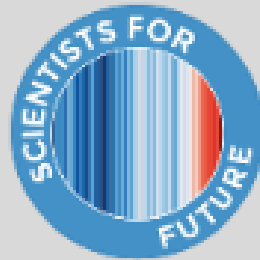


Atomkraft - Irrweg in der Klimakrise

Prof. Dr. Christian von Hirschhausen und M.Sc. Fabian Präger

04. März 2022



AGENDA

Einführung: Kann Atomkernenergie im Kampf gegen die Klimakrise eine Rolle spielen?

1. Technologie und Gefahrenpotenziale
2. / 3. Wirtschaftlichkeit und zeitliche Verfügbarkeit
4. Atomkraft in der sozialökologischen Transformation

Einführung: Kann Atomkernenergie im Kampf gegen die Klimakrise eine Rolle spielen?

Vorbemerkung zum Konnex “Ukraine-Krieg”

- Auszug aus dem Redebeitrag für die Fridays for Future Demo am 03.03.2022
- “Wir müssen unseren fossilen Ballast abwerfen [...] Das geht nur durch eine intensiv beschleunigte Energiewende und dem Aufbau eines 100% Erneuerbaren, bürger- und verbrauchsnahe Energiesystem.“
- Die Forderung nach Laufzeitverlängerungen von Atomkraftwerken oder sogar der Neubau ist nicht sinnvoll, kontraproduktiv und gefährlich!

Konsens zur Beendigung der Verbrennung fossiler Energieträger

- Allgemeiner Konsens zur Beendigung der Verbrennung fossiler Energieträger und Übergang zu einem weitgehend erneuerbaren Energiesystem („Klimaneutralität“ im European Green Deal, auch in globalen Klimaverhandlungen, „Glasgow“, etc.
- Aber: Kontroverse Diskussion, insb. europaweit und international, bzgl. der Bedeutung von Kernkraft im zukünftigen Energie-Mix:
 - Einige Energie- und Klimaszenarien sehen erhebliche Investitionen und ansteigende Stromproduktion mit Kernenergie vor (Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Internationale Energieagentur (IEA), auch einige IPCC-Szenarien
 - Transformationspfade mit raschem Auslaufen von fossilen Energie als auch Kernkraft, die technisch und wirtschaftlich darstellbar sind
 - Aktueller Stand Kernenergie: 10% der Stromerzeugung, in wenigen Ländern (gut 30)
- Aktuell Versuche von Frankreich und anderen EU-Ländern zur Integration von Kernenergie (und fossilem Erdgas) in die „EU-Taxonomie“

Wesentliche Ergebnisse

- Kernenergie ist nicht in der Lage, in der verbleibenden Zeit einen sinnvollen Beitrag zum Umbau zu einer klimaverträglichen Energieversorgung zu leisten
- Kernkraft ist zu gefährlich, zu teuer und zu langsam verfügbar
- Darüber hinaus ist Kernkraft zu transformationsresistent, d. h. sie blockiert den notwendigen sozial-ökologischen Transformationsprozess, ohne den ambitionierte Klimaschutzziele nicht erreichbar sind

Ist Kernenergie eine Technologie zur Lösung der Klimakrise?



NEIN:



zu blockierend



zu gefährlich



zu langsam



zu teuer

Scientists for Future 

1. Technologie und Gefahrenpotenziale

Kernkraft ist unsicher und gefährlich, weltweit!!!

Atomkraftwerke in der Ukraine

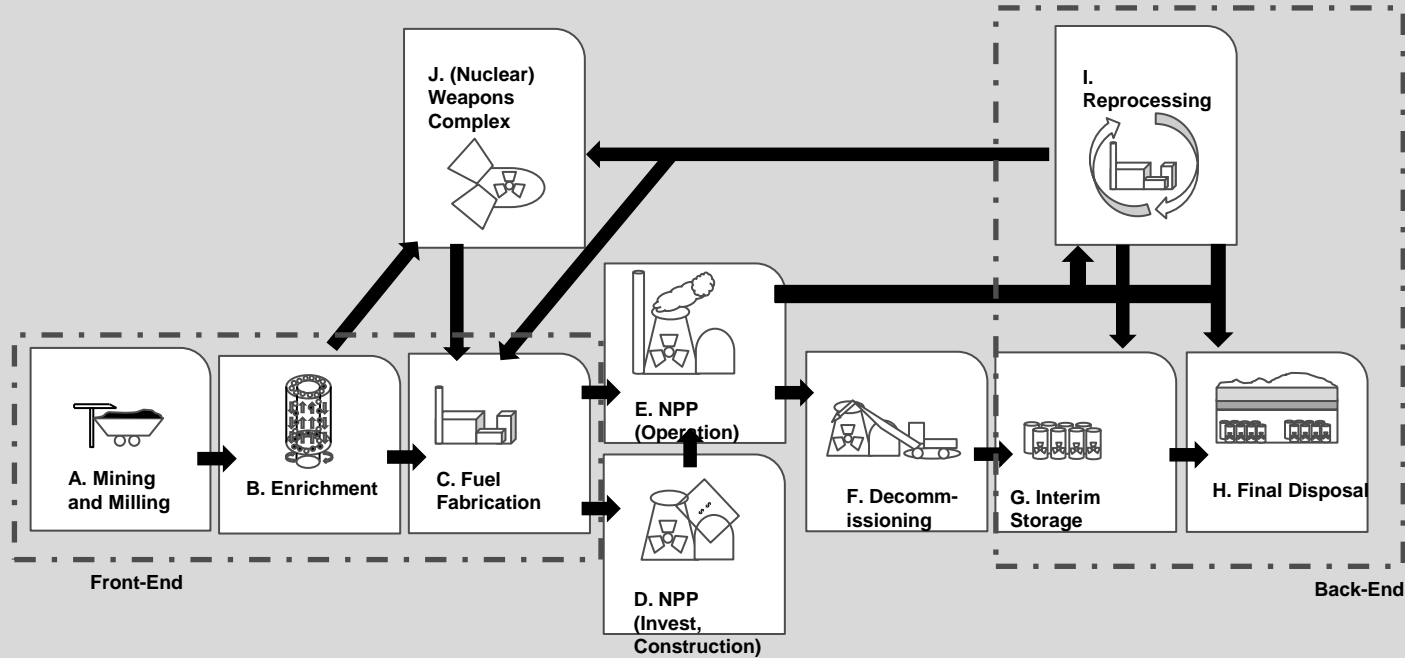
Insgesamt 15 Reaktoren - 51 % der Stromproduktion



Grafik: Apa; Quelle: Global 2000

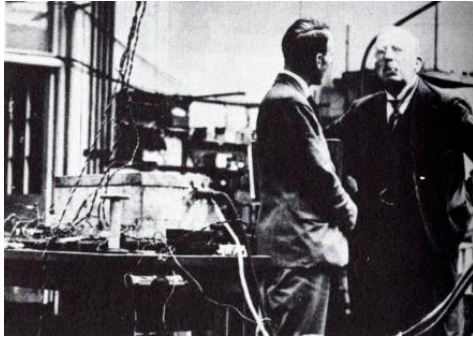
<https://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wissen/technologie/2139820-Atomkraftwerke-fuer-Krieg-nicht-geruestet.html>

Kernenergie als komplexes Systemgut



Quelle: Wealer and Hirschhausen (2020)

