

Kernenergie in Deutschland

Hat Sie noch eine Zukunft?



Manuel Marsch
Fakultät für Physik
LMU München
Kontakt: Manuel.Marsch@campus.lmu.de
Co-Betreuer: Prof. Harald Lesch

Vorwort

Dieses Bildungsmaterial beschäftigt sich mit der Einordnung der Kernenergie in die zukünftige Energieversorgung in Deutschland. Gerade im Hinblick auf immer wieder aufkommende Debatten in der Politik rund um dieses Thema soll hier objektiv der Frage nachgegangen werden, ob Kernenergie in Zeiten der Energiewende für Deutschland wieder eine wichtigere Rolle spielen sollte. Ohne ökologische Aspekte näher zu thematisieren, werden ausschließlich bereits bestehende Erkenntnisse und Daten herangezogen. Der Fokus liegt dabei auf der Darstellung und Einordnung von Fakten rund um die Kernenergie, ohne eine wertende Betrachtung im Hinblick auf Umweltwirkungen oder subjektiv motivierte energiepolitische Zielsetzungen vorzunehmen.



Inhaltsverzeichnis

1.	<u>KERNKRAFTWERKE: WIE FUNKTIONIEREN SIE?</u>	<u>4</u>
2.	<u>GESCHICHTLICHER HINTERGRUND.....</u>	<u>6</u>
3.	<u>ALTERNATIVE WEGE?</u>	<u>7</u>
4.	<u>DOCH WIE STEHT ES NUN IN DEUTSCHLAND UM DIE KERNENERGIE</u>	<u>9</u>
5.	<u>EIN BLICK AUF EUROPA.....</u>	<u>12</u>
6.	<u>WARUM WIRD KERNENERGIE IMMER TEURER?</u>	<u>13</u>
7.	<u>WIE UNS DER KLIMAWANDEL NATÜRLICHE GRENZEN SETZT</u>	<u>15</u>
8.	<u>WO LAGERN WIR UNSEREN RADIOAKTIVEN MÜLL?</u>	<u>17</u>
9.	<u>„KÖNNTE DIE KERNENERGIE EINEN BEITRAG ZUR ENERGIEWENDE LEISTEN?“</u>	<u>19</u>
10.	<u>GREEN ECONOMY.....</u>	<u>21</u>
11.	<u>ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN IN DER KERNENERGIE</u>	<u>22</u>
12.	<u>FAZIT.....</u>	<u>23</u>
13.	<u>AUFGABEN ZUM THEMENGEBIET KERNENERGIE.....</u>	<u>24</u>
1.	<u>ATOMMÜLL – HALBWERTSZEIT</u>	<u>24</u>
2.	<u>AUFGABE - GLOBALER ENDLAGERBEDARF</u>	<u>24</u>
3.	<u>ZWISCHENLAGER UND ENDLAGER FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND</u>	<u>24</u>
4.	<u>RADIOAKTIVER MÜLL</u>	<u>25</u>
5.	<u>„KERNENERGIE IST KLIMAFREUNDLICH.“</u>	<u>25</u>
6.	<u>KÜHLWASSERPROBLEM</u>	<u>25</u>
14.	<u>AUFGABEN: LÖSUNGEN</u>	<u>27</u>
15.	<u>QUELLEN</u>	<u>31</u>

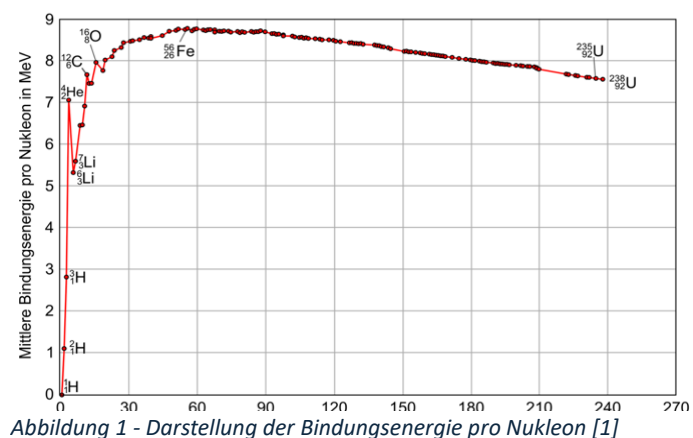
1. Kernkraftwerke: Wie funktionieren Sie?

Obwohl wir seit 2023 keine Kernreaktoren zur kommerziellen Stromerzeugung mehr nutzen – die Forschungsreaktoren ausgenommen –, spielt die Kernenergie nach wie vor eine wichtige Rolle und ist weiterhin Teil des politischen Diskurses. Die großen Wirtschaftsnationen verfolgen eine Politik, die den Ausbau der Kernenergie fördert. Gerade die Energiesicherheit Deutschlands als Wirtschaftsmacht steht dabei politisch klar im Fokus. Weltweit wird nach wie vor in großem Stil in Kernenergie investiert. Auch in der deutschen Politik wird das Interesse an einer Rückkehr zur Kernenergie immer wieder vertreten.

„Wie kann es denn sein, dass eine der größten Industrienationen wie Deutschland nach wie vor meint, einen Sonderweg einschlagen zu müssen?“ Kernenergie sei schließlich zuverlässig und vor allem günstig und gerade in Zeiten der Energiekrise die „beste Lösung“. Ein Argument, welches in diesem Zusammenhang immer wieder fällt.

Bevor wir uns genauer mit der Einordnung dieser Technologie beschäftigen, sollen zunächst die physikalischen Grundlagen erläutert werden.

Wie Kohle-, Gas- oder Ölkraftwerke gehören auch Kernkraftwerke – wobei im Großen zwischen Siedewasserreaktoren und Druckwasserreaktoren unterschieden wird – zu den Wärmekraftwerken. Denn auch sie nutzen Wasser, das durch zugeführte Wärme verdampft und eine Turbine mit Generator antreibt. Der Unterschied liegt jedoch im verwendeten Energieträger. Anstatt fossile Brennstoffe zu verbrennen, wird hier eine Energiequelle genutzt, die tief in der Materie verborgen liegt.



Um zu verstehen, wie Kernkraftwerke diese Energie abrufen können, ist ein Blick auf den Aufbau von Atomen und die physikalischen Grundlagen der Kernspaltung notwendig. Atome bestehen aus einer Elektronenhülle und einem Atomkern. Während die Elektronen die Hülle bilden, befinden sich im Kern die Protonen und Neutronen, die sogenannten Nukleonen. Obwohl sich die positiv geladenen Protonen gegenseitig abstoßen müssten, hält eine sehr starke Kraft, die Kernkraft, den Kern zusammen. Die Anzahl der Protonen bestimmt, um welches chemische Element es sich handelt. Zudem

führen unterschiedliche Neutronenzahlen zu verschiedenen Isotopen eines Elements. Beispielsweise sind Fe-54 und Fe-56 zwei unterschiedliche Isotope des Elements Eisen. Obwohl die Nukleonenzahl variiert, handelt es sich weiterhin um dasselbe Element, jedoch mit abweichenden Eigenschaften.

Die Bindung der Nukleonen im Kern ist mit einer bestimmten Energiemenge verbunden, der sogenannten Kernbindungsenergie. Diese ist je nach Element unterschiedlich groß und erreicht bei Eisen-56 ihren höchsten Wert. Das bedeutet, dass sehr leichte Kerne durch Verschmelzung und sehr schwere Kerne durch Spaltung Energie freisetzen können. Bei der Kernspaltung wird ein schwerer Atomkern, wie etwa Uran-235, in zwei leichtere Kerne geteilt. Dabei entsteht ein kleiner Massendefekt, da die Masse der Produkte etwas geringer ist als die des ursprünglichen Kerns. Diese Massendifferenz wird gemäß Einsteins Formel $E = mc^2$ in Energie umgewandelt, wodurch pro Spaltung etwa 193 MeV freigesetzt werden.

Damit eine Kernspaltung ausgelöst werden kann, muss ein U-235-Kern mit einem Neutron beschossen werden. Nimmt der Kern das Neutron auf, wird er instabil und zerfällt in zwei Spaltprodukte sowie mehrere neue Neutronen. Diese freien Neutronen können wiederum weitere Kerne spalten, wodurch eine Kettenreaktion entsteht. Da die bei der Spaltung entstehenden Neutronen jedoch sehr schnell sind, um wiederum weitere Spaltungen auszulösen, müssen sie zunächst abgebremst werden. Hierzu dient ein Moderator, beispielsweise Wasser, der die prompten Neutronen in sogenannte thermische Neutronen umwandelt.

Die Spaltprodukte wiederum können selbst verzögerte Neutronen emittieren. Diese benötigen einige Sekunden, um zu erscheinen, und ihr Anteil an der Gesamtzahl der Neutronen beträgt etwa 1 %.

