

Global Energy Perspectives

gefördert aus Kapitel 2302, Titel 687 01

BMZ-Abschlussreport / Basisdokument

Global Energy Solutions e.V.

Teil 1: Grundelemente zur Vermeidung von Treibhausgasen und Herstellung klimaneutraler Energieträger (technischer Werkzeugkasten)

Stand 08. August 2023

Kapitel 2-2

Autorenteam:	
Siddhant Bane	Joern Becker
Ulrich Begemann	Leon Berks
Christof von Branconi	Simon Göss
Prof. Dr. Estelle Herlyn	Dr. Wilfried Lyhs
Dr. Tobias Orthen	Dr. Ludolf Plass
Dr. Hans-Peter Sollinger	Dr. Jens Wagner
Dr. Hans Jürgen Wernicke	

Erklärung zum Urheberrecht

Das nachfolgende Dokument ist grundsätzlich ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Eine Weitergabe an Dritte oder die Nutzung für Dritte ist – auch auszugsweise – nicht gestattet.

Dem Empfänger des Dokuments wird eine einfache, nicht übertragbare, nicht unterlizenzierbare, eingeschränkte Lizenz gewährt, das Dokument für persönliche, nicht kommerzielle, private Zwecke zu nutzen.

Ulm, im Juni 2023

Global Energy Solutions e.V.

Lise-Meitnerstr. 9

89081 Ulm

Vorsitzender: Christof v. Branconi (Christof.Branconi@Global-Energy-Solutions.org)

2.2 Erzeugung von Strom durch Kernkraft

Glossar zu 2.2

Begriff	Beschreibung
BWR	Boiling Water Reactor
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung (nuklearer Abfälle)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CNNC	China National Nuclear Corporation
FBR	Fast Breeder Reactor
Flächenbedarf von Stromerzeugung	Unter Flächenbedarf wurde von „Our World in Data“ die Flächennutzung für die Anlage selbst während des Betriebs, die Flächen für den Abbau der Materialien für den Bau der Anlage, den Abbau von Energieträgern, die entweder direkt (d. h. Kohle, Öl, Gas oder Uran, die in den Versorgungsketten verwendet werden) oder indirekt (die zur Herstellung der Materialien verwendeten Energieträger) genutzt werden, den Anschluss an das Stromnetz und die Flächennutzung für die Entsorgung der anfallenden Abfälle betrachtet.
FNR	Fast Neutron Reactor
GCR	Gas Cooled Reactor
GW(h)	10^9 W (h)
HWR	Heavy Water Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
INES	International Nuclear Event Scale
LWR	Light Water Reactor
MSR	Molten Salt Reactor
NPCIL	Nuclear Power Cooperation of India Limited
PWR	Pressurized Water Reactor
USGS	United States Geological Survey

WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WNA	World Nuclear Association

2.2.1 Einleitung

Die Stromerzeugung aus Kernenergie hat sich global in letzten 60 Jahren fast um den Faktor 100 gesteigert und betrug im Jahr 2021 etwa 2.800 TWh (siehe Abbildung 39).

Im Jahr 2021 deckte die Kernenergie damit ca. 10 % des globalen Strombedarfs ab. In der Ausgabe von World Energy Outlook 2021 geht die IEA in ihrem 'Stated Policies Scenario' von einem Wachstum der installierten Kernkraftkapazität von über 26 % zwischen 2020 und 2050 auf 525 GW aus.⁵⁶

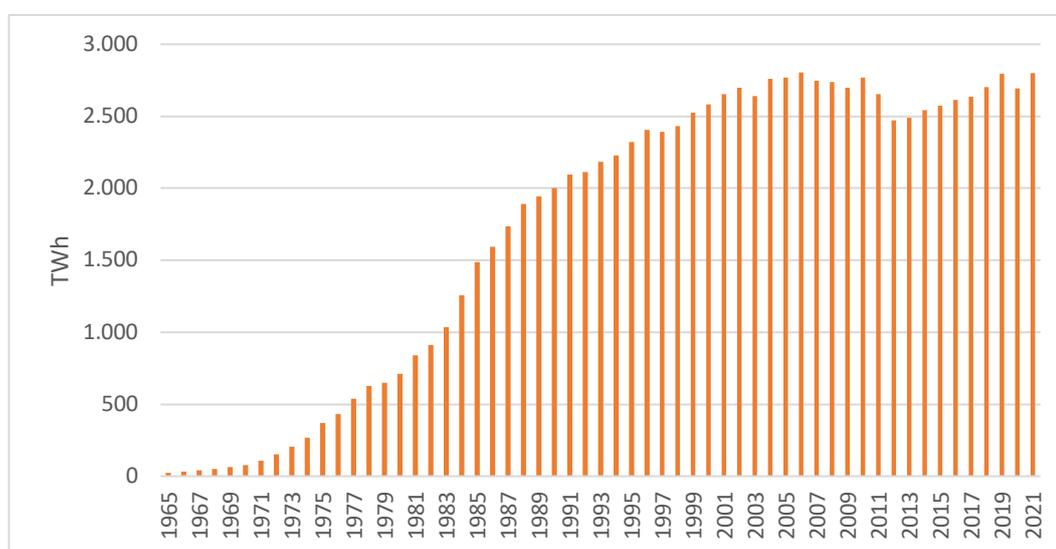


Abbildung 39: Stromerzeugung aus Kernenergie⁵⁷

Im Jahr 2022 hatte die USA die größte Nennleistung von Kernspaltungsreaktoren in Betrieb, gefolgt von Frankreich, China und Russland. Insgesamt ist eine Leistung von 422 GW in der Abbildung 40 erfasst, aber weltweit war im Jahr 2021 eine gesamte installierte Leistung von 439 GW im Betrieb.

Derzeit werden in 15 Ländern, vor allem in China, Indien und Russland, rund 60 Kernenergie-reaktoren gebaut. Etwa 100 Reaktoren mit einer Gesamtbruttokapazität von etwa 100 GW sind in Auftrag gegeben oder geplant, und über 300 weitere sind vorgeschlagen.⁵⁸ Eine Liste der in Bau befindlichen Reaktoren ist im Anhang in Tabelle 4 aufgeführt. Die meisten Reaktoren sind derzeit in Asien geplant, wo die Volkswirtschaften schnell wachsen und die Stromnachfrage rasch ansteigt.

⁵⁶ auf etwa 525 GW

⁵⁷ Vgl. Our World in Data (2022c)

⁵⁸ Vgl. (World Nuclear Association, 2022 a)

Gemäß der World Nuclear Association, stammen etwa zwei Drittel der weltweiten Uranproduktion aus Bergwerken in Kasachstan, Kanada und Australien,⁵⁹.

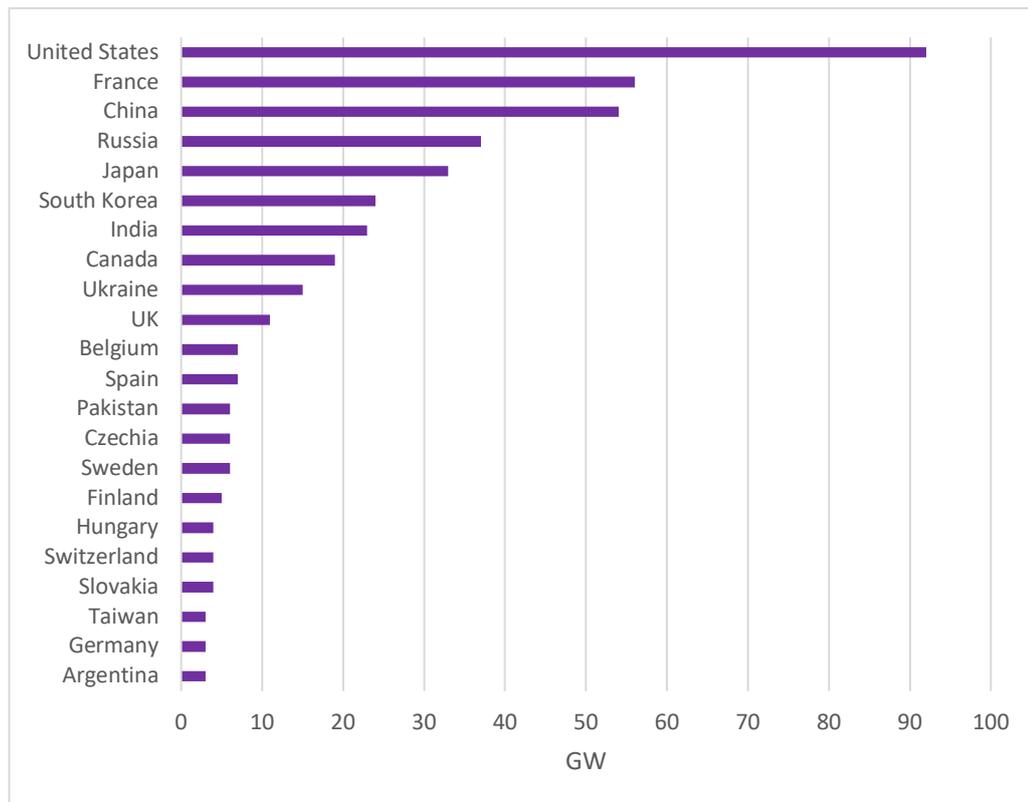


Abbildung 40: Installierte Leistung von Kernkraftwerken diverser Länder⁶⁰

Ein zunehmender Anteil des Urans, inzwischen über 60 %, wird durch In-situ-Laugung gewonnen. Bei der In-situ-Laugung (ISL) wird das Erz im Boden belassen und die Mineralien werden durch Auslösen und Pumpen der Lösung an die Oberfläche gefördert, wo die Mineralien gewonnen werden können. Folglich wird die Oberfläche nur wenig beschädigt und es fallen keine Abraumhalden oder Abfallgestein an. Allerdings muss der Erzkörper für die verwendeten Flüssigkeiten durchlässig sein und so gelegen sein, dass das Grundwasser außerhalb des Erzkörpers nicht verunreinigt wird.

Die Treibhausgasintensität der Kernenergie über den gesamten Lebenszyklus wird auf 34 - 60 gCO₂e/kWh geschätzt und liegt damit weit unter der von Grundlastkraftwerken auf Kohlebasis (1.001 gCO₂e/kWh).⁶¹ Kernkraftwerke verbrauchen je nach Betriebseffizienz und Standortbedingung 1.020 – 2.530 Liter Wasser pro MWh erzeugter Elektrizität.⁶¹

⁵⁹Vgl. (World Nuclear Association, 2022 b)

⁶⁰ Vgl. (Statista, 2022) <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152153/umfrage/anzahl-der-sich-in-betrieb-befindenden-atomkraftwerke-weltweit/>

⁶¹Vgl. (Center for Sustainable Systems, University of Michigan. 2021, 2021)

Kernenergie ist die flächeneffizienteste Stromerzeugungsquelle (0,3 m²/MWh). Sie benötigt im Vergleich zu Kohle 50-mal weniger und im Vergleich zu Solarenergie 18 bis 27-mal weniger Land, siehe Abbildung 44 im Anhang.⁶²

2.2.2 Überblick Kernreaktoren

Ein Kernspaltungsreaktor der ersten bis zur dritten Generation erzeugt und kontrolliert die Freisetzung von Energie ausschließlich aus der Spaltung von Uran-235 (U²³⁵). Die bei der kontinuierlichen Spaltung der Atome des Brennstoffs freigesetzte Energie wird über Kühlwasserkreisläufe zur indirekten und direkten Erzeugung von Dampf verwendet. Der Dampf wird zum Antrieb der Turbinen verwendet, die Strom erzeugen (wie in den meisten Kraftwerken für fossile Brennstoffe). Normalerweise werden Uranoxidpellets in Rohren zu Brennstäben angeordnet oder in dem

3 in Deutschland entwickelten Kugelhaufenreaktoren als Kugeln gehalten (Brennstoff Thorium). Die Stäbe werden im Reaktorkern zu Brennelementen angeordnet. In einem PWR der 1.000-MW-Klasse kann es 51.000 Brennstäbe mit über 18 Millionen Pellets geben.⁶³

In einem Kernreaktor werden Neutronen benötigt, um von der zufallsbedingten Kernspaltung zur steuerbaren Kettenreaktion im Reaktor zu gelangen. Hierzu ist es notwendig, die Geschwindigkeit der Neutronen zu kontrollieren, so dass diese im richtigen Wirkungsquerschnitt für die Kernspaltung wirksam werden. Dafür nutzt man verschiedene Moderatoren, die die Neutronen abbremsen. Zu geringe Neutronen-Moderation bringt den Spaltungsprozess zum Erliegen.