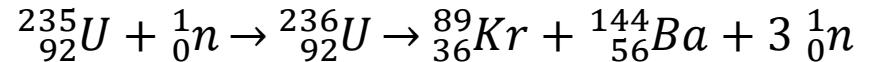
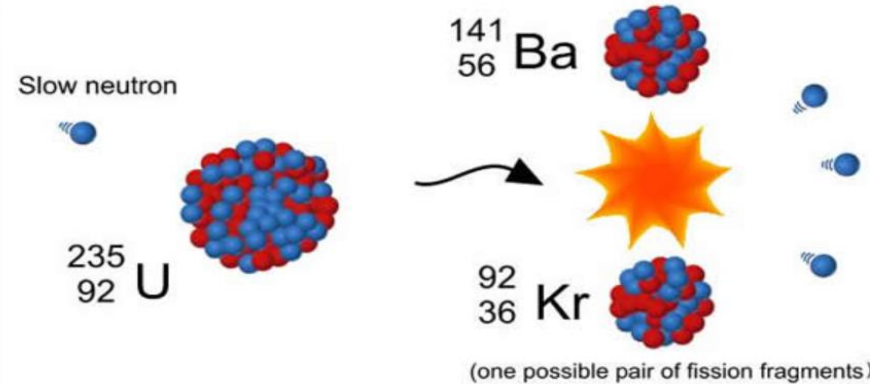
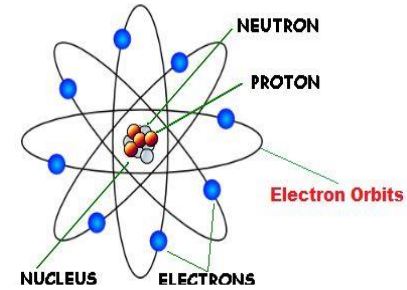
Zivil-militärische Ambivalenz der Kerntechnologie: Ein „Kind von Wissenschaft und Kriegsführung“ (Lévêque, 2012)



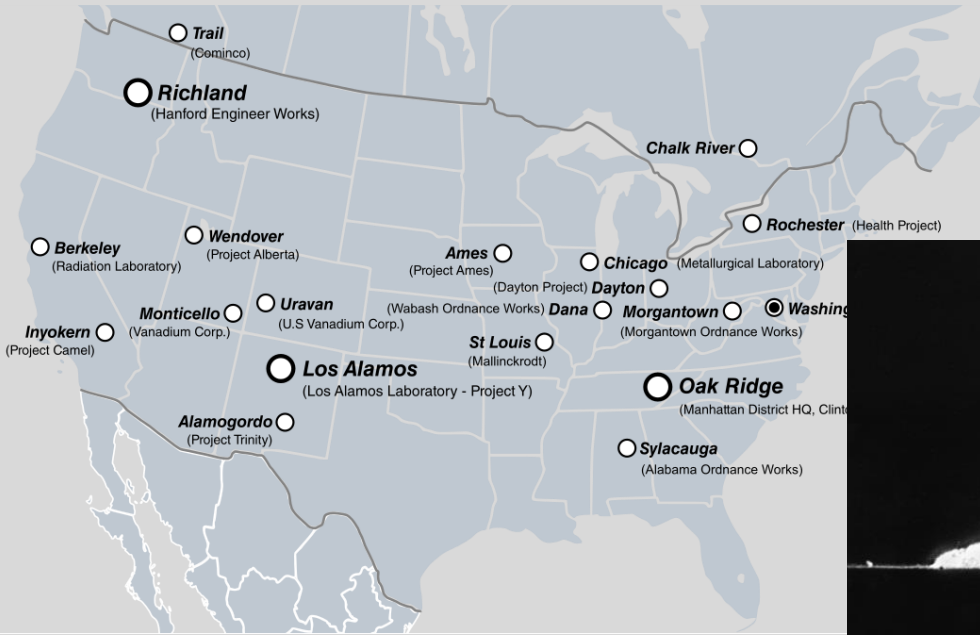
...Cambridge



...Meitner and Hahn



Manhattan Projekt (1942 – 1946): Wissenschaft... und Militär



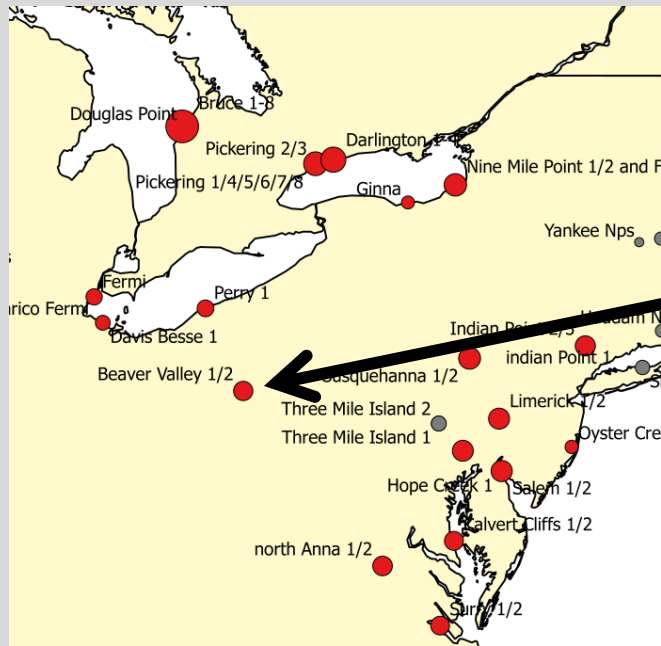
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Manhattan_Project_US_Canada_Map_2.svg



Berlyn Brixner / Los Alamos National Laboratory - <http://www.lanl.gov/orgs/pa/photos/images/PA-98-0520.jpeg>

Erste Atombombe: Trinity-Test, 16. July, 1945

... destroyed in ... 1957: Shippingport, first „commercial pilot reactor“: 8 times more expensive than the competitors (Radkau, 1983)



<https://pris.iaea.org/PRIS/ReactorImage.aspx?image=648.jpg>

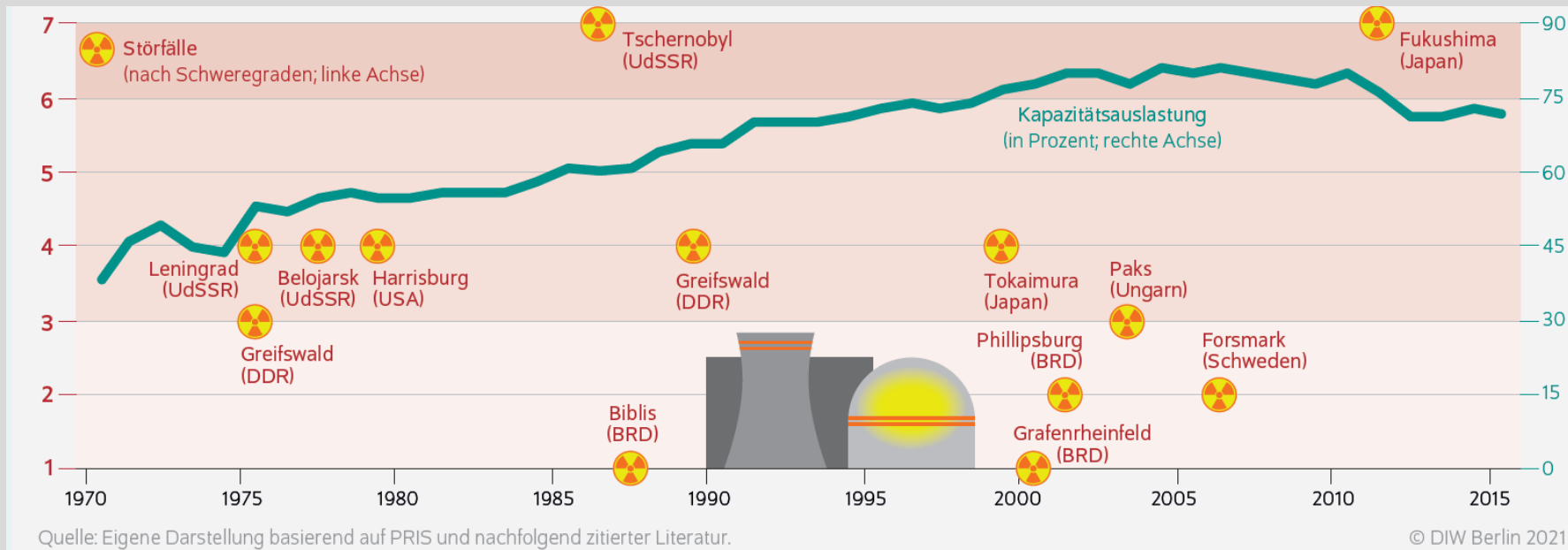
Costs of 1 kWh electricity (US-cents, 1957)

