

Kernspaltung

Zurück in die Zukunft?

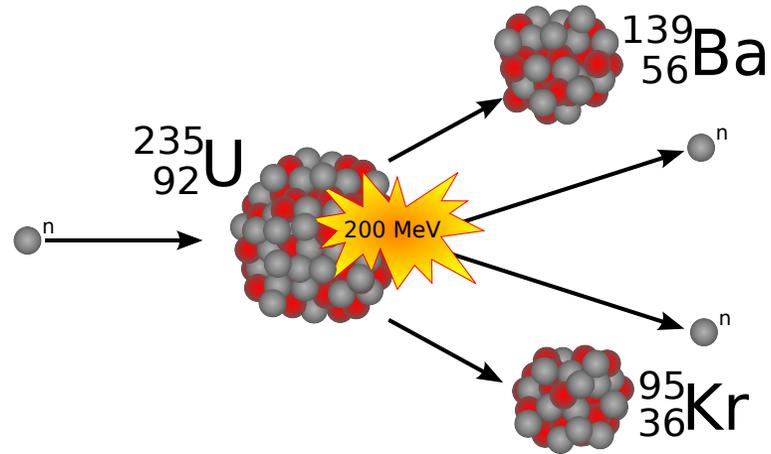
M. Anton Ertl, TU Wien

Qualifikation und Quellen

- Wie qualifiziert bin ich zu diesem Thema?
Kein Experte, aber besser informiert als die meisten
- englische und deutsche Wikipedia
Trotz *neutralem Standpunkt* manchmal zu positive Darstellung
z.B. Borsäure in Druck- und Siedewasserreaktoren
- Etienne Parent: Nuclear Fuel Cycles for Mid-Century Deployment
Master's thesis, MIT, 2003
- Wäre ein Experte besser? C. E. M. Joad:

“You can't get a parson to admit the arguments of an agnostic, because his salary depends on his not letting the agnostic refute him.”
- Referenzen in Kommentaren in
<https://www.complang.tuwien.ac.at/anton/fission/slides.tex>

Grundlagen: Kernspaltung



- Kettenreaktion
- Sehr wertvoll: Neutronen
- Wertvoll: Spaltbares Material: ^{235}U , ^{239}Pu
- Natururan enthält 0.7% ^{235}U , 99.3% ^{238}U
- Reaktorbrennstoff: angereichertes Uran, MOX
Leichtwasserreaktoren 3%–10% ^{235}U (LEU)
schnelle Reaktoren $\geq 20\%$ ^{235}U (HEU)

Grundlagen: Wirkungsquerschnitt, Moderation

- langsame (*thermische*) Neutronen reagieren anders als schnelle
- Wirkungsquerschnitt mit Neutronen (in barn)

Kern	thermisch			schnell		
	Streuung	Einfangen	Spaltung	Streuung	Einfangen	Spaltung
^{235}U	10	99	583	4	0,09	1
^{239}Pu	8	269	748	5	0,05	2
^{238}U	9	2	0,00002	5	0,07	0,3
^1H	20	0,2		4	0,00004	
^{135}Xe	400.000	2.000.000		5	0,0008	

- thermische Reaktoren benötigen weniger Anreicherung als schnelle (Proliferation, Sicherheit)
- Temperatur in thermischen Reaktoren ändert Wirkungsquerschnitt (Sicherheit)
- Wirkungsquerschnitt begrenzt Transmutation (Atommüll)

Grundlagen: Radioaktivität

- Ionisierende Strahlung
- Linear No-Threshold (LNT) model:
Krebswahrscheinlichkeit 5.5%/Sv
für sehr niedrige Strahlungsdosen nicht nachweisbar
andere Modelle wurden in diesem Bereich nicht nachgewiesen
LNT wird sicherheitshalber oft verwendet
- trotzdem Grenzwerte

Leichtwasserreaktor und Sicherheit

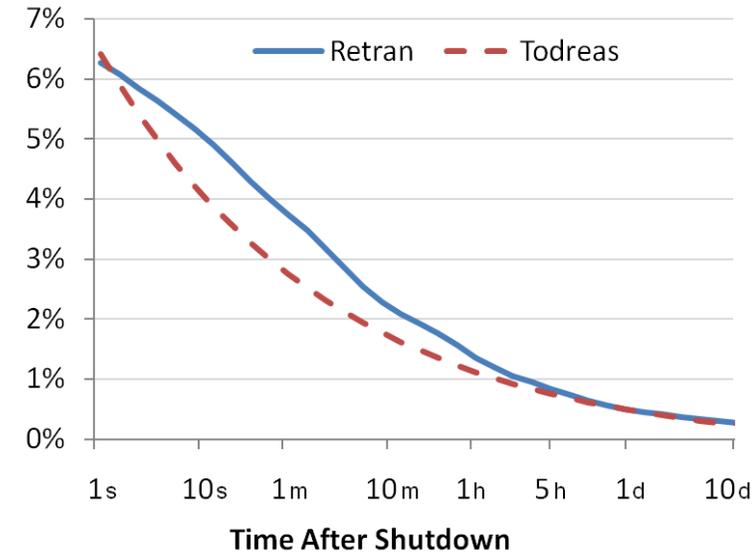
- Wasser als Moderator
- Wasser als Kühlmittel
- niedrig angereichertes Uran (LEU)
- Kühlmittelverlust → kein Moderator → keine Kettenreaktion
- thermische Neutronen →
bei höherer Temperatur absorbiert ^{238}U mehr Neutronen
- Barrieren für radioaktive Stoffe
1) Feststoff 2) Brennstabhüllen 3) Reaktordruckbehälter 4) Containment
- Reaktor expandiert thermisch → unterkritisch
- Generation III(+): Core Catcher
- Generation III(+): mehr passive Sicherheit

