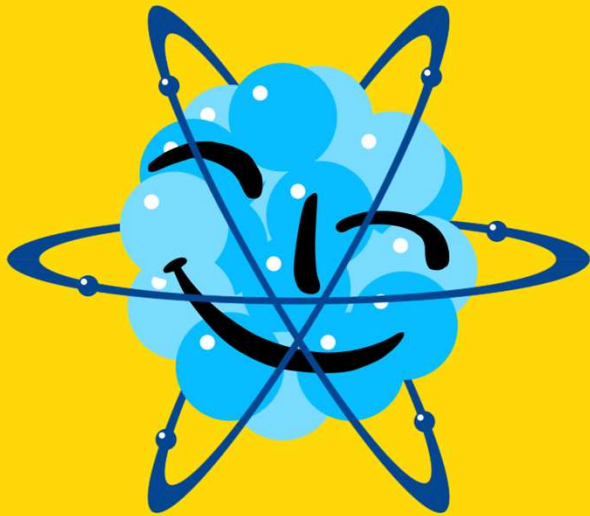




Atomkraft

„Atomkraft ist ein totes Pferd“ (Olaf Scholz)

“Und sie bewegt sich doch” (Galileo Galilei)



Martin Jetter

Inhalt



Die Entwicklung der Kerntechnik

Generationen 1-3 (1950-2020) und Generation 4 (2030+)



Vergleich Kennzahlen

AKWs gegenüber Wind und Sonne



Mythen über Atomkraft

Fakten versus verbreitete Annahmen



Fazit

Zusammenfassung und Ausblick





Die Entwicklung der Kerntechnik

1

Generation 1

Frühe Prototypreaktoren (1950-1965)

2

Generation 2

Kommerzielle Leistungsreaktoren (1965-1995)

3

Generation 3

Verbesserte Sicherheit und Wirtschaftlichkeit (1995-2030)

4

Generation 4

Revolutionäre Reaktorkonzepte (2030+)

Kernenergie Generation 1 bis 3+



Shippingport
Dresden
Fermi I (USA)

Generation 1

Erste Reaktoren der 1950er-60er Jahre. Experimentelle Designs mit grundlegender Sicherheitstechnik.



Biblis A/B
Grundremmingen
LWR/SWR/Candu

Generation 2

Kommerzielle Kraftwerke der 1970er-90er Jahre. Die meisten heute laufenden Reaktoren gehören zu dieser Generation.



HPR-1000 (China)
APR-1400 (Südkorea)
EPR (Frankreich)
Olkiluoto 3 (Finnland)
VVER-1200 (Russland)

Generation 3/3+

Verbesserte Designs mit fortschrittlichen Sicherheitssystemen und längerer Betriebsdauer. Aktuell im Bau befindliche Reaktoren.



Kernenergie Generation 4 Ziele:



Abfallverwerter

Kann alten Atommüll
als Brennstoff
verwenden
und produziert
weniger langlebige
Abfälle.



Sicher

Physikalisch
inhärente Sicherheit
macht
Kernschmelze
unmöglich.



Kostengünstig

Standardisierte
Bauweise und
effizientere
Brennstoffnutzung

**Diese Ziele sind für Generation anzustreben, werden jedoch
nicht in allen Konzepten voll erfüllt werden.**



Die Argumente gegen Kernkraft

Sicherheitsbedenken

Risiko schwerer Unfälle wie Tschernobyl oder Fukushima

Hohe Kosten

Teure Baukosten und lange Bauzeiten

Atommüll-Problem

Langlebige radioaktive Abfälle ohne sichere Endlager

Begrenzte Uranreserven

Erschöpfung der Ressourcen in absehbarer Zeit

Diese Argumente entfallen bei der 4. Generation komplett!

Ziele und Eigenschaften AKWs der 4. Generation



Nachhaltigkeit

- Effektive Nutzung der Kernbrennstoffe
- Nutzung alternativer Brennstoffe (Thorium, Plutonium)
- Minimierung radioaktiver Abfälle

Wirtschaftlichkeit

- Geringe Lebenszykluskosten
- Wirtschaftliche Nebenprodukte (H_2 , Fernwärme)
- Kleine, serienfertigmade Module (SMR)

Sicherheit

- Eigensicherheit: Kernschmelze physikalisch ausgeschlossen
- Keine externe Notfallversorgung nötig
- Sicher gegen terroristische Anschläge

Gen 4 Reaktoren, die vor 2030 in Betrieb gehen sollen



Hermes, USA Oakland Tennessee,
geplanter Start. 2027.



Terrapower (Bill Gates)
geplanter Start 2030



CFR-600 (China, Xiapu, Fujian)
In Betrieb

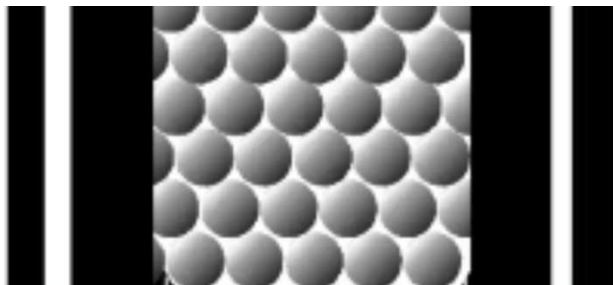


BREST-OD-300 Sibieren, Russland,
geplanter Start. 2026.