Costs of 1 kWh electricity (US-cents, 1957)



Baade (1958, 125,
exchange rate 1 USD = 4,20 DM)

Besonderes Gefahrenpotenzial der Kernspaltung



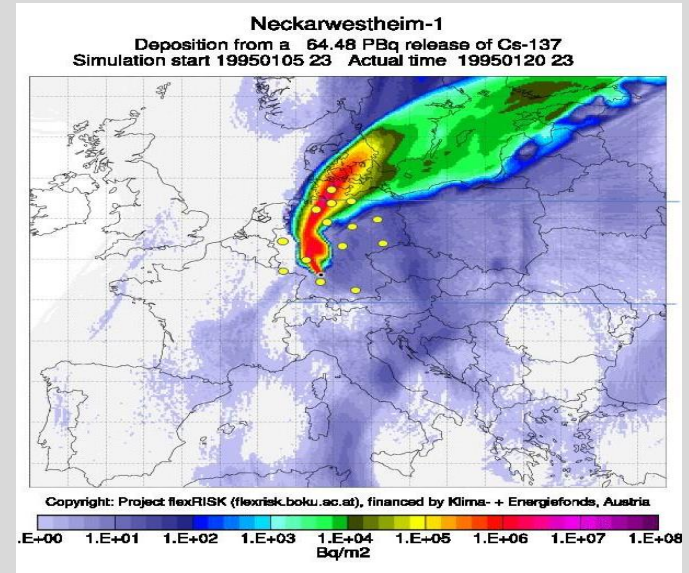
- Einschluss radioaktiver Stoffe
- Kontrolle der Reaktivität
- Kühlung der Brennelemente

https://doi.org/10.18723/diw_wb:2021-8-1



Ausbreitung von radioaktiven Schadstoffen bei Kernschmelze im Kernkraftwerke

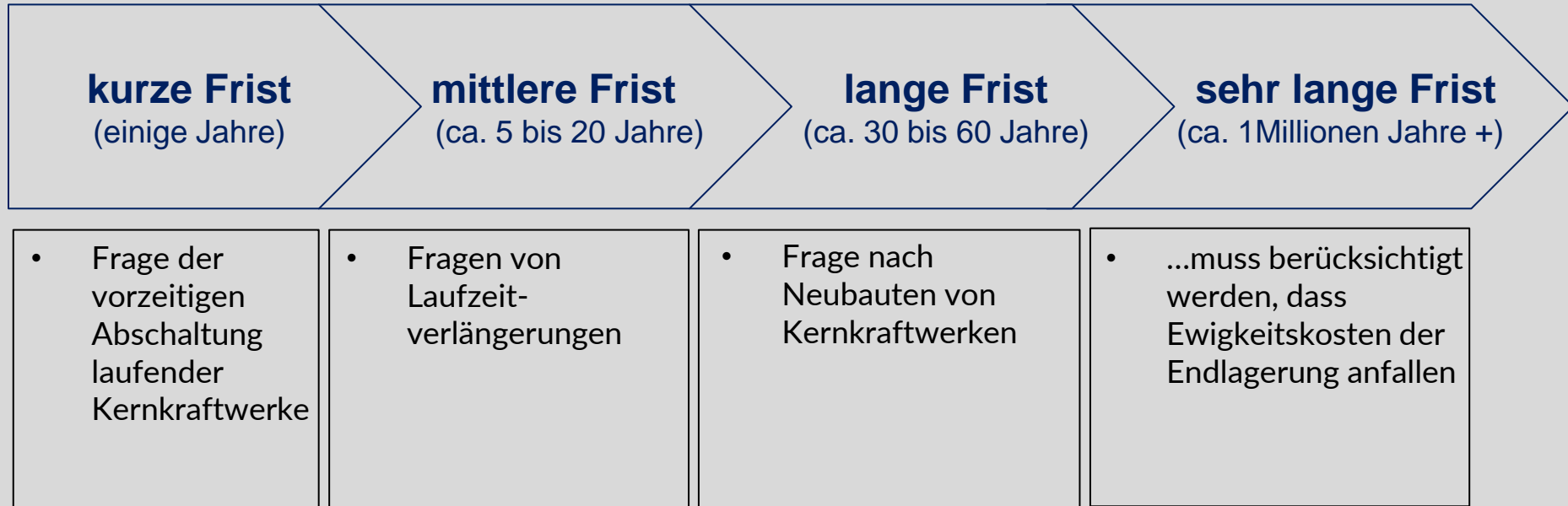
- Abhängig von Ausmaß, Form der Freisetzung, meteorologischen Verhältnissen
- Hypothetisches Beispiel: Neckarwestheim am 05.01.1995 ab 23.00h: Windrichtung Norden/Osten
- Depositionen: Mainz/Wiesbaden: über 1.000 kilo-Bequerel Cäsium 137/m²; Bremen Hamburg sogar größer
- Zum Vergleich: nach Unfall in Tschernobyl 1986 bestand ab 185 kBq/m² ein Recht auf Aussiedlung



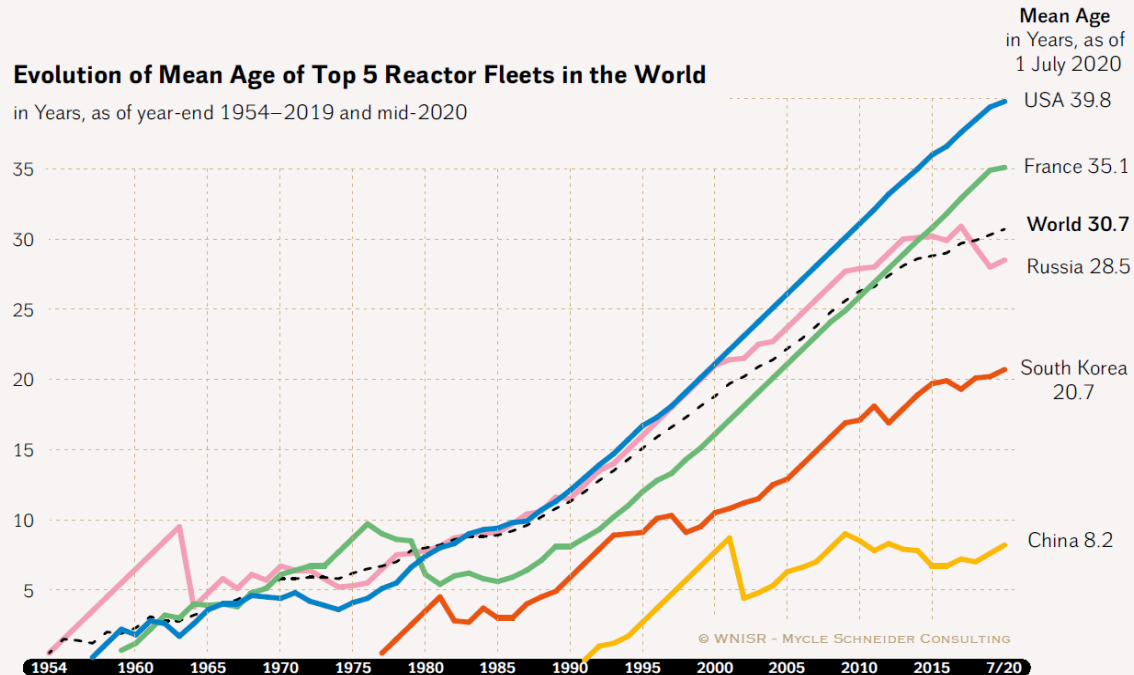
Der unmittelbare Nahbereich des KKW's ist ausgeblendet, Quelle: flexrisk.boku.ac.at/(zuletzt geprüft am 29.09.2021).

