 2021, 253, Abbildung 6), eigene „Übersetzung"

6

Schlussfolgerungen

Schlussfolgerungen I

- Die existierenden Reaktoren sind sehr alt (> 30 a im Durchschnitt)
- Ohne Laufzeitverlängerungen (und damit verbundener Unfallrisken) wird die nuklear erzeugte Stromproduktion abnehmen
- Für alle gegenwärtig in Betrieb befindlichen KKWs können schwere Unfälle nicht ausgeschlossen werden
- Ein massiver Neubau von KKWs wird das Risiko schwerer Unfälle und der Weiterverbreitung von Kernwaffen erhöhen
- Nur wenige Staaten haben bislang das Problem der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle adressiert, noch kein Staat hat ein in Betrieb befindliches Endlager
- KKWs sind keine kostengünstige Option zur Bekämpfung des Klimawandels

Schlussfolgerungen II

- „Neue“ Reaktorkonzepte sind alt
- Graduelle Verbesserungen sind möglich, ein radikaler Durchbruch jedoch nicht in Sicht
- Ein kommerziell konkurrenzfähiges System ist nicht in Sicht
- Für einige Reaktorkonzepte können mit Blick auf einzelne Aspekte Vorteile ausgemacht werden
- Kein Konzept weist substanzielle Vorteil mit Blick auf alle relevanten Problemfelder gleichzeitig auf
- Verschiedene Kriterien zur Verbesserung stehen in Konkurrenz zu einander (bspw. Sicherheit vs. Kosten)
- Neue Reaktorkonzepte, die nur bei einzelnen Aspekte Vorteile bieten, werden nicht zu einer höheren gesellschaftlichen Akzeptanz führen

Schluß

An academic reactor or reactor plant almost always has the following basic characteristics:

1. It is simple.
2. It is small.
3. It is cheap.
4. It is light.
5. It can be built very quickly.
6. It is very flexible in purpose ("omnibus reactor").
7. Very little development is required. It will use mostly "off-the·shelf“ components.
8. The reactor is in the study phase. It is not being built now.

On the other hand, a practical reactor plant can be distinguished by the following characteristics:

1. It is being built now.
2. It is behind schedule.
3. It is requiring an immense amount of development on apparently trivial items. Corrosion, in particular, is a problem.
4. It is very expensive.
5. It takes a long time to build because of the engineering-development problems.
6. It is large.
7. It is heavy.
8. It is complicated.

Quelle: Hyman Rickover, Journal of Reactor Science and Technology Vol III, No. 3 , June 1953

Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Thank you for your attention!

Haben Sie noch Fragen?
Do you have any questions?