Sicherheitsberechnungen

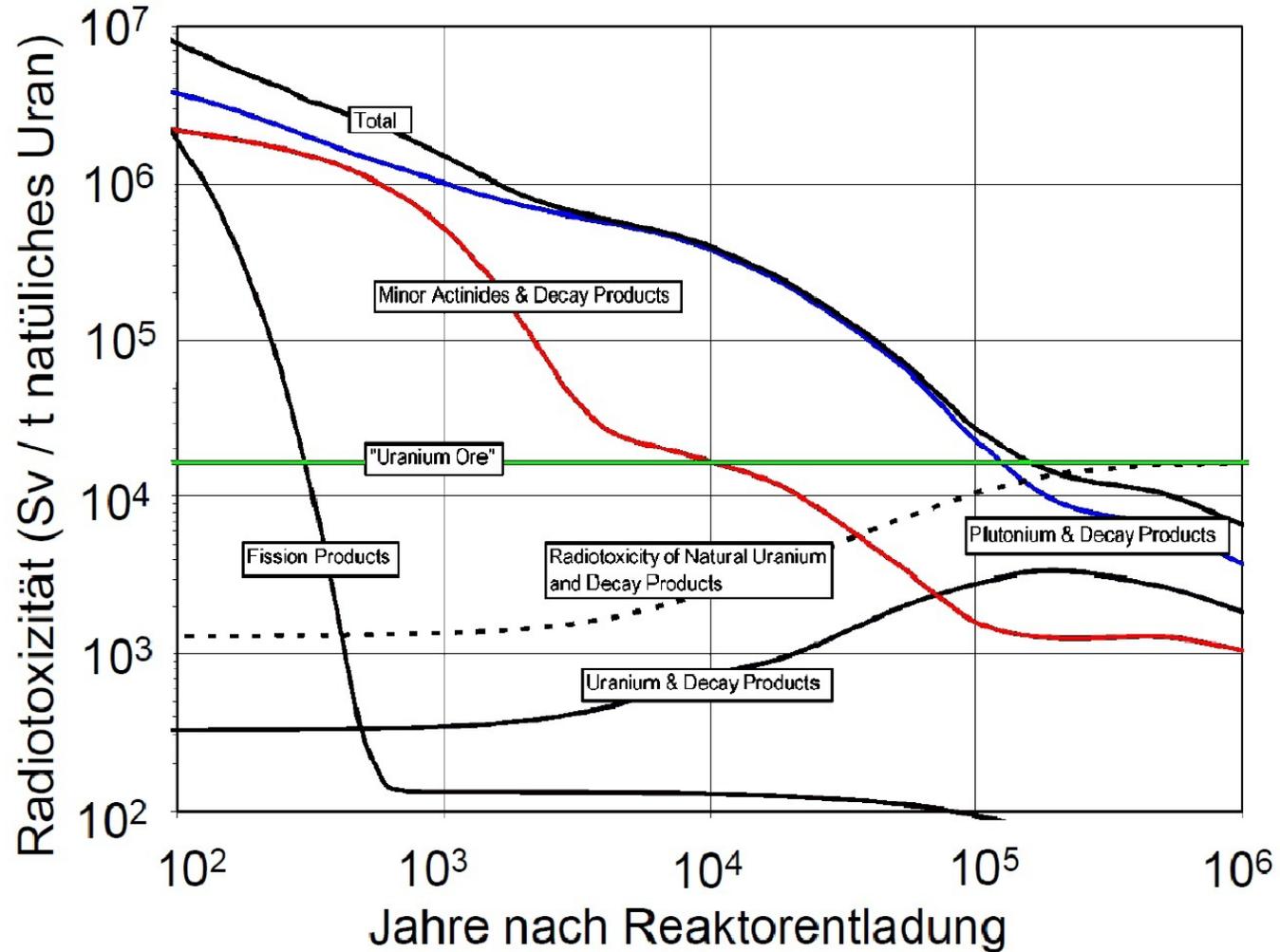
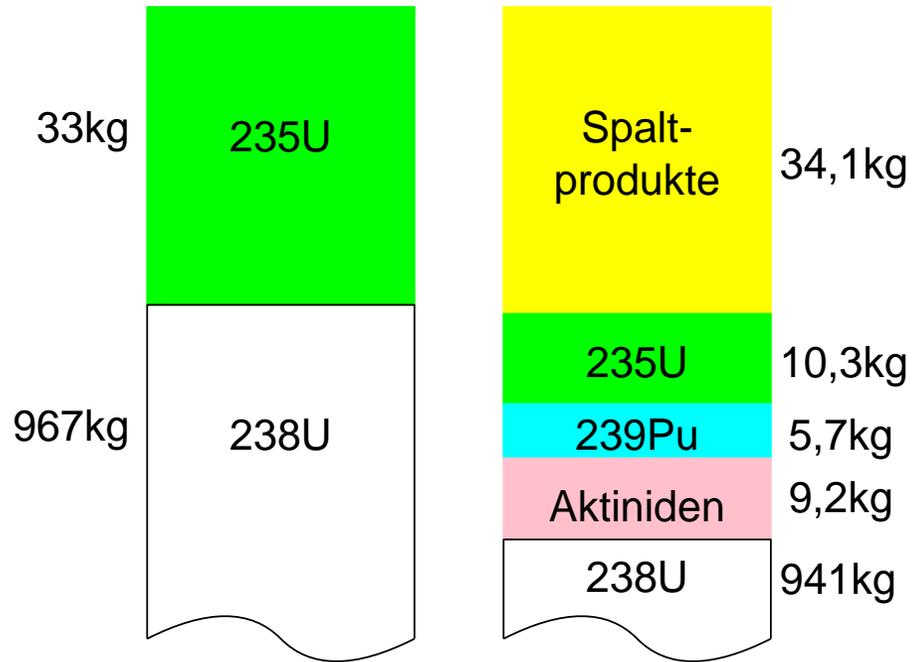
- Probabilistische Sicherheitsanalyse
Annahmen
oft werden unabhängige Störfälle angenommen
- begrenzte Haftpflicht
versichert: 0,256G€
Deckungsvorsorge und Haftung: 2,5G€
geschätzter möglicher Schaden: 2500G€-5500G€
- NASA-Management nahm 1:100.000 für katastrophalen Fehler bei Space-Shuttle-Flug an