2. / 3. Wirtschaftlichkeit und zeitliche Verfügbarkeit

Wir berücksichtigen unterschiedliche Zeithorizonte



Durchschnittsalter weltweit: 30,7 Jahre

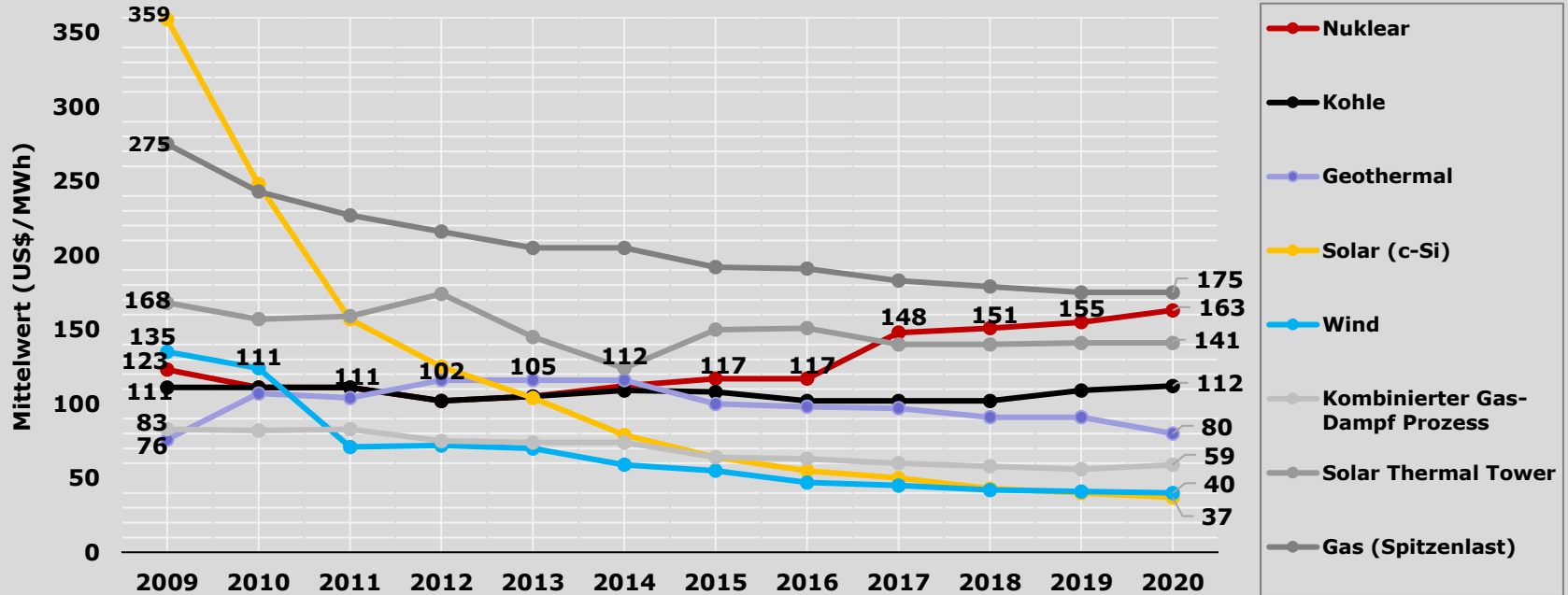


Sources: WNISR, with IAEA-PRIS, 2020

Kurze Frist: Weitere Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit

- Allgemeine Laufzeit von aktuell betriebenen KKW: 30-40 Jahre.
- Laufzeitverlängerungen sind oftmals mit erheblichen technischen Nachrüstungen verbunden (Inrag 2021).
- Insgesamt schätzt die IEA die Kosten für Laufzeitverlängerungen von 10-20 Jahren zwischen 40-55 US\$/MWh ein (IEA 2019).
- Beispiel Frankreich:
 - Der französische Rechnungshof (Cour des Comptes 2016) schätzt, dass der Betreiber EDF bis 2030 bis zu 100 Mrd.€ investieren muss, um die Lebensdauer der Reaktorflotte von 40 auf 50 Jahre zu verlängern.
 - Dies entspricht mehr als dem Dreifachen des Börsenwertes von EDF
 - und im Schnitt 1,7 Mrd.€ pro Reaktor
 - oder rund 55 US\$/MWh.

