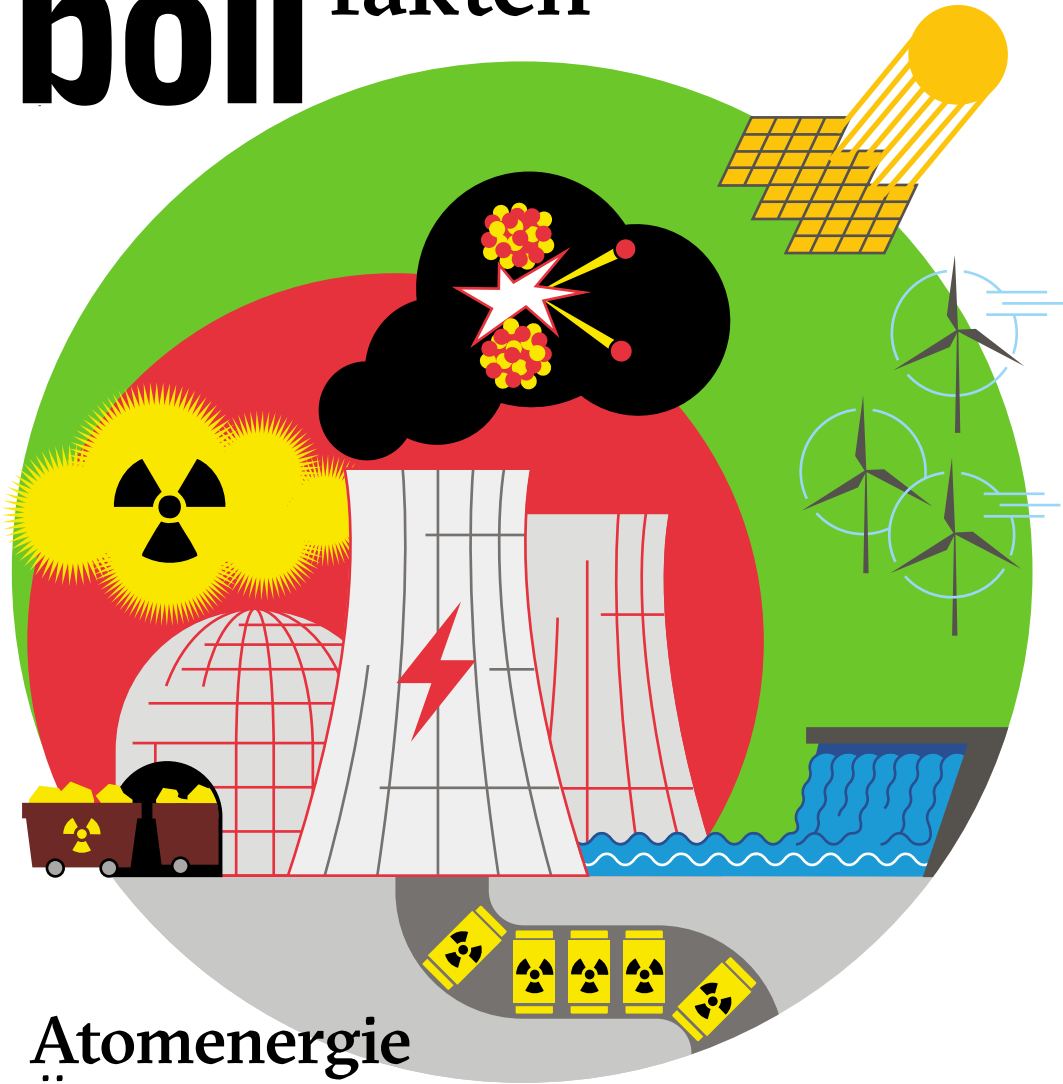


böll fakten



Atomenergie

Über Funktionsweisen und Risiken
einer umstrittenen Technologie

14 Fakten über die Atomenergie

- 1 **Wie funktioniert ein Atomkraftwerk?**
- 2 **Welchen Beitrag liefert die Atomenergie zur Stromerzeugung?**
- 3 **Ist die Atomenergie verlässlich und wichtig für die Versorgungssicherheit?**
- 4 **Entstehen Abhängigkeiten durch die Nutzung der Atomenergie?**
- 5 **Was kostet der Bau von Atomkraftwerken?**
- 6 **Ist Atomstrom günstig?**
- 7 **Sind Atomkraftwerke sicher?**
- 8 **Trägt Atomenergie zur Verbreitung von Atomwaffen bei?**
- 9 **Wie viel Atommüll entsteht durch die Nutzung der Atomenergie?**
- 10 **Welche Herausforderungen sind mit der Endlagerung von hochradioaktivem Atommüll verbunden?**
- 11 **Können alternative Reaktorkonzepte neue Perspektiven für die Atomenergie eröffnen?**
- 12 **Ist die Atomenergie nachhaltig?**
- 13 **Können die Klimaziele ohne den Ausbau der Atomenergie erreicht werden?**
- 14 **Unterstützt Atomenergie den Übergang zu einem klimaneutralen Energiesystem?**

Vorwort Seit Beginn ihrer Nutzung polarisiert die Atomenergie. Was zunächst vielversprechend erscheint – nämlich große Mengen Energie durch Kernspaltung freizusetzen –, birgt hohe Risiken und verursacht massive Umweltzerstörung. Und doch bleibt das Thema auch nach dem Atomausstieg in Deutschland aktuell: Die Energiekrise und die Suche nach effektiven Klimaschutzstrategien haben die politische Debatte über die Atomenergie wiederbelebt.

Unsere Faktensammlung zeigt: Klimaschutz gelingt auch ohne Atomenergie. Erneuerbare Energien sind nicht nur sicherer und nachhaltiger, sondern auch wirtschaftlicher.

Das Anliegen einer Energieversorgung ohne Atomkraft hat die Umweltbewegung geprägt und ist untrennbar mit der Geschichte der Grünen verbunden. Doch der Kampf gegen Atomkraft war immer mehr als die Kritik an deren Risiken und Umweltauswirkungen – es werden dabei auch grundsätzlichere Fragen von Lobbymacht, demokratischer Teilhabe und einer gerechteren Energieversorgung verhandelt. Denn der Wandel von fossilen und atomaren Großkraftwerken hin zu dezentralen Erneuerbaren Energien macht die Energieerzeugung zum Gesellschaftsprojekt. Der Atomausstieg ist ein großer Erfolg der Anti-Atomkraft-Bewegung, doch die Geschichte der Atomenergie ist damit nicht zu Ende. Deutschland steht vor der Aufgabe, fast 650.000 Kubikmeter radioaktiver Abfälle sicher zu lagern und die stillgelegten Kraftwerke verantwortungsvoll zurückzubauen. Auch deswegen bleibt Atomenergie ein aktuelles Thema, das uns alle angeht.

Zivilgesellschaftliches Engagement für eine gerechte, bezahlbare und nachhaltige Energieversorgung braucht Fachwissen. Mit diesem Heft der Reihe Böll.Fakten wollen wir ein besseres Verständnis der Funktionsweisen und Risiken der Atomenergie vermitteln und zeigen, wie sich der Atomausstieg wirtschaftlich und ökologisch positiv auswirkt.

Anna Brehm
Referentin für Ökologie der Heinrich-Böll-Stiftung

Fakt 1 Wie funktioniert ein Atomkraftwerk?

Atomkraftwerke erzeugen durch kontrollierte Kernspaltung Energie, aber es entstehen auch große Mengen gefährlicher radioaktiver Stoffe.

Unsere Welt besteht aus chemischen Elementen. Die kleinsten Bausteine der Elemente sind Atome. Die Kerne dieser Atome bestehen aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen. Wenn ein Atomkern mit vielen Protonen und Neutronen wie beim Element Uran ein weiteres Neutron einfängt, kann er zerbrechen. Es entstehen zwei oder mehrere leichtere Kerne, sogenannte Spaltprodukte. Dabei werden außerdem zwei bis drei Neutronen und eine große Menge Energie freigesetzt. Die freiwerdenden Neutronen können weitere Spaltungen auslösen; es kommt zu einer Kettenreaktion.

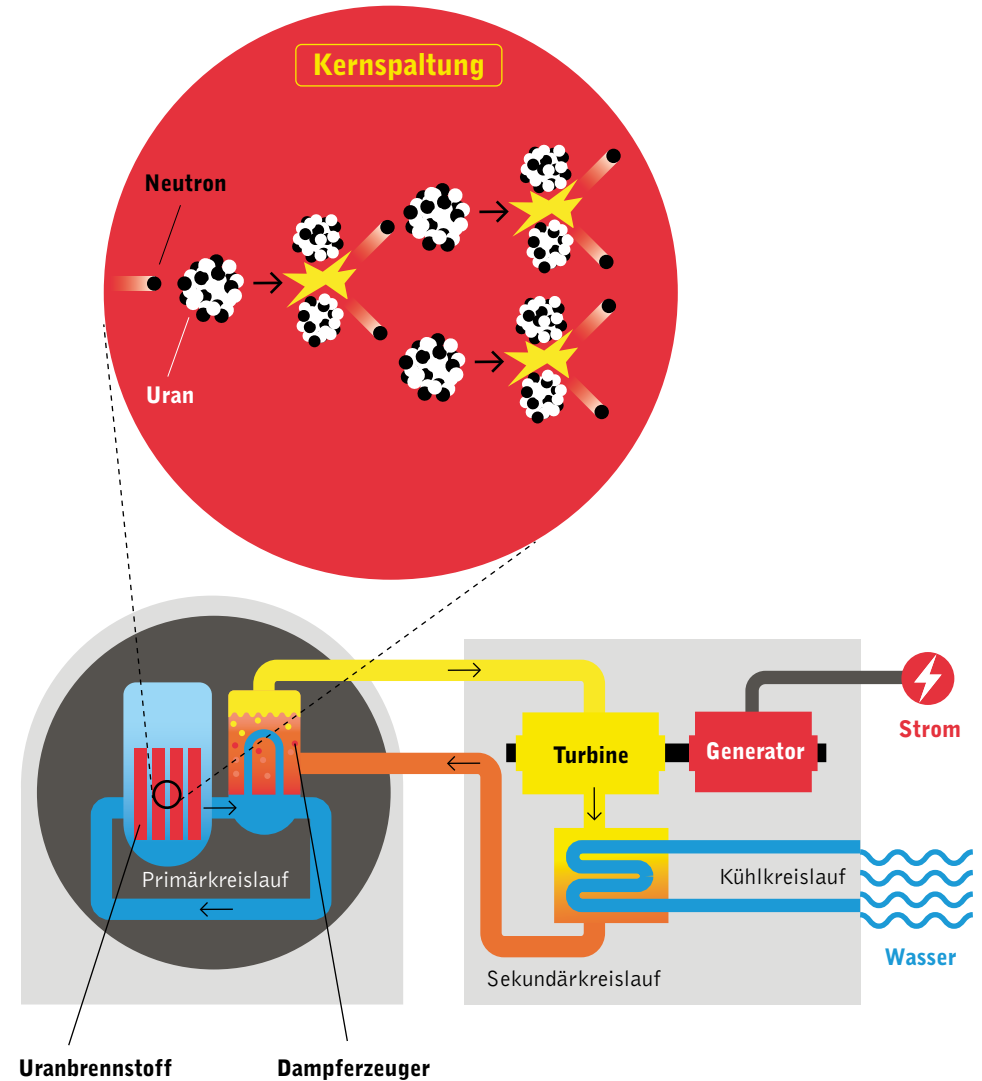
In Atomwaffen erfolgt diese Kettenreaktion unkontrolliert, sodass in kürzester Zeit extrem viel Energie explosionsartig freigesetzt wird. In Atomkraftwerken (AKW) wird die Kettenreaktion dagegen im Normalfall kontrolliert, damit immer eine gleichbleibende Menge an Energie freigesetzt wird.

Bei der Kernspaltung wird die meiste Energie als Wärme freigesetzt. Diese Wärme heizt im AKW den Brennstoff aus Uran sehr stark auf. Der Brennstoff muss deshalb gekühlt werden, wofür typischerweise Wasser verwendet wird. Ein Teil des Wassers verdampft entweder direkt bei der Kühlung (im Siedewasserreaktor) oder gibt die Wärme über einen Dampferzeuger an einen zweiten Kühlkreislauf ab (im Druckwasserreaktor). Der entstehende Dampf wird auf eine Turbine geführt, die einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Atomkraftwerke werden heute weltweit fast ausschließlich zur Stromerzeugung verwendet. Selten wird die entstehende Wärme auch direkt zur Wärmeversorgung von Industrie oder Haushalten genutzt.