Sicherheit: Nachzerfallswärme

- Kyschtym/Majak WAA (1957):
Kühlungsausfall, chemische Explosion
- Three Mile Island 2 (1979):
Kühlungsausfall nach knapp 4 Monaten Betrieb
Teilweise Kernschmelze
- Fukushima I 1-3 (2011)
bei Erdbeben abgeschaltet
55min danach: Notstromgeneratoren überschwemmt
Kühlungsausfall → Kernschmelze
- Fukushima I 4-6 (2011)
schon vorher ausser Betrieb, heiße Brennelemente im Abklingbecken
Kühlung konnte vor dem Verdampfen des Wassers wiederhergestellt werden
Ebenso im zentralen Abklingbecken
- Fukushima II 1-4 (2011)
Stromversorgung konnte rechtzeitig wiederhergestellt werden



Atommüll



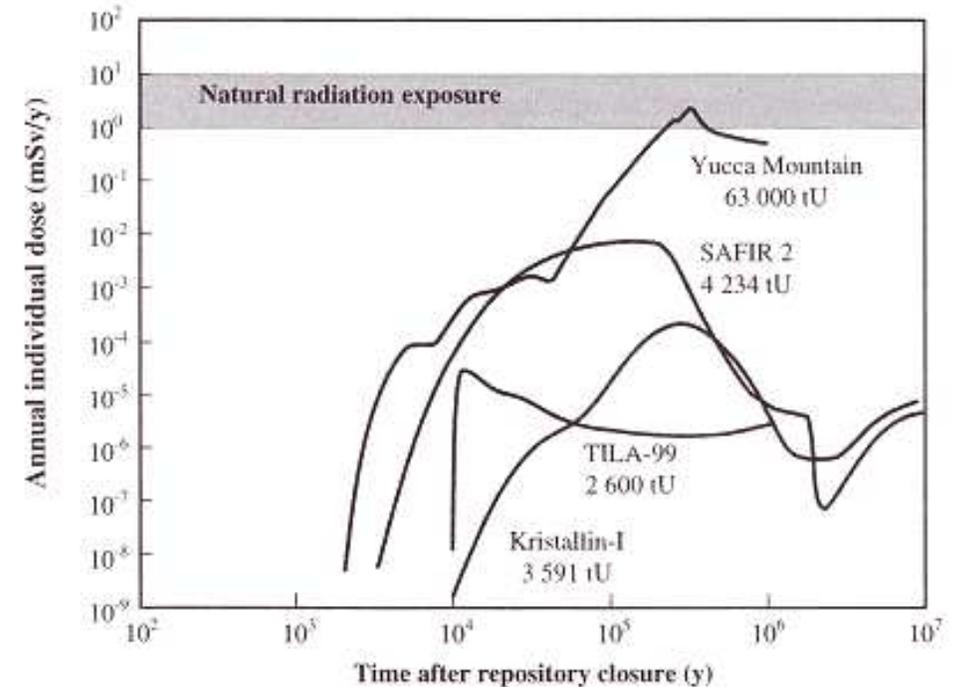
Aktiniden	Halbwertszeit	4.5–7%	Spaltprodukte	0.04–1.25%	<0.01%
	4–6a			¹⁵⁵ Eu	
²⁴⁴ Cm ²⁴¹ Pu ²⁵⁰ Cf	10–29a	⁹⁰ Sr		⁸⁵ Kr	^{113m} Cd
²³² U ²³⁸ Pu ²⁴³ Cm	29–97a	¹³⁷ Cs		¹⁵¹ Sm	^{121m} Sn
²⁴⁸ Bk ²⁴⁹ Cf ^{242m} Am	141–351a				
²⁴¹ Am ²⁵¹ Cf	430–900a				
²⁴⁷ Bk	1300–1600a				
²⁴⁰ Pu ²²⁹ Th ²⁴⁶ Cm ²⁴³ Am	4700–7400a				
²⁴⁵ Cm ²⁵⁰ Cm	8300–8500a				
²³⁹ Pu	24100a				
²³⁶ Np ²³³ U	150–250ka	⁹⁹ Tc		¹²⁶ Sn	
²⁴⁸ Cm ²⁴² Pu	327–375ka			⁷⁹ Se	
	1530ka	⁹³ Zr			
²³⁷ Np	2100–6500ka	¹³⁵ Cs		¹⁰⁷ Pd	
²³⁶ U ²⁴⁷ Cm	15–24Ma			¹²⁹ I	
²⁴⁴ Pu	80Ma				
²³² Th ²³⁸ U ²³⁵ U	0,7–14,1Ga				
spaltbar					
		Neutroneneinfang 8-50, > 3000 barns			

Atommüll

- Langlebige Radionuklide zerfallen pro Zeiteinheit weniger als kurzlebige aber über die Zeit genauso oft
- Nach dem LNT-Modell ist auch niedrige Radioaktivität gefährlich wenn Lebewesen ihr ausgesetzt werden
- Langlebigkeit macht Radionuklide nicht insgesamt ungefährlicher sondern verteilt die Gefahr auf mehr Generationen
- Reaktoren reduzieren Uran aber dafür muss es erst gefördert werden

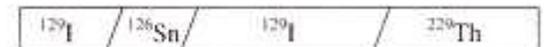
Atommüll: Deponieren

- Zwischenlagerung für 100 Jahre mit Kühlung
- Endlagerung in geologisch stabiler Formation Salz, Ton, Granit
- Endlager Asse (früher Salzbergwerk) Wassereinbrüche Abfälle werden wieder herausgeholt



Dominant nuclides:

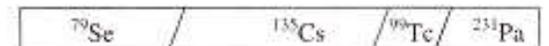
TILA-99
spent UOX, reducing env.



Yucca Mountain
spent UOX, oxidising env.