Lange Frist: Kernkraft ist die teuerste Erzeugungstechnologie

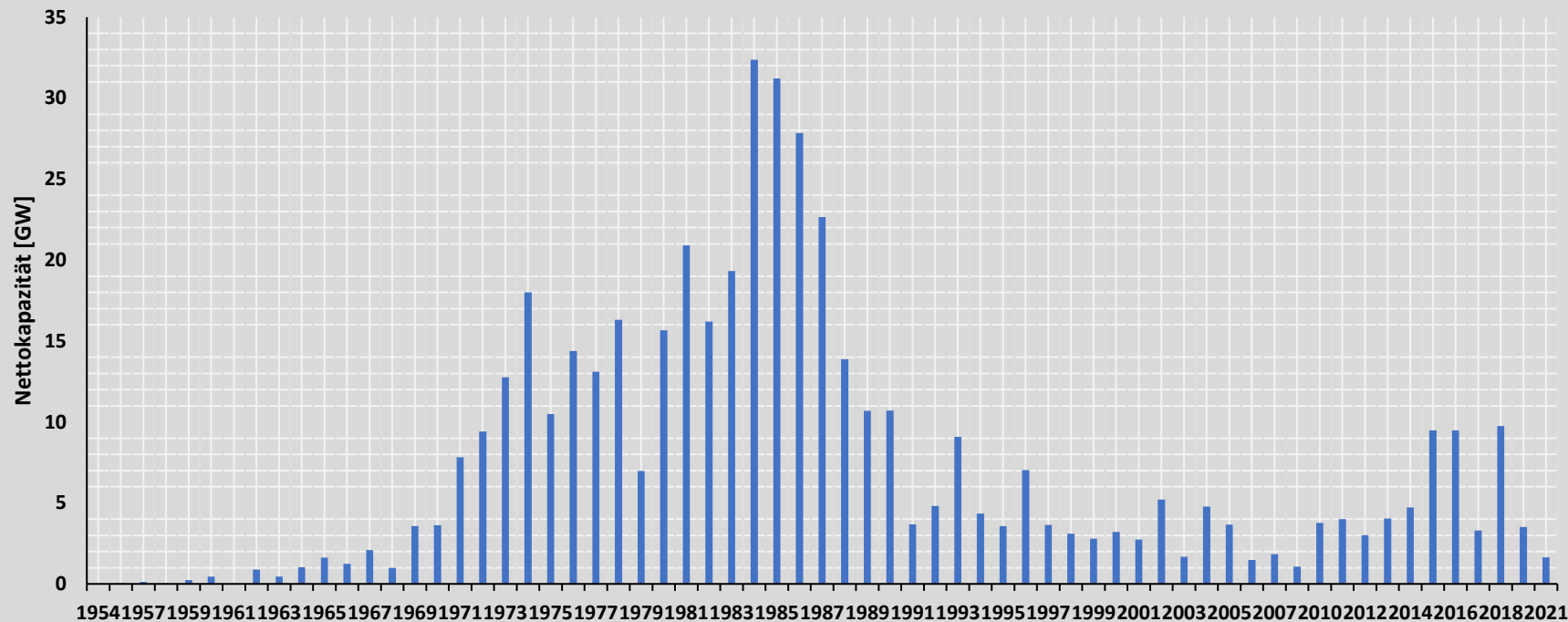


(Lazard 14.0, 2020)

Gesamtwirtschaftlich: Externe Effekte und Versicherung

- Sowohl die einzel- als auch energiewirtschaftliche Sicht ignorieren die negativen externen Effekte der Kernkraft.
 - Noch kein KKW mit 40 Jahren Betriebszeit und 1 GW an Kapazität rückgebaut (Schneider et al. 2020)
 - Weltweit noch kein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb.
- Hohe Unsicherheiten bei Rückbau- und Endlagerkosten.
- Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive ist aber auch die fehlende Versicherbarkeit von Kernkraftrisiken zu berücksichtigen.
 - Europaweit haften beispielsweise Betreiber maximal für Schäden bis zu 1,2 Mrd. € (Gaßner et al. 2017),
 - Diese Summen sind marginal im Vergleich zu den (schwer abschätzbaren) Kosten, die mit einem nuklearen Unfall verbunden sind.
 - Fukushima: auf ca. 35–80 Trillionen Yen (ca. 270–617 Mrd. Euro) geschätzt (JCER 2019).

Weltweit ans Netz angeschlossene Nettokapazität an Kernkraft in Gigawatt, 1954–2020



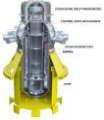


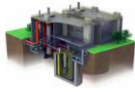


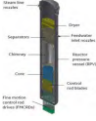


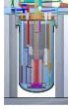

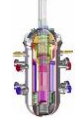













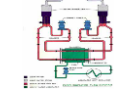
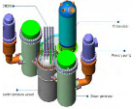
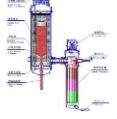

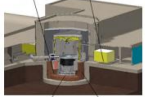


Eigene Darstellung basierend auf IAEA Prist Daten.

„Neuartige“ Reaktortechnologien: SMR und nächste Generation

- Beide Konzepte gehen auf die Frühzeit der Kernkraft zurück.
- Auch hier scheitert es an der industriellen Umsetzbarkeit
- ... und langen Zeiträumen: Aktuelle Beobachtungen zeigen, dass Planungs-, Entwicklungs- und Bauzeiten die ursprünglich geplanten Zeithorizonte in der Regel auch hier erheblich übersteigen.
- Aktuell diskutierte SMR-Konzepte sehen eine geplante elektrische Leistung von 1,5 – 300 Megawatt vor.
- Dies bedeutet, dass alleine zum Ersatz des aktuellen Kraftwerksparks mehrere tausend SMR-Anlagen gebauten werden müssten.
- Auch „neuartige“ Reaktoren lösen Endlagerproblematik nicht.

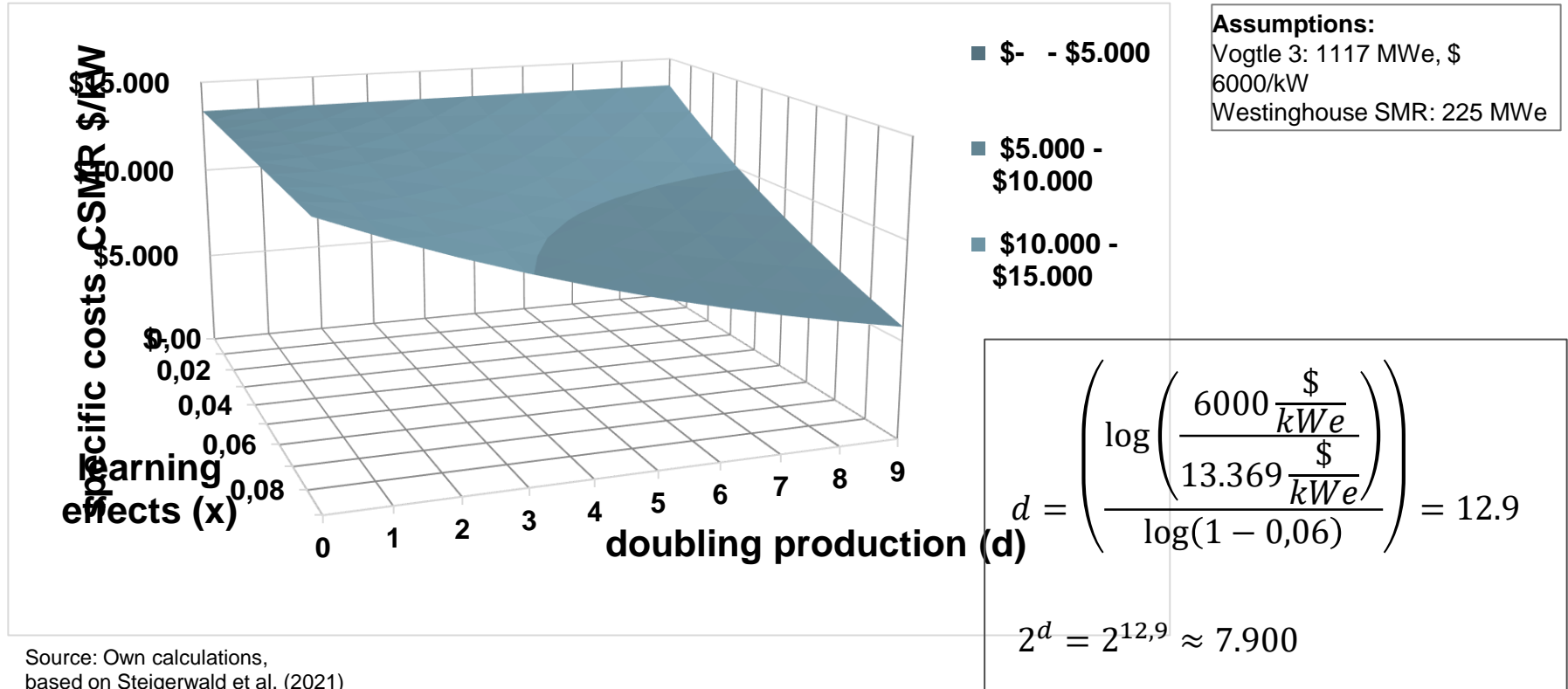
(SMR siehe Pistner et al. 2021, Gen IV / P&T siehe Frieß et al. 2021)