Neben dem AKW braucht es für die Stromerzeugung mit Atomenergie Anlagen zum Abbau des Urans, Anlagen zur Aufbereitung und Anreicherung des Urans und zur Brennstoffherstellung sowie sichere Lager für den entstehenden radioaktiven Abfall.

Druckwasserreaktor und atomare Kettenreaktion

4/5



Fakt 2 Welchen Beitrag liefert die Atomenergie zur Stromerzeugung?

Atomkraft erzeugt weltweit nur 9 Prozent des Stroms und verliert in den kommenden Jahren weiter an Bedeutung.

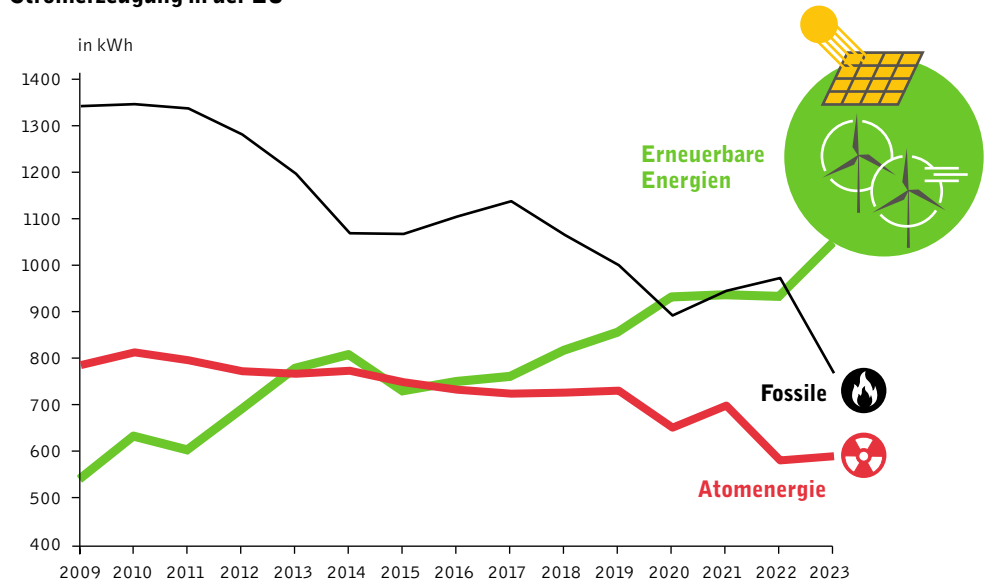
Weltweit wurden im Jahr 2023 nur 9 Prozent des Stroms mit Atomenergie erzeugt. Dieser Anteil ist seit dem Höchststand von 17 Prozent im Jahr 1996 kontinuierlich gesunken.¹ Im Vergleich lieferten Erneuerbare Energien 2023 bereits ein Drittel des globalen Stroms, und ihr Anteil steigt weiter.² Lediglich 32 Staaten betreiben Atomkraftwerke (AKW).³ Und während 2023 rund 23 Milliarden US-Dollar in neue AKW investiert wurden, waren es 27-mal so viel – 625 Milliarden US-Dollar – bei den Erneuerbaren Energien.⁴

In der EU betreiben nur 12 der 27 Mitgliedstaaten AKW. Der Höhepunkt der Atomstromerzeugung in der EU war bereits im Jahr 2004. Seitdem ist sie um mehr als ein Drittel auf einen Anteil von 24 Prozent an der Stromerzeugung zurückgegangen.⁵ Erneuerbare Energien haben die Atomenergie in der EU längst überholt und liefern aktuell 44 Prozent des europäischen Stroms – mit steigender Tendenz.

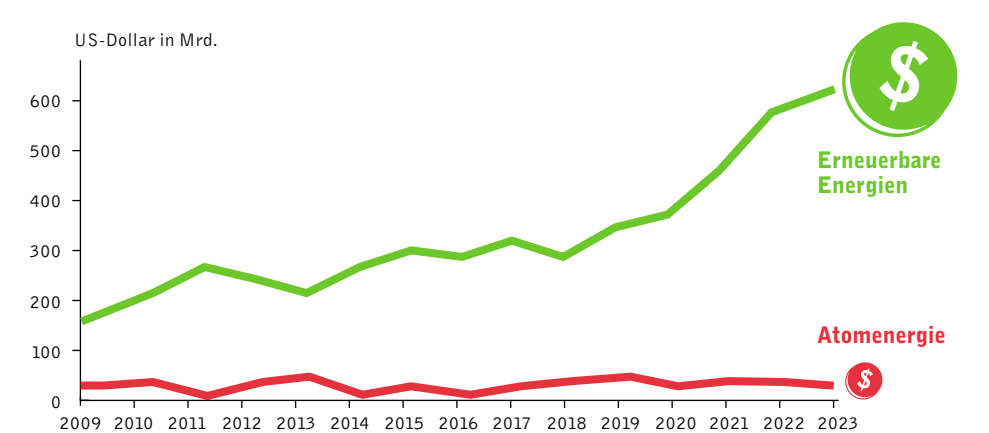
Deutschland schaltete 2023 die letzten drei AKW ab und musste dadurch etwa 30 Terawattstunden (TWh) Strom ersetzen.⁶ Doch die Erneuerbaren Energien lieferten im folgenden Jahr zusätzlich 32 TWh Strom – mehr als der Wegfall durch die AKW. Im Jahr nach dem deutschen Atomausstieg ging auch die Kohleverstromung um 36 Prozent zurück.⁷ Die befürchtete Abhängigkeit von ausländischen Stromimporten blieb aus: Deutschland importierte netto nur 2 Prozent seines Stroms,⁸ vor allem aus Dänemark, Norwegen und Schweden, wo erneuerbarer Strom günstiger war als heimischer aus Kohle und Gas.⁹

Italien und Litauen sind wie Deutschland aus der Atomenergie ausgestiegen, Belgien und Spanien haben den Ausstieg geplant. In Schweden und den Niederlanden haben rechte Regierungen den geplanten Ausstieg gestoppt und wollen neue AKW. Polen möchte in die Atomenergie einsteigen. Dennoch geht der Trend deutlich in Richtung einer erneuerbaren Stromerzeugung, die Bedeutung der Atomenergie nimmt ab.

Stromerzeugung in der EU



Globale Investitionen in neue Erneuerbare und Atomenergie



Fakt 3 Ist die Atomenergie verlässlich und wichtig für die Versorgungssicherheit?

Atomkraftwerke gefährden die Versorgungssicherheit, da sie häufig außer Betrieb sind und durch die Klimakrise zusätzliche Ausfälle drohen.

Auch Atomkraftwerke (AKW) kommen in die Jahre: Im weltweiten Schnitt sind sie 32 Jahre alt, einige sogar über 50.¹⁰ Mit zunehmendem Alter nimmt ihre Zuverlässigkeit ab – und damit auch die Versorgungssicherheit. Besonders deutlich wurde dies in Frankreich. Im Jahr 2022 war jedes der 56 französischen AKW umgerechnet 152 Tage außer Betrieb – das bedeutet, jedes AKW fiel mehr als 40 Prozent des Jahres aus.¹¹ Sogar zwölf der neuesten und größten AKW waren wegen unerwartet aufgefundener Risse abgeschaltet. 20 Reaktoren standen wegen Wartungsarbeiten still. Im Sommer mussten weitere AKW wegen Kühlwassermangels gedrosselt werden.

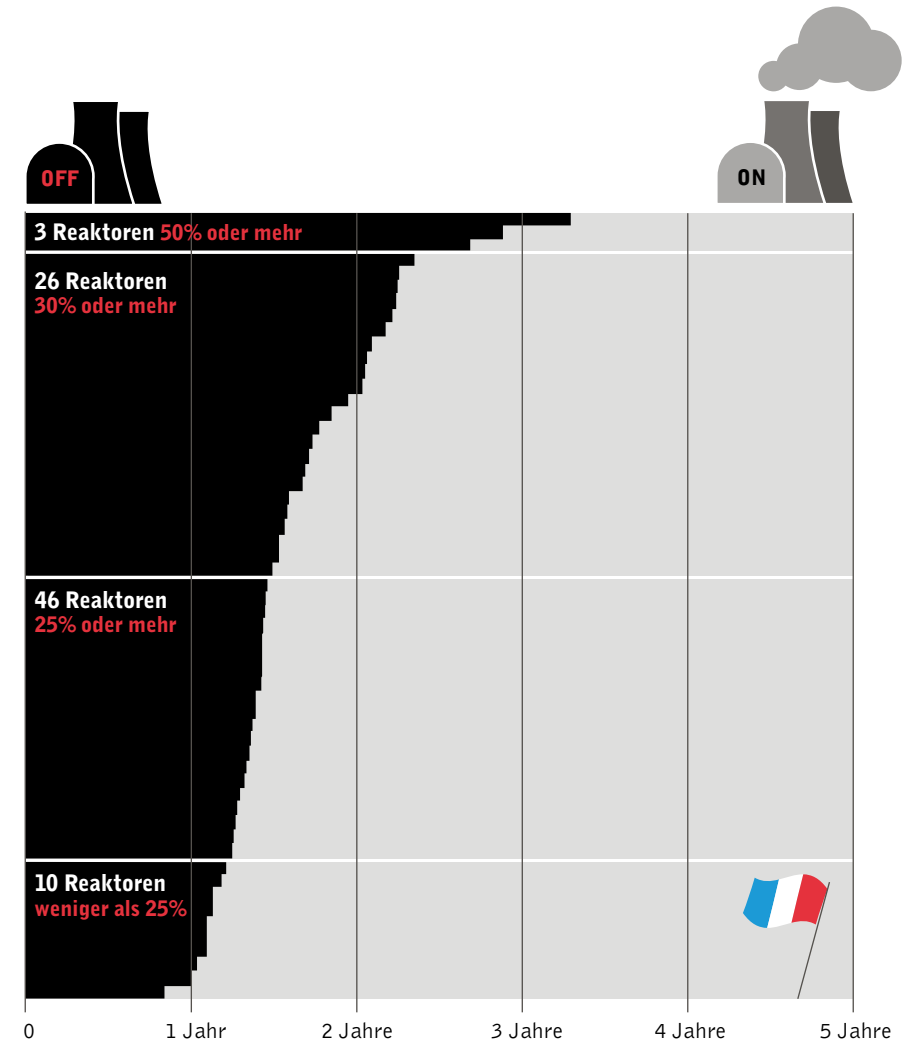
Aufgrund der Reaktorausträge wurde rund ein Viertel weniger Strom aus AKW erzeugt als im Vorjahr.^{12,13} Die Ausfälle mussten durch Stromimporte ersetzt werden und trugen so erheblich zu den hohen Strompreisen in Europa bei. Deutschland exportierte 2022 daher 15 Terawattstunden Strom nach Frankreich. Der Anteil der Kohle an der deutschen Stromerzeugung stieg dadurch um 10 Prozent. Diese Unsicherheit der französischen Stromerzeugung ist jedoch nicht neu:

2020 standen die Reaktoren im Schnitt 115 Tage still, 2023 waren es 127 Tage.¹⁴

In Frankreich hat sich auch gezeigt, wie die Klimakrise die Verlässlichkeit der AKW beeinträchtigt. Bei Trockenheit und Hitze kommt es zu geringerer Produktion oder Ausfällen, da weniger oder gar kein Kühlwasser zur Verfügung steht. Auch können AKW-Standorte an Flüssen häufiger von Überschwemmungen historischen Ausmaßes bedroht werden. Dabei können Schutt und Trümmer die Reaktoren beschädigen. AKW-Standorte an Küsten sind heftigeren Stürmen mit extremen Wasserständen und Flutwellen ausgesetzt und werden zudem durch den Anstieg des Meeresspiegels bedroht.

Auch Unfälle wie im japanischen Fukushima verdeutlichen die Risiken für die Energieversorgung. Vor dem Unfall produzierten die japanischen AKW 30 Prozent des Stroms, bis 2015 sank der Anteil auf fast null. Mehr als 10 Jahre nach dem Unfall liegt die Atomstromproduktion in Japan weiterhin auf sehr niedrigem Niveau.¹⁵

Nichtverfügbarkeit von französischen Atomkraftwerken jährlich in Prozent der Zeit, 2019–2023



Fakt 4 Entstehen Abhängigkeiten durch die Nutzung der Atomenergie?

Durch die Nutzung der Atomenergie machen sich europäische Staaten stark von Russland abhängig.

Russland hat gezielt strategische Abhängigkeiten der europäischen Staaten im Bereich der Atomenergie geschaffen. Diese sind so stark, dass die Atomenergie auch nach vielen EU-Sanktionspaketen gegen Russland von den Sanktionen ausgenommen bleibt.