Sie spielen jedoch eine sehr wichtige

Rolle für die Steuerbarkeit der Kettenreaktion, da durch die Veränderung des Neutronenlecks und der Absorption des Neutronenflusses die erzeugte Energiemenge reguliert werden kann. Ziel ist es, einen Multiplikationsfaktor von etwa 1 zu erreichen, bei dem der Neutronenfluss zeitlich konstant bleibt. Kurzum: Es soll verhindert werden, dass sich die Neutronen unkontrolliert vermehren und eine Kettenreaktion entsteht, die der einer Atombombe gleicht. [1] [2]

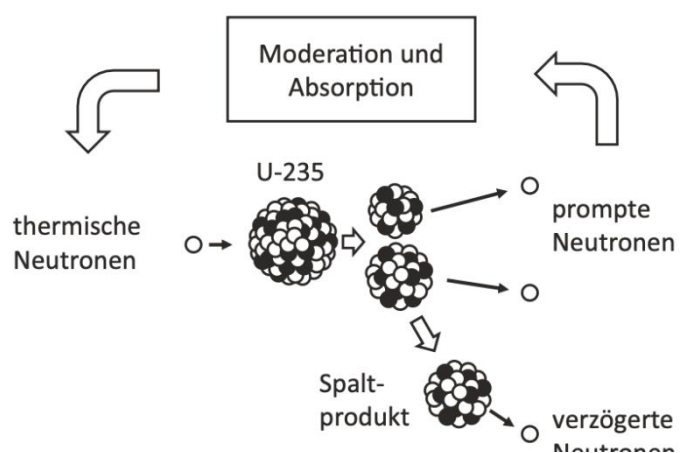


Abbildung 2 - Spaltvorgang von Uran-235 [2]

Doch wie steht es nun in Deutschland um die Kernenergie?

2. Geschichtlicher Hintergrund

Beginnen wollen wir mit einem kurzen politischen Exkurs, um die Rolle der Kernenergie in Deutschland besser verstehen zu können. Nach dem Regierungswechsel 1998 setzte sich die rot-grüne Koalition den Atomausstieg auf die politische Agenda und vereinbarte 2001 mit den Energieunternehmen eine Begrenzung der Kraftwerkslaufzeiten auf etwa 32 Jahre, die 2002 gesetzlich festgeschrieben wurde. 2010 nahm die schwarz-gelbe Regierung diese Entscheidung zurück und verlängerte die Laufzeiten, was massive Proteste auslöste und die Anti-Atomkraft-Bewegung neu belebte – insbesondere rund um die Proteststrukturen in Gorleben. Nach der Fukushima-Katastrophe im März 2011 beschloss die Bundesregierung schließlich erneut und endgültig den Ausstieg aus der Kernenergie. 2022 sollte das letzte Kraftwerk vom Netz gehen. [3]

Wir sprechen also vom Jahr 2011, wenn es um das wichtigste Entscheidungsjahr in Bezug auf die Kernenergie geht. An dieser Stelle muss man verstehen, dass die damals getroffenen Entscheidungen erst viele Jahre später ihre tatsächlichen Auswirkungen entfaltet hätten. Bis ein solches Kraftwerk von der Planung bis zum Anschluss an das Stromnetz realisiert ist, vergehen durchaus 15 Jahre.

Abgesehen von der hohen Varianz der Kosten wird deutlich, wie naiv es ist zu glauben, dass Kernenergie in einer Energiekrise, die schnelle Lösungen erfordert, kurzfristig einen Beitrag leisten kann. Auf Grundlage der Erfahrungswerte aus anderen europäischen Kraftwerken ist davon auszugehen, dass heutige Investitionen in die Kernenergie frühestens ab etwa 2040 wirksam werden und somit dem akuten Handlungsbedarf entgegenstehen. [4]

3. Alternative Wege?

Ja, die Energietransformation hätte kostengünstiger und anders ablaufen können. Genau mit diesem alternativen Weg beschäftigt sich ein Artikel im International Journal of Sustainable Energy. Grundsätzlich werden darin Überlegungen angestellt, wie sich theoretische Investitionen in die Kernenergie im Jahr 2002 auf die Energieinfrastruktur in Deutschland ausgewirkt hätten.

Die Energiewende wird (so die Studie) Deutschland bis Ende 2022 rund 696 Milliarden Euro kosten. Hätte Deutschland stattdessen seine Kernkraftwerke beibehalten und in neue investiert, wären die Gesamtausgaben auf 364 Milliarden Euro gesunken – eine Ersparnis von 332 Milliarden Euro. Auch die Netzstabilität hätte sich grundlegend anders entwickelt. Im Jahr 2002 produzierten die bestehenden Kernkraftwerke 185,6 TWh pro Jahr, mehr als alle erneuerbaren Energien im Jahr 2022 (181,8 TWh pro Jahr). Ein kontinuierlicher Ausbau der Kernenergie ab 2002 hätte die Stromproduktion aus neuen Kernkraftwerken ab 2010 deutlich erhöht und eine CO₂-freie Stromerzeugung weiter ausgebaut.

Ohne Kernenergie musste Deutschland vermehrt fossile Energieträger – vor allem Kohle und Gas – einsetzen, um die Schwankungen der erneuerbaren Energien auszugleichen. Durch die Energiewende konnten die Treibhausgasemissionen zwischen 2002 und 2022 um 25 % gesenkt werden. Mit einer Kernenergiestrategie hätte Deutschland weitere 73 % der Emissionen einsparen und seine Klimaziele deutlich übertreffen können.

Die Energiewende hat zudem zu höheren Strompreisen und wirtschaftlichen Belastungen für Haushalte und Unternehmen geführt. Der Bundesrechnungshof hat davor gewarnt, dass die Energiewende in ihrer derzeitigen Form die deutsche Wirtschaft gefährden könnte. Eine stärkere Fokussierung auf die Kernenergie hätte eine stabilere Energieversorgung zu niedrigeren Preisen ermöglichen können. Eine Kombination aus dem Erhalt bestehender und dem Bau neuer Kernkraftwerke wäre realistisch gewesen und hätte die Kosten der Energiewende etwa halbiert.

Insgesamt lässt sich aus dieser Arbeit ableiten, dass Deutschland bei Investitionen in die Kernenergie ab 2002 weniger Geld ausgegeben, eine stabilere Energieversorgung erreicht, schneller dekarbonisiert und geringere volkswirtschaftliche Belastungen getragen hätte. [5]

Während die Betrachtung der Vergangenheit zeigt, dass Kernenergie theoretisch effizienter hätte sein können, richtet sich der Blick nun auf die aktuelle Ausgangssituation und die zukünftige Entwicklung der Energiewende.

Aus dieser Perspektive zeigt die PwC-Analyse, dass ein beschleunigter Ausbau erneuerbarer Energien trotz höherer Investitionen langfristig wirtschaftlich vorteilhaft ist. So können höhere Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen – etwa 5,3 Billionen Euro bis 2050 – die Energiekosten deutlich senken (7,9 Billionen Euro vs. 9,4 Billionen Euro im „Weiter-wie-bisher“-Szenario). Die Gesamtkosten für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis 2045 liegen damit mit 13,2 Billionen Euro sogar leicht unter denen des bisherigen Ausbaupfads (13,3 Billionen Euro). Ein beschleunigter Klimaschutz reduziert darüber hinaus die jährlichen Energiekosten bereits 2045 um rund 10 Milliarden Euro.

Darüber hinaus zeigt die PwC-Analyse, dass gezielte politische Rahmenbedingungen, der Aufbau staatlicher und privater Anker-Kreditgeber sowie zinsgünstige Kredite Investitionen in die Energiewende beschleunigen und die Energiekosten langfristig senken können. Das verdeutlicht, dass heutige Investitionen in den Klimaschutz nicht nur zur Erreichung der Klimaziele beitragen, sondern sich auch wirtschaftlich lohnen. Die PwC-Analyse ergänzt somit die historische Perspektive, indem sie zeigt, dass ein beschleunigter Ausbau erneuerbarer Energien langfristig ökonomisch vorteilhaft ist.

Diese Erkenntnis aus der Vergangenheit ist wichtig, insbesondere für die Einordnung der heutigen Situation, da Kernenergie im Vergleich zu erneuerbaren Energieträgern nach wie vor zu den teuersten Optionen gehört, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden. Auch wenn wir heute wissen, dass Kernenergie mit den richtigen Investitionen und zum richtigen Zeitpunkt in der Vergangenheit viel hätte bewirken können, ändert dies nichts an der aktuellen Lage und stellt für Deutschland mittel- und langfristig keine realistische alternative Lösung dar, wie im weiteren Verlauf noch gezeigt wird. [5] [6]

4. Doch wie steht es nun in Deutschland um die Kernenergie

Die Zukunftsfähigkeit der Kernenergie wird in Deutschland seit Jahren kontrovers diskutiert, insbesondere vor dem Hintergrund politischer Forderungen nach einer Laufzeitverlängerung und der Hoffnung auf neue Reaktortypen. Damit einhergehend stellt sich immer wieder die Frage, ob Kernenergie in Zukunft einen wirtschaftlich tragfähigen und technologisch relevanten Beitrag zur Energieversorgung leisten kann. Um diese Frage beantworten zu können, muss die Kernenergie zunächst isoliert betrachtet werden, ohne sie direkt in den Gesamtzusammenhang der Energiewende einzuordnen. Zunächst sollen die aktuelle Datenlage, die Kostenstrukturen, die sicherheitstechnischen Herausforderungen und die technologischen Perspektiven der Kernenergie im deutschen Kontext beleuchtet werden.