... und viele mehr!



HTR-PM Shandong, China,
In Betrieb



Führende Technologie der 4. Generation: Der Kugelhaufen-Reaktor HTR-PM



Deutsche Entwicklung

In den 1960er Jahren in Jülich entwickelt, später stillgelegt.



Erfolgreiche Umsetzung in China

Seit Ende 2023 2×105 MW in Betrieb mit deutschem Design.



Hochtemperatur-Effizienz

750°C ermöglichen Wasserstoffherzeugung und Prozesswärme.

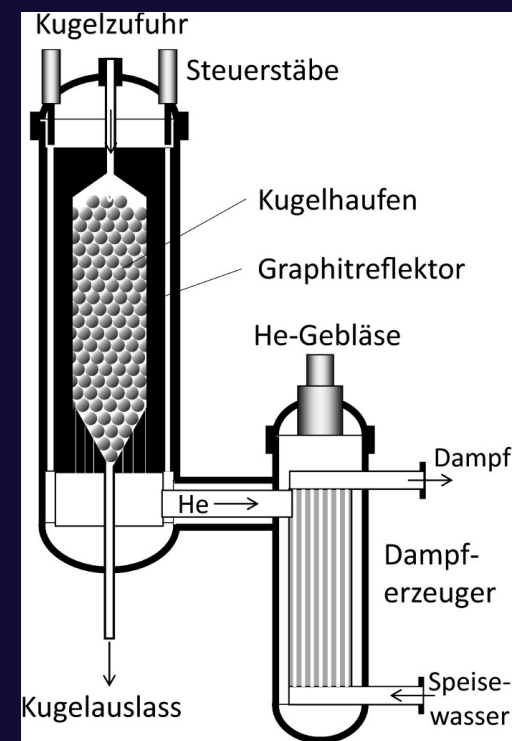


Inhärente Sicherheit

Selbststabilisierung bei Störfällen ohne aktive Eingriffe.

X-Energy entwickelt in den USA im Auftrag von Amazon, DOW und der US Regierung eine optimierte Version dieser Technologie

Experiment in China:
ungebremstes
Hochfahren des Reaktors
ging ohne Eingriff in
sicheren Betrieb über!



Small Modular Reactor (SMR)



Kompakte Bauweise

Leistung 100-400 MW, ca. 4m Durchmesser, 20m Höhe.



Kostengünstige Fertigung

Serienproduktion im Werk



Standardisierte Zulassung

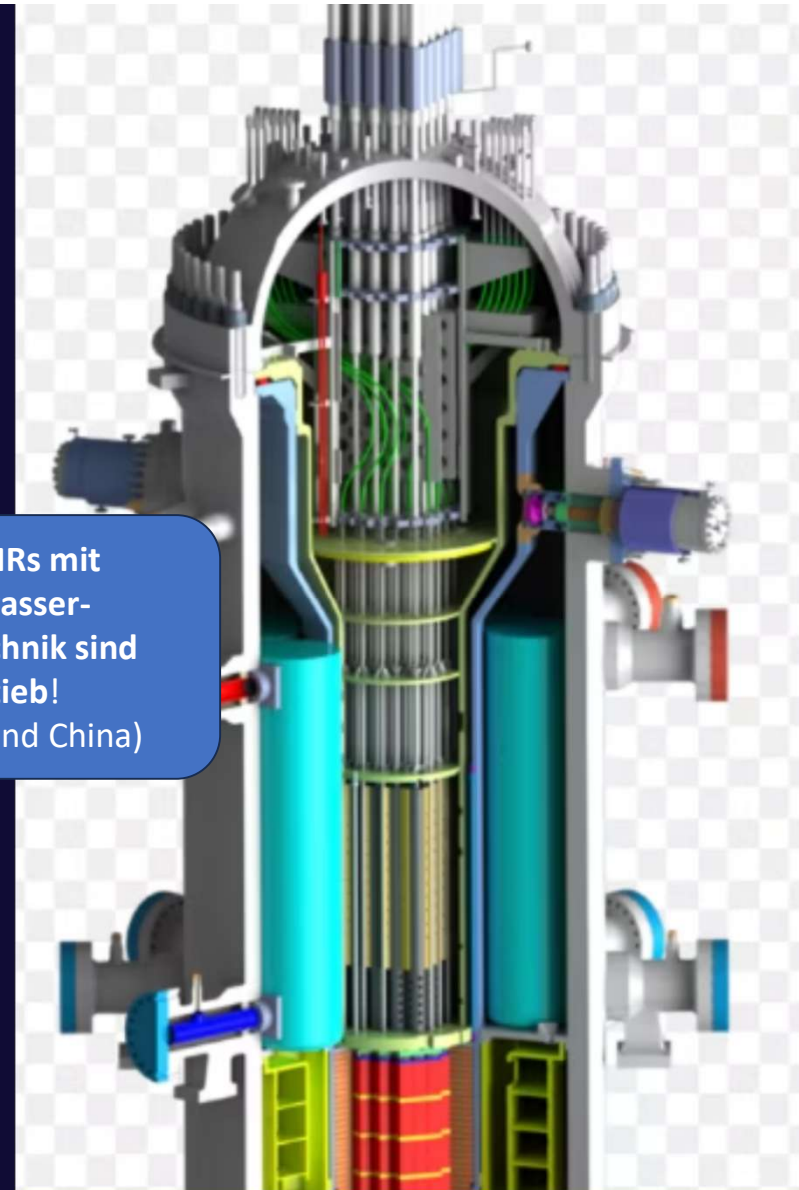
Einheitliche Bauart vereinfacht Genehmigungsverfahren.