Kristallin-I
vitrified HLW in granite



SAFIR 2, provisional
vitrified HLW in clay



Atommüll: Transmutation

- langlebige Isotope mit Neutronen bestrahlen, z.B. $^{99}\text{Tc} + n \rightarrow ^{100}\text{Tc} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$
- aber: Neutronen sind kostbar, kommen nur aus Kernreaktoren
der Betrieb des Reaktors produziert weiteren Atommüll
- Aktiniden spalten (v.a. in schnellen Reaktoren)
- langlebige Isotope von stabilen und kurzlebigen separieren
nur Elemente können chemisch separiert werden (z.B. ^{135}Cs , ^{137}Cs , ^{236}U , ^{238}U)
- lange Bestrahlungszeiten nötig
Halbwertszeit in thermischen Reaktor: 51a (^{99}Tc , ^{129}I) bis 4400a (^{126}Sn)
Halbwertszeit in schnellem Reaktor: 44a (^{107}Pd) bis 4400a (^{126}Sn)
Aktiniden in schnellem Reaktor: kürzer, aber: 24a (^{240}Pu), 32a (^{242}Pu)
- Regelmässige Wiederaufarbeitung nötig
Aktiniden werden immer unangenehmer
- wird nicht zur Atommüllreduzierung verwendet

Wiederaufarbeitung

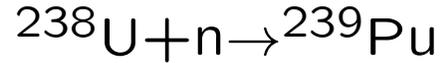
- Chemische Trennung der Elemente
- PUREX trennt in Uran/Plutonium/Rest
Plutonium → MOX-Brennstoff
andere Verfahren werden nicht großtechnisch angewandt
- Radioaktive Materialien flüssig oder gasförmig
keine Sicherheitsbarrieren Feststoff und Brennstabhülle
- Volumen des Atommülls erhöht sich
- Kostet mehr als für Endlagerung vorgesehen
MOX-Brennstoff teurer als solche aus frischem Uran
MOX-Brennstoff nur begrenzt verwendbar
wird in Europa gemacht, MOX-Brennstoff wird nicht wiederaufgearbeitet
Deutschland läßt seit 2005 nicht mehr wiederaufarbeiten
WAA Sellafield geschlossen

Spaltbares Material

- Natürlich vorkommend: ^{235}U , 0.7% des Natururans
- Wieviele Reserven?
- Bis in die 1980er machte man sich Sorgen, heute nicht
- Diese Sorgen machten viele Konzepte attraktiv:
 - Schnelle Brüter
 - Wiederaufarbeitung
 - Thoriumzyklus

Spaltbares Material: Erbrüten

- Erbrüten (Konversion)



- Im Konvoi-Leichtwasserreaktor Konversionsrate $\approx 0,6$
nicht jedes Neutron bewirkt Spaltung (^{235}U 81%, ^{239}Pu 63%, ^{233}U 89%)
Spaltprodukte fangen Neutronen ein
Leichter Wasserstoff fängt Neutronen ein
- 65% (Konvoi) bzw. 80% (EPR geplant) der Energie aus erbrütetem Plutonium

Schnelle Brüter

- schnelle Neutronen
- mehr Anreicherung ist nötig
- bei Kühlmittelverlust weiterhin Kettenreaktion
- bei Kernschmelze weiterhin Kettenreaktion
- + mehr Neutronen übrig, Konversionsrate > 1 möglich
11% Spaltungswahrscheinlichkeit von ^{238}U
Spaltprodukte fangen weniger Neutronen ein
- + ca. 60-mal bessere Ausnutzung von Natururan
- Kühlmittel bei Zimmertemperatur fest (Natrium, Blei oder Salz)
Gasgekühlter schneller Reaktor unerprobt
- Superphénix 9.2% Energieverfügbarkeit, 7,9% Nutzungsgrad (load factor)
- Im Westen keiner mehr in Betrieb

Thoriumzyklus



+ mehr Thorium als Uran auf der Erde

– Benötigt spaltbares Material (^{235}U) zum Starten

benötigt Konversionsrate ≥ 1

höhere Anreicherung, um ^{238}U durch ^{232}Th zu ersetzen

THTR-300: auf 93% ^{235}U angereichertes Uran, 10 mal soviel ^{232}Th

70% der Energie von ^{235}U , 30% von ^{233}U

+ weniger Transurane

– aber ^{231}Pa ($\lambda=32760\text{a}$) und ^{232}U (γ -Strahlung)

– ^{233}Pa $\lambda=27\text{d}$, absorbiert Neutronen, ca. 1,3% ^{234}U statt ^{233}U

- 15 Reaktoren abgeschaltet, einer (13MW) noch in Betrieb

Moderne Konzepte?

- IV. Generation: Forschungsverbund
 - Schneller gasgekühlter Reaktor (GFR)
 - Höchsttemperaturreaktor (VHTR, thermisch)
 - Überkritischer Leichtwasserreaktor (SCWR, thermisch)
 - Schneller natriumgekühlter Reaktor (SFR)
 - Schneller bleigekühlter Reaktor (LFR)
 - Flüssigsalzreaktor (MSR, thermisch)
- teilweise unerprobte Konzepte
 - teilweise erprobt und aufgegeben
- Letzter Schrei: Small modular reactors
 - < 300MW, übliche Versprechungen (sicherer, billiger)

Reaktoren der III. Generation (III+)

- Evolutionäre Weiterentwicklung erfolgreicher Reaktorkonzepte
- Ziele
 - Bessere Sicherheit: passive Sicherheit, Core Catcher
 - Bessere thermische Effizienz
 - Standardisierte Designs → geringere Kosten