Mit der Abschaltung der letzten drei deutschen Kernkraftwerke – Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2 – am 15. April 2023 wurde die kommerzielle Nutzung der Kernenergie in Deutschland beendet. Dennoch gibt es bis heute politische Akteure und gesellschaftliche Gruppen, die diesen Schritt als Fehler bewerten und eine Rückkehr zur Kernkraft fordern. Diese Diskussion findet jedoch vor dem Hintergrund statt, dass die Kosten der Kernenergie über Jahrzehnte hinweg kontinuierlich gestiegen sind, während die Gestehungskosten von Windkraft und Photovoltaik seit den frühen 2000er-Jahren deutlich gesunken sind. Die Kernenergie war schon immer auf umfangreiche staatliche Unterstützung angewiesen. Ohne diese stetigen Subventionen wären Entwicklung, Forschung, Sicherheitssysteme und Betrieb niemals finanziell tragbar gewesen. [4] [7] [8]

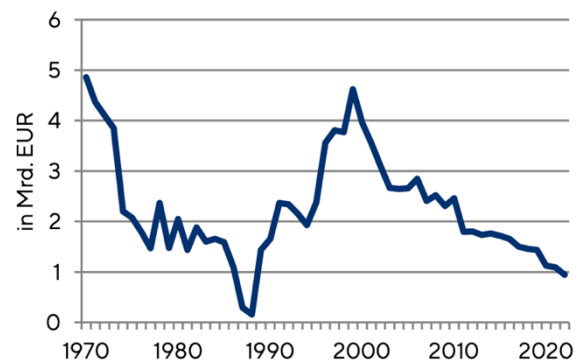


Abbildung 3 - 7 Darstellung der staatlichen Förderungen von Kernkraft von 1970-2022 [7]

Ein Blick auf die staatlichen Förderungen zwischen 1970 und 2022 zeigt, dass im Durchschnitt jährlich rund 2,3 Milliarden Euro aus dem Bundeshaushalt in Form von direkten Zuschüssen und Steuervergünstigungen in die Kernenergie geflossen sind. Trotz dieser enormen Investitionen erweist sich die Planung und der Bau neuer Reaktoren weiterhin als unzuverlässig: Bauzeiten verlängern sich erheblich, und die Kosten steigen weit über die ursprünglichen

Planungen hinaus. Ein besonders auffälliges Beispiel in Europa ist das Kraftwerk Flamanville in Frankreich. Für die 1.600-MW-Anlage waren ursprünglich 3,3 Milliarden Euro veranschlagt worden. Nach einer Verzögerung von elf Jahren lagen die tatsächlichen Kosten im Jahr 2024 bei rund 23 Milliarden Euro. Ähnlich ist die Situation beim britischen Projekt Hinkley Point C, das erstmals 2008 geplant wurde und eine Leistung von 3.200 MW erreichen soll. Auch hier haben sich die Baukosten voraussichtlich auf rund 31 Milliarden Euro bis zur geplanten Fertigstellung im Jahr 2026 verdoppelt. [4]

Diese Beispiele verdeutlichen, dass moderne Kernkraftwerke trotz technologischer Weiterentwicklungen nicht wirtschaftlicher, sondern im Gegenteil zunehmend teurer werden. [4] [7]

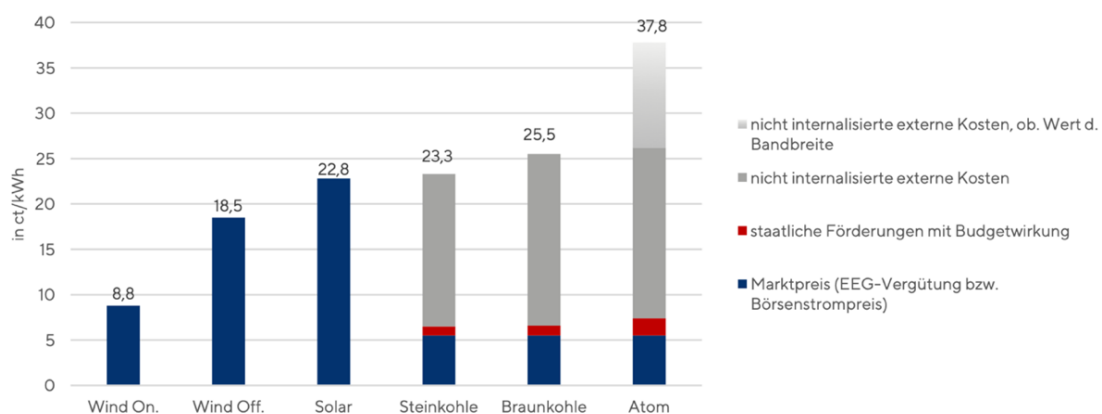


Abbildung 4 - Darstellung der Energiekosten für die verschiedenen Energieträger [7]

Zu diesen direkten Kosten kommen erhebliche externe Kosten hinzu, die nicht von den Betreibern, sondern von der Gesellschaft getragen werden. Dazu gehören die Risiken eines schweren Atomunfalls, langfristige Umweltschäden, Gesundheitsrisiken sowie die Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle. Da die tatsächlichen Kosten eines nuklearen Großschadensfalls kaum realistisch beziffert werden können und keine private Versicherung solche Risiken abdeckt, müssen diese potenziellen Schäden letztlich vom Staat und damit von der Allgemeinheit getragen werden.

Unter Einbezug aller Förderungen, Steuervergünstigungen und externen Kosten erweist sich die Kernenergie als deutlich teurer als alle relevanten konventionellen Energieträger und sogar teurer als die Stromerzeugung aus Stein- und Braunkohle. Gleichzeitig sind erneuerbare Energien – insbesondere Windkraft und Photovoltaik – inzwischen deutlich kostengünstiger. Zudem ist es Status quo, dass auch heute noch staatliche Gelder in die Kernenergie fließen,

obwohl kein einziges Kraftwerk mehr am Netz ist. Grund hierfür sind vor allem der komplexe Rückbau der Altanlagen sowie die laufende Forschung im Bereich der Endlagerung. [4] [7]

5. Ein Blick auf Europa

Nicht nur Deutschland, sondern ganz Europa stand lange vor einem Investitionsdefizit im Bereich Kernenergie. Die meisten Reaktoren in Europa wurden ursprünglich für eine Laufzeit von 30 bis 40 Jahren ausgelegt. Heute sind über 90 % dieser Anlagen älter als 30 Jahre oder haben zumindest das Ende ihrer konzipierten Lebensdauer erreicht. Gleichzeitig haben sich nicht nur die sicherheitsrelevanten Anforderungen verschärft, sondern auch die geopolitischen und klimatischen Rahmenbedingungen deutlich verändert. Kriege wie in der Ukraine erhöhen das Risiko gezielter Angriffe oder militärischer Zwischenfälle in der Nähe nuklearer Anlagen. Klimatische Veränderungen und eine steigende Häufigkeit extremer Wetterereignisse stellen zusätzliche betriebliche Herausforderungen und Risiken für den sicheren Betrieb dieser Anlagen dar. Auch der natürliche Verschleiß von Materialien und Komponenten macht ältere Reaktoren anfälliger für Störungen.