Schnelle Installation

Kurze Montagezeiten auf Baustelle (ca. 1,5 Jahre).

Erste SMRs mit
Leichtwasser-
Reaktortechnik sind
in Betrieb!
(Russland und China)



SMRs sind inhärent sicher!



Physikalische Sicherheit

Kernschmelze ist physikalisch unmöglich.



Selbstregulation

Bei zu hoher Temperatur stoppt die Reaktion automatisch.



Passive Kühlung

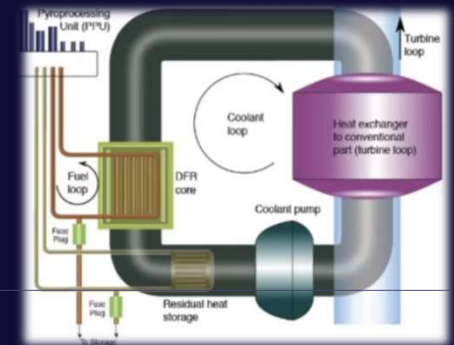
Keine aktiven Kühlsysteme erforderlich.



Keine externe Versorgung nötig

Sicher ohne menschlichen Eingriff und Stromversorgung.

Das Design stellt sicher, dass physikalisch weder eine „Durchgehen“ des Reaktors noch eine Kernschmelze möglich ist



SMRs mit Thorium-Reaktoren: Verbrennung von altem Atom-Müll!

Atommüll-Recycling

Alter Atom-Müll wird als Brennstoff genutzt.

Ressourcen für Jahrtausende

Brennstoff reicht für tausende von Jahren.



Thorium-Nutzung

Thorium ist häufiger und preiswerter als Uran.

Kurze Halbwertszeit

Restmüll ist nur 300 Jahre strahlend.

SMRs Generation 4: Extrem günstig!

Kohle:	5 ct/KWh
AKW EPR:	6,5 ct/KWh
Zielkosten:	
SMR DF300:	2,7 ct/KWh
Copenhagen A.:	2 ct/KWh