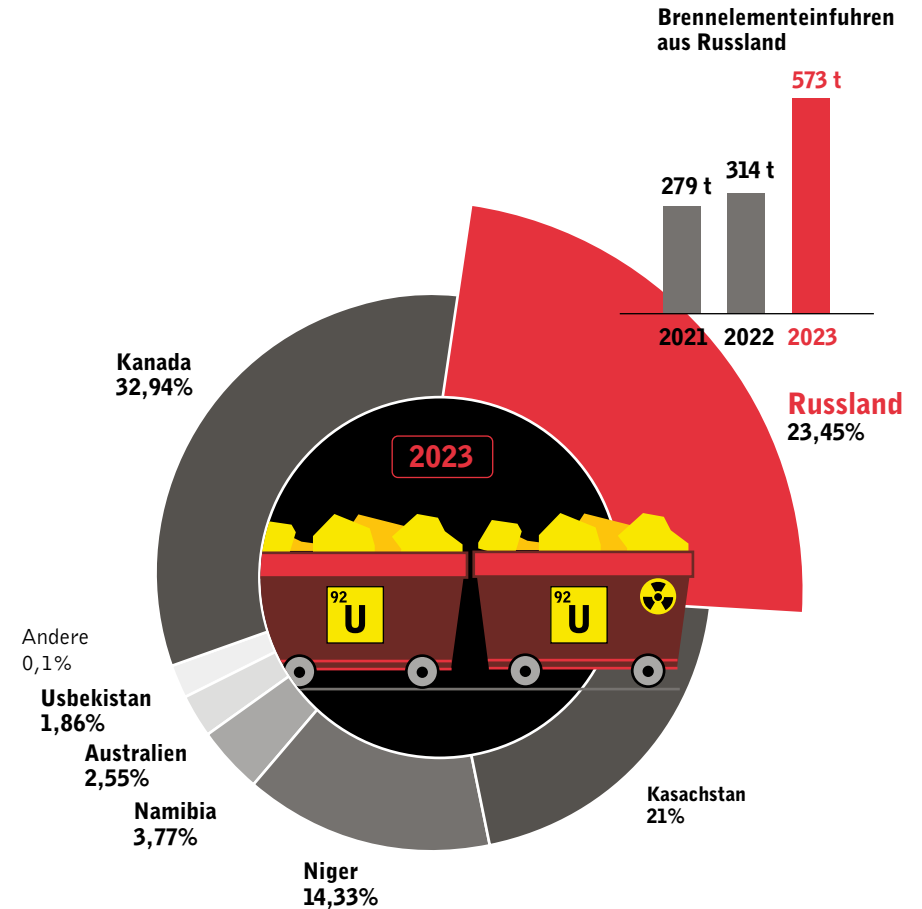
Die Abhängigkeit beginnt beim Uranbergbau. Im Jahr 2023 importierte die EU 23 Prozent ihres Urans aus Russland. Ähnliche Mengen kamen aus Kasachstan,¹⁶ wo allerdings auch 22 Prozent der Uranproduktion russischen Unternehmen gehören.¹⁷ Bevor das Uran verwendet werden kann, muss es angereichert werden. Der russische Staatskonzern Rosatom übernahm 2023 rund 38 Prozent der Anreicherung für die europäischen Versorger. Aber auch in die USA lieferte Russland ein Viertel des angereicherten Urans.

Am deutlichsten ist die europäische Abhängigkeit jedoch bei der Herstellung von Brennelementen. Russland liefert Brennelemente für 19 AKW russischer Bauart in Bulgarien, Finnland, Rumänien, der Slowakei, Tschechien und Ungarn. Der Großteil dieser AKW

ist vollständig von russischen Brennelementen abhängig.¹⁸ Der Aufbau alternativer Produktionskapazitäten in westlichen Ländern wird mindestens 6 Jahre dauern.¹⁹ Rosatom übernimmt in einigen osteuropäischen Ländern auch die Wartung und die Versorgung mit Ersatzteilen.

Aber auch die westeuropäischen AKW sind nicht unabhängig. Der französische Atomkonzern Areva arbeitet mit der russischen Firma TVEL zusammen, um Brennelemente für AKW in Westeuropa zu liefern.²⁰ Noch im Dezember 2021 hat der französische Konzern Framatome ein strategisches Kooperationsabkommen mit Rosatom unterzeichnet.²¹

Rosatom ist das einzige Unternehmen weltweit, das viele neue AKW in anderen Ländern baut (z.B. in Ägypten, Bangladesch, China, dem Iran, Indien, der Türkei oder der Slowakei)²², was den Einfluss und das Drohpotenzial Russlands weiter erhöht.



Fakt 5 Was kostet der Bau von Atomkraftwerken?

Der Neubau von AKW ist so teuer und riskant, dass private Energieunternehmen in Europa die Investitionssummen nicht aufbringen können.

In vielen Ländern der Welt gehören neue Atomkraftwerke (AKW) zu den teuersten Bauprojekten überhaupt. Die Kosten der Neubauten eines Reaktors lagen in den letzten Jahren zwischen 12 und fast 30 Milliarden US-Dollar. Alle AKW-Neubauprojekte in westlichen Ländern haben in diesem Jahrhundert sowohl die geplanten Bauzeiten als auch die geplanten Kosten massiv überschritten.

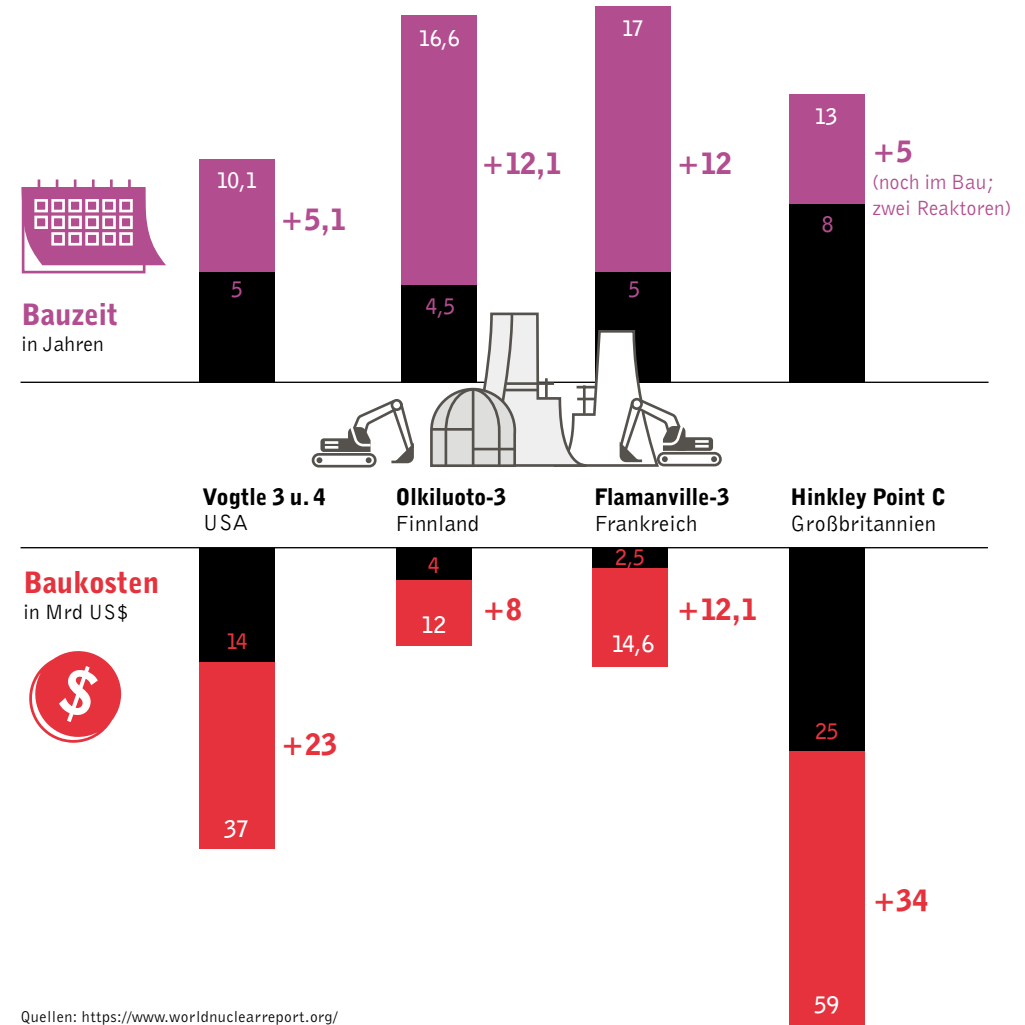
In den USA gingen in den beiden letzten Jahren zwei neue Reaktoren ans Netz, deren Bau 2013 begann. Die Baukosten stiegen von ursprünglich geplanten 14 Milliarden US-Dollar auf fast 37 Milliarden, also um 260 Prozent.²³ Bei Europas größtem Reaktor in Finnland stiegen die Kosten von den geplanten knapp 4 Milliarden US-Dollar auf über 12 Milliarden, und das AKW ging erst 2023 ans Netz – nach 17 Jahren Bauzeit.^{24,25} In Frankreich haben sich die Baukosten für das neue AKW in Flamanville von im Jahr 2001 geschätzten 2,5 Milliarden US-Dollar auf aktuell mindestens 14,6 Milliarden vervielfacht.²⁶ Erst nach 17 statt der geplanten

5 Jahre wurde 2024 der Probebetrieb aufgenommen.²⁷ Auch die Kosten für das neue AKW Hinkley Point C in Großbritannien mit zwei Reaktoren stiegen von den 2015 geplanten 25 Milliarden US-Dollar auf bis zu 59 Milliarden (Schätzung aus 2024).²⁸ Die Inbetriebnahme war für 2025–27 geplant, mittlerweile ist sie auf 2029–31 verschoben.²⁹

Vergleicht man die immensen Baukosten mit den Investitionsmöglichkeiten der deutschen Energieversorger, dann wird deutlich, wie unrealistisch AKW-Neubauten hierzulande sind. EnBW beispielsweise, einer der größten deutschen Energieversorger, plant im Zeitraum 2024 bis 2030 Investitionen von 40 Milliarden Euro in eine Vielzahl von Energieprojekten.³⁰ Der Bau von ein bis zwei AKW würde die gesamten Investitionsmittel aufzehren. Das wäre für das Unternehmen und die Kreditgeber viel zu riskant. Ohne staats-eigene Energieversorger, Monopolstrukturen oder massive staatliche Subventionen ist der Neubau von AKW daher praktisch unmöglich.

Bauzeit und -kosten jüngerer AKW-Projekte

geplant (schwarz) und real



Quellen: <https://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2024-1046> und s. Fußnoten im Text

Fakt 6 Ist Atomstrom günstig?

Atomstrom ist eine der teuersten Formen der Stromerzeugung und im Laufe der Zeit teurer statt günstiger geworden.