Aus all diesen Gründen führt eine deutliche Verlängerung der Laufzeiten zu einem erhöhten Risiko schwerer Reaktorunfälle. Die Altersstruktur der europäischen Reaktorflotte stellt somit ein zunehmendes Sicherheitsproblem dar. [7]

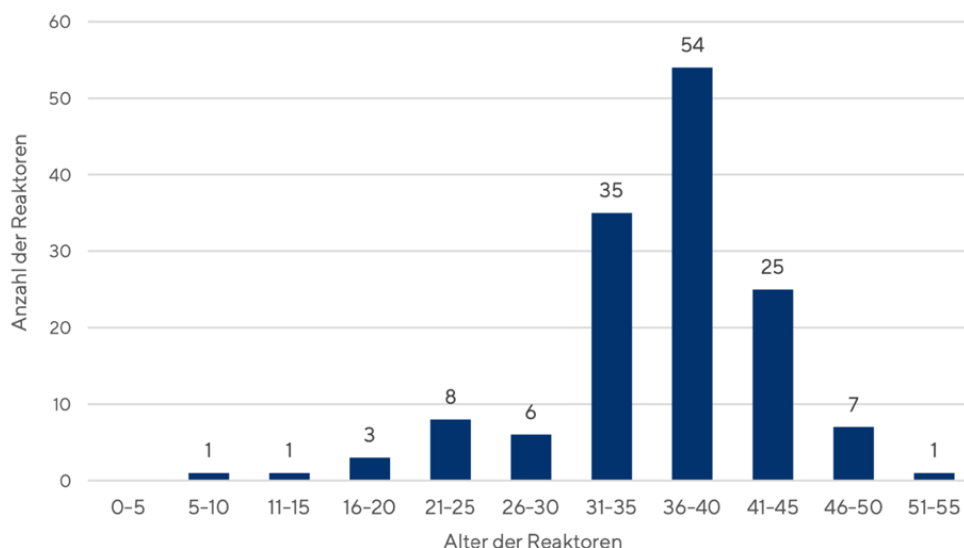


Abbildung 5 - Darstellung der Altersstruktur europäischer Kernkraftwerke [7]

6. Warum wird Kernenergie immer teurer?

Lernkurven beschreiben, wie sich die Kosten verschiedener Technologien im Laufe der Zeit verändern. Der positive Effekt von Lernkurven zeigt sich derzeit besonders in der Technologiebranche: Geräte wie Computer oder Smartphones bleiben preislich weitgehend stabil, werden aber stetig leistungsfähiger. Dieses Prinzip – sinkende Kosten pro Einheit bei steigender Produktionsmenge – lässt sich auch auf die Energieerzeugung übertragen. Entscheidend ist dabei weniger der absolute Preis einer Technologie, sondern ihre Wirkung auf die Stromkosten.

Ein Vergleich von Kernkraft und Photovoltaik verdeutlicht die Unterschiede: Bei der PV-Technologie zeigt sich ein klarer Lerneffekt. Die installierte Leistung ist seit den 1990er-Jahren stark gestiegen, während die Kosten pro

kW dramatisch gefallen sind – von etwa 10.000 US-Dollar Anfang der 1990er-Jahre auf rund 250 US-Dollar im Jahr 2022. In der Kerntechnik ist die Entwicklung dagegen entgegengesetzt. Die Kosten pro kW sind im Laufe der Jahrzehnte gestiegen; bereits in den 1990er-Jahren hatten sie sich gegenüber den Ausgangswerten nahezu verdoppelt. [4]

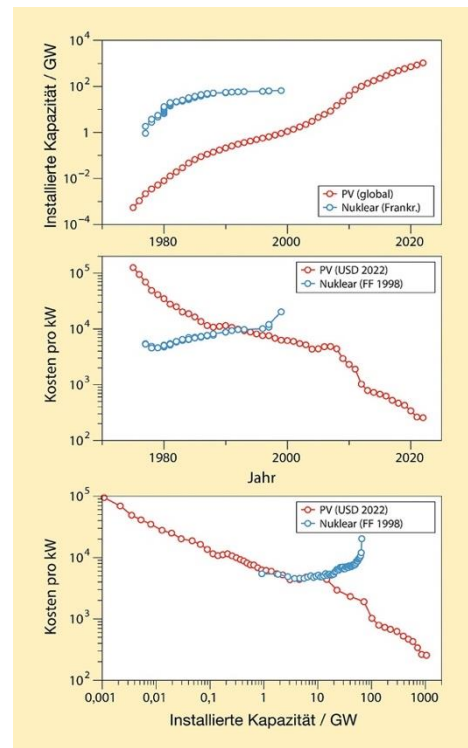


Abbildung 6 - Entwicklung der Kosten über die Jahre von Kernkraftwerken (blau, Einheit in französischen Francs) und Photovoltaik (rot, in US-Dollar von 2022) [4]

Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung

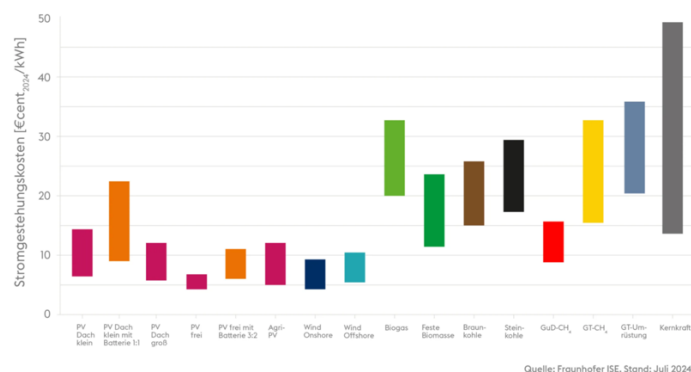


Abbildung 7 - Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung [9]

Die Ursache für diese unterschiedlichen Lernkurven liegt vor allem im Marktumfeld und in der technologischen Komplexität. Photovoltaik verfügt über einen breiten Weltmarkt, ist leicht transportierbar, vergleichsweise einfach zu installieren und sowohl für Unternehmen als auch für private Haushalte zugänglich. Die hohe Nachfrage, viele Anbieter und fortschreitende Automatisierung senken die Preise zusätzlich.

Kernkraftwerke dagegen sind Einzelanfertigungen, technisch sehr anspruchsvoll und nur begrenzt standardisierbar – daher fehlt ein echter Lerneffekt.

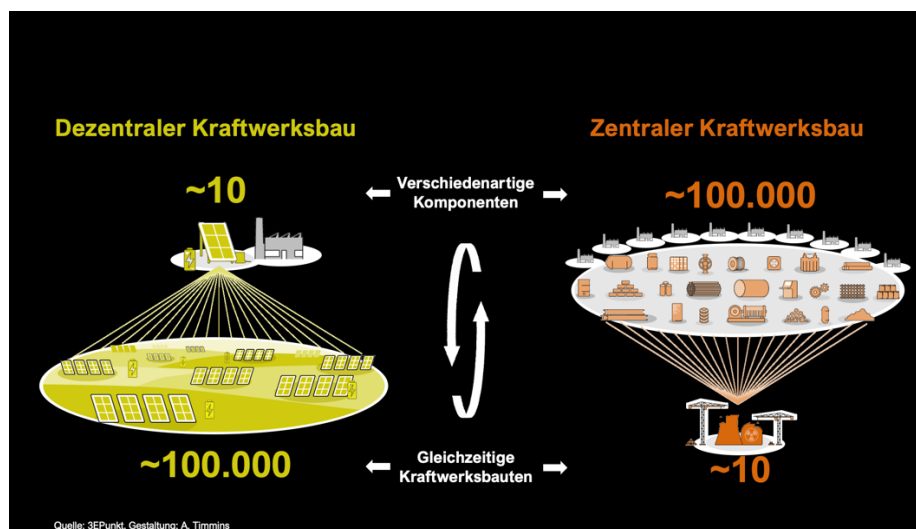


Abbildung 8 Gegenüberstellung des dezentralen und des zentralen Kraftwerksbaus (Gestaltung: A.Timmins)

In der obigen Abbildung ist noch einmal der entscheidende Unterschied zwischen den Technologien zu erkennen: Bei einem Kernkraftwerk werden rund 100.000 verschiedene Komponenten benötigt. Bei einem dezentralen Kraftwerk, wie beispielsweise einem Solarfeld, werden ebenfalls etwa 100.000 Module eingesetzt, mit dem entscheidenden Unterschied, dass diese alle gleich sind. Dadurch verhält sich die Lernkurve deutlich anders.

Angesichts dieser Entwicklungen ist abzusehen, dass die Kernkraft tendenziell teurer wird, während Photovoltaik perspektivisch weiter günstiger bleibt. Dies zeigt auch ein Blick auf die Ausbautzahlen: Ende 2023 stehen weltweit rund 374 GW Kernkraft einer installierten PV-Leistung von etwa 1.055 GW gegenüber – mit einer jährlichen Wachstumsrate von rund 20 % im Solarsektor. [4]

7. Wie uns der Klimawandel natürliche Grenzen setzt

Neben den steigenden Kosten für Kernenergie muss man sich auch die Frage stellen, wie kompatibel die Kraftwerke mit dem Klimawandel umgehen können. Wir haben bereits erfahren, dass Kernreaktoren thermische Kraftwerke sind, was bedeutet, dass diese Kraftwerke an einen Kühlkreislauf gebunden sind, wobei Flüsse oder Meerwasser die Rolle der Kühlung übernehmen. Ein bislang wenig beachteter Aspekt des Klimawandels ist die zunehmende Wasserknappheit. Auch in Deutschland ist das Wasserangebot in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zurückgegangen, da die Niederschläge abnahmen und gleichzeitig die Temperaturen stiegen. Zur Bewertung der klimatologischen Wasserverfügbarkeit wird häufig die Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen. Letztere beschreibt, wie viel Wasser bei unbegrenzter Verfügbarkeit verdunsten könnte, und nimmt mit steigender Temperatur zu. [4]