Günstige Wasserstoffproduktion

¼ der Kosten im Vergleich zu Windenergie



Hoher Wirkungsgrad

Durch höhere Betriebstemperaturen

3

Serienproduktion

Extreme Kostenreduzierung



Effiziente Brennstoffnutzung

Thorium-Reaktoren: 100% statt 5% des Brennstoffs werden genutzt



Standortflexibilität

Einsparen von Netzanbindungs- und Leitungskosten

Vergleich der Kennzahlen: AKWs gegenüber Wind und Sonne

Brennmaterial

Vergleich der benötigten
Ressourcen pro Energieeinheit

Flächenverbrauch

Benötigte Landfläche für gleiche
Stromerzeugung

Materialverbrauch

Menge an Stahl, Beton und
kritischen Metallen

Energiebilanz

Verhältnis von aufgewendeter zu produzierter
Energie

Kosten

Investitions- und Betriebskosten im Systemvergleich

Vergleich Leistungsdichte: Brennmaterial

400.000 m³

LNG Erdgas

210.000 Tonnen für 1 TWh Energie

400.000 m³

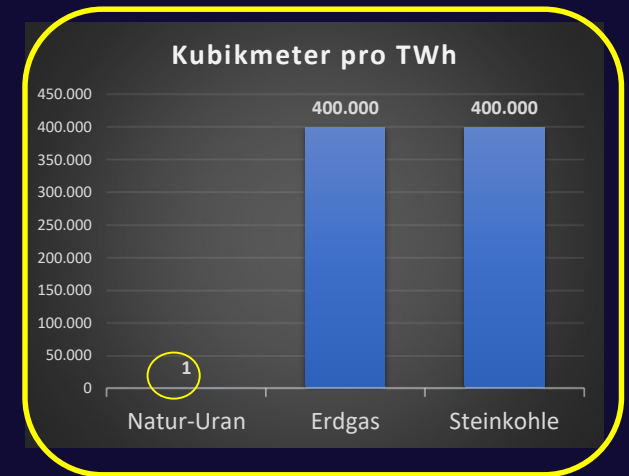
Steinkohle

400.000 Tonnen für 1 TWh Energie

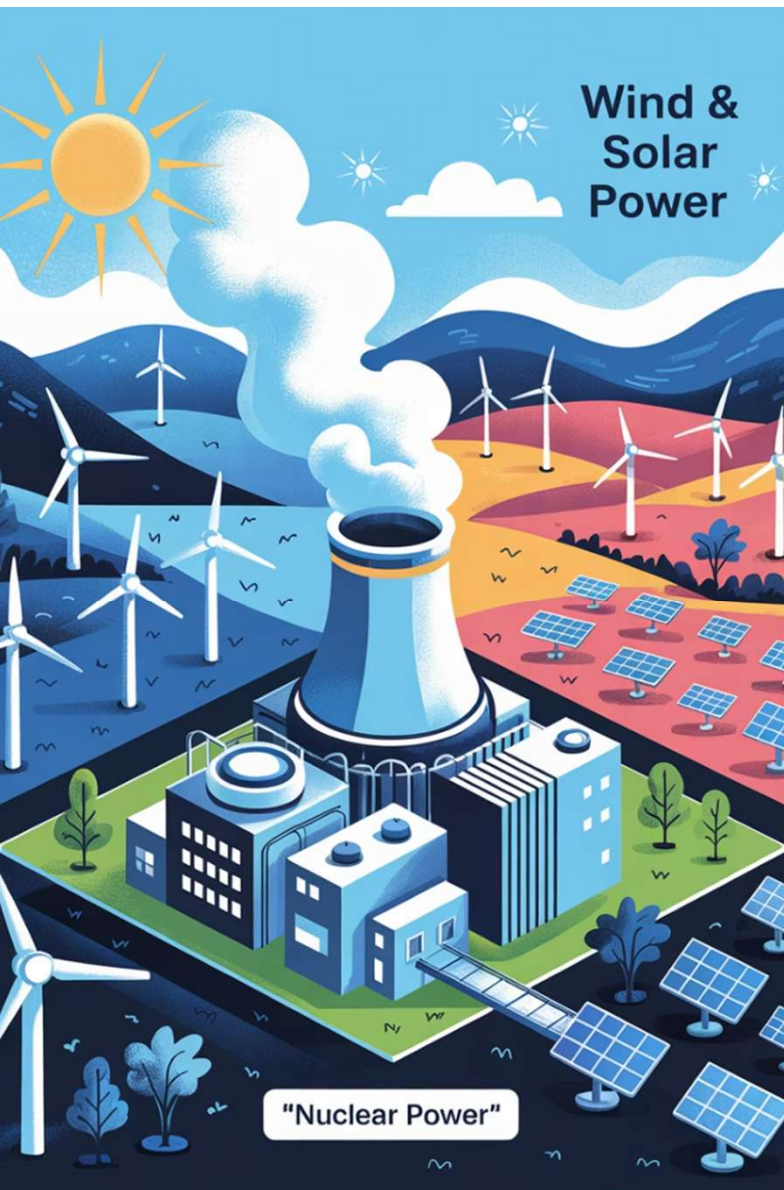
1 m³

Natur-Uran

24 Tonnen für 1 TWh Energie



Die Menge an Steinkohle für 1 TWh entspricht
180 Güterzügen mit je 45 Waggon!