Die Erzeugung von Atomstrom war und ist teuer.³¹ Für die Stromgestehungskosten werden alle Kosten eines Kraftwerks – also Baukosten inklusive der Finanzierungskosten, Betriebskosten und Kosten für Brennstoffe – zur Menge des erzeugten Stroms ins Verhältnis gesetzt. Im Jahr 2024 kostet eine Megawattstunde (MWh) Strom aus neuen Atomkraftwerken (AKW) etwa 182 US-Dollar, aus Windenergie 50 US-Dollar und aus Solarenergie 61 US-Dollar.³² Damit ist Atomstrom rund dreimal teurer als Strom aus Erneuerbaren Energien. Auch bei der Berücksichtigung der Kosten für zusätzlich benötigte Speichertechnologien ist beispielsweise Strom aus Photovoltaik immer noch deutlich billiger als Atomstrom.³³ Die Kosten für Strom aus Wind- und Solarenergie sind in den letzten 15 Jahren um 63 bzw. 83 Prozent gefallen, während sie für Strom aus neuen AKW um fast die Hälfte gestiegen sind.³⁴

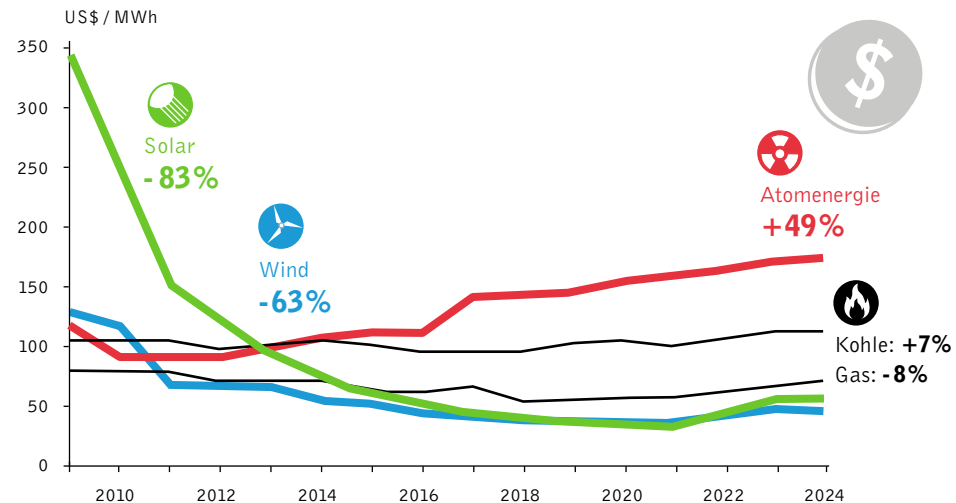
Nicht nur der Neubau, auch eine Laufzeitverlängerung von bestehenden AKW ist teuer, auch weil zusätzliche Sicherheitsinvestitionen anfallen. In Belgien wurde 2022 als

Reaktion auf die Energiekrise in Europa die Laufzeit von zwei Reaktoren um zehn Jahre verlängert. Dafür musste der belgische Staat zur Hälfte zum Miteigentümer der Anlagen werden und muss künftig die anteiligen Verluste tragen. Es wurde ein garantierter Strompreis von 81 Euro pro MWh vereinbart – der durchschnittliche Strompreis an der Börse in Belgien lag 2024 jedoch bei 68 Euro pro MWh. Die Differenz müssen nun der belgische Staat bzw. die Steuerzahler*innen zahlen.^{35,36}

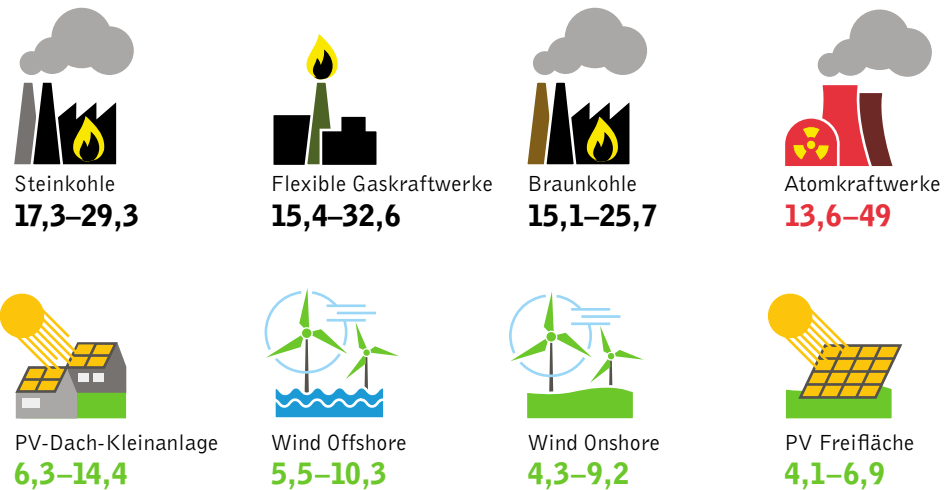
Außerdem werden die Kosten für den Rückbau der AKW und die Endlagerung des Atommülls oft übersehen, da sie erst später anfallen. Im Jahr 2014 wurden die Kosten für die Entsorgung des deutschen Atommülls auf insgesamt fast 49 Milliarden Euro geschätzt.³⁷

Schließlich besteht bei AKW auch das Risiko eines schweren Unfalls. Die dabei potenziell entstehenden Kosten wären jedoch so hoch, dass sie sich faktisch nicht versichern lassen.

Entwicklung der Durchschnittskosten von Strom nach Technologie



Stromgestehungskosten 2023 (€Cent/kWh)



Quellen: https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024_vf.pdf und <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>

Fakt 7 Sind Atomkraftwerke sicher?

Atomenergie birgt erhebliche Sicherheitsrisiken: Bei Unfällen können große Mengen radioaktiver Stoffe freigesetzt werden, die Mensch und Umwelt gefährden.

Bei der Kernspaltung entstehen große Mengen Spaltprodukte. Außerdem wird ein Teil des Urans in schwerere Elemente wie Plutonium umgewandelt, die ebenfalls radioaktiv sind. In einem Atomkraftwerk (AKW) befindet sich darum eine große Menge radioaktiver Stoffe. Werden diese freigesetzt, gefährden sie Mensch und Umwelt.

Gleichzeitig entsteht im Reaktor viel Wärme. Selbst wenn der Reaktor abgeschaltet ist, fällt durch radioaktive Zerfälle weiter Wärme an. Der Reaktor muss also dauerhaft gekühlt werden. Dafür sind Sicherheitssysteme vorhanden. Damit diese funktionieren, müssen sie aber kontinuierlich mit Strom und Wasser versorgt werden.³⁸

In AKW kann es trotzdem zu katastrophalen Unfällen kommen.³⁹ Gerät die Kettenreaktion außer Kontrolle, wird sehr schnell zu viel Wärme erzeugt. Dies ist beim Unfall im AKW Tschernobyl im Jahr 1986 passiert.⁴⁰ Durch äußere Einwirkungen wie Erdbeben oder

Überflutungen können die Sicherheitssysteme ausfallen. Dies ist im AKW Fukushima im Jahr 2011 geschehen.⁴¹ Viele weitere Ursachen können Auslöser für Unfälle sein: Brände oder menschliche Fehler, aber auch Terroranschläge oder militärische Angriffe. Besonders gefährlich ist zum Beispiel die Situation am ukrainischen AKW Saporischja, das sich inmitten eines Kriegsgebiets befindet.⁴² Kein AKW auf der Welt könnte einen gezielten militärischen Angriff überstehen.

In der Folge katastrophaler Unfälle können große Landstriche nicht mehr von Menschen bewohnt oder für die Landwirtschaft genutzt werden. Hunderttausende mussten nach den Unfällen in Tschernobyl und Fukushima ihre Heimat verlassen. Die ökonomischen Kosten können sich auf einige hundert bis zu ein-tausend Milliarden Euro belaufen.⁴³ Derartige Kosten sind nicht durch Versicherungen abgedeckt und müssen daher vom Staat und der Gesellschaft getragen werden.

Unfälle in kerntechnischen Anlagen (Auswahl)

(nur Unfälle der Schwere INES 5, 6 und 7)

29.9.1957 Majak, SU

Explosion in einem Tank in einer Wiederaufbereitungsanlage, großflächige Bodenkontamination

7.–12.10.1957 Windscale, GB

Feuer in einem graphitmoderierten Reaktor zur Plutoniumherstellung von Atomwaffen

26.7.1959 Simi Valley, USA

partielle Kernschmelze in einem natriumgekühlten Schnellen Brüter

1969 Lucens, CH

wegen Korrosion wird der Reaktor nicht korrekt gekühlt, partielle Kernschmelze

1977 Belojarsk, SU

Unfall, bei dem die Hälfte der Brennstoffkanäle eines Reaktors schmolz

28.3.1979 Three Mile Island, USA

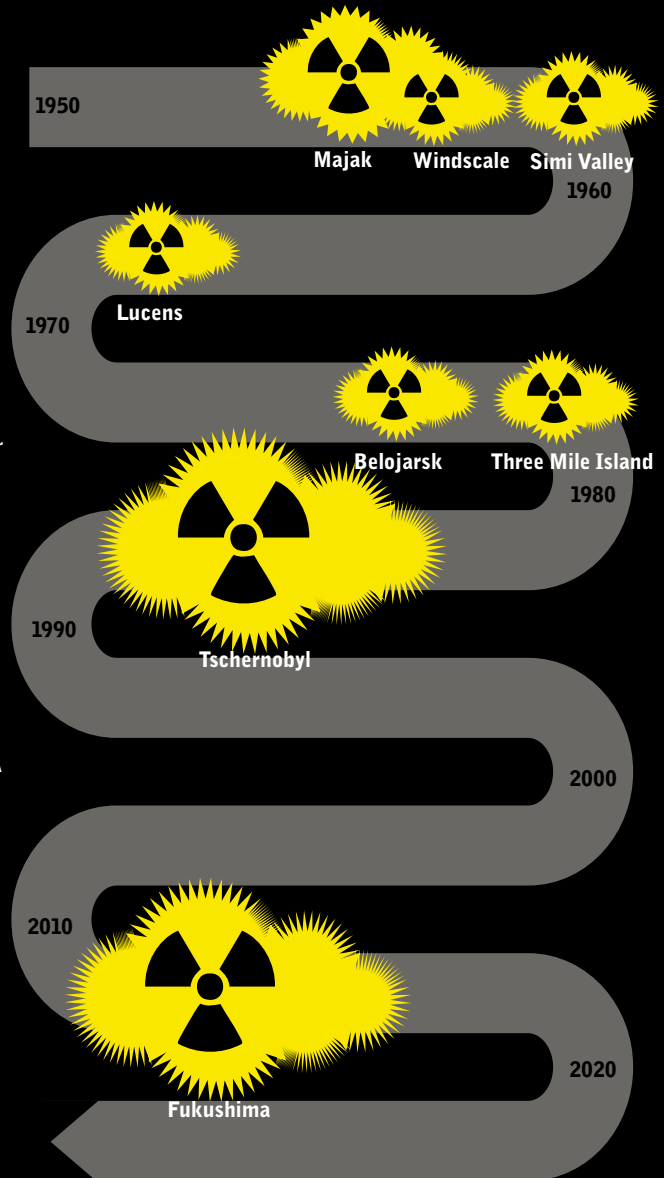
partielle Kernschmelze in einem Reaktor

26.4.1986 Tschernobyl, SU

explosionsartige Kernzerstörung mit anschließendem Graphitbrand

11.3.2011 Fukushima, JP

mehrere Explosionen nach Überhitzung von Brennelementen, nachdem die Kühlsysteme durch einen Tsunami unterbrochen waren



Fakt 8 Trägt Atomenergie zur Verbreitung von Atomwaffen bei?

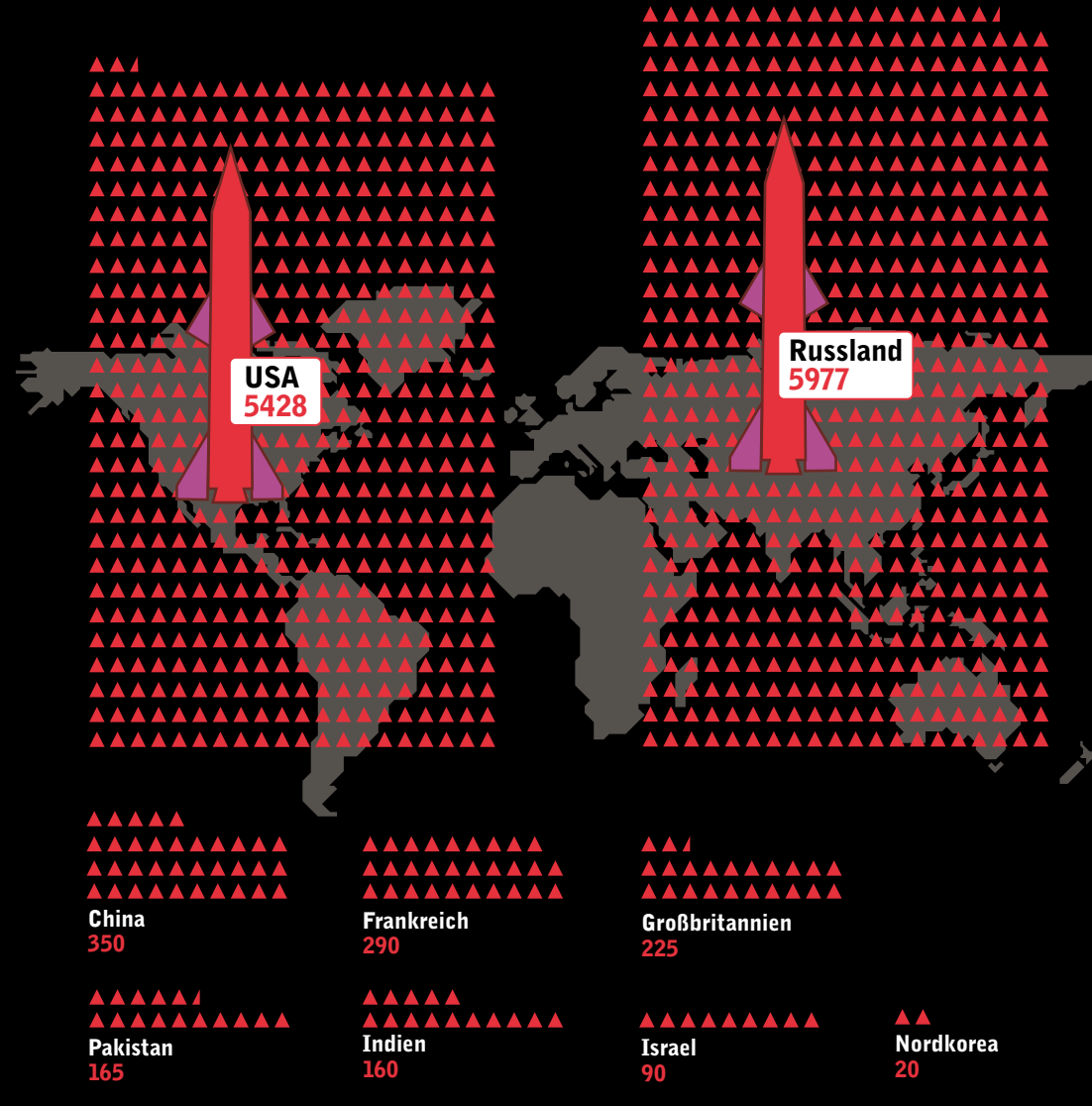
Die Atomenergie birgt erhebliche Risiken, da Materialien und Technologien sowohl für friedliche Zwecke als auch für die Herstellung von Atomwaffen verwendet werden können.