Diese Differenz ist ein guter Indikator für die Wasserverfügbarkeit, da sie ausschließlich von Niederschlag und Temperatur abhängt. Für den Zeitraum von 1961 bis 1990 zeigt sich in weiten Teilen Deutschlands eine negative Bilanz, besonders im Osten, während Regionen wie das Alpenvorland höhere Niederschlagsüberschüsse aufweisen. Im Vergleich zum Zeitraum 1991–2020 wird deutlich, dass Deutschland insgesamt trockener geworden ist. Ursache dafür sind der Klimawandel, eine um etwa 2 °C gestiegene Durchschnittstemperatur in den letzten Jahren und eine höhere Sonneneinstrahlung, die die Verdunstung weiter erhöht. Diese Entwicklung hat direkte Auswirkungen auf die Energieerzeugung. [4]

Thermische Kraftwerke, wie Kernreaktoren, sind aufgrund ihrer Turbine auf die Erzeugung eines Temperaturgefälles angewiesen. Dazu wird Fluss- oder Meerwasser verwendet, das entweder in Kühltürmen verdunstet oder erwärmt wird, um einen Kühleffekt zu erzeugen. Als Beispielrechnung, um die benötigten Wassermengen abzuschätzen, gehen wir von einem thermischen Kraftwerk mit einer Leistung von 1000 MW und einem Wirkungsgrad von 40 % aus. Daraus ergibt sich eine Abwärme von 1500 MW, die durch Wasser abgeführt werden muss. Mit einer Verdampfungswärme von 2,5 MJ pro Kilogramm Wasser würde dies bedeuten, dass 0,6 Tonnen Wasser pro Sekunde verdampfen, oder bei Flusswasser 36 Tonnen pro Sekunde benötigt werden, wenn dieses um 10 °C erwärmt wird.

Deutschlandweit haben wir im Jahr 2020 eine Netzlast von ca. 57 GW. Geht man davon aus, dass nur thermische Kraftwerke an dieser Leistung beteiligt sind, so würde die Verdunstung von Wasser $1,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ betragen, was 2,3 % des Bodenseevolumens entspricht. Bei der Nutzung von Flusswasser wären es $64,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{Jahr}$, also etwa 30 % mehr als der Bodensee überhaupt hergibt.

Es sollte nun deutlich geworden sein, mit welchen Größenordnungen man hier operieren muss, um den Wasserverbrauch thermischer Kraftwerke einordnen zu können. [4]

Vor diesem Hintergrund spricht vieles dafür, auf Technologien zu setzen, die kein Kühlwasser benötigen. Das Problem mit der Wasserknappheit in Verbindung mit den Kernreaktoren ist bereits ein bestehendes Problem im Jahr 2025.

„In der Schweiz ist wegen des warmen Flusswassers einer der Reaktoren des Kernkraftwerks Beznau abgeschaltet worden. Der zweite Reaktor arbeite mit halber Leistung, teilte die Betreibergesellschaft Axpo mit.“ [10]

„Angesichts der extremen Hitze in Frankreich hatte der staatliche Stromkonzern EDF bereits vorgestern das Kernkraftwerk Golfech im Süden des Landes heruntergefahren. Dies sei am späten Sonntagabend geschehen, um ein Aufheizen des Flusses Garonne zu verhindern, aus dem das Kraftwerk sein Kühlwasser bezieht. Wie lange das Kraftwerk ausgeschaltet bleibt, teilte EDF nicht mit. Die Wassertemperatur der Garonne könnte durch die Hitze auf 28 Grad steigen.“ [10]

Fördert ein Fluss weniger, so muss das verbleibende Flusswasser mehr überschüssige Energie abtransportieren, was zu einer Überhitzung der Flüsse führt, solange diese überhaupt noch Wasser führen. Fraglich ist nun auch, unabhängig vom Umweltaspekt – also davon, dass die Flora und Fauna der Flüsse zerstört werden –, ob ein zuverlässiger Kühlkreislauf für Kernenergie gesichert ist, wenn der Klimawandel und damit die Wasserknappheit zunehmend fortschreiten. Es hat auch schon früher in Deutschland solche Vorfälle gegeben, dass Kraftwerke heruntergefahren werden mussten, um zu verhindern, dass die Flüsse aufgrund der Abwärme überhitzen. [11]

8. Wo lagern wir unseren radioaktiven Müll?

Die ungelöste Endlagerfrage ist einer der größten Kritikpunkte an der Kernenergienutzung. Länder wie Finnland, Frankreich oder Schweden haben bereits nationale Endlagerstandorte festgelegt und teilweise sogar gebaut. In Deutschland existieren derzeit über 125.000 m³ schwach- und mittelradioaktive Abfälle – eine Menge, die dem Volumen von rund 50 olympischen Schwimmbecken entspricht. Der überwiegende Teil davon befindet sich in Zwischenlagern, häufig direkt an ehemaligen Kraftwerksstandorten, sei es in nassen Lagerbecken oder in trockenen Hallen. Ein Teil der Abfälle wurde zur Wiederaufarbeitung ins Ausland transportiert, ein kleiner Anteil ohne Rücknahmeoption exportiert. Diese Situation zeigt, dass die langfristige Verantwortung für den radioaktiven Abfall weiterhin ungelöst bleibt. [7] [12]

Auch hier geht es nicht primär um die Umwelt, sondern vielmehr um die landesweite Sicherheitslage. Der Krieg in der Ukraine markiert einen Bruch mit bisherigen sicherheitspolitischen Annahmen zur Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle. Zivile kerntechnische Anlagen werden erstmals seit Jahrzehnten direkt in militärische Auseinandersetzungen einbezogen. Damit sind Szenarien eingetreten, die zuvor als äußerst unwahrscheinlich galten und bisher in Genehmigungsverfahren kaum berücksichtigt wurden. Für deutsche Zwischenlager bedeutet dies eine deutlich verschärfte Bedrohungslage. Neben terroristischen Angriffen müssen nun auch militärische Szenarien berücksichtigt werden, etwa der Beschuss mit panzerbrechenden Waffen, der Einsatz bewaffneter Drohnen oder der Absturz bewaffneter Militärflugzeuge. Diese Bedrohungen gehen weit über klassische SEWD-Szenarien hinaus und können zu großflächigen Freisetzungen radioaktiver Stoffe führen. [13]

Die bestehenden Sicherungskonzepte sind darauf nicht ausgelegt. Die bisherigen Nachrüstungen verzögern vor allem das Eindringen kleiner Tätergruppen, bieten aber keinen Schutz gegen militärische Angriffe. Angesichts sehr langer Lagerzeiträume ist es daher nicht mehr vertretbar, kriegerische Szenarien auszublenden. Vielmehr müssen sie realistisch in die Sicherheitsbewertungen einbezogen und langfristig grundlegend neue, gegebenenfalls unterirdische Lagerkonzepte diskutiert werden. [13]

Zudem ist die Gefährdungslage bei laufenden Kernkraftwerken noch größer, da nicht nur die Zwischenlager, sondern auch die aktiven Reaktoren selbst potenzielle Quellen für Freisetzungen unter extremen Szenarien darstellen.

Schlussendlich zeigt sich, dass die Sicherheitslage mit der ungeklärten Endlagerfrage ein zentrales Problem darstellt. Eine vom BASE in Auftrag gegebene Studie des Öko-Instituts e. V. nennt unter „idealen Bedingungen“ das Jahr 2074 als möglichen Zeitpunkt, bis Deutschland die Endlagerfrage geklärt haben könnte. Für das

anschließende Genehmigungsverfahren sowie für die Errichtung und Inbetriebnahme des Endlagers einschließlich der dafür erforderlichen Konditionierungsanlage und des Eingangslagers wird ein Zeitraum von etwa 20 bis 35 Jahren veranschlagt. [15]



Abbildung 9 - Darstellung der Zwischenlager in Deutschland [16]

9. „Könnte die Kernenergie einen Beitrag zur Energiewende leisten?“

Hier kann eindeutig gesagt werden, dass die Kerntechnik in ihrer heutigen Form und in Anbetracht der jetzigen Ausgangsform unseres Landes weder kurz- noch langfristig unser Energieproblem lösen wird. Die in den letzten Jahren noch betriebenen Atomreaktoren befinden sich, wie die meisten Reaktoren in Europa, bereits am Ende ihrer geplanten Laufzeit. Selbst wenn diese noch um einige Jahre verlängert würden, wäre dies auf lange Sicht definitiv keine nachhaltige Lösung. Solche alten Reaktoren sind modernisierungsbedürftig und stellen zudem wieder ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar. Neue Kernkraftwerke zu entwickeln und zu bauen, erscheint auch nicht sinnvoll, denn wie wir an der Lernkurve der Kernkraftwerke gesehen haben, sind diese und damit auch der Atomstrom in den letzten Jahren immer teurer geworden. Auch wissen wir bis heute nicht, wie wir mit den radioaktiv belasteten Materialien umgehen sollen, wobei eben die Endlagerfrage in Deutschland immer noch nicht geklärt ist. Auch wenn die Kernenergie nicht aktiv Kohlendioxid freisetzt, so entstehen doch radioaktive Materialien, die wir nicht ohne weiteres entsorgen können. Damit ist klar, dass die Kernspaltung keine nachhaltige und preiswerte Energie liefern kann. Über Fusionsreaktoren kann derzeit nur spekuliert werden und sie sollten in der aktuellen Diskussion vorerst keinen großen Raum einnehmen, auch wenn die Forschung sehr wichtig ist. Die Kernfusion ist bei weitem noch nicht ausgereift und es wird noch einige Jahre dauern, bis diese Technologie für uns zur Verfügung steht. Die Stromgestehungskosten lassen sich derzeit nicht verlässlich vorhersagen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Technologie frühestens Mitte des 21. Jahrhunderts eine Rolle spielen wird und daher nicht in die heutige Diskussion eingebracht werden sollte.