Es gibt folgende Arten von Kernspaltungsreaktoren:

- *Light Water Reactor (LWR)*: Dies ist der am weitesten verbreitete Typ von Kernspaltungsreaktor, der hauptsächlich in der Stromerzeugung eingesetzt wird. LWR können als Pressurized Water Reactor (PWR) oder Boiling Water Reactor (BWR) Technologien weiter unterschieden werden, bei denen Leichtwasser als Moderator und Kühlmittel dient.
- *Heavy Water-Reactor (HWR)*: Dieser Typ von Kernspaltungsreaktor verwendet Schweres Wasser als Moderator und Kühlmittel.⁶⁴ Die Reaktoren werden häufig in Kanada verwendet (CANDU).

⁶²Vgl. (Our World in Data, 2022 a)

⁶³Vgl. (World Nuclear Association, 2022 c)

⁶⁴ Wasser mit hohem Gehalt an Deuterium

- *Gas Cooled Reactor (GCR)*: Dieser Typ von Kernspaltungsreaktor verwendet Kohlenstoffdioxid als Kühlmittel und Kohlenstoffblöcke als Moderator. Die Reaktoren werden hauptsächlich in Großbritannien eingesetzt.
- *Fast Breeder Reactor (FBR)*: Dieser Typ von Kernspaltungsreaktor ist in der Lage, mehr Brennstoff zu produzieren, als er verbraucht, indem er Uran²³⁸ in Plutonium²³⁹ umwandelt. FBR werden hauptsächlich in Japan und Russland und auch einst in Frankreich eingesetzt. Hierbei scheint derzeit das russische Brüterkonzept BREST am weitesten fortgeschritten zu sein. Im Kraftwerk Beloyarsk wurden die Abfälle von Leichtwasserreaktoren älterer Generationen, die bis zu 96 % ungenutztes Uran oder Plutonium enthalten, und auch das im Rahmen von START⁶⁵ zur Vernichtung vorgesehene waffenfähige Plutonium, zur Stromerzeugung genutzt. Je nach Fahrweise kann der schnelle Brüter Plutonium vernichten oder „erbrüten“.
- *Molten Salt Reactor (MSR)*: Dieser Typ von Kernspaltungsreaktor verwendet flüssiges Salz bei etwa 600 °C als Kühlmittel und Moderator. Es gibt keine Brennstäbe, da der Brennstoff im Salz gelöst ist.⁶⁶ Da sich die Lösung bei Überhitzung ausdehnt, treffen die Neutronen auf weniger spaltbares Material und die Kettenreaktion wird reduziert. Dieser Mechanismus zur Erzielung inhärenter Sicherheit wird auch bei Terrapower, der von Bill Gates gegründeten Firma, eingesetzt.
MSR-Reaktoren sind in der Lage, hohe Temperaturen zu erreichen und können zur Stromerzeugung, zur Wasserstoffproduktion und zur Nutzung von Abfallstoffen eingesetzt werden. Sie befinden sich derzeit jedoch noch im Entwicklungsstadium und werden noch nicht kommerziell eingesetzt. China hat MSR-Anlagen, die Thorium als Brennstoff verwenden, seit 2021 in der Erprobung.⁶⁷ Das norwegische Schiffbauunternehmen Ulstein hat letzters eine Konzeptstudie für einen zivilen Schiffsantrieb vorgestellt.⁶⁸
- *Dual Fluid Reactor (DFR)*: der noch in der Planung befindliche Reaktor mit einem in Deutschland entwickelten Prinzip der Kühlung durch flüssiges Blei soll nach Beschreibung seiner Erfinder alle Erwartungen realisieren⁶⁹:
 - Der DFR erzeugt keinen langlebigen Atommüll sondern baut bestehenden Atommüll ab.

⁶⁵ START: Strategic Arms Reduction Treaty von 1991, Als START I 1994 in Kraft getreten, 2023 durch Putin ausgesetzt

⁶⁶ Vgl. Vahrenholt, (2023) S. 114

⁶⁷ ebenda

⁶⁸ Vgl. [„Ulstein Thor“: Versorgung Akku-betriebener Kreuzfahrtschiffe mit Strom aus Kernenergie \(cruisetricks.de\)](https://www.ulstein.com/Thorium-Thorium-Technologie)

⁶⁹ ebenda

- Die Energieeffizienz soll etwa 100 mal höher sein als die Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energie, sodass die Erzeugungskosten für Strom in einem 1,5 GW-Kraftwerk bei 1 ¢/kWh liegen könnten.
- Der DFR ist inhärent sicher.

In Tabelle 2 sind die globalen installierten Leistungen verschiedener Typen von Kernspaltungsreaktoren aufgelistet.

Tabelle 2: Globale Flotte von Kernspaltungsreaktoren

Arten der Reaktoren	Anzahl der Reaktoren	Gesamtleistung (GW)	Brennstäbe
Pressurized water reactor (PWR)	307	294	angereichertes UO ₂
Boiling water reactor (BWR)	61	62	angereichertes UO ₂
Pressurized heavy water reactor (PHWR)	47	24	Naturell UO ₂
Light water graphite reactor (LWGR)	11	7,4	angereichertes UO ₂
Advanced gas-cooled reactor (AGR)	8	4,7	Naturell U (Metall), angereichertes UO ₂
Fast neutron reactor (FNR)	2	1,4	PuO ₂ und angereichertes UO ₂
High temperature gas-cooled reactor (HTGR)	1	0,2	angereichertes UO ₂

2.2.2.1 Verschiedene Arten der Kernreaktoren (SMR)

Die Kernspaltung kann als kommerziell ausgereifte Technologie betrachtet werden, da die gesamte weltweite Reaktorflotte auf Kernspaltung basiert. Die andere Kerntechnologie zur Elektrizitätserzeugung, die sich seit langer Zeit mit beginnenden Erfolgen hinsichtlich der technischen Machbarkeit in der internationalen Entwicklung befindet (Wendelstein⁷⁰ und ITER⁷¹), ist die Kernfusion.

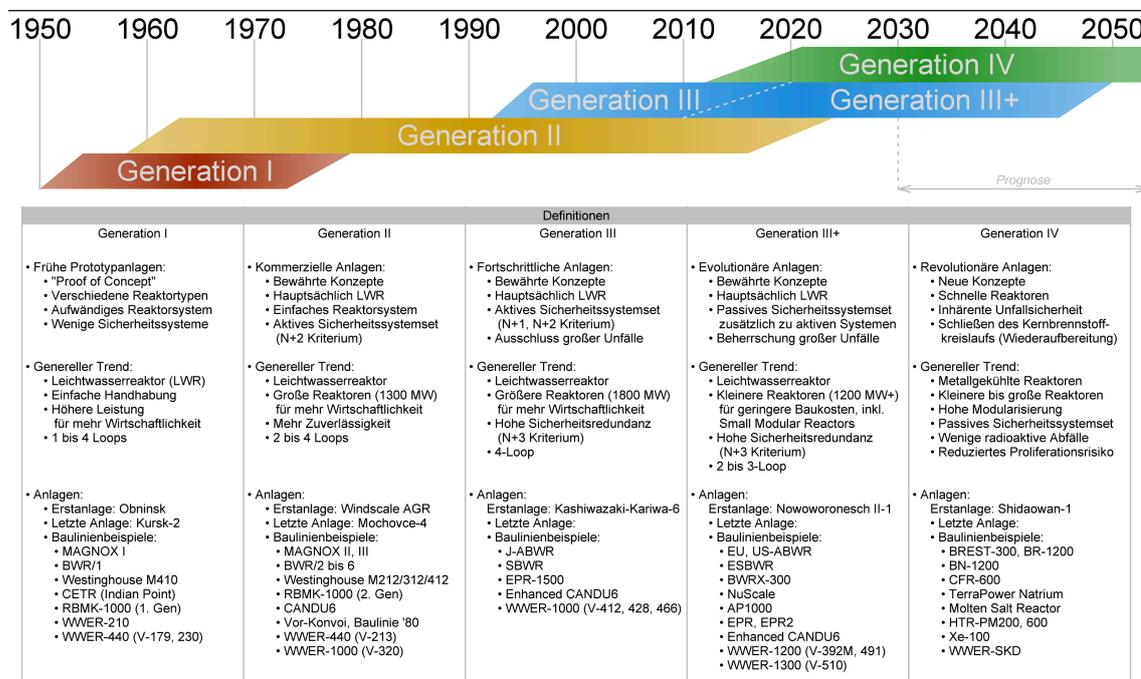
Die Verbesserung der Kernreaktoren für die Spaltung (Fission) vollzog sich in mehreren Generationen (Tabelle 3). War die erste Generation im Grunde nur der Proof of Concept für die Erzeugung von Strom aber auch zum Erbrüten von kernwaffenfähigem Plutonium, so musste

⁷⁰ Vgl. [Kernfusionsreaktor Wendelstein 7-X: Nächste Phase der Experimente beginnt in Greifswald - n-tv.de](#)

⁷¹ Vgl. [ITER - the way to new energy](#)

eine zweite Generation entwickelt werden, um wirtschaftlichere und sicherere Anlagen zu bauen. In Deutschland waren Obrigheim (1968) und Würgassen (1971) die ersten Reaktoren.⁷² Reaktoren dieses Typs produzieren heute weltweit noch 85 % des Atomstroms.⁷³

Tabelle 3: Generationen von Kernreaktoren;

Quelle: https://de.nucleopedia.org/wiki/Datei:Reaktorgenerationen_Chart.svg

Die Reaktoren der dritten Generation, die seit etwa 1996 in Betrieb sind, können als Stand der Technik bezeichnet werden. „Die Generation III zeichnet sich durch verbesserte Sicherheit und Wirtschaftlichkeit aus, jedoch nicht durch Nachhaltigkeit in Hinblick auf den Brennstoffkreislauf. Vor allem der Typ Siedewasserreaktor – der nach dem Druckwasserreaktor weltweit am zweithäufigsten in Betrieb ist – konnte in seiner Konstruktion deutlich vereinfacht und damit verbessert werden. Reaktor-Vertreter der dritten Generation sind der ABWR (aktiv in Japan), System 80+ (so nie verkauft, aber in südkoreanische Technik eingeflossen) und VVER-1200 (aktiv in Russland und Belarus).“⁷²

Bei der Generation III+ wurde die passive Sicherheit deutlich verbessert. Der Europäische Druckwasserreaktor EPR ist der leistungsstärkste Reaktor dieser Generation. Seine Entwicklung begann schon 1989 und hatte u.a. zum Ziel, durch den Einbau einer Stahlbetonwanne unter dem Reaktordruckbehälter das Grundwasser vor Radioaktivität zu schützen und das Kraftwerk zudem durch ein spezielles Containment gegen Flugzeugabstürze zu schützen.⁷⁴ Das Risiko einer umfassenden Kernschmelze konnte durch die Konstruktion von unter 1:100.000 auf unter 1:1.000.000 reduziert werden. Allerdings entwickelte sich der Bau der

⁷² Vgl. Nucleopedia (o.J. a)

⁷³ ebenda

⁷⁴ Vgl. de.nucleopedia.org/wiki/Generation_III

ersten zwei EPR (FOAK-Projekte), in Olkiluoto-3 (Finnland) und Flamanville (Frankreich), zu Milliardenrößen. Weitere zwei Projekte in China waren deutlich erfolgreicher. Der Reaktor in Olkiluoto-3 befand sich seit dem Jahre 2003 im Bau, und ging nach umfangreichen Sicherheitsprüfungen am 16. April 2023 in den kommerziellen Leistungsbetrieb des Betreibers TVO.