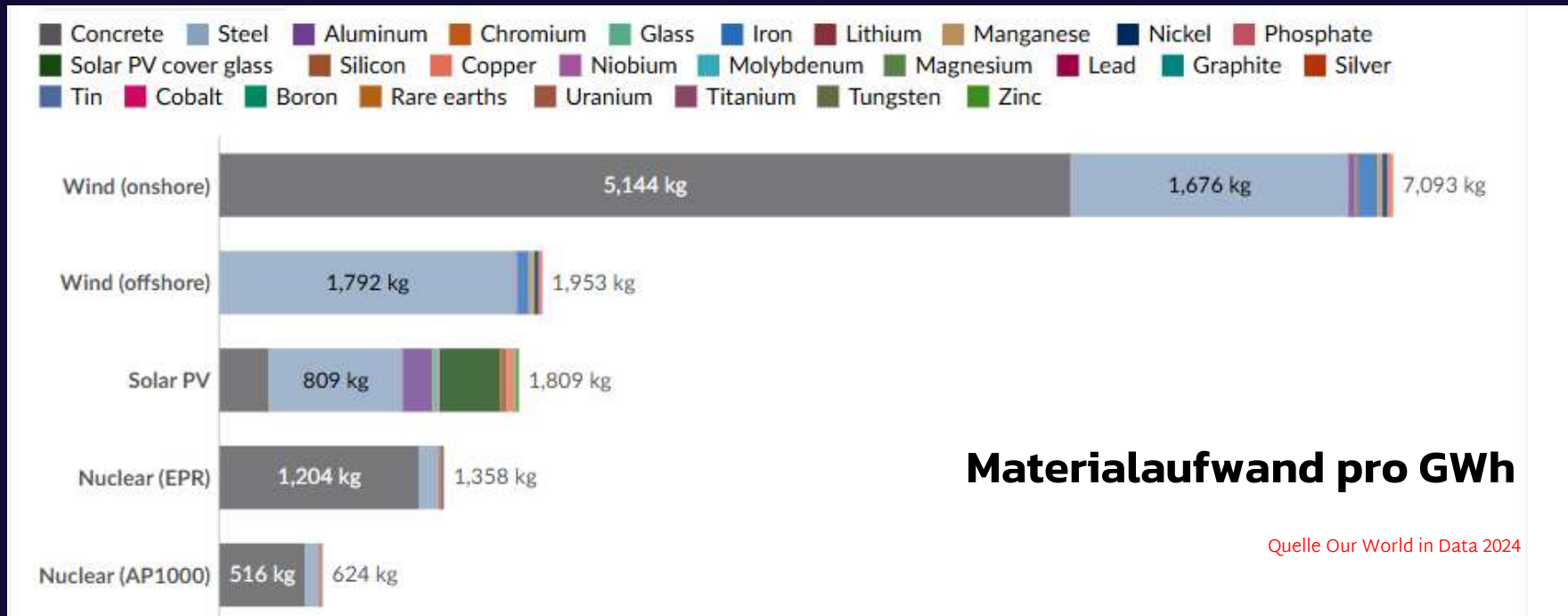


Vergleich Leistungsdichte: Flächenverbrauch

Energiequelle	Flächenbedarf	Jahresleistung	Verhältnis zu AKW
Atomkraft	1 km ²	13 TWh	1 x
Windkraft (Windpark)	750 km ²	13 TWh	750 x
Solarpark	200 km ²	13 TWh	200 x

Für die gleiche Energiemenge benötigen Windparks 750 mal und Solarparks 200 mal soviel Fläche als ein AKW.

Vergleich Leistungsdichte: Materialverbrauch



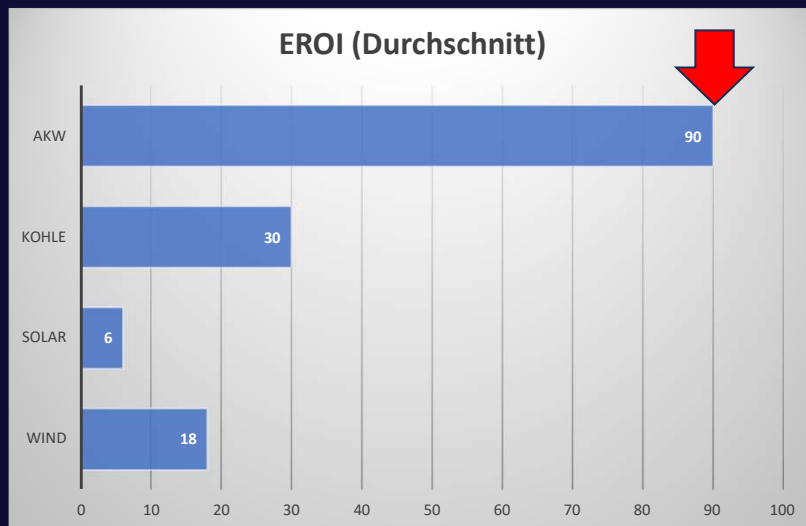
Windkraft verbraucht ungeheuer viel Material. Modernste Kernkraftwerke brauchen nur zwischen 7%-20% im Vergleich

EROI

=

$$\frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$

Energiebilanz



Quelle: Wikipedia

Energieertrag

Produzierte Energie über die Lebensdauer

Energieeinsatz

Energie für Herstellung und Betrieb

EROI

Erntefaktor

Kernenergie hat einen deutlich besseren Energierückgewinnungsfaktor als erneuerbare Energien.

Investitionskosten im Vergleich

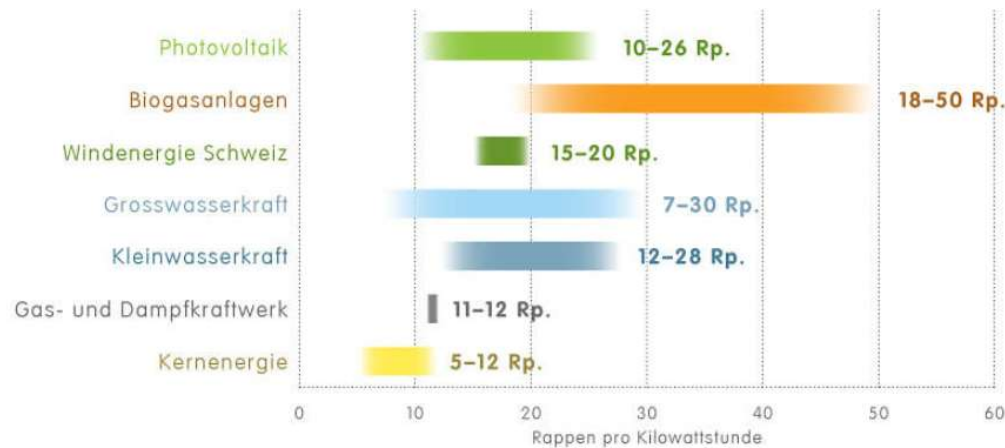
	AKW 1,5GW heute	AKW 1,5GW skaliert	Solardach 10KWp	Windkraftanlage 5MW
Inv.Kosten TEUR	12.000.000	6.000.000	13	5.000
Zins	5%	5%	5%	5%
Betriebsjahre	50	50	25	25
Laufzeit Finanz Jahre	25	25	25	25
Finanz.kosten/Jahr TEUR	-851.429	-425.715	-1	-355
Output MWh/Jahr	13.140.000	13.140.000	9	8.760
Jahr 1-25:				
Finanz.kosten EUR/MWh	-65	-32	-105	-40
Jahr 26-50	(Weiterbetrieb)	(Weiterbetrieb)	(Neuinstallation)	(Neuinstallation)
Finanz.kosten EUR/MWh	0	0	-105	-40
Durchschnitt EUR/MWh	-32	-16	-105	-40