Reaktoren der III. Generation (III+): Realität

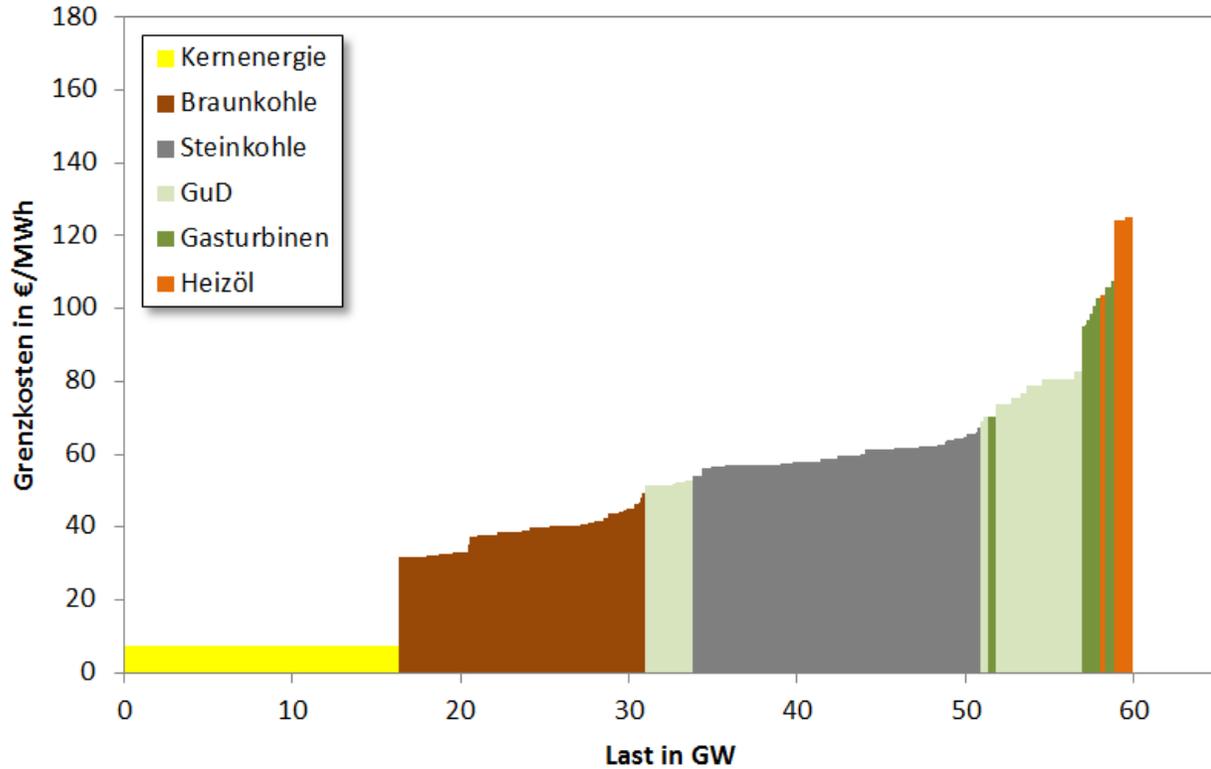
- AP1000 (Westinghouse/Toshiba), 1100MW
 - 2 AP1000 in South Carolina für 9.8G\$, Baustart 2013
 - Bauzeitüberschreitung und Kostenexplosion (25G\$) → Westinghouse pleite
 - Projekt wird 2017 gestoppt, Stromkunden müssen Kredit abbezahlen
 - 2 AP1000 in Georgia, Baustart 2013, erwartet 2023, 14G\$→28,5G\$
 - 4 AP1000 in China, Baustart 2009, fertig 2018, mehr geplant
- EPR (Areva/Framatome), 1600MW
 - Olkiluoto 3: Baustart 2005, sollte für 3.7G€ bis 2009 online sein
 - Geschätzte Kosten 11G€, soll Juli 2022 Strom produzieren
 - Flamanville 3: Baustart 2007, sollte für 3.3G€ 2012 fertig sein
 - soll 2023 fertig sein, 12.7/19.1G€ geschätzte Kosten
 - Taishan 1,2: Baustarts 2009, 2010, geplante Bauzeit 46 Monate
 - haben nach 9 Jahren mit kommerzieller Stromproduktion begonnen
 - Hinkley Point C (2 EPR): Baubeginn 2017, erwartetes Bauende: 2026
 - garantierter Preis £106/MWh (2021), teurer als Erneuerbare

Ist Kernkraft billig?

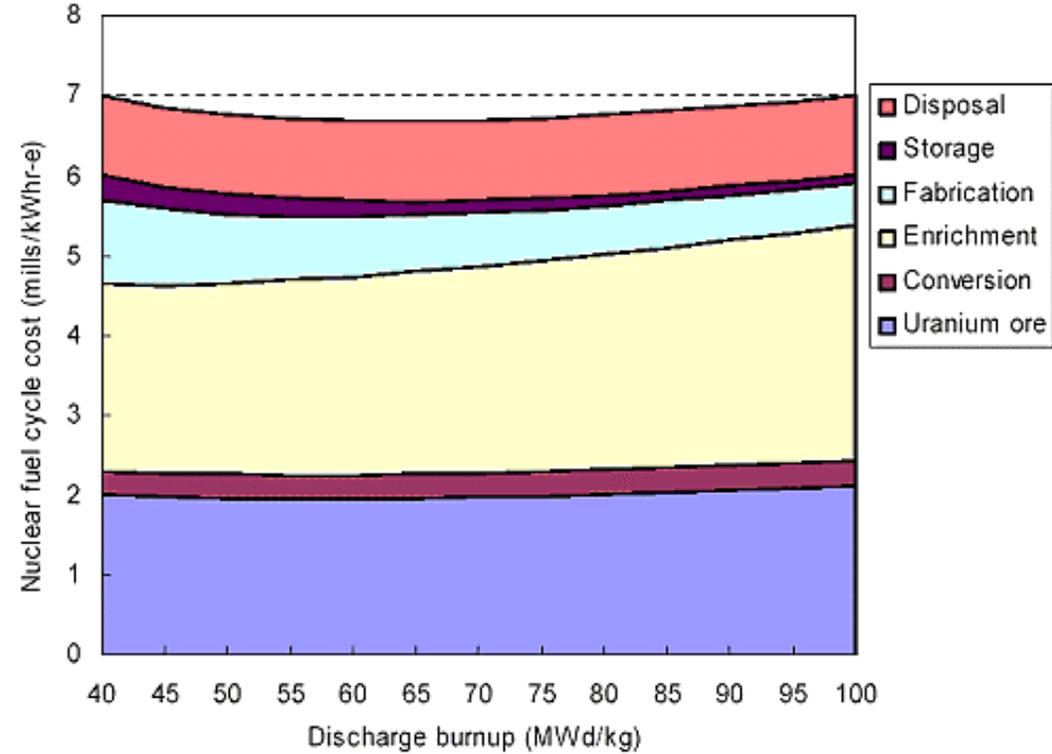
- Lewis Strauss (1954): „Too cheap to meter“
- Deutschland: Subventionen wegen mangelnder Konkurrenzfähigkeit