In einigen Reaktorkonzepten der vierten Generation werden sehr schnelle Neutronen eingesetzt, die in der Lage sind, auch nicht spaltbare Atomkerne durch Neutroneneinfang spaltbar zu machen.⁷⁵ Dieser Vorgang wird Transmutation⁷⁶ genannt. Sie hat einerseits den Vorteil, dass der Einsatz von angereichertem U^{235} verringert werden kann und der Anteil an U^{238} , der bei Reaktoren der vorangegangenen Reaktortypen nicht zur Energiegewinnung genutzt wurde, reduziert wird. Andererseits bedeutet dies auch, dass der Anteil stark radioaktiven Mülls reduziert wird und die Lagerzeiten des Reaktormülls von einer Million Jahre auf „nur noch“ 500 Jahre reduziert werden kann.⁷⁷

Das bedeutet auch, dass Reaktoren der vierten Generation dazu eingesetzt werden können, stark radioaktive Reste der Vorgängergenerationen aufzuarbeiten, Energie daraus zu gewinnen und die Endlagerungszeiten zu verkürzen.

2.2.2.2 Small Modular Reaktoren (SMR)

SMR sind in der Regel kleiner und leistungsärmer als konventionelle Kernkraftwerke, mit einer Kapazität von weniger als 300 MW. Sie sollen sicherer sein als traditionelle Kernkraftwerke, mit passiven Sicherheitssystemen und inhärenten Sicherheitsmerkmalen des Reaktors, wie z. B. geringerer Leistung und niedrigerem Betriebsdruck. Bei SMR sind weniger häufig Brennelementwechsel erforderlich, nämlich nur alle 3 bis 7 Jahre, im Vergleich zu alle 1 bis 2 Jahren bei konventionellen Kernkraftwerken.⁷⁸

Sowohl öffentliche als auch private Einrichtungen beteiligen sich aktiv an den Bemühungen, die SMR-Technologie noch in diesem Jahrzehnt zur kommerziellen Anwendung zu bringen. Das russische Kernkraftwerk Akademik Lomonosov, das erste schwimmende Kernkraftwerk der Welt, das im Mai 2020 den kommerziellen Betrieb aufnahm, erzeugt Energie aus zwei 35 MW Kernreaktoren. Weitere SMR befinden sich in Argentinien, Kanada, China, Russland, Südkorea und den Vereinigten Staaten von Amerika im Bau oder in der Genehmigungsphase. Mehr als 70 kommerzielle SMR-Konzepte (siehe Tabelle 5 im Anhang), die weltweit entwickelt werden, zielen auf unterschiedliche Leistungen und Anwendungen ab, z. B. Strom, hybride Energiesysteme, Heizung, Wasserentsalzung und Dampf für industrielle Anwendungen.

⁷⁵ Vgl. (Vahrenholt 2023), S. 113

⁷⁶ Vgl. (Grytz, M. 2021)

⁷⁷ Vgl. (Vahrenholt 2023), S. 113

⁷⁸ Vgl. (IAEA, 2021 a)

Obwohl die SMR-Kraftwerke geringere Investitionskosten pro Einheit aufweisen, muss ihre wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit in der Praxis noch bewiesen werden.

Während landgestützte konventionelle Kernkraftwerksblöcke bis zu 2 GW elektrische Leistung erzeugen, produziert ein typischer Schiffs- oder U-Bootsantriebsreaktor nicht mehr als ein paar hundert Megawatt. Einige Small Modular Reactors, sind in Bezug auf die Kapazität und einige Konstruktionsaspekte den Schiffsantriebsreaktoren ähnlich, so dass der nukleare Schiffsantrieb manchmal als zusätzliche Marktnische für SMR vorgeschlagen wird. Marinereaktoren werden mit relativ niedrig angereichertem Uran betrieben, das häufiger nachgeladen werden muss. Andere Reaktoren werden mit hochangereichertem Uran betrieben, das von 20 % U-235 bis zu über 96 % U-235 reicht, wie es in amerikanischen U-Booten verwendet wird.⁷⁹ Die Verwendung von hochangereichertem Brennstoff erhöht auch die Leistungsdichte des Reaktors und verlängert die Nutzungsdauer des Kernbrennstoffs, ist aber teurer und stellt ein größeres Risiko für die Weiterverbreitung von Kernwaffen dar als weniger hochangereicherter Brennstoff.⁸⁰

2.2.2.3 Thorium-Kernspaltungsreaktoren

In einem Thorium-Kernreaktor wird Thorium zunächst in eine Form umgewandelt, die als Brennstoff verwendet werden kann. Uran²³³ wird durch die Bestrahlung von Thorium²³² mit Neutronen erzeugt. Wenn Thorium²³² ein Neutron absorbiert, wird es zu Thorium²³³, das eine Halbwertszeit von nur 22 Minuten hat. Thorium²³³ zerfällt durch Beta-Zerfall in Protactinium²³³, das mit einer Halbwertszeit von 27 Tagen im Beta-Zerfall zu Uran²³³ zerfällt. Uran²³³ wird dann als Brennstoff im Reaktor verwendet.

Darüber hinaus ist Thorium reichlich in der Erdkruste vorhanden ist. Thorium-Vorkommen gibt es vor allem in Australien, Brasilien, Indien und den Vereinigten Staaten. Indien verfügt über die größten Ressourcen (850 kt), gefolgt von Brasilien (630 kt) sowie Australien und den Vereinigten Staaten (jeweils 600 kt).⁸¹

Es gab in jüngster Zeit zahlreiche Entwicklungen im Bereich der Thorium-Kernreaktoren. Eine der bedeutendsten war die Entwicklung von Schmelzsaltreaktoren, die eine flüssige Brennstoffmischung verwenden, die Thorium und andere Elemente enthält. Diese Reaktoren haben das Potenzial, effizienter und sicherer zu sein als traditionelle Kernreaktoren.⁸² Es gibt auch einige Länder, darunter China und Indien, die aktiv an der Erforschung und Entwicklung von Thorium-Kerntechnologie arbeiten.

⁷⁹ Vgl. (Clay & Moltz, 2006)

⁸⁰ Vgl. (Chunyan, Ma, & Hippel, 2008)

⁸¹ Vgl. (USGS, 2022)

⁸² Vgl. (World Nuclear Association, 2022 d)

2.2.2.4 Kernfusion

Die Kernfusion ist der Prozess, bei dem sich zwei leichte Atomkerne zu einem einzigen schwereren verbinden und dabei Energie freisetzen, da die Masse des Produktes geringer ist als die Masse der Ausgangsteilchen und die Differenz gemäß $E=mc^2$ in Energie umgesetzt wird. Der Massendefekt tritt nur bei der Fusion von sehr leichten Elementen und bei der Spaltung von schweren Elementen auf.

Fusionsreaktionen finden in einem Materiezustand statt, der Plasma genannt wird – ein sehr heißes, geladenes Gas, das aus positiven Ionen und frei beweglichen Elektronen besteht. In der Sonne schaffen die massiven Gravitationskräfte die richtigen Bedingungen für die Fusion. Der Fusionsbrennstoff – verschiedene Wasserstoffisotope – muss auf extrem hohe Temperaturen in der Größenordnung von $5 \cdot 10^7$ °C erhitzt und unter hohem Druck und starken äußeren Magnetkräften stabil gehalten werden – d.h. dicht genug und lange genug eingeschlossen sein, damit die Kerne fusionieren können. Das Ziel der kontrollierten Fusion ist die "Zündung", die dann erfolgt, wenn genügend Fusionsreaktionen stattfinden, so dass sich der Prozess selbst trägt. Außerdem muss die „Asche“ d.h. das Produkt entfernt und frischer Brennstoff hinzugefügt werden, um den Prozess fortzusetzen. Sobald die Zündung erreicht ist, ergibt sich ein Nettoenergieertrag, der etwa viermal so hoch ist wie bei der Kernspaltung.⁸³ Die verschiedenen Arten von Kernfusionsreaktoren sind wie folgt:

- *Tokamak*: Dies ist der am weitesten fortgeschrittene und am häufigsten untersuchte Typ von Kernfusionsreaktor. Es ist ein torusförmiger Reaktor, der elektrisch geladenes Plasma erzeugt und dieses mit verschiedenen, starken Magnetfeldern von den Wänden des Behältnisses abhält.⁸⁴ ITER, die internationale Gesellschaft der 27 EU-Länder plus Indien, Japan, Korea, Russland und den Vereinigten Staaten betreibt in Cadarache (Frankreich) einen Versuchsreaktor, der zur Lieferung von 500 MW Fusionsleistung bei nur 50 MW zugeführter Heizleistung ausgelegt ist. Im November 2022 wurden Mängel an den Hitzeschilden und den Vakuumgefäßsektoren festgestellt, deren Reparatur eine Überarbeitung des durch COVID verzögerten Zeitplans notwendig machen.⁸⁵
- *Laserfusionsreaktor*: Dieser Typ von Kernfusionsreaktor verwendet Laser, um die Energie für die Kernfusion aufzubringen.

Seit mehr als 60 Jahren arbeiten Wissenschaftler an einer der schwierigsten physikalischen Herausforderungen aller Zeiten – die Nutzung der Kernfusion auf der Erde. Am 5. Dezember

⁸³ Massachusetts Institute of Technology

⁸⁴ Tokamak ist ein Akronym aus der russischen Bezeichnung für toroidale Kammer mit Magnetfeld

⁸⁵ Vgl. <https://www.iter.org/proj/inafewlines#1>

2022 feuerte eine Reihe von Lasern in der National Ignition Facility (NIF), 2,05 Megajoule Energie auf einen winzigen Zylinder, der ein Pellet aus gefrorenem Deuterium und Tritium, enthielt.⁸⁶ Das Pellet wurde komprimiert und erzeugte Temperaturen und Drücke, die stark genug waren, um die Isotope zur Fusion zu bringen. In einem winzigen Feuer, das weniger als ein Milliardstel einer Sekunde dauerte, setzten die fusionierenden Atomkerne 3,15 Megajoule Energie frei – etwa 50 % mehr, als zum Erhitzen des Pellets verwendet worden war.⁸⁷

Experten haben jedoch betont, dass die Ergebnisse zwar einen wichtigen Grundsatzbeweis darstellen aber die Technologie noch weit davon entfernt sei, eine wesentliche Rolle in der Energieversorgung zu spielen.⁸⁸

2.2.3 Entsorgung von Atommüll

Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit der Kernenergie ist die angemessene und sichere Handhabung und Entsorgung der nuklearen Abfälle, die in der Öffentlichkeit Besorgnis hervorgerufen hat. Die Kosten für Handhabung und Entsorgung finden sich nicht in den Gestehungskosten, sondern in den gesellschaftlichen Kosten der Kernenergie, die im Kapitel 2.2.4 betrachtet werden.