Im Zuge der Energiewende gewinnt der Ausgleich von Spitzenlasten im Stromnetz zunehmend an Bedeutung. Der stark wachsende Anteil erneuerbarer Energien führt zu zeitlich schwankender Stromerzeugung, die kurzfristig ausgeglichen werden muss. Solche Schwankungen gab es jedoch auch schon früher, etwa zwischen Tag und Nacht.

Für diese Aufgabe sind Kraftwerkstypen erforderlich, die ihre Leistung schnell und flexibel anpassen können. Kernkraftwerke sind hierfür nur sehr eingeschränkt geeignet. Sie sind auf einen kontinuierlichen Grundlastbetrieb ausgelegt und können ihre Leistung nur langsam und in begrenztem Umfang hoch- oder herunterfahren. Mit zunehmender variabler Einspeisung aus

Sonne und Wind sinkt die Auslastung von Kernkraftwerken, was die Stromgestehungskosten pro erzeugter Strommenge erhöht.

Demgegenüber können flexible Kraftwerkstechnologien, insbesondere Gasturbinen, Laständerungen in kurzer Zeit ausgleichen und gezielt zur Stabilisierung des Netzes eingesetzt werden. Sie lassen sich schnell an- und abschalten und sind damit besser geeignet, kurzfristige Erzeugungsschwankungen auszugleichen. Speichertechnologien wie Pumpspeicherkraftwerke, Batterien oder chemische Speicher wie grüner Wasserstoff werden genutzt, um Unterschiede zwischen Erzeugung und Verbrauch auszugleichen.

Vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass Kernkraftwerke nicht nur aus Sicht von Kosten und Sicherheit, sondern auch systemisch nur begrenzt in ein modernes, erneuerbar geprägtes Energiesystem passen. Der notwendige Ausgleich von Spitzenlasten erfordert flexible Erzeugungskapazitäten, die Kernkraftwerke aufgrund ihrer technischen Auslegung nicht bereitstellen können. Um das Defizit in den Bereichen der Spitzenlasten zu kompensieren, ist es sinnvoll, erneuerbare Energien weiter auszubauen, da sie, wie wir bereits gesehen haben, eine der günstigsten Energieformen darstellen und viele Vorteile mit sich bringen. Das zu nennende Stichwort ist hier „Green Economy“ [4].

10. Green Economy

Viele halten nach wie vor die Kernenergie für wirtschaftlich beständiger, gerade im Vergleich zu erneuerbaren Energien. Doch die globale „Green Economy“ zeigt her gerade genau das Gegenteil, wobei längst Dimensionen erreicht wurden, die vielfach noch unterschätzt werden. „Green Economy“ ist ein Konzept für Wirtschaft und Energieversorgung, das ökologische Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz in den Mittelpunkt stellt. Mit einem Jahresvolumen von über fünf Billionen US-Dollar gehört sie bereits heute zu den größten Wirtschaftsräumen weltweit. Bis 2030 soll der Markt auf mehr als sieben Billionen US-Dollar anwachsen und zählt damit zu den am schnellsten wachsenden Sektoren der Weltwirtschaft. In den vergangenen zehn Jahren entwickelte sich lediglich die Tech-Branche dynamischer. Die Transformation hin zu einer klimafreundlicheren Wirtschaft ist damit kein Randphänomen mehr, sondern ein zentraler Wachstumstreiber der kommenden Jahre.

Eine besonders prägende Rolle nimmt China ein. Kein anderes Land investiert so viel in grüne Technologien: Allein im Jahr 2024 flossen dort 659 Milliarden US-Dollar in saubere Energie – mehr als in den USA und der Europäischen Union zusammen. China ist führend bei der Herstellung von Solar- und Windtechnik, Batterien und grünen Schlüsselpatenten und prägt damit globale Lieferketten klimafreundlicher Technologien entscheidend mit. Während die USA und Europa in einzelnen Bereichen innovativ bleiben, verschiebt Chinas schiere Größe, kombiniert mit politischer Steuerung und staatlicher Industriepolitik, die Kräfteverhältnisse zunehmend. Die wirtschaftliche Bedeutung dieses Sektors – und Chinas Rolle darin – wird bislang häufig unterschätzt. [17]

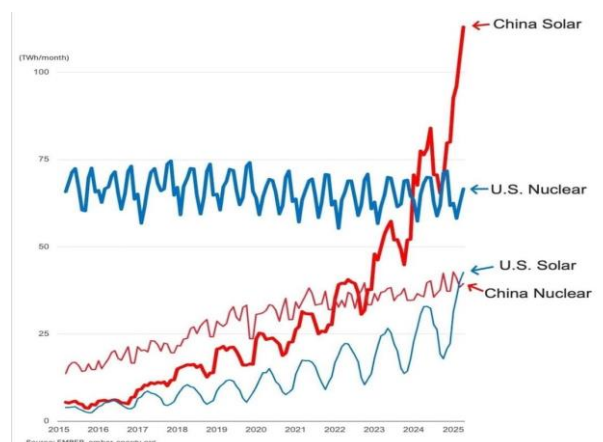


Abbildung 10 - Installierte Leistung im Bereich Solarenergie

11. Zukünftige Entwicklungen in der Kernenergie

Die Frage nach der Zukunft der Kernenergie richtet sich auch auf neuere Reaktorkonzepte, insbesondere auf sogenannte Reaktoren der vierten Generation – fortschrittliche Kernreaktoren, die höhere Sicherheit, Effizienz und eine verbesserte Abfallbilanz gegenüber heutigen Kernkraftwerken bieten sollen – sowie auf Small Modular Reactors (SMRs). Gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren werden seit den 1960er Jahren erforscht, doch bis heute existiert keine einzige kommerzielle Anlage, die erfolgreich Strom produziert. Auch neue Entwicklungen in China haben bislang keinen wirtschaftlichen Vorteil gezeigt. Um Kosten zu senken, müsste ein Hochtemperaturreaktor mit einer direkten Gasturbine entwickelt werden, doch dies liegt technologisch noch in weiter Ferne. Zudem dürfen die immensen Forschungsgelder nicht übersehen werden, die seit mehr als fünf Jahrzehnten in diese Technologie geflossen sind. [2]

SMRs werden häufig als vielversprechende Lösung dargestellt, da sie kleiner, schneller zu bauen und angeblich kostengünstiger sein sollen. Eine Analyse des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass sich durch stärkere Modularität keine signifikanten Kosteneinsparungen erzielen lassen – weder in bisherigen Entwicklungen noch in Zukunft. Darüber hinaus widersprechen SMRs dem ökonomischen Prinzip der „Economies of Scale“, wonach größere Anlagen aufgrund ihrer Skalierung geringere Kosten pro erzeugter Kilowattstunde aufweisen. Es erscheint daher fraglich, warum viele kleine Reaktoren günstigeren Strom produzieren sollten als ein großer, wenn die erzeugte Energiemenge insgesamt gleichbleibt. Hinzu kommt, dass SMRs dieselben grundlegenden Probleme haben wie große Reaktoren: Sie erzeugen radioaktiven Abfall – Schätzungen zufolge 30-mal mehr als gewöhnliche Kraftwerke – benötigen konstante Leistung und sind für ein Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, das flexible und schnell regelbare Kraftwerke bevorzugt, nur bedingt geeignet. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass SMRs für die deutsche Energieversorgung keine realistische oder wirtschaftlich sinnvolle Option darstellen. [18] [19]

12. Fazit

Die vorliegende Arbeit hat die Rolle der Kernenergie in der zukünftigen Energieversorgung Deutschlands auf Grundlage bestehender Daten, Kostenentwicklungen und technischer Rahmenbedingungen untersucht. Dabei zeigt sich, dass Kernenergie zwar historisch einen bedeutenden Beitrag zur Stromerzeugung geleistet hat und in der Vergangenheit – insbesondere bei frühzeitigen Investitionsentscheidungen – potenziell andere energiepolitische Entwicklungen ermöglicht hat. Diese retrospektive Betrachtung ändert jedoch nichts an den heutigen strukturellen, wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen.