Die Finanzierungskosten pro produzierte MWh sind bei AKWs über die Laufzeit
Geringer als bei Windkraft und Solardächern

AKW heute: derzeitige Kosten AKWs in Europa

AKW skaliert: Durchschnittskosten weltweit

Stromgestehungskosten im Vergleich (für 2019 neu gebaute Anlagen)



Quelle: Bundesamt für Energie, «Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen», 2019

Stromkosten im Vergleich

Schweiz 2019
Vollkosten incl CAPEX, OPEX
und Entsorgung, ohne Subventionen

5–12 ct

Kernkraft

Vollkosten pro kWh

15–20 ct

Windkraft

Dazu kommen
Backup/Speicher-Kosten

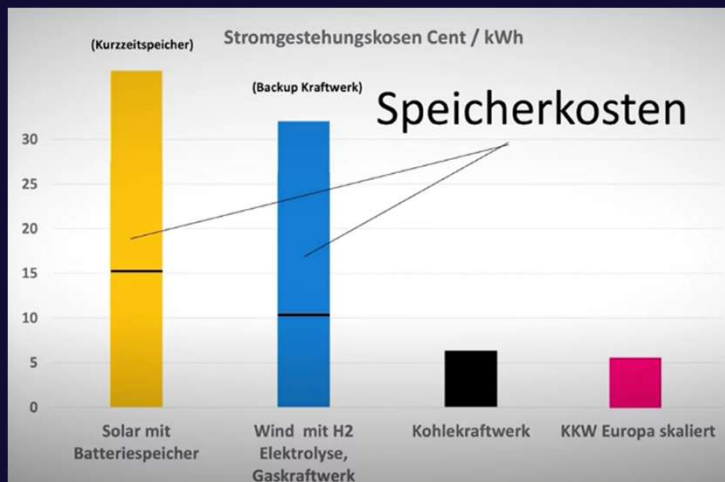
10–26 ct

Solaranlage

Dazu kommen
Backup/Speicher-Kosten

AKWs sind kostengünstig.

Unfairer Kostenvergleich: Speicher-/Backupkosten müssen berücksichtigt werden!



Direkte Stromkosten

Erneuerbaren Energien erscheinen günstig, wenn nur die reine Stromerzeugung betrachtet wird.

Systemkosten

Die notwendigen Speicher und Backup-Systeme, sowie dazu notwendige Infrastruktur erhöhen die Kosten für Wind- und Solarenergie erheblich.



Die 7 Mythen der Kernkraft



Mythos 1:
Alle steigen aus der Kernkraft aus

Olaf Scholz: "Kernkraft ist ein totes Pferd"