Es gibt mehrere Methoden, die zur Entsorgung von Nuklearmüll verwendet werden, darunter:

- *Oberflächenlagerung (Zwischenlager)*: Diese Methode beinhaltet das Lagern des Mülls in oberirdischen Einrichtungen, wie Beton- oder hochkomplexen Stahlbehältern (z.B. CASTOR). Die unbearbeiteten abgebrannten Brennelemente, oder der radioaktive Müll nach einer Wiederaufarbeitung werden an einer gesicherten Stelle, wie einer Militärbasis oder einer Forschungseinrichtung, gelagert, bis eine dauerhafte Entsorgungsmethode z.B. zukünftig durch Transmutation gefunden werden kann. Diese Art von Atommüllentsorgung in Zwischenlagern wird in Ländern wie Deutschland, Finnland, Frankreich, Tschechien, USA und Schweden umgesetzt.⁸⁹
- *Tiefengeologische Entsorgung*: Diese Methode beinhaltet das Verbringen des Mülls tief unter der Erde in einer geologisch stabilen Lage, wie einer Salzkaverne oder einer Granitfelsformation. Der Müll wird in komplexen Spezial-Behältern platziert, die dann versiegelt und tief im Erdboden in vorbereiteten Hohlräumen versenkt werden. Die Endlagerung von Atommüll in tiefen geologischen Lagerstätten ist der sicherste Weg, so WNA. Zwischen 1954 und 2016 wurden ca. 390 kt von „spent Fuel“ (hochradioaktiv) erzeugt. Zweidrittel davon befinden sich in Entsorgung und der Rest wurde

⁸⁶ Deuterium und Tritium sind schwere Isotope von Wasserstoff

⁸⁷ Vgl. (National Geographic, 2022)

⁸⁸ Vgl. (Guardian, 2022)

⁸⁹Vgl. (World Nuclear Association, 2021)

wiederaufbereitet.⁹⁰

Ein Kernspaltungskraftwerk mit der Leistung 1 GW erzeugt ungefähr 30 t abgebrannten Kernbrennstoffs pro Jahr und sollte nach gängiger Meinung als „Spent-Fuel“ nicht weiter verarbeitet/aufbereitet werden, also zwischen- und dann direkt endgelagert werden.^{91 92} Die Reaktoren der vierten Generation werden wahrscheinlich diese Meinung revidieren.

- Das erste tiefengeologische Lager: Im Lager von Onkalo in der Nähe von Olkiluoto in Finnland wird der in über 100 Jahren anfallende Atommüll von ca. 6,5 kt für die nächsten 10.000 Jahre 425 m unter der Erde stabil gelagert. Die Onkalo-Anlage ist das Ergebnis von fast 20 Jahren Arbeit und über diesen Zeitraum könnte das Lager schätzungsweise 3,5 Mrd. Euro kosten.⁹³ Es gibt allerdings auch Experten, die das neue Lager zur Atommüllentsorgung nicht für sicher halten, da Finnland sich wegen der verschwundenen Last der Eispanzer aus der Eiszeit insgesamt hebt und mit ihm auch der versenkte radioaktive Müll.
- International stellt die Endlagerung von radioaktivem Müll immer noch ein politisch ungelöstes Problem dar. Durch die Entwicklung von Reaktoren der vierten Generation erhält die Debatte allerdings eine Wendung, da der radioaktive „Müll“ eine weitere Energiequelle für die Reaktoren darstellt und die inhärente Sicherheit der Kraftwerke deutlich verbessert wird.

In Deutschland läuft ein mehrstufiges, demokratisch legitimes Verfahren zur Findung eines Standortes für das Endlager mit bestmöglicher Sicherheit für den Zeitraum von einer Million Jahren.⁹⁴ Das Verfahren sollte ursprünglich bis zum Jahr 2031 abgeschlossen sein. Aus internen Unterlagen der BGE geht hervor, dass frühestens im Jahr 2046 mit dem Abschluss des Verfahrens zu rechnen ist.

⁹⁰Vgl. (IAEA, 2022 a)

⁹¹Vgl. (Mohammed, Alwaeli, & Mannheim, 2022)

⁹² Vgl. (IAEA, 2000)

⁹³Vgl. (NS Energy, 2022)

⁹⁴ Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Endlagersuche_in_Deutschland

2.2.4 Finanzielle Aspekte der Kernenergie

2.2.4.1 Investitions- und Betriebskosten

Die Bemühungen, die Sicherheit von Kernkraftwerken zu verbessern, schlagen sich natürlich in den Baukosten nieder. Die Konstruktion eines Core Catchers, der im Falle einer Kernschmelze⁹⁵ den Kern eines Reaktors sicher auffängt, erhöhten die Baukosten in Olkiluoto /Finnland)⁹⁶ neben vielen anderen technischen Hochsicherheits-Features und Projektverzögerungen auf 11 Mrd Euro und im Doppelblock im englischen Hinkley Point auf 27 Mrd Euro.⁹⁷

Einige Schätzungen besagen, dass die Investitionskosten für den Bau eines neuen Kernkraftwerks zwischen 4.000 und 12.000 USD/kW installierte Leistung variieren können.^{98 99} Diese Kosten umfassen die Kosten für den Reaktor selbst sowie die Kosten für die Standortvorbereitung, die Infrastruktur und andere damit verbundene Ausgaben.

Die Betriebskosten für ein Kernkraftwerk können ebenfalls erheblich variieren, abhängig von Faktoren wie den Brennstoffkosten, der Wartung und der Stilllegung. Einige Schätzungen besagen, dass die durchschnittlichen Betriebskosten für ein Kernkraftwerk von 30 bis 60 USD/MWh produzierter Elektrizität variieren können, was die Aussage, Kernkraft sei eine billige Energieerzeugung zweifelhaft erscheinen lässt. Es ist schwierig, durchschnittliche globale Investitions- und Betriebskosten für Kernspaltungsreaktoren zu nennen, da diese Kosten in Abhängigkeit von vielen Faktoren, wie dem Typ des Reaktors, dem Standort, dem Regulierungsumfeld, den Entsorgungskosten und den Finanzierungsbedingungen, erheblich variieren können. Bei möglichen Betriebszeiten von über dreißig Jahren¹⁰⁰ ist aber klar, dass sich die massiven Kapitalkosten relativieren, und hier eine kostengünstige, nahezu CO₂-freie großtechnische, 24/7 über 365-Tage laststabile Stromerzeugungsquelle zur Verfügung steht.

Die Genehmigung zum Bau von Kraftwerken wird in Deutschland nach einem „großen Genehmigungsverfahren“ ablaufen. Die Dauer und der Ausgang des Verfahrens hängen davon ab, wie die lokale Öffentlichkeit auf das Bauvorhaben reagiert, ob schriftliche Einwendungen erfolgen oder Gutachten gegen den Bau angefertigt werden. Genehmigungsverfahren können sich auf diese Weise mehrere Jahre in die Länge ziehen.

⁹⁵ Kernschmelzen sind in Harrisburg (1979), Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011) aufgetreten

⁹⁶ Der Bau des Reaktors in Olkiluoto (Typ EPR) wurde 2003 begonnen und ist seit dem 16. April 2023 am Netz, da sich der Bau komplexer erwies als geplant, siehe <https://www.mdr.de/wissen/vierte-gene-ration-atomkraft-reaktor-klimawandel-100.html>

⁹⁷ Vgl. (Vahrenholt, 2023), S. 111

⁹⁸ Vgl. (Söder, 2019)

⁹⁹ Vgl. (Lazard, 2020)

¹⁰⁰ Das Durchschnittsalter der 173 europäischen Reaktoren beträgt 34,5 Jahre, vgl. <https://www.grs.de/de/aktuelles/kernenergie-weltweit-2022>

2.2.4.2 Wieviel CO₂ entsteht bei der Produktion von Atomstrom und was kostet er?

Hierzu gibt es unterschiedliche Angaben, die davon abhängig sind, ob die Berechnung von Atomgegnern oder Atombefürwortern angestellt wurden. Der IPCC-Report von 2014 nennt einen Emissionsbereich von 3,7 bis 110 g CO₂e/kWh.¹⁰¹ Einer Studie der WISE-Organisation zur Folge beträgt die CO₂-Emission 117 g CO₂/kWh über den gesamten Lebenszyklus eines Kernkraftwerks, wenn die erheblichen Emissionen beim Bau und Abriss der Anlage berücksichtigt werden.¹⁰² Es ist daher sicher nicht richtig zu behaupten, bei der Stromproduktion mit Kernkraft würde kein CO₂ freigesetzt. Aber die Emissionen sind deutlich niedriger als z.B. bei der Erzeugung mit Erdgas (ca. 442 g CO₂e/kWh) oder bei Steinkohle (ca. 864 g CO₂e/kWh).¹⁰³ In Deutschland ist die Stromerzeugung durch Kernkraft jahrzehntelang nach konservativer Rechnung und ohne die Ausgaben der DDR mit etwa 287 Mrd EUR (Kaufkraft von 2019) gefördert worden.¹⁰⁴ Dies entspricht einem Betrag von 4,6 Ct/kWh, von dem 2,4, Ct/kWh nicht im Strompreis enthalten ist.¹⁰⁴

¹⁰¹ Vgl. IPCC (2014)

¹⁰² Vgl. WISE (2017)

¹⁰³ Vgl. Deutsche Welle (2021)

¹⁰⁴ Vgl. FÖS (2020)