Seit ihrer Entdeckung wird die Atomenergie sowohl für friedliche als auch für militärische Zwecke genutzt. Die Spaltung eines Atomkerns setzt millionenfach mehr Energie frei als eine chemische Reaktion. In einem Atomkraftwerk (AKW) wird diese Energie kontrolliert genutzt, um Strom zu erzeugen. Bei einer Atombombe hingegen wird die gleiche Energie auf explosive Weise eingesetzt, um Zerstörung anzurichten.

Oft kommen bei der Herstellung von Atombomben und bei der zivilen Atomtechnik die gleichen Technologien und Materialien zum Einsatz. Man spricht dann von „Dual-Use“, was bedeutet, dass die Technologie für friedliche und militärische Zwecke verwendet werden kann. Dies betrifft vor allem die Materialien Uran und Plutonium und die Technik der Anreicherung und der Wiederaufarbeitung.

In einer Urananreicherungsanlage wird das niedrig angereicherte Uran für AKW hergestellt. Dieselbe Anlage kann aber auch hochangereichertes Uran für Atomwaffen produzieren. Plutonium entsteht im Brennstoff von AKW. Das Plutonium aus AKW kann für Atomwaffen genutzt werden.⁴⁴ Es muss dafür chemisch aus dem dann hochradioaktiven Brennstoff abgetrennt werden. Dies geschieht bei der Wiederaufbereitung.

Der Nukleare Nichtverbreitungsvertrag dient der Begrenzung der Weiterverbreitung von Atomwaffen. Der Vertrag legt fünf offizielle Atomkräfte fest, die sich zur nuklearen Abrüstung verpflichten. Alle anderen Staaten verzichten auf Atomwaffen und erhalten dafür das Recht zur friedlichen Nutzung der Atomenergie. Neben den offiziellen Atomkräften besitzen heute wahrscheinlich vier weitere Staaten Atomwaffen. Weltweit gab es jedoch in etwa 25-30 Ländern Bestrebungen, Atombomben zu bauen. Alle diese Länder hatten auch ein ziviles Atomprogramm und konnten die Dual-Use-Eigenschaften der Atomenergie nutzen.



Fakt 9 Wie viel Atommüll entsteht durch die Nutzung der Atomenergie?

Die Nutzung von Atomenergie verursacht große Mengen radioaktiver Abfälle, die für extrem lange Zeit sicher unterirdisch gelagert werden müssen.

Radioaktive Stoffe, die im Atommüll zum Teil hochkonzentriert enthalten sind, senden beim Zerfall Strahlung mit hoher Energie aus. Je nach Art und Menge der Strahlung kann das für Menschen schädlich bis tödlich sein. Radioaktive Abfälle gefährden dadurch Menschen und Umwelt.

In Deutschland werden nach 60 Jahren kommerzieller Nutzung der Atomenergie rund 27.500 Kubikmeter hochradioaktiver Abfall angefallen sein. Zusätzlich werden bis zu 620.000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktiver Abfälle anfallen.⁴⁵ Der hochradioaktive Abfall macht zwar nur ca. 1 Prozent des Volumens der Abfälle aus, enthält aber 99 Prozent der Radioaktivität und ist daher besonders gefährlich.





Überall auf der Welt wird der Atommüll zwischengelagert, bis Endlager zur Verfügung stehen. In Deutschland geschieht das zurzeit oberirdisch an 33 Standorten.




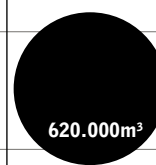
Für sehr lange Zeiträume ist die Zwischenlagerung aber keine Lösung. In den Zwischenlagern muss sichergestellt sein, dass die Behälter dicht und die Abfallprodukte stabil bleiben, um sie später abtransportieren zu können. Auch stabile gesellschaftliche Verhältnisse, dauerhafte Verantwortungsübernahme für die Abfälle und die Finanzierung der Zwischenlager müssen gewährleistet sein.

Insbesondere die Abfälle mit hoher Radioaktivität müssen in Deutschland für eine Million Jahre sicher gelagert werden.⁴⁶ Das geht über die menschlichen Zeitvorstellungen weit hinaus. Daher kommt nach derzeitigem Wissensstand nur die geologische Endlagerung in Betracht, das heißt, die Abfälle sollen mehrere hundert Meter tief in der Erde gelagert werden. Die Endlagerbehälter, in denen die Abfälle gelagert werden, stellen eine erste von mehreren technischen Barrieren dar. Die Gesteinsschichten um das Endlager sollen als geologische Barriere die langfristige Freisetzung radioaktiver Stoffe in die belebte Umwelt verhindern.

Entsorgungsanlagen für radioaktive Abfälle in Deutschland



-  Brennelemente-Zwischenlager
-  Zwischenlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, Landessammelstelle
-  Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle
-  Rückholprojekt Schachtanlage Asse

	Hochradioaktive Abfälle	Sonstige radioaktive Abfälle
Strahlungsaktivität	 99%	 1%
Volumen	 27.500 m ³	 620.000 m ³

Quellen: <https://www.bmu.de> und <https://www.endlagersuche-infoplattform.de>

Fakt 10 Welche Herausforderungen sind mit der Endlagerung von hochradioaktivem Atommüll verbunden?

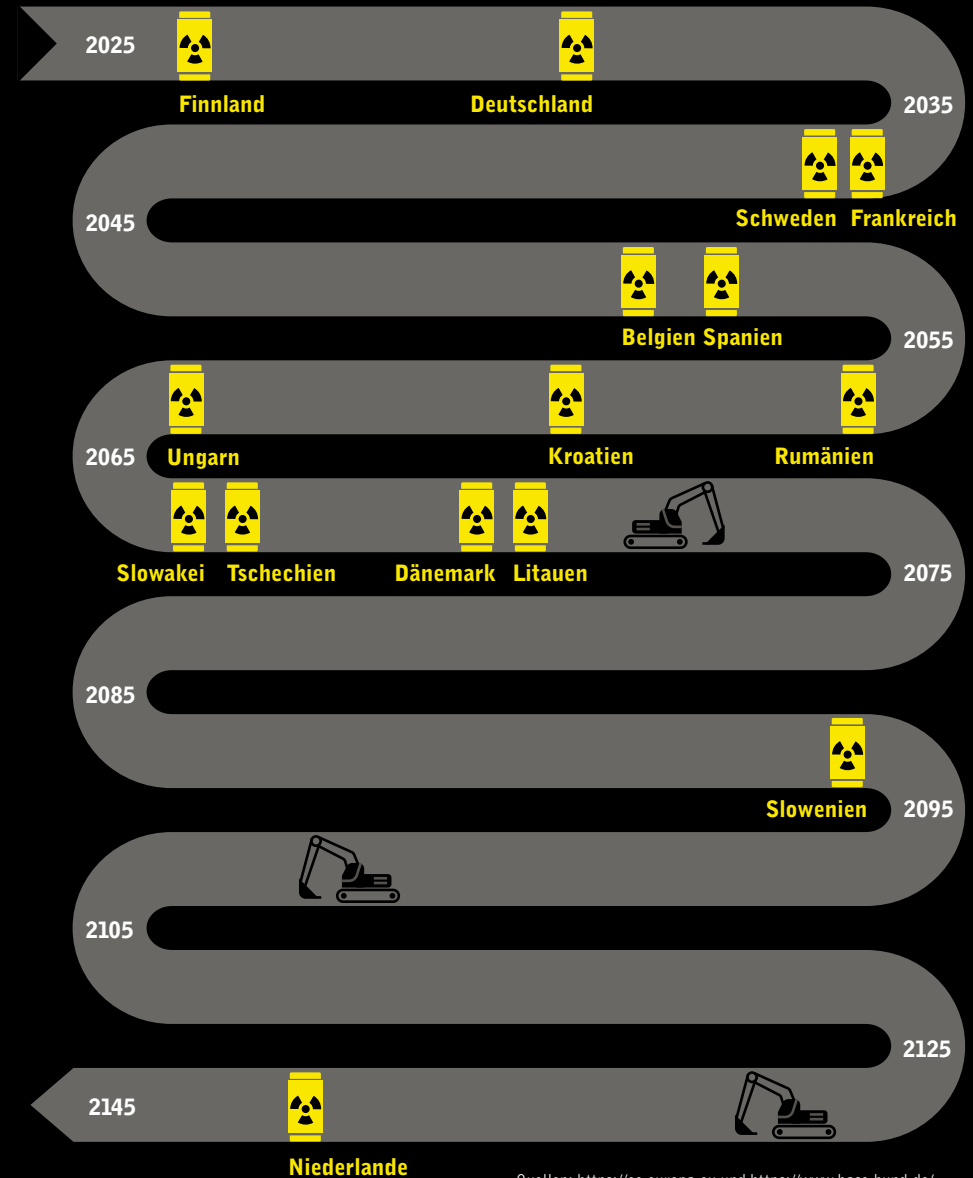
Die Endlagerung von Atommüll und die Suche nach einem geeigneten Standort ist nicht nur eine technische, sondern auch eine gesellschaftliche Herausforderung.

Obwohl Atomenergie seit Mitte des letzten Jahrhunderts genutzt wird, ist weltweit noch kein einziges Endlager für hochradioaktiven Atommüll in Betrieb. Es wurde und wird unterschätzt, dass die Standortsuche für ein Endlager nicht nur eine technologische und geologische Herausforderung ist, sondern auch eine gesellschaftliche und politische.

In vielen Ländern wurde die Suche nach einem Endlager noch nicht begonnen, zwischenzeitlich gestoppt oder auch ganz neu gestartet. In Finnland soll 2025 nach mehrmaligem Verschieben das weltweit erste Endlager für hochradioaktiven Atommüll in Betrieb gehen. Die Schweiz, Schweden und Frankreich haben zumindest den Standort des Endlagers festgelegt. Eine Standortentscheidung in den USA wurde 2010 zurückgenommen. Viele andere Staaten haben noch gar nicht mit der Suche nach einem Endlagerstandort begonnen.

In Deutschland wurde 2017 mit dem Standortauswahlgesetz⁴⁷ das Auswahlverfahren für ein Endlager neu gestartet. Es soll der Standort mit der ‚bestmöglichen Sicherheit‘ für eine Million Jahre identifiziert werden. Durch einen deutschlandweiten wissenschaftsbasierten Prozess mit Öffentlichkeitsbeteiligung sollen frühere Fehler vermieden und ein gesellschaftlich akzeptierter Standort gefunden werden. Die bisherigen Planungen sehen eine Standortfestlegung bis 2031 vor. Nach aktuellen Schätzungen könnte der Prozess jedoch noch mehrere Jahrzehnte benötigen.^{48,49} Genehmigungsverfahren, Bau und Inbetriebnahme des Lagers werden dann bis nach 2100 dauern.

Finanziert wird der Standortauswahlprozess über den Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO)⁵⁰, in den die Kraftwerksbetreiber gut 24 Milliarden Euro eingezahlt haben. Reichen die Gelder nicht, müssten die Kosten nach jetzigem Stand von der Staatskasse und somit den Steuerzahler*innen übernommen werden.



Fakt 11 Können alternative Reaktorkonzepte neue Perspektiven für die Atomenergie eröffnen?