Vor dem Hintergrund deutlich gestiegener Bau- und Betriebskosten, langer Realisierungszeiträume, fehlender Lernkurveneffekte sowie ungelöster Fragen der Endlagerung und Sicherheit erweist sich Kernenergie in Deutschland gegenwärtig weder als wirtschaftlich tragfähig noch als systemisch sinnvoll integrierbar. Hinzu kommen neue Herausforderungen durch den Klimawandel, insbesondere im Bereich der Kühlwasserverfügbarkeit, sowie verschärfte sicherheitspolitische Risiken im internationalen Kontext. Auch neue Reaktorkonzepte wie SMRs oder Reaktoren der vierten Generation bieten nach aktuellem Stand keine belastbare Lösung für diese grundlegenden Probleme.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Kernenergie unter den heutigen Bedingungen keinen relevanten Beitrag zur Energiewende in Deutschland leisten kann. Der weitere Ausbau erneuerbarer Energien, ergänzt durch flexible Kraftwerkskapazitäten und Speichertechnologien wie Batterien, Pumpspeicher oder chemische Speicher, ist wirtschaftlich und systemisch deutlich besser geeignet, die zukünftige Energieversorgung zuverlässig, bezahlbar und anpassungsfähig zu gestalten. Gleichzeitig macht dieser Weg Deutschland unabhängiger von der Einfuhr kritischer Rohstoffe wie Uran. Das primäre Ziel der Arbeit war dabei nicht, ökologisch zu argumentieren, sondern die Aspekte Kosten, Versorgungssicherheit und Systemintegration zu betrachten – dass erneuerbare Energien zusätzlich zur Energiewende beitragen, ist dabei eine logische Folge. Außerdem kann Deutschland so als Vorbild für andere Länder, insbesondere für Schwellenländer, dienen, die nicht die gleichen teuren und risikoreichen Schritte in Richtung Kernenergie gehen müssen, sondern von Anfang an auf günstige, nachhaltige und erneuerbare Energie setzen können.

13. Aufgaben zum Themengebiet Kernenergie

1. Atommüll – Halbwertszeit

Plutonium ist ein radioaktives Element, das in Kernkraftwerken als Nebenprodukt entsteht, wenn Uran-238 von Neutronen beschossen wird. Das Isotop Plutonium-239 hat eine Halbwertszeit von 24.110 Jahren. [20]

Berechne, wie viel Prozent der ursprünglichen Aktivität nach

- a) 1 Halbwertszeit
- b) 2 Halbwertszeiten
- c) 10.000 Jahren

noch übrig sind.

Hinweis: $N(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$

2. Aufgabe - Globaler Endlagerbedarf

Der weltweite jährliche Anfall an hochradioaktivem Abfall beträgt etwa 12.000 Tonnen pro Jahr.

Das finnische Endlager Onkalo hat eine Kapazität von 6.500 Tonnen. [21]

- a) Berechne wie viel hochradioaktiver Abfall weltweit in 100 Jahren anfällt?
- b) Ermittle wie viele Endlager nach dem finnischen Onkalo-Konzept nötig wären, um diesen Abfall einzulagern?

3. Zwischenlager und Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland

Radioaktive Abfälle müssen sicher gelagert werden. Da ein geeignetes Endlager in Deutschland noch nicht endgültig feststeht, werden die Abfälle derzeit in Zwischenlagern aufbewahrt. Diese befinden sich an verschiedenen Standorten in Deutschland.

- a) Erkläre in eigenen Worten: Was ist ein Zwischenlager und was ist ein Endlager? Warum sind Zwischenlager in Deutschland notwendig?
- b) Trage mindestens fünf Standorte von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle in die Karte unten ein. Nummeriere und beschrifte diese.

c) Beschreibe, wo sich die Zwischenlager häufig befinden.

d) Erkläre zwei Gründe, warum Zwischenlager oft an diesen Orten stehen.

e) Nenne und erläutere zwei Probleme oder Risiken, die mit Zwischenlagern verbunden sind



4. Radioaktiver Müll

„Warum wird die Endlagerung radioaktiver Abfälle als Problem betrachtet?“ – Beziehe hierzu Stellung.

5. „Kernenergie ist klimafreundlich.“

Nenne 3 Argumente dagegen, die sich auf Umweltrisiken und den dabei entstehenden Abfall beziehen.

6. Kühlwasserproblem

Kernkraftwerke erzeugen im Reaktorkern enorme Mengen Wärme, weil bei der Kernspaltung viel Energie freigesetzt wird. Diese Wärme muss ständig abgeführt werden, damit der Reaktor nicht überhitzt und die Brennelemente sicher betrieben werden können.

Ein Kernkraftwerk entnimmt zur Kühlung 30 m³ pro Sekunde Flusswasser und erwärmt es um 12°C.

(a) Berechne die abgegebene Wärmeleistung an den Fluss.

Hinweis: $\Delta E = m * c * \Delta T$, mit $c = 4,19 \frac{kJ}{kg * K}$

(b) Gib 2 ökologische Folgen dieser Erwärmung an.

(c) Zeige durch eine geeignete Rechnung den jährlichen Wasserverbrauch solcher Kernkraftwerke.

(d) Stelle diesen Verbrauch mit dem jährlichen Verbrauch der privaten Haushalte in Deutschland gegenüber.

(e) Nimm Stellung wie dieser Wasserverbrauch in Zeiten der Klimakrise einzuordnen ist.

14. Aufgaben: Lösungen

1. Atommüll – Halbwertszeit

Halbwertszeit von Plutonium-239:

$$T_{1/2} = 24\,110 \text{ Jahre}$$

Zerfallsgesetz:

$$N(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

a) Nach 1. Halbwertszeit

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)^1 = 0,5 = 50\%$$

b) Nach 2. Halbwertszeit

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0,25 = 25\%$$

c) Nach 10000 Jahren

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)^{10000/24110} \approx 0,750 \%$$

Es verbleiben ca. 75% der ursprünglichen Aktivität

2. Globaler Endlagerbedarf

Jährlicher Abfall: 12 000 t/Jahr Kapazität Onkalo: 6 500 t

a) Abfallmenge in 100 Jahren

$$12\,000 \cdot 100 = 1\,200\,000 \text{ t}$$

b) Benötigte Endlager

$$\frac{1\,200\,000}{6\,500} \approx 185$$

3. Zwischenlager und Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland

a)

Zwischenlager:

Ein Zwischenlager ist eine Anlage, in der radioaktive Abfälle vorübergehend gelagert werden. Die Lagerung ist zeitlich begrenzt, bis ein endgültiger Lagerort zur Verfügung steht.

Endlager:

Ein Endlager ist ein Ort, an dem radioaktive Abfälle dauerhaft und sicher für sehr lange Zeiträume (bis zu mehreren hunderttausend Jahren) gelagert werden sollen.

Warum sind Zwischenlager notwendig?

Zwischenlager sind notwendig, weil es in Deutschland bisher kein endgültig festgelegtes und betriebsbereites Endlager für hochradioaktive Abfälle gibt. Die Abfälle müssen aber trotzdem sicher aufbewahrt werden.

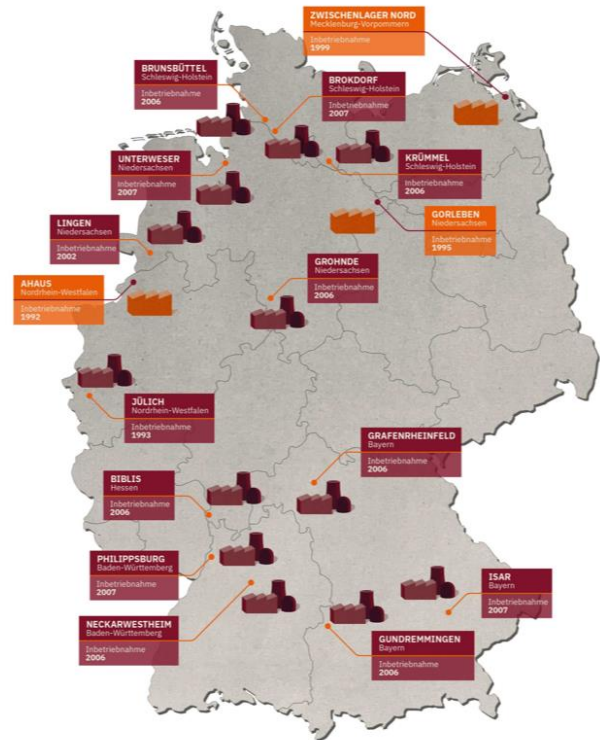


Abbildung 11- Darstellung der Zwischenlager in Deutschland [22]

b) Mögliche Standorte von Zwischenlagern (mindestens fünf):

- Gorleben (Niedersachsen)
- Ahaus (Nordrhein-Westfalen)
- Jülich (Nordrhein-Westfalen)
- Brokdorf (Schleswig-Holstein)
- Isar/Ohu (Bayern)
- Philippsburg (Baden-Württemberg)
- Neckarwestheim (Baden-Württemberg)
- Biblis (Hessen)

c) Lage der Zwischenlager

Viele Zwischenlager befinden sich in der Nähe ehemaliger oder stillgelegter Kernkraftwerke. Sie liegen häufig in Regionen, in denen früher Kernenergie erzeugt wurde, zum Beispiel in Süddeutschland, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen.

d) Gründe für diese Standorte

Zwei mögliche Gründe:

Die radioaktiven Abfälle entstehen direkt in den Kernkraftwerken. Durch die Lagerung vor Ort werden lange und gefährliche Transporte vermieden.