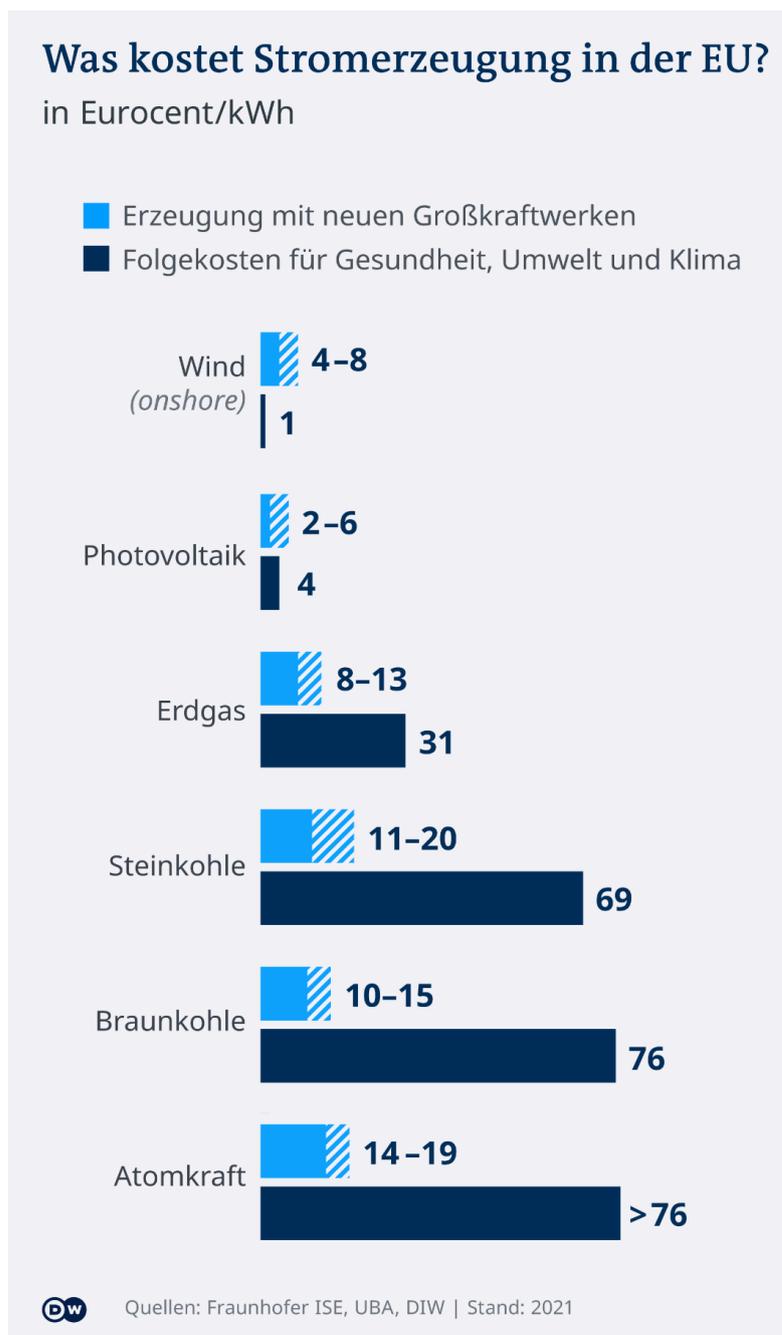


Abbildung 41: Kosten der Stromerzeugung durch Atomkraft in der EU;
Quelle: Deutsche Welle (2021)

Bei den Kosten des Atomstroms muss unterschieden werden zwischen den Kosten, die der Verbraucher direkt zu tragen hat und die er auf seiner Stromrechnung sieht, und den Kosten, die durch die Beeinträchtigung seiner Gesundheit und den Folgekosten, die nicht auf seiner Stromrechnung aufgerechnet werden, entstehen. Abbildung 41 verdeutlicht, dass Atomstrom wie schon vorher festgestellt, nicht billig ist, denn nicht nur die Erzeugung kostet ungefähr das Gleiche wie mit Stein- und Braunkohle, sondern die gesamtgesellschaftlichen Folgekosten mit Berücksichtigung von Gesundheit, Klima und Umwelt sind höher als bei jeder anderen Art der Energieerzeugung.

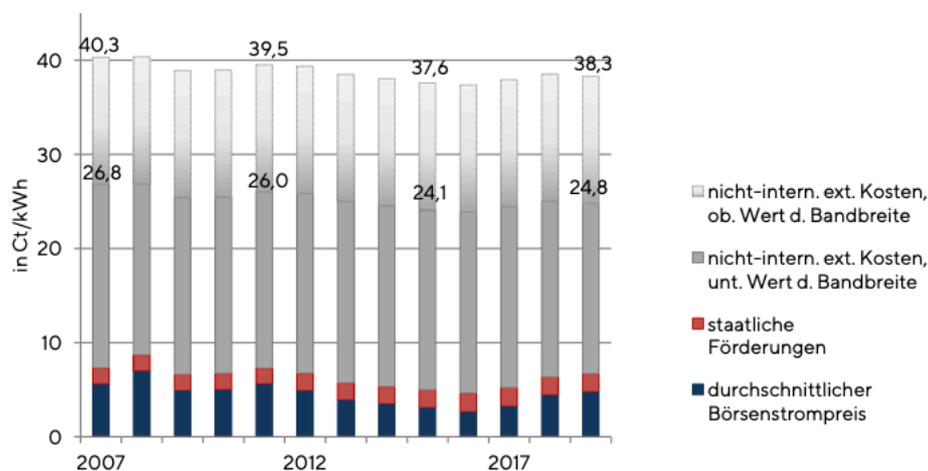


Abbildung 42: Gesamtgesellschaftliche Kosten der Stromerzeugung aus Atomenergie von 2007 bis 2019;
Quelle: FÖS (2020)

Das Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS) ermittelte die versteckten Kosten der gesamtgesellschaftlichen Kosten der Stromerzeugung aus staatlichen Förderungen (Finanzhilfen und Steuervergünstigungen) und externen Kosten alleine in den Jahren 2007 bis 2019 zu durchschnittlich 25 Ct/kWh bis 39 Ct/kWh (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43). Das sind für diesen relativ kurzen Zeitraum 348 bis 533 Mrd EUR. Wegen fehlender Daten zu anderen Zeiten lassen sich die gesellschaftlichen Kosten nicht vollständig und genau bestimmen. Auch für die anderen Arten von Energieerzeugung lassen sich gesamtgesellschaftliche Kosten ermitteln (siehe Abbildung 43). Dennoch reicht das Zahlenmaterial aus, um nach Analyse der Kosten verschiedener Energieträger festzustellen, dass Atomenergie mit den höchsten gesamtgesellschaftlichen Kosten verbunden ist und wegen der hohen Risiken dieser Technik auch in Zukunft noch hohe, schwer abzuschätzende Kosten verursachen wird.¹⁰⁵

¹⁰⁵ Vgl. [Infografik: Folgekosten von Atomstrom am höchsten | Statista](https://de.statista.com/infografik/27231/kosten-der-stromerzeugung-in-deutschland-nach-energetraeger/), <https://de.statista.com/infografik/27231/kosten-der-stromerzeugung-in-deutschland-nach-energetraeger/>

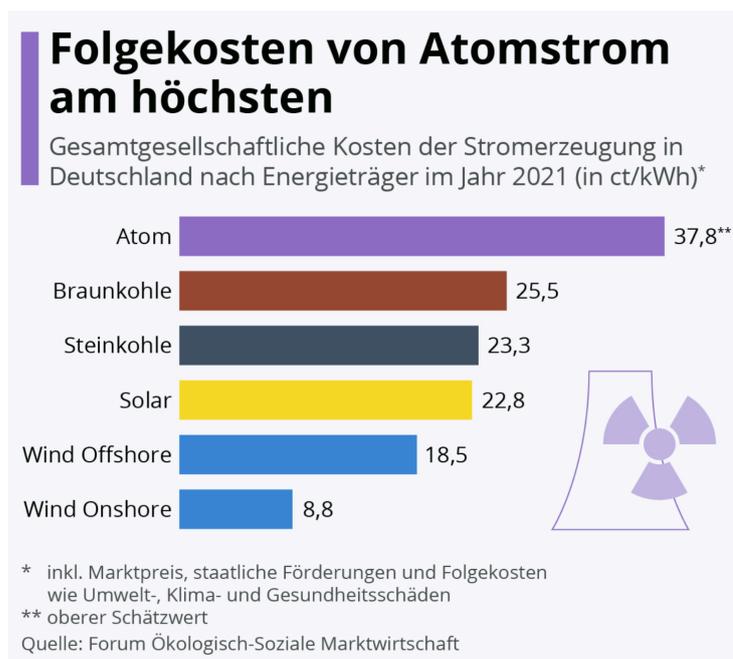


Abbildung 43: Gesamtgesellschaftliche Kosten der Stromerzeugung nach Energieträger;
 Quelle; Statista¹⁰⁵

2.2.4.3 Staatliche und private Investoren

Es gibt viele private Unternehmen und öffentliche Institutionen, die aktiv in die Kernenergieerzeugung investiert haben. Die Regierung der USA hat in Kernenergie investiert, indem sie das Department of Energy finanziert, welches Gelder für Forschung und Entwicklung in der Kernenergie bereitstellt. Gleiches tat die deutsche Regierung.

Beispiele:

- Electricité de France (EdF) ist ein Energieversorgungsunternehmen, das eine Flotte von 58 Kernreaktoren in Frankreich betreibt. In einer Erklärung aus dem Jahr 2022 teilte das französische Finanzministerium mit, dass es 9,7 Mrd. € oder 12 € pro Aktie für den Kauf der verbleibenden 16%igen Beteiligung an EDF angeboten hat.¹⁰⁶ Sobald die Transaktion abgeschlossen ist, wird der Staat EdF vollständig verstaatlichen und alleiniger Besitzer des Unternehmens werden.
- China National Nuclear Corporation (CNNC) ist ein staatlicher Energieversorger in China, der in Kernenergie investiert hat und eine Reihe von Kernkraftwerken im Land betreibt.
- TerraPower ist ein privates Kernenergie-Unternehmen, das von Bill Gates und anderen privaten Investoren finanziert wurde. Es hat 750 Millionen Dollar aufgebracht, um

¹⁰⁶Vgl. (Power Technology, 2022)

fortschrittliche Thorium-Kernreaktoren zu entwickeln, die als Alternative zu den Leichtwasserreaktoren dienen sollen.¹⁰⁷

- NuScale Power ist ein privater Entwickler von Small Modular Reactor, der von der Private Equity Firmen wie Enerbility, Samsung C&T Corporation, JGC Holdings Corporation, Japan Bank for International Cooperation und Enercon Services finanziert wird.¹⁰⁸

2.2.5 Gesundheits- und Umweltrisiken

In der Geschichte der Kernenergie gab es einige Unfälle, bei denen radioaktives Material ausgetreten ist, Menschen zu Schaden gekommen sind und die Umwelt geschädigt wurde. Dennoch hat die Kernenergie einen der niedrigsten Werte für Todesfälle pro erzeugter elektrischer Energie (30 bis 90 pro PWh) im gesamten Spektrum der Kraftwerke.¹⁰⁹

Die negative Einstellung zur Kernenergie in der deutschen Bevölkerung wurde wesentlich durch dramatische Unfälle in Tschernobyl (1986) und Fukushima Daiichi (2011) geprägt. Letzterer hat sogar in einer Kurzschlussreaktion den endgültigen Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergie initiiert, obwohl bei genauerer Bewertung der zu den Katastrophen führenden Ursachen hätte erkannt werden müssen, dass derartige Unfälle in Deutschland nicht hätten passieren können.¹¹⁰

Die Internationale Skala für nukleare und radiologische Ereignisse (INES) wurde 1990 von der IAEA eingeführt, um bei nuklearen Unfällen eine rasche Übermittlung von sicherheitsrelevanten Informationen zu ermöglichen.¹¹¹ Die Skala ist als logarithmische Skala konzipiert, jede steigende Stufe steht für einen Unfall, der etwa zehnmal so schwerwiegend ist wie einer in der vorherigen Stufe. Die Stufe 0 wird als Abweichung, die Stufen 1 bis 3 werden als Störungen und Störfälle, die Stufen 4 bis 7 als Unfälle klassifiziert. Die meldepflichtigen Stufen von Ereignissen werden nach drei Aspekten bewertet:

- Auswirkungen auf Menschen und Umwelt
- Beeinträchtigungen radiologischer Barrieren und Überwachungsmaßnahmen
- Beeinträchtigung von Sicherheitsvorkehrungen

Am 11. März 2011, nach einem schweren Erdbeben, setzte ein 15 Meter hoher Tsunami die Stromversorgung und die Kühlung von drei Reaktoren in Fukushima Daiichi außer Kraft und verursachte einen Atomunfall. Der Unfall wurde auf der internationalen Skala für nukleare und

¹⁰⁷Vgl. (CNBC, 2022)

¹⁰⁸Vgl. (NuScale, 2022)

¹⁰⁹Vgl. (Statista, 2021) <https://www.statista.com/statistics/494425/death-rate-worldwide-by-energy-source/>, (Our World in Data, 2022 b)

¹¹⁰ Vgl. (Vahrenholt 2023), S. 107

¹¹¹Vgl. (Wikipedia, 2022) https://en.wikipedia.org/wiki/International_Nuclear_Event_Scale

radiologische Ereignisse auf Stufe 7 eingestuft. Offizielle Zahlen zeigen, dass es 2.313 katastrophenbedingte Todesfälle unter den Evakuierten der Präfektur Fukushima gab.¹¹² Alle vier Reaktoren des Kernkraftwerks mit einer gesamten Leistung von 2,7 GW wurden aufgrund von Schäden bei dem Unfall abgeschaltet.