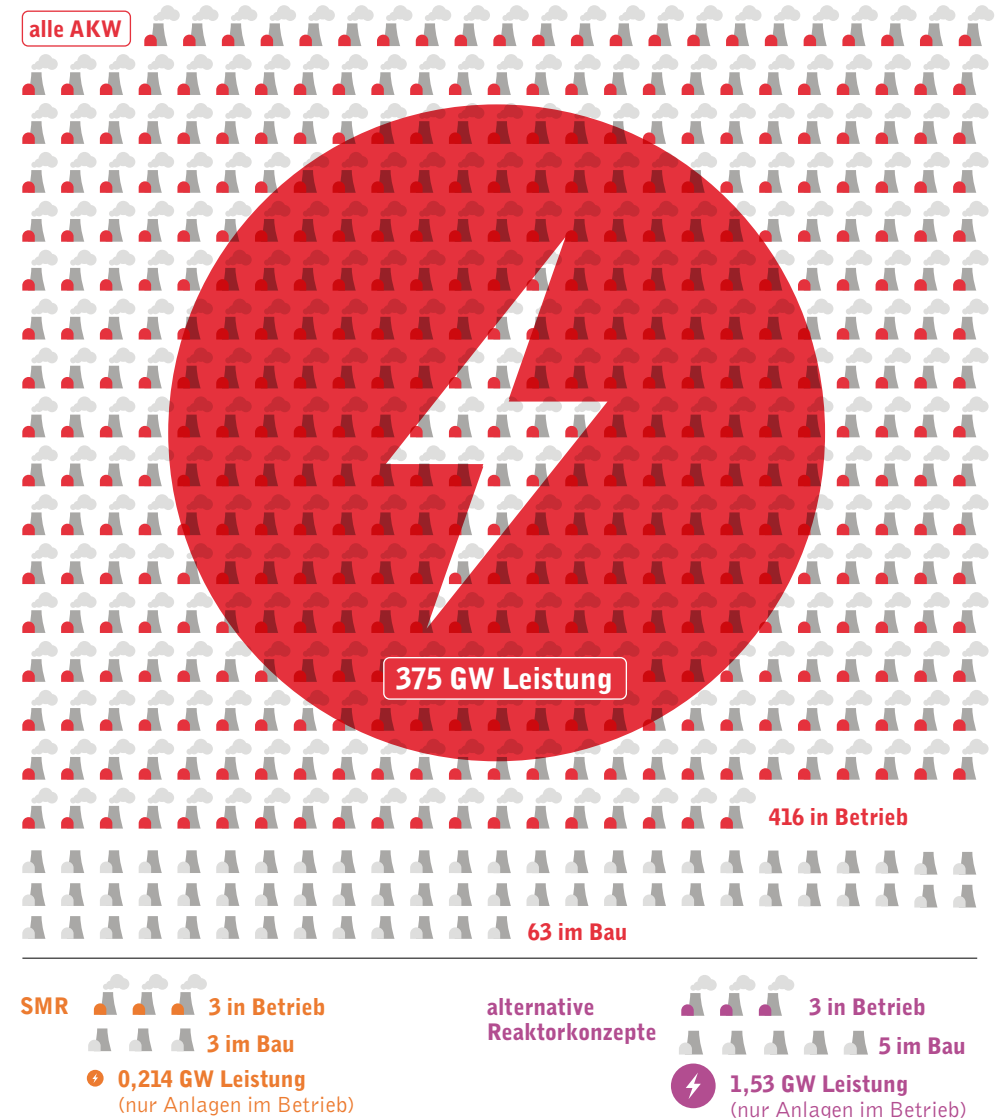
Die Entwickler alternativer Reaktorkonzepte versprechen einige Vorteile, doch bislang sind solche Systeme nicht kommerziell verfügbar.

Seit Jahrzehnten werden alternative Reaktorkonzepte diskutiert. Im Gegensatz zu heutigen Atomkraftwerken (AKW) werden dabei vor allem andere Kühlmittel verwendet, statt Wasser beispielsweise Flüssigmetalle wie Natrium oder Blei. Keines der Konzepte ist technisch ausgereift oder hat sich kommerziell durchgesetzt, trotz teils jahrzehntelanger Entwicklung.

Einzelne dieser Konzepte könnten Vorteile in Bezug auf Sicherheit, die Versorgung mit Brennstoffen, die Entsorgung von Abfällen, die Verhinderung der Verbreitung von Atomwaffen oder die Kosten bieten. Gleichzeitig vereint keines der Konzepte alle Vorteile, oft gibt es auch Nachteile. Die weitere Entwicklung bis zur Marktreife wird noch Jahrzehnte dauern und erhebliche Investitionen erfordern. Die von den Entwicklern in Aussicht gestellte Hoffnung, dass die Konzepte einen wichtigen Beitrag zur Lösung der heutigen Probleme der Atomkraft leisten und zeitnah einen relevanten Beitrag zur CO₂-armen Energieerzeugung liefern, ist unrealistisch.⁵¹

Außerdem wird der Einsatz von Small Modular Reactors (SMR) diskutiert. Darunter werden Reaktorkonzepte verstanden, deren Leistung deutlich geringer ist als bei heutigen AKW.⁵² Die Idee stammt bereits aus den 1950er Jahren.⁵³ Befürworter erhoffen sich insbesondere eine schnelle und kostengünstige Herstellung, indem einzelne Reaktorteile oder gar ganze Reaktoren „modular“ in zentralen Fabriken hergestellt werden. Bislang gibt es weltweit aber nur wenige AKW, die auf diese Weise hergestellt wurden und auch keine industrielle Produktionskapazität dafür. Bisherige Prototypen wurden nicht modular hergestellt, sie waren umgerechnet auf ihre Größe noch teurer als heutige AKW, und sie konnten auch nicht schnell gebaut werden. Nach einer aktuellen Analyse würden SMR nur bei Stückzahlen von vielen hundert bis einigen tausend Anlagen günstigeren Strom produzieren als heutige AKW.⁵⁴

Stand: Dezember 2024



Fakt 12 Ist die Atomenergie nachhaltig?

Atomenergie ist nicht nachhaltig, da sie indirekte Treibhausgasemissionen erzeugt, massive Umweltschäden durch Uranabbau hinterlässt und bei Unfällen verheerende Folgen verursacht.

Klimaschutz wird oft als Argument für den Bau von Atomkraftwerken (AKW) genannt. Bei AKW entstehen keine direkten Treibhausgasemissionen wie bei der Verbrennung fossiler Energieträger. Dadurch sind die Emissionen deutlich geringer als bei Kohle- oder Gaskraftwerken. Allerdings gibt es indirekte Treibhausgasemissionen über die Lebenszeit eines AKWs, zum Beispiel bei der Förderung des Urans, der Herstellung der Brennelemente oder dem Bau des Kraftwerks. Laut dem Weltklimarat IPCC liegen diese Emissionen bei 4–110g CO₂-Äquivalenten (CO₂e) pro Kilowattstunde Strom, mit einem Mittelwert von 25g CO₂e pro Kilowattstunde.⁵⁵ Bei Windenergie liegen nach einer aktuellen Studie des Umweltbundesamts die Emissionen durchschnittlich bei 9g CO₂e pro Kilowattstunde und bei Photovoltaik zwischen 17–63g CO₂e pro Kilowattstunde (je nachdem, wo die Solarmodule hergestellt werden).⁵⁶

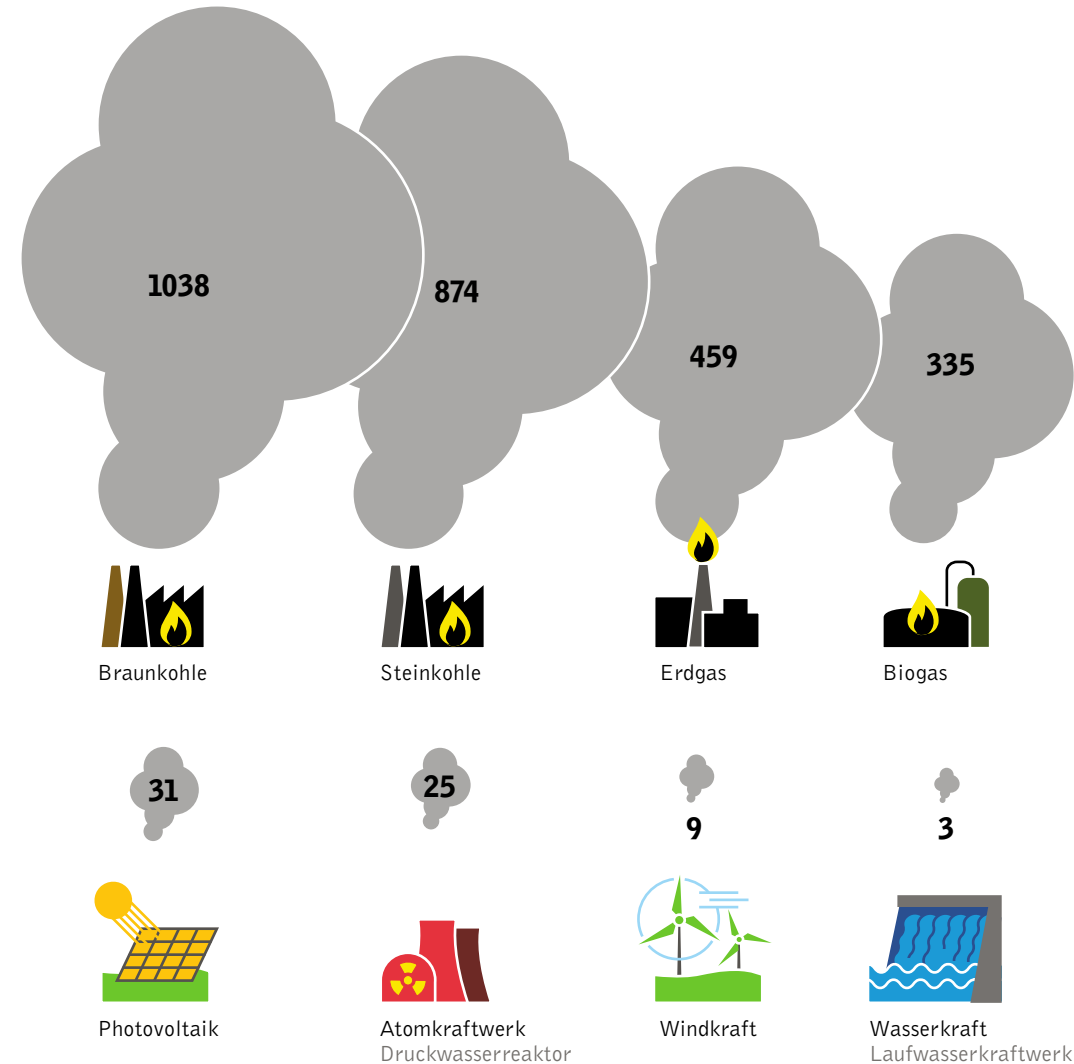
Neben den Emissionen verursacht Atomenergie große Umweltschäden durch den Uranabbau. Erzhalde und ehemalige Minen können ganze Landstriche radioaktiv verseuchen, weil der Wind den radioaktiven

Staub verweht. Bei der Technik des In-Situ-Leaching werden Säuren und Laugen in die unterirdischen Lagerstätten eingeführt, um das Uranerz vom Gestein zu trennen und nach oben zu pumpen. Dabei können Grundwasservorkommen verseucht werden. Unabhängig vom Verfahren bleibt immer radioaktiver Müll zurück. Häufig verschwinden die Firmen nach dem Uranabbau, und die lokalen Gemeinschaften bleiben auf den radioaktiven Hinterlassenschaften sitzen. Französische Firmen förderten beispielsweise seit 1960 Uran im Niger. Die Cominak-Mine wurde 2021 geschlossen und hinterließ 20 Millionen Tonnen radioaktive Rückstände bei den Minen.^{57,58} Böden und Wasser in diesem Gebiet sind kontaminiert.

Außerdem fallen durch die Stromerzeugung mit Atomenergie hochradioaktive Abfälle an, und schwere Unfälle können zu massiven Umweltschäden führen, die es notwendig machen, große Landstriche zu evakuieren.⁵⁹

Die Klimalast des Stroms

Ausstoß von Klimagasen unterschiedlicher Energiequellen (durchschnittliche CO₂-Äquivalente in g pro kWh)



Fakt 13 Können die Klimaziele ohne den Ausbau der Atomenergie erreicht werden?

Zum Erreichen der Klimaziele ist ein Ausbau der Atomenergie weder nötig noch realistisch. Denn die Atomenergie ist viel zu teuer und kommt viel zu spät.