Ist Kernkraft billig? Grenzkosten

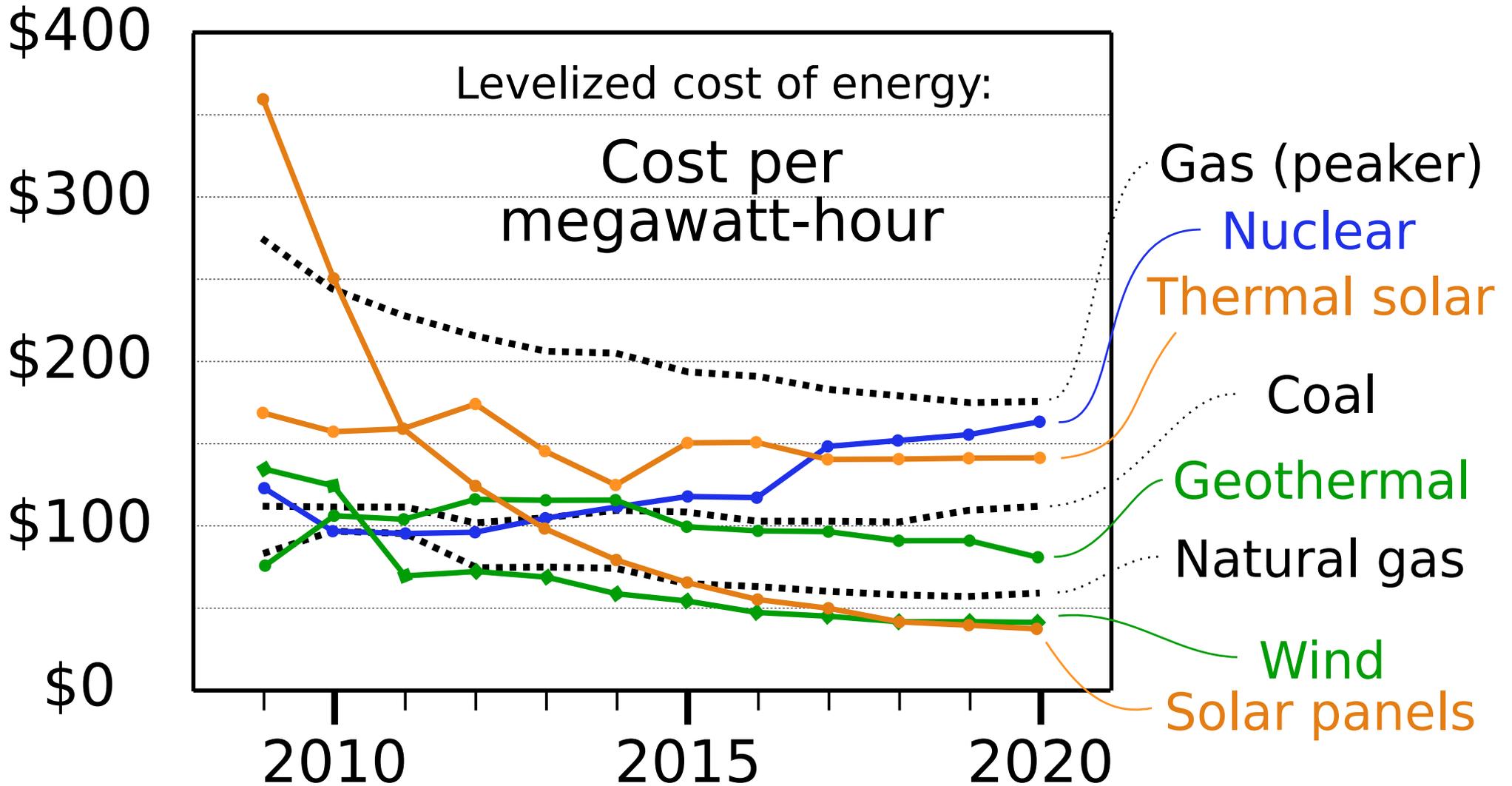
Grenzkosten 2008 BRD



Brennstoffkosten 2003 USA



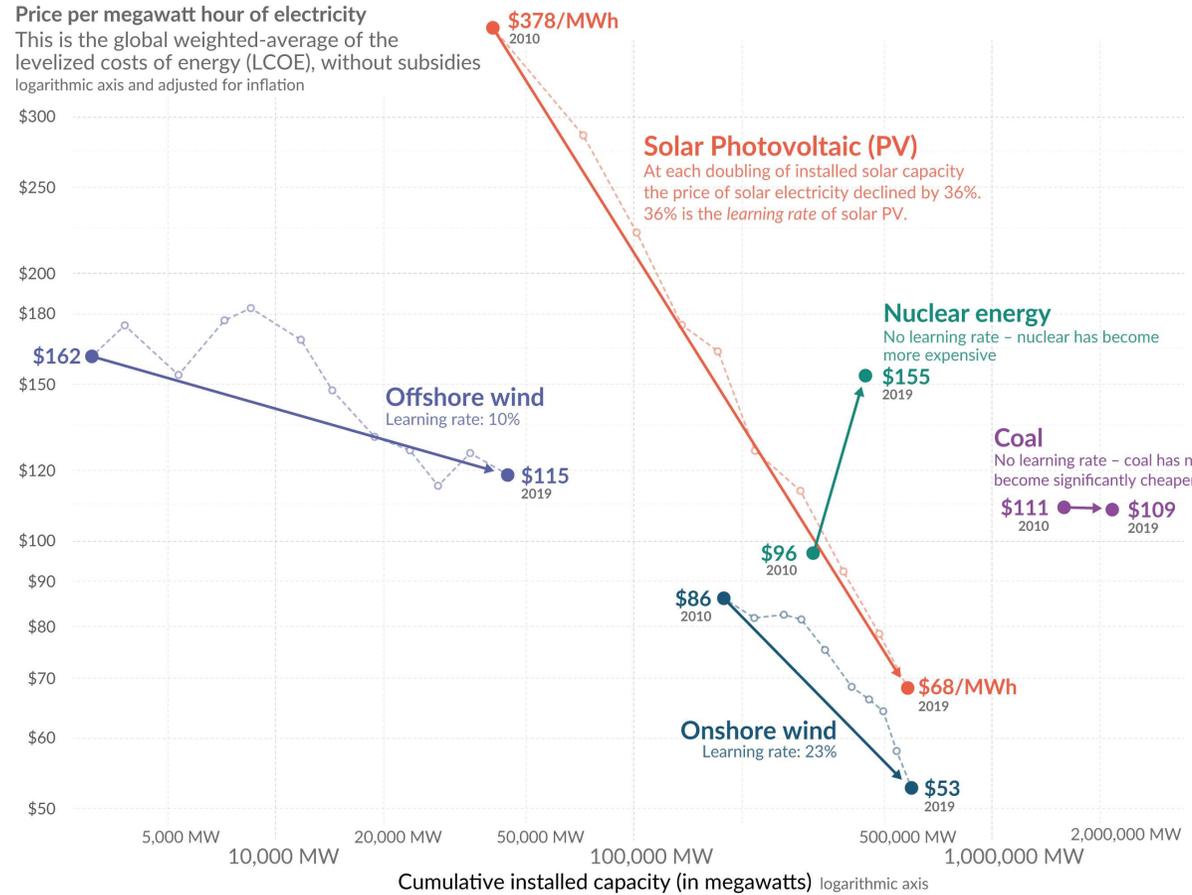
Ist Kernkraft billig? Stromgestehungskosten