Der Unfall von Tschernobyl im Jahr 1986 war das Ergebnis einer fehlerhaften Reaktorkonstruktion, die mit unzureichend trainiertem Personal betrieben wurde. Durch die daraus resultierende Dampfexplosion und die Brände wurden mindestens 5 % des radioaktiven Reaktorkerns in die Umwelt freigesetzt, wodurch sich radioaktive Stoffe in vielen Teilen Europas ablagerten. Zwei Arbeiter des Kernkraftwerks Tschernobyl starben an den Folgen der Explosion, und weitere 28 Menschen starben innerhalb weniger Wochen an den Folgen des akuten Strahlensyndroms. Dieser Unfall wurde auf der INES Skala auf der Stufe 7 eingestuft. Die Einstufung weiterer Atomunfälle auf der INES Skala sowie die Beschreibung verschiedener Stufen sind in Abbildung 44: Flächenbedarf diverser Arten von Stromerzeugung

Abbildung 45 im Anhang zu finden.

Unabhängig davon, wie das Uran aus dem Gestein gewonnen wird, bleiben bei den Verfahren zur Gewinnung radioaktive Abfälle zurück. So werden beispielsweise die festen radioaktiven Abfälle, die beim Mahlen zurückbleiben, als *Tailings* bezeichnet und die flüssigen Abfälle aus der In-situ-Extraktion als *Raffinate*.¹¹³ Im Uranbergbau fallen Abraumhalden an, die in der Regel in oberflächennahen Lagerstätten in der Nähe der Mine „entsorgt“ werden. Diese Abraumhalden stellen ernsthafte Umwelt- und Gesundheitsrisiken in Form von Radon-Emissionen und dem Entweichen von Schwermetallen und Arsen in das Grundwasser dar.¹¹⁴ In der Vergangenheit wurden diese Risiken in vielen Ländern der Welt politisch thematisiert, da sie unverhältnismäßig stark einkommensschwache Bevölkerungsgruppen und Minderheiten betrafen. So haben die Vereinigten Staaten beispielsweise von 1944 bis 1986 4 Mio t Uranerz abgebaut und 500 verlassene Minen im Gebiet der Navajo hinterlassen.¹¹⁵ In dieser Zeit stiegen die Raten von Lungenkrebs und anderen Krankheiten bei den Navajo, die in der Nähe der Minen lebten, drastisch an.¹¹⁶

¹¹²Vgl. (World Nuclear Association, 2022 e)

¹¹³Vgl. (EPA, 2022)

¹¹⁴ Uran zerfällt auf natürlichem Weg zu Radongas

¹¹⁵Vgl. (Longstaff, 2017)

¹¹⁶Vgl. (Arnold, 2014)

Darüber hinaus haben mehrere Untersuchungen, darunter von der japanischen Kyoto-Universität und der indischen Jadavpur-Universität, eine radioaktive Verschmutzung der Luft, des Wassers und des Bodens im Dorf von Jadugoda, Indien, bestätigt, wo seit dem Jahr 1967 im Tagebau Uran abgebaut wird.¹¹⁷ Ein unabhängiger Nuklearwissenschaftler hat Fälle von angeborenen Missbildungen, Unfruchtbarkeit, Krebs, Atemwegsproblemen und Fehlgeburten in Jadugoda dokumentiert.

Eine sichere, transparentere und umweltschonende Gewinnung von Uran wäre nötig, um den Schutz der Menschenrechte von indigenen Völkern und eine gerechtere Nutzung von Kernenergie in Entwicklungsländern zu ermöglichen. Durch den Einsatz von Robotern könnte die Arbeit von Menschen in gesundheitsschädlichen Minen vermieden werden, während Drohnen die Verbreitung von umwelt- und gesundheitsschädlichen Stoffen überwachen könnten. Laut GlobalData ist die Robotertechnologie für jedes Bergbauunternehmen, das wettbewerbsfähig sein will, zukünftig unverzichtbar.¹¹⁸ Die künftigen Ziele von Bergbauunternehmen – Sicherheit, Produktivität und Nachhaltigkeit – können alle durch den Einsatz von Robotern unterstützt werden.

2.2.6 Entwicklungsrelevanz und Geopolitik

Die IAEA hat Verhaltensregeln aufgestellt, um eine globale Sicherheit bei der Nutzung der Kernenergie gewährleisten zu können. Die Verhaltensregeln sind ein anerkanntes, nicht rechtsverbindliches internationales Instrument, das von mehr als 130 Mitgliedstaaten politisch unterstützt wird.¹¹⁹ ¹²⁰ Die [Guidance on the Import and Export of Radioactive Sources](#) ergänzt den Code und soll für eine angemessene Übertragung der Verantwortung sorgen, wenn eine radioaktive Quelle von einem Staat in einen anderen verbracht wird.¹²¹ Die [Guidance on the Management of Disused Radioactive Sources](#) enthält weitere Leitlinien für die Festlegung einer nationalen Politik und Strategie für die Entsorgung ausgedienter radioaktiven Strahlenquellen sowie für die Umsetzung von Entsorgungsoptionen wie Recycling und Wiederverwendung, langfristige Lagerung bis zur Entsorgung und Rückgabe an einen Lieferanten.¹²²

In der Europäischen Union werden für die nukleare Sicherheit ein breites Spektrum von Tätigkeiten wie die Gewährleistung ordnungsgemäßer Betriebsbedingungen für Kernkraftwerke und die Vermeidung von Unfällen und die Abmilderung der Folgen von Unfällen ausgeführt.

¹¹⁷Vgl. (Aljazeera, 2014)

¹¹⁸Vgl. (GlobalData Thematic Research & MiningTechnology, 2022)

¹¹⁹Vgl. (IAEA, 2018)

¹²⁰Vgl. (IAEA, 2022 b)

¹²¹Vgl. (IAEA, 2018)

¹²²Vgl. (IAEA, 2018)

Mit der Änderung der Richtlinie über nukleare Sicherheit ([2014/87/Euratom](#)) hat die EU ihre Führungsrolle im Bereich der nuklearen Sicherheit weltweit deutlich ausgebaut.¹²³

In Indien werden die Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Errichtung und Nutzung kerntechnischer Anlagen und der Verwendung radioaktiver Quellen gemäß den Bestimmungen des [Atomic Energy Act von 1962](#) durchgeführt. Die Aspekte des Umweltschutzes werden durch den *Environmental Protection Act, 1986*, geregelt. Die Vorschriften für Strahlenschutzaspekte sind in den [Radiation Protection Rules, 1962](#) festgelegt. Die Sicherheitsaspekte beim Abbau und der Verarbeitung von sogenannten „Prescribed Substances“ sind in den [Mines Minerals Prescribed Substance Rules, 1984](#), geregelt. Die sichere Abfallentsorgung wird durch die Umsetzung der [Atomic Energy Safe Disposal of Radioactive Waste Rules, 1987](#), gewährleistet.

2.2.6.1 Friedliche Nutzung der Kernenergie

Der Technologieaustausch und die Zusammenarbeit zwischen den Nationen können auch die Entwicklung der Kernkraft und der Kernforschung in den Entwicklungsländern betreffen. Das Rooppur-Projekt in Bangladesch ist beispielsweise die erste Initiative im Rahmen eines indisch-russischen Abkommens zur Durchführung von Atomenergieprojekten in Drittländern.¹²⁴

Die indische NPCIL wird eine Schlüsselrolle beim Bau eines Kernkraftwerks auf fremdem Boden spielen, da sie Ausrüstungen und Material für das von Russland in Bangladesch gebaute Kraftwerk liefern soll. Rosatom hat außerdem mit dem Bau von zwei Kernkraftwerken in Ungarn im Jahr 2022 begonnen.¹²⁵

Russland gilt als Weltmarktführer für den Export von Kernkraftwerken. Das staatliche Unternehmen Rosatom hat zwischen 2012 und 2021 mit dem Bau von 19 Kernreaktoren begonnen, davon 15 im Ausland.¹²⁶ Das ist weit mehr als die nächsten wichtigen Kernkraftwerksentwickler China, Frankreich und Südkorea realisieren. Obwohl China im selben Zeitraum mit dem Bau von 29 Reaktoren begonnen hat, wurden nur zwei davon im Ausland in Betrieb genommen. Frankreich begann mit dem Bau von zwei Reaktoren im Ausland und Südkorea mit vier.

Etwa 40 % des weltweit raffinierten Urans stammt aus Russland.¹²⁷ Es gibt mindestens 50 Länder, die in irgendeiner Form mit Russland im Nuklearbereich zusammenarbeiten. Rosatom ist auch führend bei der Anreicherung von Uran und bietet etwa 46 % des weltweit angereicherten Urans auf dem Weltmarkt an. Gleichzeitig wird der Anteil von Chinas CNNC am Weltmarkt in Höhe von 18 % im Jahr 2018 auf 28 % im Jahr 2030 steigen.

¹²³Vgl. (European Union, 2015)

¹²⁴Vgl. (Economic Times, 2018)

¹²⁵Vgl. (Euronews, 2022)

¹²⁶Vgl. (REFRL, 2022)

¹²⁷Vgl. (REFRL, 2022)

Eine solche Abhängigkeit von einer Handvoll Lieferanten kann sich nachteilig auf die Energiesicherheit der Welt auswirken, und die Abhängigkeiten können zu geopolitischen Zwecken ausgenutzt werden, wie die Welt beim Einmarsch Russlands in die Ukraine erfährt.

2.2.6.2 Militärische Nutzung der Kernenergie

Neun Länder, nämlich die Vereinigten Staaten, Russland, Frankreich, China, das Vereinigte Königreich, Pakistan, Indien, Israel und Nordkorea, besitzen Atomwaffen¹²⁸. Insgesamt beläuft sich das weltweite Atomwaffenarsenal auf etwa 13.000 Waffen, was weniger ist als die 60.000 Waffen, die es während des Kalten Krieges gab.¹²⁹ Ein überwiegender Teil dieser Waffen ist unter Kontrolle der USA und Russland – 5.400 bzw. 6.000 Waffen.