Globale Klimaszenarien zeigen Wege auf, wie die Erderhitzung auf 1,5 bzw. 2°C begrenzt werden kann. Diese Szenarien verdeutlichen: Um die globalen Klimaziele zu erreichen und die fossilen Energien bis 2050 vollständig zu ersetzen, ist ein starker Ausbau der Erneuerbaren Energien unabdingbar. Ein Ausbau der Atomenergie, die derzeit einen Anteil von 9 Prozent an der globalen Stromerzeugung hat, ist nicht erforderlich.⁶⁰ Zwar enthalten manche Klimaszenarien einen geringen Anteil an Atomenergie. Die Szenarien reichen von einem weltweiten Atomausstieg bis zu einem leichten Anstieg des Anteils der Atomenergie auf 12 Prozent der Stromerzeugung.⁶¹ Ein noch höherer Anteil ist angesichts der langen Bauzeiten und hohen Baukosten jedoch unrealistisch.

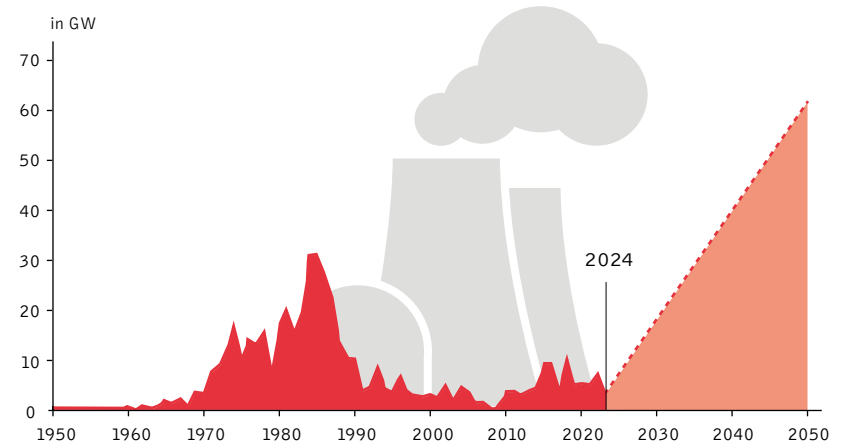
In den meisten Klimaszenarien geht der Anteil der AKW an der Stromerzeugung bis 2050 deutlich zurück.⁶² Der Anteil der Erneuerbaren Energien steigt dagegen stark auf 70–100 Prozent. Zum Erreichen der Klimaziele würde ein Ausbau der Atomenergie bei

reinen Bauzeiten von ca. 10 Jahren und langen Vorlaufzeiten für Planung und Genehmigung zu lange dauern und wäre erheblich teurer als der Umstieg auf Erneuerbare Energien.

Dennoch haben 20 Staaten aus Klimaschutzgründen das Ziel formuliert, die weltweiten Atomkapazitäten bis 2050 zu verdreifachen.⁶³ Dafür müsste die jedes Jahr neu ans Netz gehende Leistung bis 2050 so gesteigert werden, dass im Jahr 2050 60 GW ans Netz gehen.⁶⁴ Selbst Mitte der 1980er Jahre – dem bisherigen Höhepunkt des Atomausbaus – starteten jedoch nur AKW mit ca. 30 GW insgesamt pro Jahr. Dies zeigt, dass die angestrebte Verdreifachung sehr unrealistisch ist. Insbesondere, da der Großteil der bestehenden AKW so alt ist, dass sie bis 2050 stillgelegt und ersetzt werden müssten. In Ländern mit vielen alten Reaktoren wie den USA gibt es jedoch kaum Pläne für neue AKW. Ohne Ersatz führt die Alterung zwangsläufig zu einem Rückgang der Atomenergie bis 2050.

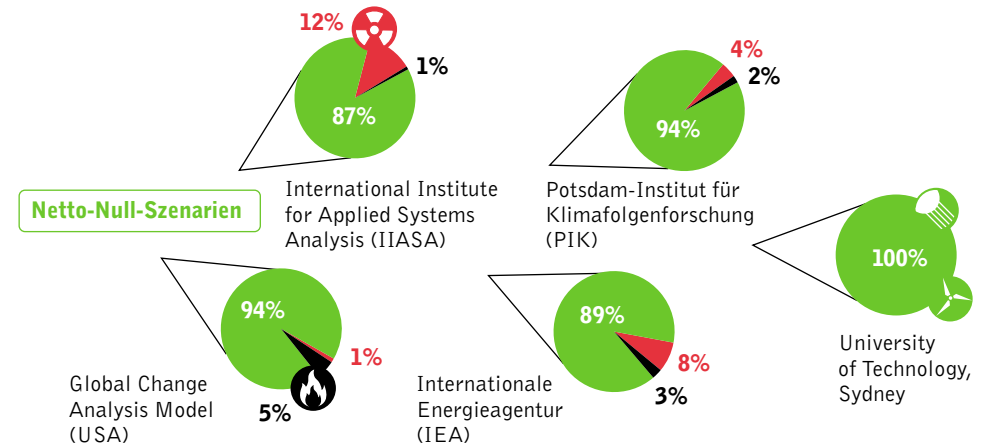
Jährliche Netzanschlüsse von Atomkraftwerken (in Gigawatt)

die im Vergleich zu den jährlichen Anschlüssen seit 1950 für eine Verdreifachung der Atomkapazitäten notwendig wären



Netto-Null-Szenarien

Anteile der Energieträger an der weltweiten Stromerzeugung im Jahr 2050 in verschiedenen Klimaszenarien



Quellen: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_nuclear_in_international_energy_scenarios.pdf (Abb. 1)

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> und https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf und Teske, S. 2019: Achieving the Paris Climate Agreement Goals, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05843-2>

Fakt 14 Unterstützt Atomenergie den Übergang zu einem klimaneutralen Energiesystem?

Atomenergie kann den Übergang zur Klimaneutralität kaum unterstützen, da sie unflexibel ist und ihre hohen Kosten nicht mit den Erneuerbaren Energien mithalten können.

Das künftige Energiesystem wird überwiegend aus Wind- und Solarenergie bestehen. Die Stromerzeugung wird dadurch abhängiger vom Wetter und variiert stärker über den Tag (vor allem durch die Solarenergie), innerhalb einer Woche (durch die Windenergie) und zwischen den Jahreszeiten. Deshalb benötigt das Energiesystem Möglichkeiten, um die Schwankungen auszugleichen, wie zum Beispiel Stromspeicher oder flexible Kraftwerke, die dann anspringen, wenn der Wind nicht weht oder die Sonne nicht scheint. Atomkraftwerke (AKW) produzieren jedoch möglichst stetig mit voller Leistung. Sie sind eher unflexibel und können nicht beliebig ihre Produktion ändern. Wasserstofffähige Gaskraftwerke können sich dagegen im Minutentakt an eine andere Situation im Energiesystem anpassen und sind deswegen technisch besser mit Wind- und Solarenergie kombinierbar.

Hinzu kommt: Ein flexibler Betrieb von AKW, bei dem weniger Strom produziert wird, wenn Erneuerbare Energien genug günstigen Strom erzeugen, verringert die

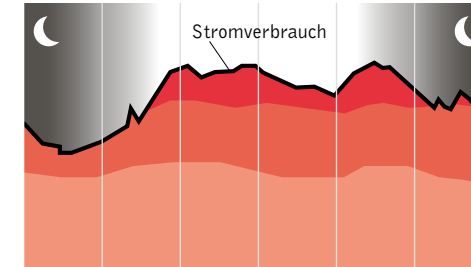
Wirtschaftlichkeit der AKW erheblich. Der französische Energiekonzern EDF beklagt schon heute, dass der Rückgang der Strompreise durch die Erneuerbaren Energien allein im ersten Halbjahr 2024 einen Verlust von 8,1 Milliarden Euro für EDF verursacht hat.⁶⁵ Die hohen Investitionskosten der AKW machen eine Abschaltung oder Drosselung extrem teuer. Batteriespeicher, die Herstellung von Wasserstoff und die Verwendung in Backup-Gaskraftwerken sind günstigere Optionen als die Atomenergie, um Zeiten ohne ausreichenden Strom aus Erneuerbaren Energien auszugleichen.

Geringe Emissionen reichen als Argument nicht aus: Um die Klimaziele zu erreichen, ist auch die Effizienz entscheidend, d.h. es muss der größte Rückgang an Emissionen pro Euro und Jahr erreicht werden. Es gibt wesentlich günstigere, flexiblere und weniger gefährliche Optionen als AKW um die Schwankungen der Erneuerbaren im Energiesystem der Zukunft auszugleichen.

Die Stromerzeugung im fossilen und erneuerbaren Energiesystem sowie die Anlaufzeit von regelbaren Kraftwerken

30/31

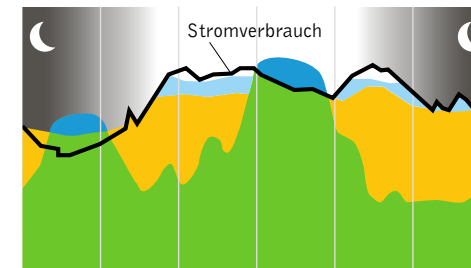
0:00 4:00 8:00 12:00 16:00 20:00 24:00



Baseload-Paradigma

Fossile oder atomare Kraftwerke liefern kontinuierlich, rund um die Uhr, mit konstant hoher Leistung Strom, um die Grundlast des Strombedarfs zu decken.

- Spitzenlast
- Mittellast (Erzeugung nach Bedarf)
- Grundlast



Variable erneuerbare Stromerzeugung

Die Stromproduktion erfolgt zunehmend durch Erneuerbare Energien, die weniger konstant und vorhersehbar sind, aber durch flexible Kraftwerke und Stromspeicher ausgeglichen werden können.

- Überproduktion (für Speicher oder Export)
- Aus Speichern oder Importen
- Regelbare Kraftwerke, die bei Bedarf anspringen
- Variable Erneuerbare Energie



Neles, Pistner: Kernenergie,
[https://link.springer.com/
 book/10.1007/978-3-642-24329-5](https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-24329-5)

Schneider, M. et al 2024:
 The World Nuclear Industry Status
 Report 2024,
[https://www.worldnuclearreport.org/
 IMG/pdf/wnisr2024-v2.pdf](https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2024-v2.pdf)

M.V. Ramana:
 Nuclear is not the solution,
[https://www.versobooks.com/
 products/3013-nuclear-is-not-the-
 solution](https://www.versobooks.com/products/3013-nuclear-is-not-the-solution)

Lochbau et. al: Fukushima.
 The story of a nuclear disaster,
[https://www.ucsusa.org/resources/
 fukushima-story-nuclear-disaster](https://www.ucsusa.org/resources/fukushima-story-nuclear-disaster)

Radkau, Hahn: Aufstieg und
 Fall der deutschen Atomwirtschaft,
[https://www.oekom.de/buch/
 aufstieg-und-fall-der-deutschen-
 atomwirtschaft-9783865813152](https://www.oekom.de/buch/aufstieg-und-fall-der-deutschen-atomwirtschaft-9783865813152)