Selection of SMR – concepts in the current debate

 CAREM	 ELK River		 Peach Bottom	 PRISM	 CEFR	
 Westinghouse SMR	 BWRX-300	 S2W	 PBMR-400	 ARC-100		
 SMR-160	 SMART	 RITM-200M	 THTR-300	 BREST-OD-300	 MSRE	 U-Battery
 mPower	 IHK-SMR	 KLT40	 Xe-100	 FM2	 IMSR	 MMR
 Nuscale	 PHWR-220	 ACPR50S	 HTR-PM	 4S	 SSR-W300	 d/eVinci
 AURORA						
Land-based, Water - cooled	Marine-based, Water - cooled	High temperature, gas - cooled	Fast neutron spectrum reactors	Molten salt reactors	Microreactors	

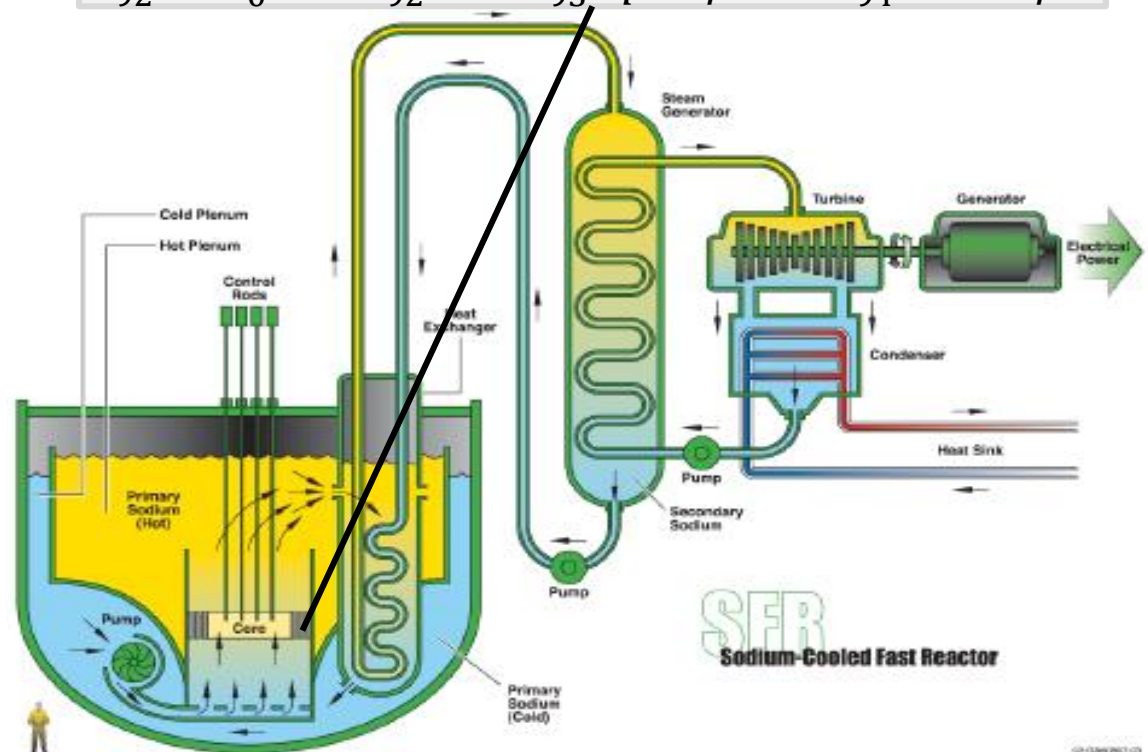
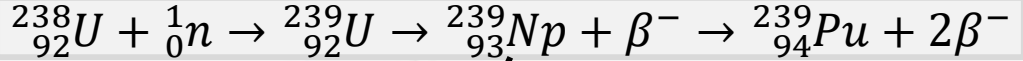
Source: ARIS 2020 supplementary source

Costs of an SMR taking into account learning, and doubling of production: Westinghouse SMR (225 MW) in comparison with AP 1000 (1,117 MWe)



Act 1: “Invention“ of fast reactors, and expectation of innovation: Sodium-cooled fast reactor (SFR) for plutonium breeding

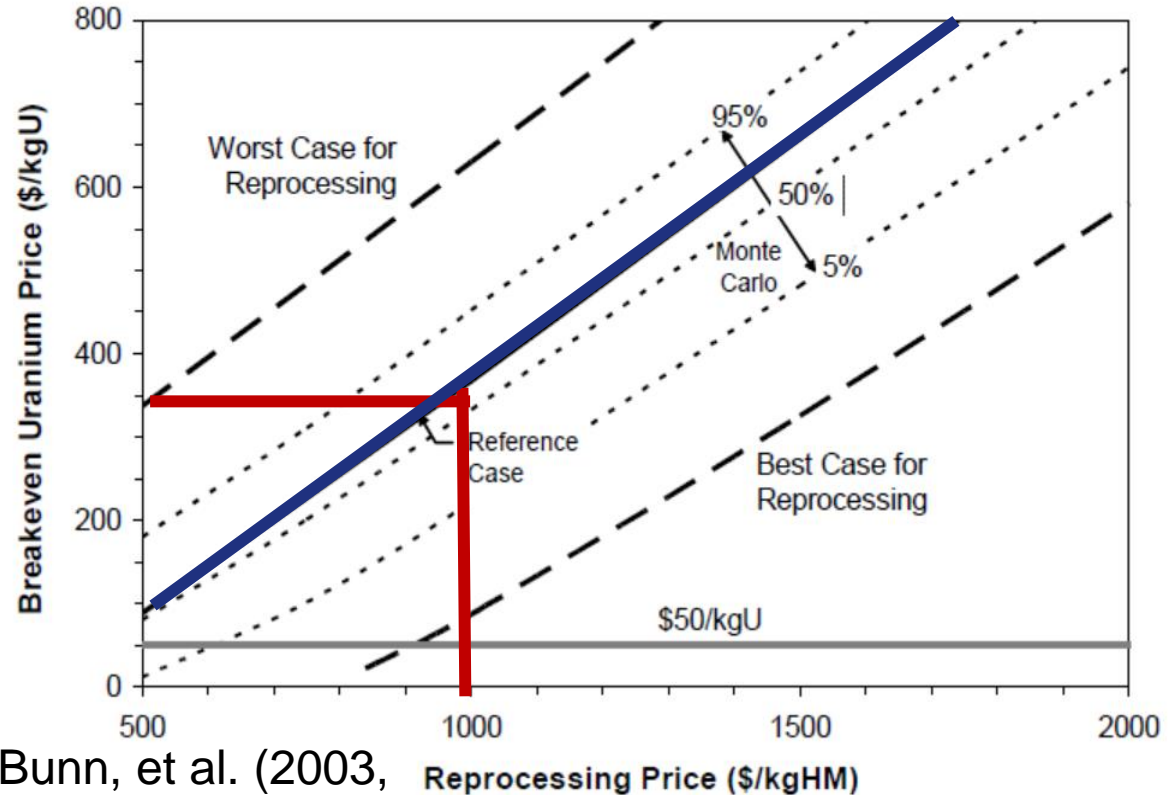
- Invented by Leo Szilard (1944), first test breeder (1947)
- „Breeding“ takes place in the „blanket“; inverse functioning also possible, plutonium „burner“ (ratio of final to fissile content less than one)
- Theoretically „simple“ (Szilard, 1946, Heisenberg, 1953), but large-scale implementation not successful until today
- Shortage of uranium and high energy potential favor innovation of the fast reactor and the “plutonium economy” (Szilard 1947; 1972)