Das wichtigste Waffenmaterial ist hochangereichertes Uran, das mindestens 20 % Uran-235 (U^{235}) und in der Regel etwa 90 % U^{235} enthält. Hochangereichertes Uran kann mit Uran mit geringem U^{235} -Gehalt gemischt werden, um schwach angereichertes Uran mit weniger als 5 % U^{235} als Brennstoff für Kernkraftwerke herzustellen. Es wird mit abgereichertem Uran (überwiegend U^{238}), Natururan (0,7 % U^{235}) oder teilerreichertem Uran gemischt. Das hochangereicherte Uran in den Waffen- und sonstigen Militärbeständen der USA und Russlands beläuft sich auf etwa 1,5 kt, gemäß des Berichts aus dem Jahr 2017 von World Nuclear Association.¹³⁰

Die Zusagen der USA und Russlands, Atomwaffen in Brennstoff für die Stromerzeugung umzuwandeln, wurden als "Megatons to Megawatts"-Programm bekannt. Zwischen den Jahren 1993 und 2013 sollten 500 t hochangereichertes Uran von Russland in schwach angereichertes Uran umgewandelt werden, das von den USA zur Verwendung in Kernkraftwerken gekauft werden sollte.¹³¹ Außerdem besteht waffenfähiges Plutonium zu über 93 % aus Pu^{239} und kann wie reaktorfähiges Plutonium als Brennstoff für die Stromerzeugung verwendet werden. Dieses Potenzial bleibt jedoch aus technisch-wirtschaftlichen Gründen begrenzt.

¹²⁸Vgl. Statista (2022a) <https://www.statista.com/statistics/264435/number-of-nuclear-warheads-world-wide/#:~:text=As%20a%20weapon%20of%20mass,the%20United%20States%20and%20Russia.>

¹²⁹Vgl. (Union of Concerned Scientist USA, 2022)

¹³⁰Vgl. (World Nuclear Association, 2017)

¹³¹Vgl. (World Nuclear Association, 2017)

Anhang zu 2.2

Tabelle 4: Liste der unter Konstruktion stehenden Kernspaltungskraftwerke

Startjahr	Ort	Reaktor	Model	Gross GWe
2022	Belarus, BNPP	Ostrovets 2	VVER-1200	1,2
2022	China, CGN	Fangchenggang 3	Hualong One	1,2
2022	Russia, Rosenergoatom	Kursk II-1	VVER-TOI	1,3
2022	Slovakia, SE	Mochovce 3	VVER-440	0,5
2023	Bangladesh	Rooppur 1	VVER-1200	1,2
2023	China, CGN	Fangchenggang 4	Hualong One	1,2
2023	China, CNNC	Xiapu 1	CFR600	0,6
2023	France, EDF	Flamanville 3	EPR	1,7
2023	India, NPCIL	Kakrapar 4	PHWR-700	0,7
2023	India, NPCIL	Kalpakkam PFBR	FBR	0,5
2023	India, NPCIL	Kudankulam 3	VVER-1000	1,0
2023	India, NPCIL	Kudankulam 4	VVER-1000	1,0
2023	India, NPCIL	Rajasthan 7	PHWR-700	0,7
2023	India, NPCIL	Rajasthan 8	PHWR-700	0,7
2023	Korea, KHNP	Shin Hanul 2	APR1400	1,4
2023	Korea, KHNP	Shin Kori 5	APR1400	1,4
2023	Russia, Rosenergoatom	Kursk II-2	VVER-TOI	1,3
2023	Slovakia, SE	Mochovce 4	VVER-440	0,5
2023	Turkey	Akkuyu 1	VVER-1200	1,2
2023	UAE, ENEC	Barakah 4	APR1400	1,4
2023	USA, Southern	Vogtle 3	AP1000	1,3
2023	USA, Southern	Vogtle 4	AP1000	1,3
2024	Bangladesh	Rooppur 2	VVER-1200	1,2
2024	China, SPIC & Huaneng	Shidaowan 1	CAP1400	1,5
2024	China, Guodian & CNNC	Zhangzhou 1	Hualong One	1,2
2024	Iran	Bushehr 2	VVER-1000	1,1
2024	Korea, KHNP	Shin Kori 6	APR1400	1,4
2024	Turkey	Akkuyu 2	VVER-1200	1,2

2025	China, SPIC & Huaneng	Shidaowan 2	CAP1400	1,5
2025	China, CGN	Taipingling 1	Hualong One	1,2
2025	China, Guodian & CNNC	Zhangzhou 2	Hualong One	1,2
2025	Turkey	Akkuyu 3	VVER-1200	1,2
2026	China, CGN	Cangnan/San'ao 1	Hualong One	1,2
2026	China, Huaneng & CNNC	Changjiang 3	Hualong One	1,2
2026	China, CNNC	Changjiang SMR 1	ACP100	0,1
2026	China, CGN	Taipingling 2	Hualong One	1,2
2026	China, CNNC	Tianwan 7	VVER-1200	1,2
2026	China, CNNC	Xiapu 2	CFR600	0,6
2026	India, NPCIL	Kudankulam 5	VVER-1000	1,0
2026	Russia, Rosatom	BREST-OD-300	BREST-300	0,3
2026	Turkey	Akkuyu 4	VVER-1200	1,2
2027	Argentina, CNEA	Carem	Carem25	0,0
2027	China, CGN	Cangnan/San'ao 2	Hualong One	1,2
2027	China, CNNC	Sanmen 3	CAP1000	1,3
2027	China, CNNC	Tianwan 8	VVER-1200	1,2
2027	China, CNNC & Datang	Xudabao 3	VVER-1200	1,2
2027	China, Huaneng & CNNC	Changjiang 4	Hualong One	1,2
2027	India, NPCIL	Kudankulam 6	VVER-1000	1,0
2027	UK, EDF	Hinkley Point C1	EPR	1,7
2028	Brazil, Eletrobrás	Angra 3	Pre-Konvoi	1,4
2028	China, CGN	Lufeng 5	Hualong One	1,2
2028	China, CNNC & Datang	Xudabao 4	VVER-1200	1,2
2028	Egypt, NPPA	El Dabaa 1	VVER-1200	1,2
2028	UK, EDF	Hinkley Point C2	EPR	1,7
2030	Egypt, NPPA	El Dabaa 2	VVER-1200	1,2

Tabelle 5: Liste von im Bau befindlicher Small Modular Reactors weltweit

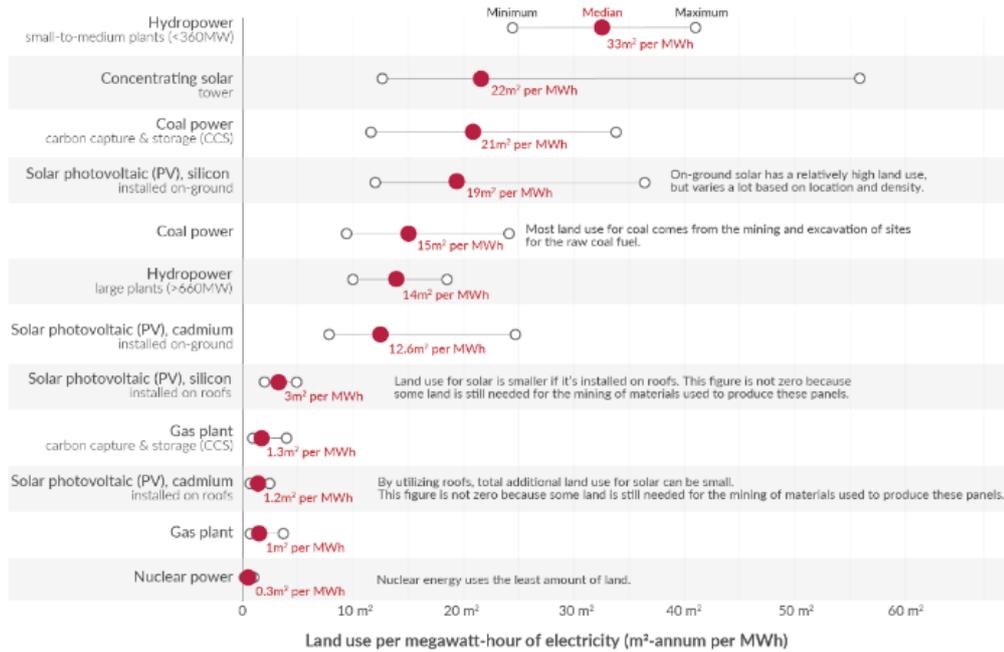
Design	Output MW(e)	Type	Designers	Country	Status
PART 1: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (LAND BASED)					
CAREM	30	PWR	CNEA	Argentina	Under construction
ACP100	100	PWR	CNNC	China	Detailed Design
CANDU SMR	300	PHWR	Candu Energy Inc (SNC-Lavalin Group)	Canada	Conceptual Design
CAP200	200	PWR	SNERDI/SPIC	China	Conceptual Design
DHR400	400 MW(t)	LWR (pool type)	CNNC	China	Basic Design
HAPPY200	200 MW(t)	PWR	SPIC	China	Detailed Design
TEPLATOR™	50 MW(t)	HWR	UWB Pilsen & CIIRC CTU	Czech Republic	Conceptual Design
NUWARD	2 × 170	PWR	EDF, CEA, TA, Naval Group	France	Conceptual Design
IRIS	335	PWR	IRIS Consortium	Multiple Countries	Basic Design
DMS	300	BWR	Hitachi-GE Nuclear Energy	Japan	Basic Design
IMR	350	PWR	MHI	Japan	Conceptual Design
SMART	107	PWR	KAERI and K.A.CARE	Republic of Korea, and Saudi Arabia	Certified Design
RITM-200	2 × 53	PWR	JSC "Afrikantov OKBM"	Russian Federation	Under Development
UNITHERM	6.6	PWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
VK-300	250	BWR	NIKIET	Russian Federation	Detailed Design
KARAT-45	45 - 50	BWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
KARAT-100	100	BWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
RUTA-70	70 MW(t)	PWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
ELENA	68 kW(e)	PWR	National Research Centre "Kurchatov Institute"	Russian Federation	Conceptual Design
UK SMR	443	PWR	Rolls-Royce and Partners	United Kingdom	Conceptual Design
NuScale	12 × 60	PWR	NuScale Power Inc.	United States of America	Under Regulatory Review
BWRX-300	270 - 290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi GE Nuclear Energy	United States of America, Japan	Pre-licensing
SMR-160	160	PWR	Holtec International	United States of America	Preliminary Design
W-SMR	225	PWR	Westinghouse Electric Company, LLC	United States of America	Conceptual Design
mPower	2 × 195	PWR	BWX Technologies, Inc	United States of America	Conceptual Design
PART 2: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (MARINE BASED)					
KLT-40S	2 × 35	PWR in Floating NPP	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	In Operation
RITM-200M	2 × 50	PWR in FNPP	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Under Development
ACPR50S	50	PWR in FNPP	CGNPC	China	Conceptual Design
ABV-6E	6-9	PWR in FNPP	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Final design
VBER-300	325	PWR in FNPP	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Licensing Stage