- 1** Energy Institute 2024:
 Statistical Review of World Energy,
[https://www.energyinst.org/
 statistical-review/home](https://www.energyinst.org/statistical-review/home)
- 2** Energy Institute 2024, op. cit.
- 3** International Atomic Energy
 Agency (IAEA) 2024: Power
 Reactor Information System,
<https://pris.iaea.org/pris/>
- 4** Schneider, M. et al 2024:
 The World Nuclear Industry Status
 Report 2024, [https://www.
 worldnuclearreport.org/IMG/pdf/
 wnisr2024-v2.pdf](https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2024-v2.pdf)
- 5** Energy Institute 2024, op. cit.
- 6** Burger, B. 2024: Ein Jahr ohne
 Kernkraftwerke in Deutschland.
 Fraunhofer ISE, [https://www.
 energy-charts.info/downloads/Ein_
 Jahr_ohne_Kernkraftwerke.pdf](https://www.energy-charts.info/downloads/Ein_Jahr_ohne_Kernkraftwerke.pdf)
- 7** Burger, B 2024, op. cit.
- 8** Burger, B. 2024: [www.
 energy-charts.info](http://www.energy-charts.info), Karten, Import
 und Export, Importe in 2023
 betragen 11,7 TWh,
[https://www.energy-charts.info/
 charts/import_export_map/chart.
 htm?l=de&c=DE&year=2023&
 interval=year](https://www.energy-charts.info/charts/import_export_map/chart.htm?l=de&c=DE&year=2023&interval=year), Gesamte Netto-
 stromerzeugung in 2023 betrug
 486,3 TWh, [https://www.
 energy-charts.info/charts/energy_
 pie/chart.htm?l=de&c=DE&sour-
 ce=total&interval=year&ye-
 ar=2023](https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&source=total&interval=year&year=2023)
- 9** Burger, B. 2024: Stromerzeu-
 gung in Deutschland im Jahr 2023,
 S. 58, 59, [https://www.energy-
 charts.info/downloads/
 Stromerzeugung_2023.pdf](https://www.energy-charts.info/downloads/Stromerzeugung_2023.pdf)
- 10** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 11** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 12** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 13** Fraunhofer-Institut für Solare
 Energiesysteme ISE 2024: Energy-
 Charts - Die Seite für interaktive
 Grafiken zu Stromproduktion und
 Börsenstrompreisen, [https://www.
 energy-charts.info/charts/energy_
 pie/chart.htm?l=de&c=FR&inter-
 val=year&year=2022](https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=FR&interval=year&year=2022)
- 14** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 15** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 16** European Supply Agency:
 Annual Report 2023, Final Version
 13.08.2024, [https://euratom-sup-
 ply.ec.europa.eu/document/
 download/29018562-122c-4818-
 8774-2424fc029bf6_en?filena-
 me=ESA%20Annual%20
 Report%202023%20-%20
 Final%20draft.pdf](https://euratom-supply.ec.europa.eu/document/download/29018562-122c-4818-8774-2424fc029bf6_en?filename=ESA%20Annual%20Report%202023%20-%20Final%20draft.pdf)
- 17** World Nuclear Association
 (WNA) 2022: Uranium Production
 Figures, 2012-2021, updated July
 2022, [https://world-nuclear.org/
 information-library/facts-and-figu-
 res/uranium-production-figures.aspx](https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-figures.aspx)
 Uranium One Group 2023: Our
 operations, [https://uranium1.com/
 our-operations/](https://uranium1.com/our-operations/)
- 18** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 19** Gufler, K., Meister, F. 2022:
 Analyse der Rosatom-Aktivitäten
 bzw. Rosatom-Verflechtungen mit
 der EU. Hintergrundpapier, Umwelt-
 bundesamt Report REP-0814, Wien,
[https://www.umweltbundesamt.at/
 energie/kernenergie/
 hintergrundpapier-rosatom](https://www.umweltbundesamt.at/energie/kernenergie/hintergrundpapier-rosatom)
- 20** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 21** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 22** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 23** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 24** [https://www.worldnuclear-
 report.org/Der-Welt-Statusreport](https://www.worldnuclearreport.org/Der-Welt-Statusreport)
- 25** Schneider M. et al: World
 Nuclear Industry Status Report 2022,
[https://www.worldnuclearreport.org/
 Europe-s-First-EPR-13-Years-
 Behind-Schedule-Oikiluoto-3-in-
 Finland-Starts-Up.html](https://www.worldnuclearreport.org/Europe-s-First-EPR-13-Years-Behind-Schedule-Oikiluoto-3-in-Finland-Starts-Up.html)
- 26** Schneider M. et al: The World
 Nuclear Industry Status Report 2020,
[https://www.worldnuclearreport.org/
 The-World-Nuclear-Industry-Status-
 Report-2020-HTML.html](https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2020-HTML.html)
 und Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 27** World Nuclear Association
 2024, [https://www.world-nuclear-
 news.org/articles/edf-begins-start-
 up-process-for-flamanville-epr](https://www.world-nuclear-news.org/articles/edf-begins-start-up-process-for-flamanville-epr)
- 28** Schneider et al. 2024, op. cit.,
 S. 221ff
- 29** EDF, [https://www.edf.fr/en/
 the-edf-group/dedicated-sections/
 journalists/all-press-releases/
 hinkley-point-c-update-1](https://www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/hinkley-point-c-update-1)
- 30** EnBW 2024: Unternehmens-
 strategie, [https://www.enbw.com/
 investoren/finanzstrategie/#unter-
 nehmensstrategie](https://www.enbw.com/investoren/finanzstrategie/#unternehmensstrategie)

- 31** Wimmers, A., Böse, F., Kemfert, C., Steigerwald, B., von Hirschhausen, C. und Weibezahn, J.: Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen. DIW Wochenbericht 10/2023, https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.867893.de/23-10-1.pdf
- 32** Schneider, M. et al 2024, op. cit.
- 33** Lazard: Levelized Cost of Electricity, June 2024, https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoepplus-june-2024-_vf.pdf
- 34** Lazard 2024, op. cit.
- 35** Polfliet A. 2024: LTO of Tihange 3 and Doel 4. Präsentation bei der Konferenz "Why nuclear won't save the climate", <https://www.bondbeterleefmilieu.be/kalender/why-nuclear-wont-save-climate>
- 36** Fraunhofer-ISE 2024: Energy Charts, Jährliche Börsenstrompreise in Belgien, https://www.energy-charts.info/charts/price_average/chart.htm?l=de&c=BE&interval=year&year=2024
- 37** Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausbaus: Verantwortung und Sicherheit - Ein neuer Entscheidungskonsens, 25.05.2016, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bericht-der-expertenkommission-kernenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=11
- 38** C. Pistner, C. Küppers, S. Kurth: Reaktorsicherheit – Sicherheitskonzepte und Unfallrisiko. In: J. M. Neles, C. Pistner: Kernenergie. Eine Technik für die Zukunft? Springer Vieweg 2012
- 39** Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Systematik der internationalen Bewertungsskala (INES), https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/stoerfallmeldestelle/ines/ines_node.html
- 40** Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Die Nuklearkatastrophe von Tschernobyl, https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/unfaelle/tschernobyl/tschernobyl_node.html;jsessionid=1
- 41** Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Fukushima am 11. März 2011: Der katastrophale Unfall und seine Folgen, https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/unfaelle/fukushima/fukushima_node.html
- 42** Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Kerntechnische Sicherheit im Ukraine-Krieg, <https://www.grs.de/de/aktuelles/Infobereich-Ukraine,V.Ustohalova,M.Englert:NukleareSicherheitinKrisengebieten.Öko-Institut.e.V.2017,https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Nukleare-Sicherheit-in-Krisengebieten.pdf>
- 43** Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire: Méthodologie appliquée par l'IRSN pour l'estimation des coûts d'accidents nucléaires en France, http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-PRP-CRI-SESUC-2013-00261_methodologie-cout-accident.pdf
- 44** Gregory S. Jones: Reactor-grade plutonium and nuclear weapons. Exploding the myths. Nonproliferation policy education center (NPEC). 2018. Egbert Kankeleit, Christian Küppers, Ulrich Imkeller: Bericht zur Waffentauglichkeit von Reaktorplutonium. Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit, Technische Universität Darmstadt. Arbeitsbericht 1/1989
- 45** Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Radioaktive Abfälle in Deutschland, https://www.endlagersuche-info-plattform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/info-broschueren/flyer-abfall-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- 46** Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG), https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/BJNR107410017.html
- 47** StandAG, op. cit.
- 48** Bundesgesellschaft für Endlagerung: Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens. 28.10.2022, https://www.base.bund.de/SharedDocs/IP6/BASE/DE/20221028_Zusammenfassung_Rahmenterminplanung_und_Zeitschaetzungen.pdf;jsessionid=8DDDEB728D1049E-A99954FEF1F5B739B.internet992?__blob=publicationFile&v=6
- 49** Öko-Institut e.V.: Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta). Im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, Juli 2024, https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/fachinfo/fa/pasta_abschlussbericht.pdf;jsessionid=A2BD75423CE31E-423798EBD23D9E92E1.internet002?__blob=publicationFile&v=3
- 50** Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung, <https://www.kenfo.de/start>
- 51** C. Pistner, M. Englert, C.v. Hirschhausen, F. Böse, B. Steigerwald, L. Gast, R. Donderer: Sogenannte „neuartige“ Reaktorkonzepte. Öko-Institut e.V., 27.02.2024, <https://www.oeko.de/publikation/analyse-und-bewertung-des-entwicklungsstands-der-sicherheit-und-des-regulatorischen-rahmens-fuer-sogenannte-neuartige-reaktor-konzepte/>
- 52** C. Pistner, M. Englert, C. Küppers, B. Wealer, B. Steigerwald, C.v. Hirschhausen, R. Donderer: Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors). Öko-Institut e.V., März 2021, <https://www.oeko.de/publikation/sicherheitstechnische-analyse-und-risikobewertung-einer-anwendung-von-smr-konzepten-small-modular-reactors/>
- 53** M.V. Ramana, „The Forgotten History of Small Nuclear Reactors“, IEEE Spectrum, 27. April 2015, <https://spectrum.ieee.org/the-forgotten-history-of-small-nuclear-reactors>
- 54** Björn Steigerwald, Jens Weibezahn, Martin Slowik, Christian von Hirschhausen: Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors, Energy, Volume 281, 2023, 128204, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>
- 55** IPCC 2014: Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change – Working Group III Contribution to the 5th Assessment Report of the IPCC.
- 56** Hengstler, J., Russ, M., Soffregen, A., Hendrich, A., Weidner, S.; Held, M., Briem, A.-K. 2021: Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Umweltbundesamt, Abschlussbericht, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf
- 57** Nuclear Free Foundation et al. 2022: Uranatlas _ Daten und Fakten über den Rohstoff des Atomzeitalters, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/atomkraft/Uranatlas_2022_2.pdf
- 58** CRIIRAD, <https://www.criirad.org/orano-au-niger-des-millions-de-tonnes-de-dechets-radioactifs-non-confines-une-eepe-de-damocles-pour-l'alimentation-en-eau-potable-de-plus-de-100-000-personnes/>
- 59** C. Pistner, M. Englert: Nuclear Power and the „do no significant harm“ criteria of the EU Taxonomy. Öeko-Institut Working Paper 4/2021, <https://www.oeko.de/publikation/nuclear-power-and-the-do-no-significant-harm-criteria-of-the-eu-taxonomy/>; C. Pistner, M. Englert, B. Wealer: Sustainability at risk. A critical analysis of the EU Joint Research Centre technical assessment of nuclear energy with respect to the “do no significant harm“ criteria of the EU Taxonomy Regulation. Heinrich-Böll-Stiftung, September 2021, https://eu.boell.org/sites/default/files/2021-09/Sustainability_at_risk_2021_final_0.pdf?dimension1=ecology

60 Energy Institute 2024:
Statistical Review of World Energy.
[https://www.energyinst.org/
statistical-review/home](https://www.energyinst.org/statistical-review/home)

61 Umweltbundesamt 2023:
What is the role of nuclear energy in
achieving climate targets in global
scenarios? Fact sheet Autoren:
Loreck, C., Pistner, C., Herold, A.,
Rausch, L, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/
medien/11850/publikationen/
factsheet_nuclear_in_international_
energy_scenarios.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_nuclear_in_international_energy_scenarios.pdf) , Die Daten der
Szenarien stammen aus: NGFS
(2022): NGFS Scenarios for central
banks and supervisors. Ed. by
Network For Greening the Financial
Systems (NGFS), [https://www.ngfs.
net/sites/default/files/medias/
documents/ngfs_climate_
scenarios_for_central_banks_and_
supervisors_.pdf.pdf](https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf.pdf)

62 Umweltbundesamt 2023,
op. cit.

63 Nuclear Energy Agency 2023:
Countries launch joint declaration
to triple nuclear energy capacity by
2050 at COP28, [https://www.
oecd-nea.org/jcms/pl_88702/
countries-launch-joint-declaration-
to-triple-nuclear-energy-capacity-
by-2050-at-cop28](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_88702/countries-launch-joint-declaration-to-triple-nuclear-energy-capacity-by-2050-at-cop28)

64 Umweltbundesamt 2023,
op. cit.

65 Schneider, M. et al 2024,
op. cit., Figure 58

Alle Angaben zuletzt überprüft
am 14.10.2024.

Impressum

Herausgeberin: Heinrich-Böll-Stiftung e.V.
Schumannstraße 8, 10117 Berlin
info@boell.de, www.boell.de, 030 / 285 34-0

Text: Anke Herold, Anna Kopp, Christoph Pistner (Öko-Institut e.V.)
Konzeption und Leitung: Anna Brehm
Redaktionelle Mitarbeit: Rita Hoppe und Stephan Stoll
(Heinrich-Böll-Stiftung)

Gestaltung und Infografiken: Heimann + Schwantes, Berlin
Druck: Kern GmbH, Bexbach

ISBN 978-3-86928-271-8

V.i.S.d.P.: Annette Maennel, Heinrich-Böll-Stiftung, 2025
Dieses Werk steht unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0

Die Publikationen der Heinrich-Böll-Stiftung dürfen nicht zu
Wahlkampfzwecken verwendet werden.

Bestell- und Download-Adresse:
Heinrich-Böll-Stiftung e.V., Schumannstraße 8, 10117 Berlin
buchversand@boell.de, www.boell.de/publikationen

Wollen Sie regelmäßig von uns per E-Mail oder
per Post über interessante Veranstaltungen und
Publikationen informiert werden?
Dann tragen Sie sich bitte unter www.boell.de/news
in unsere Verteiler ein. Und folgen Sie uns auf

   @boellstiftung