Weltweite Entwicklung der Atomkraft

443

In Betrieb

Derzeit aktive Kernkraftwerke weltweit

54

Im Bau

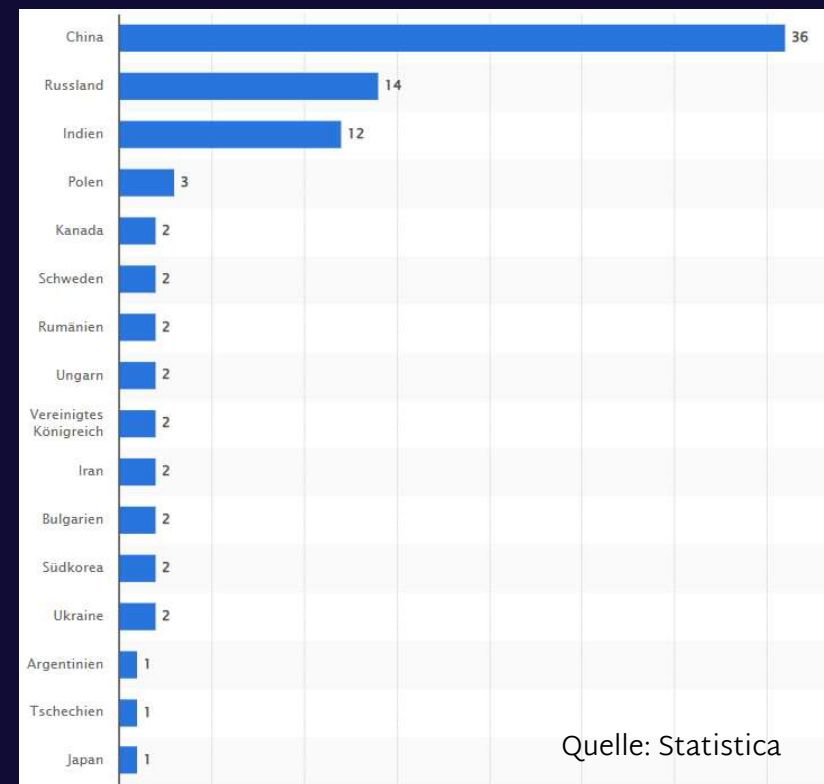
Aktuell im Bau befindliche Reaktoren

100+

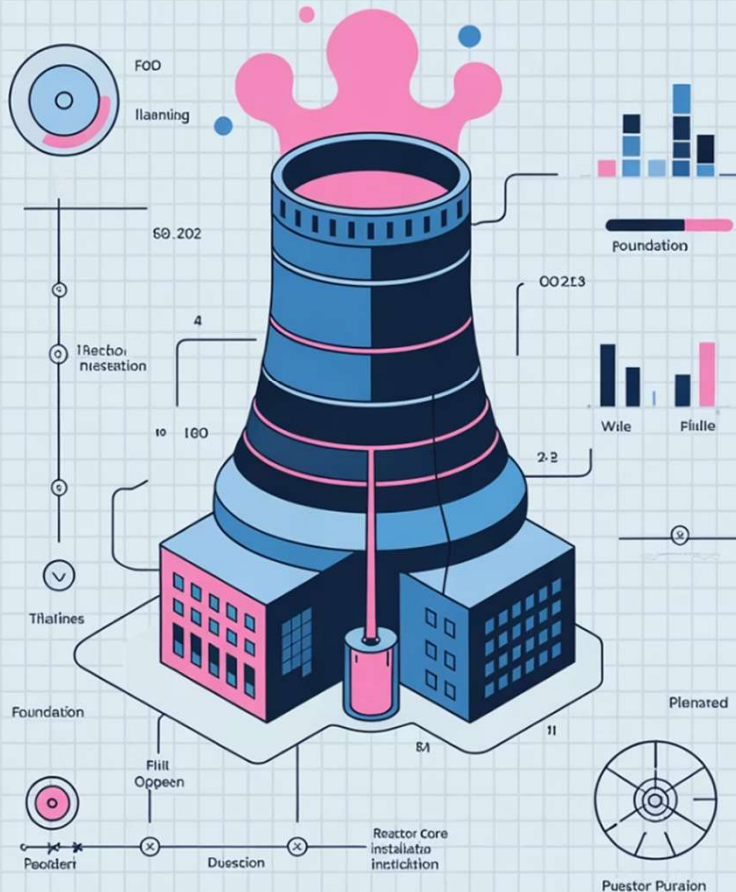
In Planung

Zukünftige Anlagen in konkreter
Planung

Auf der Klimakonferenz in Dubai 2023 haben 22 Industrieländer eine Atominitiative gestartet. Sie wollen die Kernkraft bis 2050 verdreifachen.



Construction Journey



Mythos 2: AKWs haben viel zu lange Bauzeiten

Behauptung

Neue Kernkraftwerke haben extrem lange Bauzeiten und sind daher keine Option für die schnelle Energiewende.

Fallbeispiele

Die EPR-Kraftwerke in Finnland, England und Frankreich werden oft als Beweis für lange Bauzeiten angeführt.

Faktenprüfung

Diese Einzelbeispiele stellen nicht die globale Realität dar. Weltweit werden Kernkraftwerke deutlich schneller gebaut.

Die Bauzeit und Kosten für ein AKW

Kraftwerk	Bauzeit	Kosten
EPR Olkiluoto, Finnland	17 Jahre	11 Mrd EUR
EPR Flamanville, Frankreich	17 Jahre	13 Mrd EUR
EPR Hualong 2.0, China	5 Jahre	2,5 Mrd EUR
Südkorea	5-6 Jahre	2,5 Mrd EUR
Japan (Durchschnitt)	4-5 Jahre	3-5 Mrd EUR
Weltweiter Durchschnitt	89 Monate	5-6 Mrd EUR

Die europäischen Verzögerungen sind auf fehlendes Know-how und fehlende Lieferketten zurückzuführen, nicht auf inhärente Probleme der Technologie. .



Mythos 3: Atomenergie ist eine Hochrisiko-Technologie



Behauptung

Kernkraft ist wegen Unfällen wie Tschernobyl und Fukushima zu gefährlich.



Analyse

Diese Anlagen waren alte Designs (Gen 1-2) mit bekannten Sicherheitsdefiziten.



Fakten

Moderne Reaktoren haben grundlegend verbesserte Sicherheitssysteme.



Ergebnis

Generation 3+ und 4 bieten ein völlig anderes Sicherheitsniveau.



Kernkraft = Hochrisiko-Technologie?

AKW Typ	Anzahl Reaktor-Jahre bis eine Kernschmelze wahrscheinlich wird	Bei 500 AKWs: Jahre bis zum nächsten GAU:
Gen 1, 1950-1970	> 1.000 Jahre	> 2 Jahre
Gen 2, 1970-1990	> 10.000 Jahre	> 20 Jahre
Gen 3, seit 1990	> 1.000.000 Jahre	> 2.000 Jahre
Gen 4, ab 2030	> 10.000.000 Jahre	> 20.000 Jahre

Quelle: IAEA
OECD/NEA

Plausibilitätsprüfung:

Generation 2:

Wahrscheinlichkeit bei 500 AKWs: 1 Unfall alle 20 Jahre.