inkl. Kapitalkosten, exkl. Verteilung, Pufferung, externe Kosten

Ist Kernkraft billig? Stromgestehungskosten

Electricity from renewables became cheaper as we increased capacity – electricity from nuclear and coal did not



Source: IRENA 2020 for all data on renewable sources; Lazard for the price of electricity from nuclear and coal – IAEA for nuclear capacity and Global Energy Monitor for coal capacity. Gas is not shown because the price between gas peaker and combined cycles differs significantly, and global data on the capacity of each of these sources is not available. The price of electricity from gas has fallen over this decade, but over the longer run it is not following a learning curve.

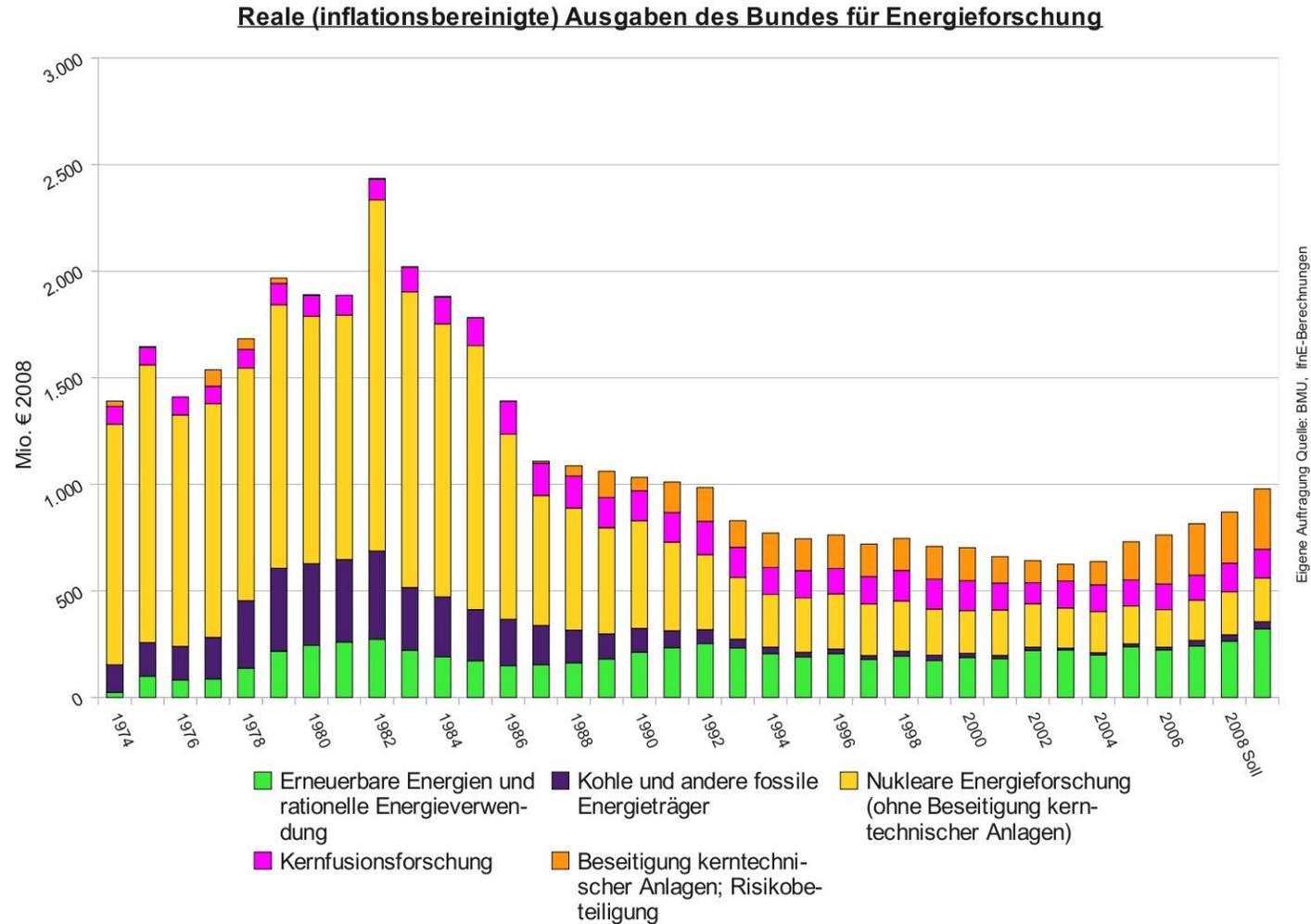
Ist Kernkraft billig?