SHELF	6.6	PWR in Immersed NPP	NIKIET	Russian Federation	Detailed Design
PART 3: HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS					
HTR-PM	210	HTGR	INET, Tsinghua University	China	Under Construction
StarCore	14/20/60	HTGR	StarCore Nuclear	Canada/UK/US	Pre-Conceptual Design
GTHTR300	100 - 300	HTGR	JAEA	Japan	Pre-licensing
GT-MHR	288	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Preliminary Design
MHR-T	4 × 205.5	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Conceptual Design
MHR-100	25 – 87	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Conceptual Design
PBMR-400	165	HTGR	PBMR SOC Ltd	South Africa	Preliminary Design
A-HTR-100	50	HTGR	Eskom Holdings SOC Ltd.	South Africa	Conceptual Design
HTMR-100	35	HTGR	Steenkampskraal Thorium Limited	South Africa	Conceptual Design
Xe-100	82.5	HTGR	X-Energy LLC	United States of America	Basic Design
SC-HTGR	272	HTGR	Framatome, Inc.	United States of America	Conceptual Design
HTR-10	2.5	HTGR	INET, Tsinghua University	China	Operational
HTTR-30	30 (t)	HTGR	JAEA	Japan	Operational
RDE	3	HTGR	BATAN	Indonesia	Conceptual Design
PART 4: FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS					
BREST-OD-300	300	LMFR	NIKIET	Russian Federation	Detailed Design
ARC-100	100	Liquid Sodium	ARC Nuclear Canada, Inc.	Canada	Conceptual Design
4S	10	LMFR	Toshiba Corporation	Japan	Detailed Design
microURANUS	20	LBR	UNIST	Korea, Republic of	Pre-Conceptual Design
LFR-AS-200	200	LMFR	Hydromine Nuclear Energy	Luxembourg	Preliminary Design
LFR-TL-X	5–20	LMFR	Hydromine Nuclear Energy	Luxembourg	Conceptual Design
SVBR	100	LMFR	JSC AKME Engineering	Russian Federation	Detailed Design
SEALER	3	LMFR	LeadCold	Sweden	Conceptual Design
EM ²	265	GMFR	General Atomics	United States of America	Conceptual Design
Westinghouse LFR	450	LMFR	Westinghouse Electric Company, LLC.	United States of America	Conceptual Design
SUPERSTAR	120	LMFR	Argonne National Laboratory	United States of America	Conceptual Design
PART 5: MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS					
Integral MSR	195	MSR	Terrestrial Energy Inc.	Canada	Conceptual Design
smTMSR-400	168	MSR	SINAP, CAS	China	Pre-Conceptual Design
CA Waste Burner 0.25	20 MW(t)	MSR	Copenhagen Atomics	Denmark	Conceptual Design
ThorCon	250	MSR	ThorCon International	International Consortium	Basic Design
FUJI	200	MSR	International Thorium Molten-Salt Forum: ITMSF	Japan	Experimental Phase
Stable Salt Reactor - Wasteburner	300	MSR	Moltex Energy	United Kingdom / Canada	Conceptual Design
LFTR	250	MSR	Flibe Energy, Inc.	United States of America	Conceptual Design
KP-FHR	140	Pebble-bed salt cooled Reactor	KAIROS Power, LLC.	United States of America	Conceptual Design
Mk1 PB-FHR	100	FHR	University of California at Berkeley	United States of America	Pre-Conceptual Design
MCSFR	50 - 1200	MSR	Elysium Industries	USA and Canada	Conceptual Design
PART 6: MICRO MODULAR REACTORS					
Energy Well	8	FHTR	Centrum výzkumu Rež	Czech Republic	Pre-Conceptual Design
MoveInX	3–4	Heat Pipe	Toshiba Corporation	Japan	Conceptual Design
U-Battery	4	HTGR	Urenco	United Kingdom	Conceptual Design
Aurora	1.5	FR	OKLO, Inc.	United States of America	Conceptual Design
Westinghouse eVinci	2 -3.5	Heat Pipe	Westinghouse Electric Company, LLC.	United States of America	Under Development
MMR	5-10	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation	United States of America	Preliminary Design

Land use of energy sources per unit of electricity



Land use is based on life-cycle assessment; this means it does not only account for the land of the energy plant itself but also land used for the mining of materials used for its construction, fuel inputs, decommissioning, and the handling of waste.



The land use of onshore wind can be measured in several ways, and is distinctly different from land use of other energy technologies. Land between wind turbines can be used for other purposes (such as farming), which is not the case for other energy sources. The spacing of turbines, and the context of the site means land use is highly variable.



*** Capacity factors are taken into account for each technology which adjusts for intermittency. Land use of energy storage is not included since the quantity of storage depends on the composition of the electricity mix. Source: UNECE (2021). Lifecycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe for all data except wind. Wind land use calculated by the author. See OurWorldinData.org/land-use-per-energy-source for more research on this topic. Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Abbildung 44: Flächenbedarf diverser Arten von Stromerzeugung¹³²

Abbildung 45: Diverse Atomunfälle auf INES Skala

Nächste Seite

INES scale

The International Nuclear Event Scale (INES) is a tool for facilitating communication with the public in the event of a nuclear incident.

Each one-step increase on the INES represents a 10 times increase in severity

Accidents	Major Accident Level 7	DESCRIPTION Major release of radioactive material with widespread health effects.
	Serious Accident Level 6	Significant release of radioactive material.
	Accident with Wider Consequences Level 5	Limited release of radioactive material. At least several deaths from radiation.
	Accident with Local Consequences Level 4	Minor release of radioactive material. At least one death from radiation.
Incidents	Serious Incident Level 3	Near accident at a nuclear power plant with no safety provisions remaining.
	Incident Level 2	Public exposure in excess of 10 mSv. Worker's exposure in excess of the statutory annual limits.
	Anomaly Level 1	Public exposure in excess of annual limits. Reduced activity or stolen radioactive source, device or transport package.

Source: International Atomic Energy Agency

G. Cabrera, 21/08/2013

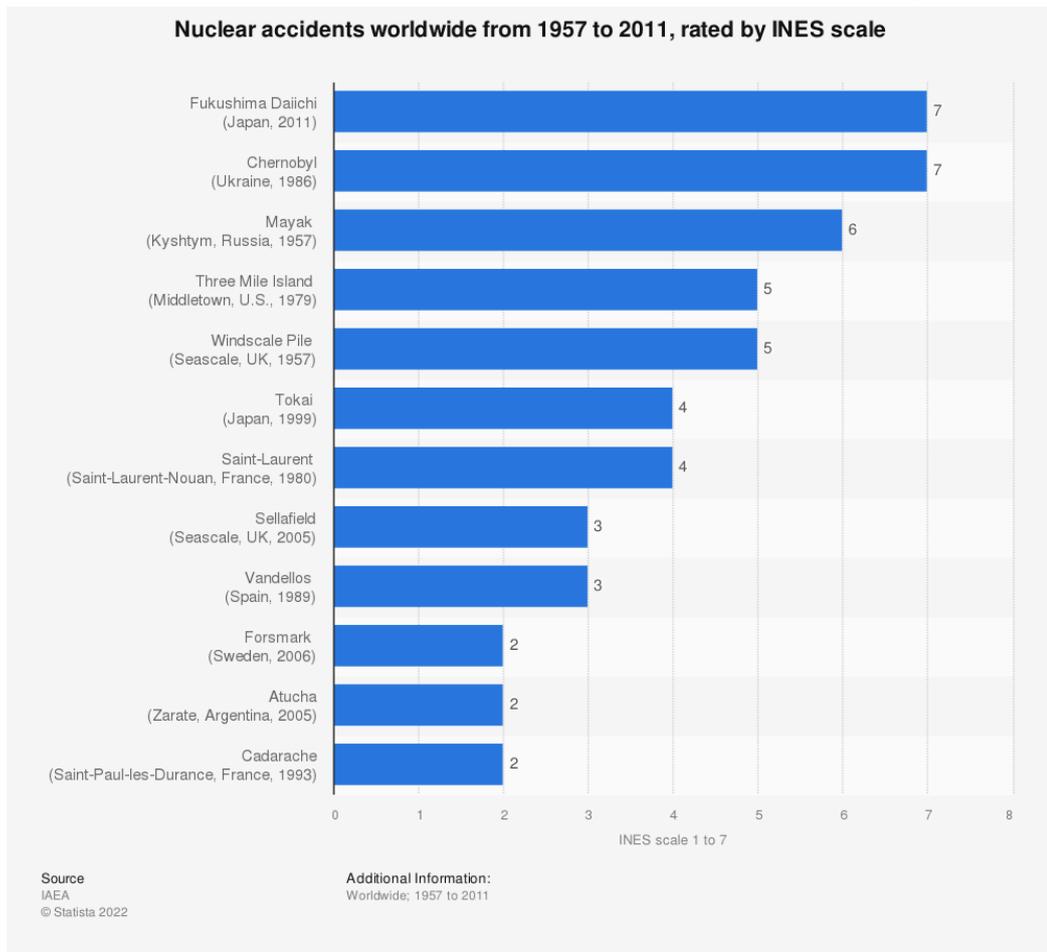


Abbildung 46: Weltweite Atomunfälle geordnet nach INES Skala;
Quelle: Statista (2022b)

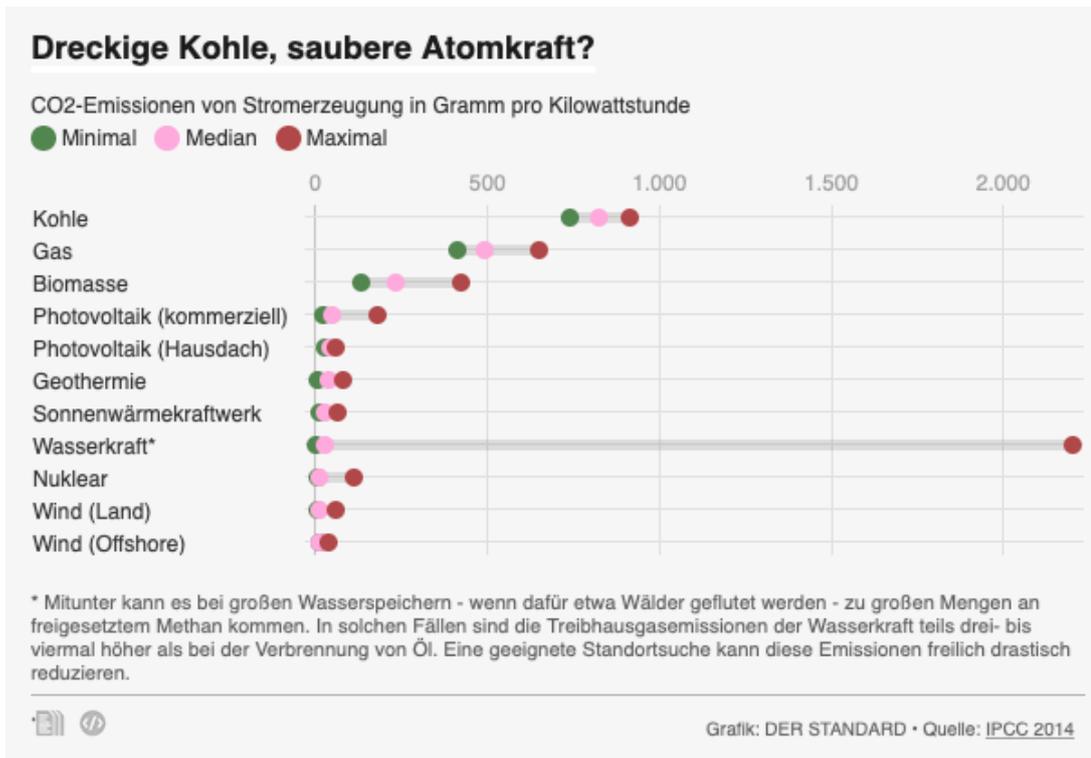


Abbildung 47: Dreckige Kohle, saubere Atomkraft;
Quelle: IPCC Report (2014)