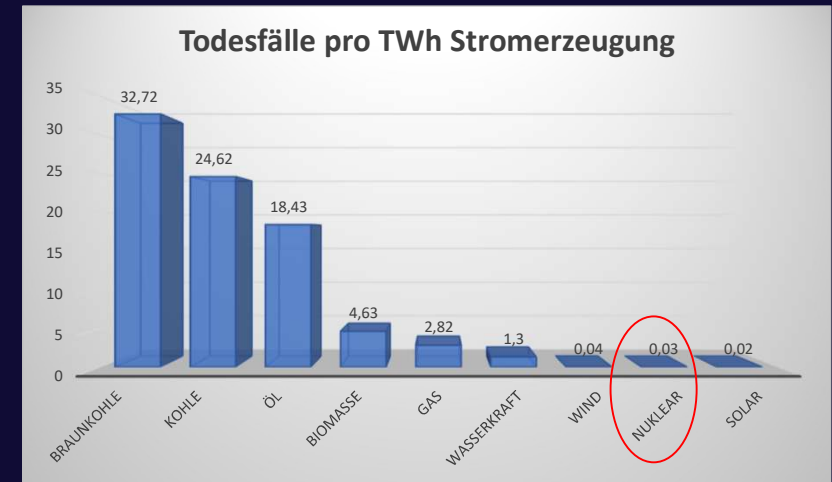
Es gab 2 Kernschmelzen zwischen 1980 und 2025 (45 Jahre)

Tschernobyl 1986, Fukushima 2011, wie statistisch zu erwarten ($45/2=22,5$)

Generation 3:

Sicherheit um Faktor 100 erhöht:

Bei 500 AKWs ist nur alle 2.000 Jahre eine Kernschmelze zu erwarten.



Kernkraftwerke haben statistisch die wenigsten Todesfälle pro TWh aller konventionellen Energiequellen.



Mythos 4: Es gibt keine Endlager

Behauptung

Es gibt keine sichere Lösung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Realität

Technische Lösungen existieren und werden international bereits umgesetzt.

Lösungsansätze

Geologische Tiefenlager und neue Reaktoren, die Atom Müll als Brennstoff nutzen können.

Endlager Atom-Müll



Überschaubare Menge

Der gesamte deutsche Atom-müll seit 1960 passt in einen Würfel mit 30m Kantenlänge (27.000 m³).



Abklingzeiten

Stark strahlende Komponenten sind nach 300-500 Jahren ungefährlich. Lang strahlende Komponenten strahlen schwach.



Internationale Beispiele

Finnland und Schweiz bauen Endlager mit großer öffentlicher Akzeptanz.



Wirtschaftlich machbar

Finnisches Endlager kostet etwa 2 Milliarden Euro.

Atom-müll in Deutschland

Zwischen- und Endlager für Atom-müll



Quelle: BGE

Zum Vergleich: Endlager für chemische Abfälle

3 Mio

Tonnen Chemieabfälle

Lagern allein in Hessen

Herfa-Neurode

Arsen, Cyanid, Quecksilber,...

50.000

Tonnen pro Jahr

Jährlicher Zuwachs



Jahre giftig

Keine Halbwertszeit bei Chemieabfällen

Im Gegensatz zu radioaktiven Abfällen werden chemische Gifte, die nie ihre Toxizität verlieren, mit deutlich geringeren Sicherheitsanforderungen gelagert.



Mythos 5:

AKWs verstopfen die Netze

Behauptung

AKWs können nicht schnell genug hoch- und runtergefahren werden und sind daher nicht kompatibel mit erneuerbaren Energien.

Tatsache

Moderne Kernkraftwerke sind für flexible Lastanpassung ausgelegt und können ihre Leistung schnell variieren.

Beispiel	AKW	Gaskraftwerk	Kohlekraftwerk
Max. Leistung	1200 MW	870 MW	600 MW
Min. Leistung	600 MW	200 MW	420 MW
Max. Veränderung	63 MW/min	38 MW/min	8 MW/min

Leistungsfähigkeit

AKWs können innerhalb von 10 Minuten bis zu 600 MW Leistung anpassen.



Mythos 6: Das Uran reicht nur noch für 130 Jahre



Behauptung

Die Uranvorräte sind zu begrenzt für langfristige Energieversorgung.



Argumentationslogik

Bei knappen Ressourcen lohnt sich die Investition in AKWs mit langen Bauzeiten nicht.



Faktencheck

Diese Behauptung berücksichtigt nur konventionelle Uranvorkommen und ignoriert alternative Quellen und Technologien.



Realität

Mit neuen Technologien und alternativen Brennstoffen ist die Verfügbarkeit deutlich höher.





Wie lange reicht Uran?

Konventionelle Betrachtung

Bekannte Uran-Landvorkommen reichen bei **Verfünffachung** der Kernkraft noch etwa **130 Jahre**.

Meerwasser-Uran

Ozeane enthalten riesige Uranmengen. Neue Extraktionsmethoden machen diese wirtschaftlich nutzbar.

Brütertechnologie

Moderne Reaktoren wie Dual-Fluid-Reaktoren können Brennstoff selbst erzeugen und verlängern die Reichweite auf **Millionen Jahre**.

Thorium-Alternative

Thorium kommt dreimal häufiger vor als Uran und kann in neuen Reaktortypen genutzt werden.

Mythos 7:

AKWs benötigen viel Kühlwasser



Behauptung

AKWs müssen bei Wasserknappheit abgeschaltet werden.



Technischer Hintergrund

Alle thermischen Kraftwerke brauchen Kühlung für ihre Dampfturbinen.



Alternative Kühlmethoden

Neben Flüssen können Kühltürme oder Kombinationen genutzt werden.



Lösung

Mit Kühltürmen ist der Betrieb unabhängig von Flusstemperaturen möglich.



Fazit