Source: Pistner, et al. (2017, 40)

Breakeven uranium price as a function of the cost of reprocessing

- 322 US-\$/t for reprocessing cost of 1,000 US-\$/t
- Much higher break-even prices possible
- At a uranium price of \$ 50/kg, the equilibrium cost of reprocessing would need to decrease to \$ 420, a 58% reduction

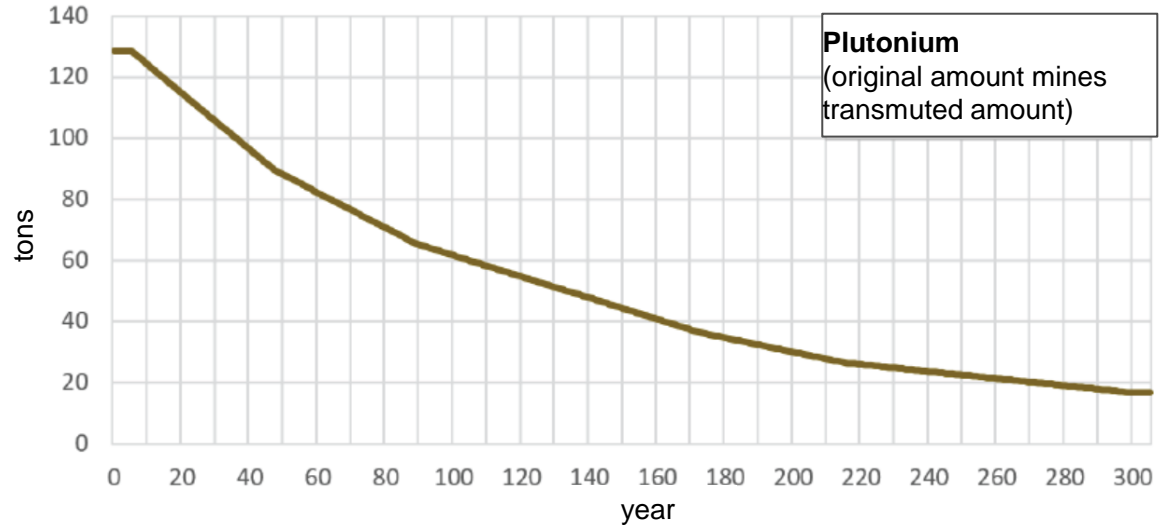


Bunn, et al. (2003, 18)

Can plutonium be efficiently abated?

Abatement of plutonium through transmutation in fast reactors (FR)

- Some reduction of plutonium is possible, but not all
- Very long-time frames (> 300 a)
- Technologies are uncertain
- Very high, uncertain costs



The figure shows the initial amount mines the transmuted amount. Plutonium in a fast breeder scenario. At the end of the scenario (after 300 years), at least 21.8 tons of plutonium remain, of which 2.3 t are in reprocessing and fuel fabrication.

Frieß, et al.
(2021, 197)

Infrastructure requirements and low- and medium-level waste for the P&T scenario with fast reactors

- Hydrochemical reprocessing, and MOX-fuel production
- Additional construction of 23 nuclear power plants, 19 reprocessing plants, and seven fuel factories
- Additional 316,500 m³ low- and medium-level waste (> Schacht Konrad in Germany at present)

Frieß, et al.
(2021, 201)

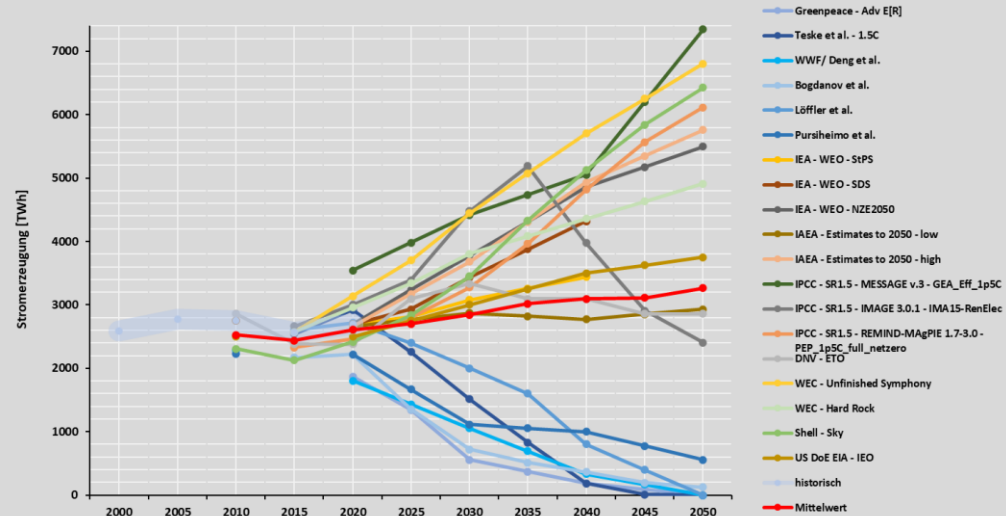
	Amount	Comment	Total
Reactors			
Decommissioning	23 installations	5,000 m ³ /installation	115,000 m ³
Operation	23 installations, 42 years each	42 years * 45 m ³ /year	43,500 m ³
Reprocessing plant for light-water fuel			
Decommissioning	1	36,000 m ³	36,000 m ³
Operation	10,113 t HM	6.59 m ³ /t HM	66,600 m ³
Reprocessing plant (reactor MOX-fuel)			
Decommissioning	18	1,500 m ³	27,000 m ³
Operation	2,710 t HM	6.59 m ³ /t HM	17,900 m ³
Fuel fabrication			
Decommissioning	7	1,000 m ³	7,000 m ³
Operation	2,945 t HM	1.2 m ³ /t HM	3,500 m ³
Total			316,500 m³

Energiewirtschaftliche Sicht und Energieszenarien

Diskurs zur zukünftigen Bedeutung: Energieszenarien mit „mehr“ oder „keiner“ Kernkraft - 1

- Es gibt zwei klare Gruppen bei Energieszenarien
- Etliche Teams finden konsistent Szenarien, die ohne Kernkraft auskommen, kosteneffizient sind, und zu 100% Erneuerbaren Energien führen
- Eine andere Gruppe schlussfolgert einen zunehmenden Bedarf an Kernkraft, dies umfasst internationale Organisationen, auch den IPCC mit IAM Szenarien
- Der höchste Wert in Szenarien stammt vom aktuellen NZE Szenario der Internationalen Energieagentur, die zeitgleich (!) bestätigt, dass Kernkraft die teuerste Art der Strombereitstellung ist

Quelle: [Abbildung 5, Wealer et al. 2021. Diskussionsbeiträge der Scientists for Future 9](#)



4. Atomenergie in der sozialökologischen Transformation und Atomwende

Atomenergie in der sozialökologischen Transformation

- Die „Große Transformation“ als Weg zu einer nachhaltigen und klimaneutralen Gesellschaft
- Nachhaltige Entwicklung – „17 Sustainable Development Goals“
- Herausforderung: Reale Gestaltung der sozial-ökologischen Transformation (politisch und gesellschaftlich)



WBGU 2011; Verbruggen et al. 2014

https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2011/pdf/wbgu_jg2011_ZfE.pdf und <http://www.denkwerkzukunft.de/img/articleimgs/thumb3655.jpg>