An diesen Standorten gibt es bereits technische Anlagen, Sicherheitsvorkehrungen und Fachpersonal, die für den Umgang mit radioaktiven Stoffen notwendig sind.

e) Probleme und Risiken von Zwischenlagern

Zwei mögliche Probleme/Risiken:

Zwischenlager sind nur für eine begrenzte Lagerzeit ausgelegt und keine dauerhafte Lösung. Die Abfälle müssen später erneut transportiert werden.

Es bestehen Sicherheitsrisiken, zum Beispiel durch mögliche Terroranschläge, Unfälle oder Naturkatastrophen.

Außerdem gibt es häufig Widerstand in der Bevölkerung, da viele Menschen Angst vor gesundheitlichen Folgen haben.

3. Radioaktiver Müll

Sehr lange Gefährlichkeit

Radioaktiver Müll bleibt über tausende bis hunderttausende Jahre gefährlich und muss über extrem lange Zeiträume sicher gelagert werden.

Keine endgültig sichere Lösung

Bis heute gibt es kein Endlager, das nachweislich über so lange Zeiträume vollständig sicher ist. Risiken können nicht ausgeschlossen werden.

Belastung zukünftiger Generationen

Die heutige Gesellschaft profitiert von der Kernenergie, während zukünftige Generationen die Verantwortung und die Risiken tragen müssen.

Gefahr bei Unfällen oder Angriffen

Zwischen- und Endlager können durch Unfälle, Naturkatastrophen oder gezielte Angriffe beschädigt werden, was zu Freisetzungen führen kann.

Hohe Kosten über lange Zeiträume

Lagerung, Überwachung und Sicherung verursachen sehr hohe Kosten, die über Generationen hinweg anfallen.

5. Bewertung: „Kernenergie ist klimafreundlich“

Gegenargumente:

1. Umwelt- und Unfallrisiken
2. Langlebiger radioaktiver Abfall
3. Bau, Rückbau, Entsorgung kostet ebenfalls CO_2

6. Kühlwasserproblem

Gegeben:

$$V = 30 \text{ m}^3 \quad t = 1 \text{ s} \quad \Delta T = 12 \text{ K} \quad c = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad \rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

a) Abgegebene Wärmeleistung

Masse pro Sekunde:

$$m = \rho \cdot V = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 30 \text{ m}^3 = 30\,000 \text{ kg}$$

Wärme:

$$\Delta E = m \cdot c \cdot \Delta T = 30\,000 \text{ kg} \cdot 4190 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 12 \text{ K} \approx 1,505 \times 10^9 \text{ W} = 1,505 \text{ GW}$$

b) Ökologische Folgen

1. Verringerte Sauerstofflöslichkeit → Stress für Fische und Wasserorganismen
2. Veränderung der Artenzusammensetzung, Förderung von Algenblüten

c) Jährlicher Wasserverbrauch

$$V_{\text{Jahr}} = 30 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 31\,536\,000 \text{ s} \approx 0,9468 \times 10^9 \text{ m}^3 \approx 0,947 \text{ Mrd. m}^3$$

d) Vergleich Haushaltsverbrauch Deutschland

$$\text{Haushalte: } 46,36 \text{ m}^3/\text{Jahr}/\text{Person} \cdot 83 \text{ Mio. Personen} \approx 3,85 \text{ Mrd. m}^3/\text{Jahr}$$

➔ Der Wasserverbrauch des Kernkraftwerks entspricht mehr als 25% des Haushaltsverbrauchs in Deutschland

e) Einordnung in der Klimakrise

- Wasserknappheit wird verschärft
- Niedrigwasser kann Kühlleistung einschränken
- Belastung der Ökosysteme durch erhöhte Temperatur

15. Quellen

- [1] LEIFI Physik – Massendefekt und Bindungsenergie
<https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernreaktionen/grundwissen/massendefekt-und-bindungsenergie>
- [2] Schulenberg, Thomas – Die vierte Generation der Kernreaktoren, 2020
- [3] bpb.de – Kleine Geschichte der Atomkraft
<https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/333362/kleine-geschichte-der-atomkraft-kontroverse-in-deutschland/>
- [4] Kleidon & Lesch – Kann Kernenergie zur Energiewende beitragen?
Zukünftige Energieversorgung in Deutschland, 17.07.2024
- [5] What if Germany had invested in nuclear power? A comparison between the German energy policy the last 20 years and an alternative policy of investing in nuclear power; International Journal of Sustainable Energy; Jan Emblemsverlag; 2024
- [6] PwC – Klimaschutzinvestitionen lohnen sich
<https://www.pwc.de/de/energiwirtschaft/klimaschutzinvestitionen-lohnen-sich.html>
- [7] FOES – Atom ist nicht die Lösung
https://foes.de/publikationen/2021/2021-10_FOES_Factsheet_Atom_ist_nicht_die_Loesung.pdf
- [8] BASE – AKW Betriebsdaten
<https://www.base.bund.de/de/nukleare-sicherheit/atomausstieg/akw-betriebsdaten/akw-betriebsdaten.html>
- [9] Fraunhofer ISE – Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Juli 2024
- [10] Tagesschau – Atomkraftwerke Hitzeabschaltung
<https://www.tagesschau.de/ausland/europa/atomkraftwerke-hitze-kuehlung-abgeschaltet-100.html>
- [11] Welt.de – Hitzewelle: Atomkraftwerke Leistung reduziert
<https://www.welt.de/newsticker/news1/article180288670/Klima-Wegen-Hitzewelle-muessen-erste-Atomkraftwerke-ihre-Leistung-herunterfahren.html>
- [12] Endlagersuche-Infoplattform – Schwach- und mittelradioaktive Abfälle
https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Radioaktiver-Abfall/Abfallarten/schwach-und-mittelradioaktive-abfaelle/schwach-und-mittelradioaktive-abfael-le_node.html#:~:text=Aktuell%20lagern%20mehr%20als%20120.000,und%20mittelradioaktiver%20Abf%C3%A4lle%20in%20Deutschland.

[13] Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hoch-radioaktive Abfälle Studie von Diplom-Physikerin Oda Becker im Auftrag des BUND Juni 2023

[14] BASE – Abschlussbericht Endlagerkommission

https://www.base.bund.de/shareddocs/downloads/de/fachinfo/fa/pasta_abschlussbericht.pdf?blob=publicationFile&v=3

[15] ESK – Positionspapier Auswahlverfahren Beschleunigungspotenziale

https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Positionspapier_ZEIT_AuswahlverfahrenBeschleunigungspotenziale_ESK118_251024.pdf

[16] BASE – Zwischenlager Aufbewahrung

https://www.base.bund.de/de/zwischenlager/aufbewahrung/aufbewahrung-zwischenlager_inhalt.html

[17] BCG – Green Economy

<https://www.bcg.com/press/2december2025-green-economy-wachst-auf-5-billionen-dollar-china-dominiert-deutschland-unter-zugzwang>

[18] BASE-Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors) Vorhaben 4720F50500; Dr. Christoph Pistner, Dr. Matthias Englert, Christian Küppers, Prof. Dr. Christian von Hirschhausen, Dr. Ben Wealer, Björn Steigerwald, Richard Donnerer; Berlin, März 2021

[19] SCINEXX – Atomkraft Kleinreaktoren verschärfen Entsorgungsproblem

<https://www.scinexx.de/news/energie/atomkraft-kleinreaktoren-verschaerfen-entsorgungsproblem/>

[20] Geothermie – Uran-Actinium-Zerfallsreihe

<https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/u/uran-actinium-zerfallsreihe>

[21] Science – Finnland Endlager Atommüll

<https://www.science.org/content/article/finland-built-tomb-store-nuclear-waste-can-it-survive-100000-years>

[22] Einblicke – Zwischenlager-Infografik

https://www.einblicke.de/fileadmin/images/magazin/Einblicke_24/Artikel3_Zwischenlager-Infografik_MW.jpg

*alle Links wurden am 04.01.2026 zuletzt geöffnet