- Errichtung teuer, aber dann billig?
- Schon errichtete Kernkraftwerke weiterlaufen lassen?
- Deutschland
 - 2010: Bundesregierung beschließt Laufzeitverlängerung (2011 zurück)
 - 2020: RWE schließt Laufzeitverlängerung kategorisch aus
 - 2022: Es wird wieder darüber diskutiert
- USA: KKW wegen Unwirtschaftlichkeit geschlossen oder subventioniert
 - Duane Arnold (2020), Fort Calhoun (2016), Indian Point 2&3 (2021), Kewaunee (2013), Oyster Creek (2018), Pilgrim (2019), Three Mile Island 1 (2019), Vermont Yankee (2014)
 - wegen Unwirtschaftlichkeit abgeschaltet, trotz längerer Lizenzen
 - 2013 Crystal River 3, San Onofre 2&3 schließen wegen technischer Probleme
 - 2020: Subventionen halten Davis-Besse und Perry am Laufen
 - 2021: Subventionen halten Byron und Dresden am Laufen
 - 2021: CO₂-Begrenzungen halten Beaver Valley am Laufen

Ist Kernkraft billig? Atommüll

- USA: Staat übernimmt Endlagerung für \$1/MWh
- Deutschland: Staat übernimmt Endlagerung für 24G€
soll bis 2100 169G€ werden
Wird das reichen?
- Die Übernahme der Entsorgung ist auch eine Art Staatsverschuldung

Ist Kernkraft billig? Forschungssubventionen



Ist Kernkraft billig? Subventionen

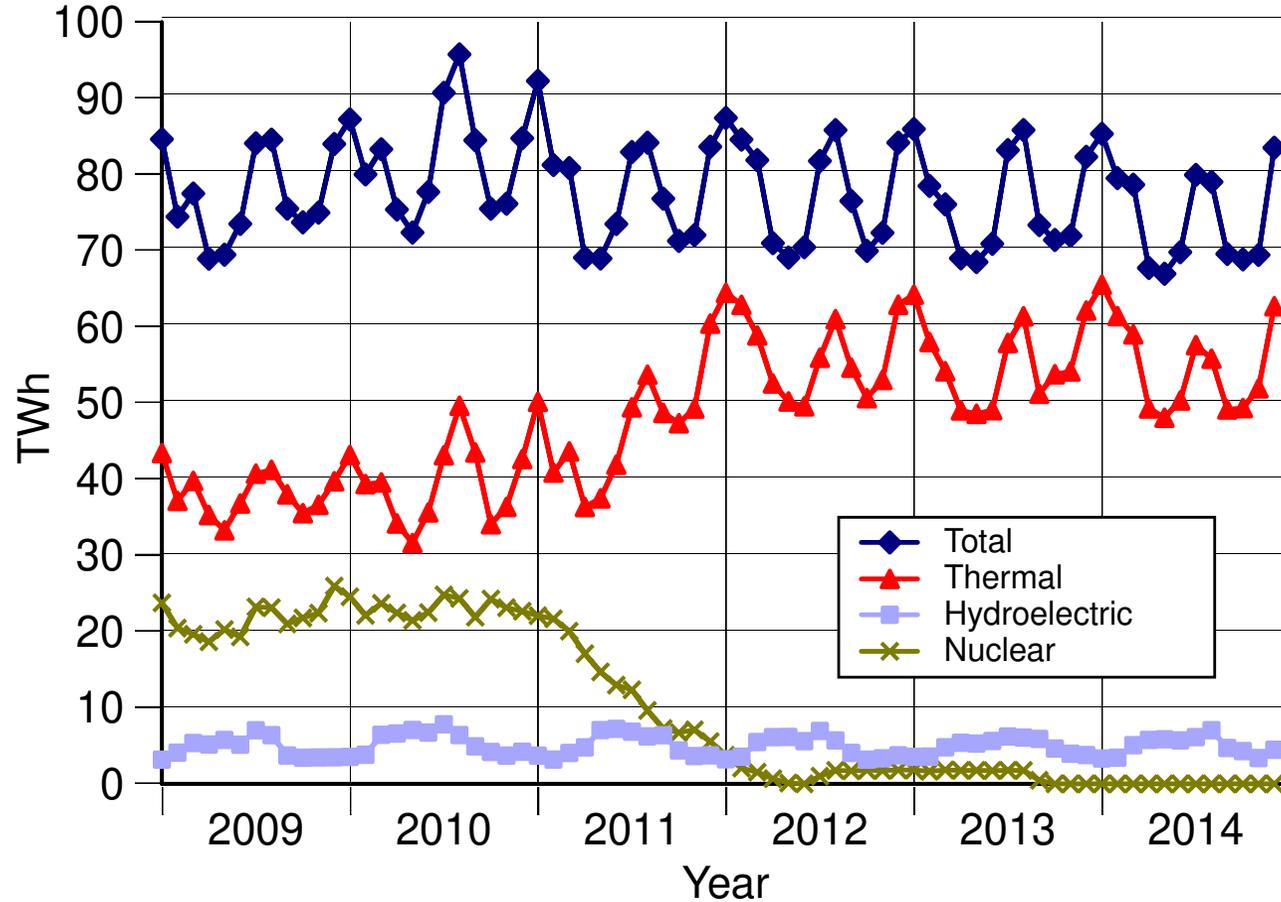
- 2006 subventionierte Deutschland die Kernenergie mit $\geq 3,7 \text{G€}$
- $\geq 22 \text{€}/\text{MWh}$

Ist Kernkraft verlässlich?

- Grundlastkraftwerke
Erzeugen Strom auch dann, wenn er nicht gebraucht wird
Nachtspeicherheizung, Pumpspeicherkraftwerke
- Ausfall von z.B. 1600MW bei internem Störfall
- Tōhoku-Erdbeben 2011: 7 Kernreaktoren (6400MW) offline

Ist Kernkraft verlässlich?

Monthly Electricity Generation in Japan 2009-2014



Ist Kernkraft verlässlich?

- 2016: Schwächen in Stahlteilen der Le Creusot Werke entdeckt
- Reaktorabschaltungen 2016/2017 zur Überprüfung
- Strompreissteigerung, da Frankreich Elektrizität importieren musste

Zusammenfassung

- Trotz Sicherheitsfeatures gibt es Unfälle
- Atommüll muss $> 100.000a$ sicher verwahrt werden
- Wie lange reichen Uranreserven?
Konzepte zur Streckung (tw. wirtschaftlich) wenig erfolgreich
- Kernkraft ist nicht billig
- Zuverlässigkeit: KKW können ausfallen, Flotten können ausfallen
- Neue Konzepte? Meist alte Hüte

Was sonst?

- Verbrauch begrenzen
Auch menschliche Arbeitskraft ist begrenzt
Wir haben trotzdem Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum
- Wasser, Wind, Sonne, Pumpspeicher
- Wasserstoff? Ist keine Energiequelle
Als Energiemedium in einigen Zusammenhängen sinnvoll