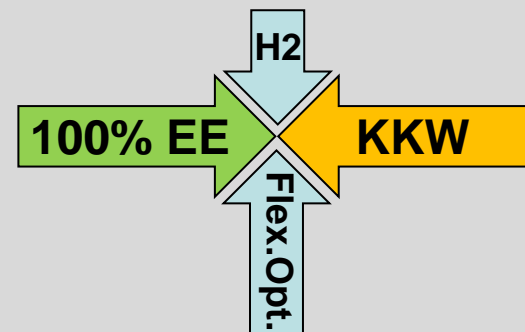
Transformationsresistenz

- Verursachung und Verfestigung von Pfadabhängigkeiten und Lock-In- Effekten

Quellen: Seto et al. 2016; Unruh 2000

- Atomenergie „gegen“ oder „mit“ Erneuerbaren Energien?
→ Transformationsresistenz

Stilllegung der Atomkraftwerke als notwendige Bedingung für den Aufbau eines nachhaltigen und bürgernahen 100% EE-Systems



Eigene Darstellung

Atomwende und Endlagersuche

- Der Begriff des „Atomausstiegs“ ist irreführend: „*Aus Atomen kann man nicht aussteigen*“
- Die Energiewende entstand in DE aus „atompolitischer Wende“
- Stilllegung der restlichen KKWs als zentrale Voraussetzung für erfolgreiche Endlagersuche

„Atomwende“ zur Vollendung des Atomausstiegs

Quellen: BMU 2021

Quellen: Krause et al. 1980; Mueschen and Romberg 1986; Brunnengräber 2016; Hirschhausen 2018



https://www.endlagersuche-infoplattform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/PublikationenMediathekSlider/journalisten-broschuere.pdf?__blob=publicationFile&v=6 und <https://pbs.twimg.com/media/Dy3yG0MwWAAErRr.jpg>

Scientists for Future (S4F) „Kernenergie und Klima“ ...

Kernenergie und Klima

(Version 1.0, Deutsch, 27. Okt. 2021)



Ben Wealer (TU Berlin, DIW Berlin), Christian Breyer (LUT University), Peter Hennicke (Wuppertal-Institut), Helmut Hirsch (cervus nuclear consulting), Christian von Hirschhausen (TU Berlin, DIW Berlin), Peter Klafka (Scientists for Future), Helga Kromp-Kolb (BoKu Wien), Fabian Präger (TU Berlin), Björn Steigerwald (TU Berlin, DIW Berlin), Thure Traber (Energy Watch Group), Franz Baumann (New York University), Anke Herold (Öko-Institut), Claudia Kemfert (DIW Berlin, SRU), Wolfgang Kromp (BoKu Wien), Wolfgang Liebert (BoKu Wien) und Klaus Mischen (Scientists for Future)¹

Fazit: Im vorliegenden Diskussionsbeitrag wird eine Vielzahl von Argumenten geprüft und am bestehenden Stand der Forschung abgeglichen. Dabei bestätigt sich die Einschätzung der Scientists for Future aus dem Diskussionsbeitrag „Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland“ vom Juli 2021, dass Kernenergie nicht in der Lage ist, in der verbleibenden Zeit einen sinnvollen Beitrag zum Umbau zu einer klimaverträglichen Energieversorgung zu leisten. Kernkraft ist *zu gefährlich, zu teuer und zu langsam verfügbar*; darüber hinaus ist Kernkraft *zu transformationsresistent*, d.h. sie blockiert den notwendigen sozial-ökologischen Transformationsprozess, ohne den ambitionierte Klimaschutzziele nicht erreichbar sind.

Zu finden unter:
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5573719>



Literaturverzeichnis

- *BMU. 2021. "12 Punkte für die Vollendung des Atomausstiegs – die Position des Bundesumweltministeriums." Positionspapier. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.*
- *Brunnengräber, Achim. 2016. "Die atompolitische Wende - Paradigmenwechsel, alte und neue Narrative und Kräfteverschiebungen im Umgang mit radioaktiven Abfällen." In Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll, 13–32. Baden-Baden: Nomos, Edition Sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft.*
- *Grünwald, Reinhard, and Claudio Caviezel. 2017. "Lastfolgefähigkeit Deutscher Kernkraftwerke: Monitoring." 21. TAB-Hintergrundpapier. Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag.*
- *Hirschhausen, Christian von. 2018. "German Energy and Climate Policies: A Historical Overview." In Energiewende "Made in Germany": Low Carbon Electricity Sector Reform in the European Context, edited by Christian von Hirschhausen, Clemens Gerbaulet, Claudia Kemfert, Casimir Lorenz, and Pao-Yu Oei, 17–44. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.*
- *Hirth, Lion, Falko Ueckerdt, and Ottmar Edenhofer. 2015. "Integration Costs Revisited – An Economic Framework for Wind and Solar Variability." Renewable Energy, no. 74 (February): 925–939.*
- *Kendziorski, Mario, Claudia Kemfert, Fabian Präger, Christian von Hirschhausen, Robin Sogalla, Björn Steigerwald, Ben Wealer, Richard Weinhold, and Christoph Weyhing. 2021. "Atomwende: Abschaltung von Kernkraftwerken eröffnet Perspektiven für die Endlagersuche." Wochenbericht 88: 767–775.*
- *Krause, Florentin, Hartmut Bossel, and Karl-Friedrich Müller-Reissmann. 1980. Energie-Wende: Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran. Edited by Öko-Institut Freiburg. Frankfurt am Main, Germany: S. Fischer.*
- *LUT University, Agora Energiewende, Renewable Energy Institute, Dmitrii Bogdanov, Ayobami Oyewo Solomon, Theophilus Mensah Nii Odai, Tatsuhiro Shimoyama, Kristina Sadovskaia, Rasul Satymov, et al. 2021. "Renewable Pathways to Climate-Neutral Japan." Deutschland, Japan: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Renewable Energy Institute (REI).*
- *Morris, Craig. 2018. "Can Reactors React? Is a Decarbonized Electricity System with a Mix of Fluctuating Renewables and Nuclear Reasonable?" IASS Discussion Paper, January.*
- *Morris, Craig, and Martin Pehnt. 2016. "Energy Transition - The German Energiewende." Berlin, Germany: Heinrich Böll Stiftung.*
- *Mueschen, Klaus, and Erika Romberg. 1986. Strom Ohne Atom: Ausstieg Und Energiewende. Ein Report Des Oeko-Instituts Freiburg-Breisgau. Frankfurt a.M: Fischer.*
- *OECD/NEA. 2012. The Economics of Long-Term Operation of Nuclear Power Plants. Nuclear Development. OECD.*
- *Seto, Karen C., Steven J. Davis, Ronald B. Mitchell, Eleanor C. Stokes, Gregory Unruh, and Diana Ürge-Vorsatz. 2016. "Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications." Annual Review of Environment and Resources 41 (1): 425–452.*
- *Unruh, Gregory C. 2000. "Understanding Carbon Lock-In." Energy Policy 28 (12): 817–830.*
- *Verbruggen, Aviel, and Erik Laes. 2015. "Sustainability Assessment of Nuclear Power: Discourse Analysis of IAEA and IPCC Frameworks." Environmental Science & Policy 51 (August): 170–180.*
- *Verbruggen, Aviel, Erik Laes, and Sanne Lemmens. 2014. "Assessment of the Actual Sustainability of Nuclear Fission Power." Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 (April): 16–28.*
- *WBGU. 2011. Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation [Hauptgutachten]. 2. veränderte Auflage. Berlin, Deutschland: WBGU.*