



Kernenergie

DIHK Faktenpapier

DIHK

Deutsche
Industrie- und Handelskammer

 **Gemeinsam Wirtschaft Stärken**

1 Inhalt

Wieso ein Faktenpapier Kernkraft?.....	1
1. Stand Deutschland, EU und International	1
2. Klassische Kernreaktoren	3
2.1 Übersicht.....	3
2.2 Stand der Technik und Entwicklung.....	3
2.2.1 Leichtwasserreaktoren	4
2.2.2 Schnelle Reaktoren	5
2.2.3 Hochtemperaturreaktoren	5
2.2.4 Flüssigsalzreaktoren	6
2.3 Kosten der Stromerzeugung und des Anlagenbaus.....	6
3. Small Modular Reactors (SMR).....	8
3.1 Übersicht.....	8
3.2 Stand der Technik und Entwicklung.....	9
3.3 Kosten der Stromerzeugung oder Anlagenbau.....	9
4. Fusionskraftwerke	10
4.1 Übersicht.....	10
4.2 Stand der Technik und Entwicklung.....	11
4.2.1 Magnetfusion.....	11
4.2.2 Laser-/Trägheitsfusion	11
4.3 Kosten der Stromerzeugung oder Anlagenbau.....	11
5. Recycling, radioaktive Abfälle und Endlager	12
5.1 Übersicht.....	12
5.2 Recycling der Brennelemente	13
5.3 Radioaktive Abfälle und Endlager	14
6. Fazit	15

Wieso ein Faktenpapier Kernkraft?

Am 15. April 2023 wurden die letzten drei noch laufenden deutschen Kernkraftwerke (KKW) abgeschaltet¹. Dieser finale Ausstieg aus der Nutzung der Kernkraft ist vor allem in Folge des russischen Angriffskrieges 2022 nach wie vor politisch und auch in Teilen der Wirtschaft umstritten. Seit Abschaltung der Kraftwerke sind die reinen Beschaffungskosten für Strom (ohne Netzentgelte, Umlagen und Steuern) im Vergleich zum Vorjahr gesunken, konnten allerdings ihr Vorkrisenniveau nicht erreichen. Die Belastung der deutschen Unternehmen durch die hohen Energiepreise bleibt somit unverändert bestehen. Laut Daten der aktuellen Konjunkturumfrage der DIHK aus dem Frühsommer 2024 zählen die Energie- und Rohstoffpreise konstant zu den größten Geschäftsrisiken, insbesondere in der energieintensiven Industrie².

Angesichts anhaltend hoher Energiekosten und der für 2045 politisch gewollten Klimaneutralität wird die Diskussion um die Kernenergie in Deutschland wieder intensiver. Einige Parteien sprechen sich offen für die Wiederinbetriebnahme stillgelegter KKW's aus, teilweise wird auch der Neubau von Reaktoren in Deutschland gefordert. Auch auf europäischer Ebene sorgt die Kernenergie für anhaltende Diskussionen. Befürworter dieser Erzeugungstechnologie schlossen sich im letzten Jahr unter Federführung Frankreichs zu einer Europäischen Atomallianz zusammen. Ziel der 11 EU-Mitgliedstaaten ist es die Kernenergie in Europa auszubauen. Fragen der Einstufung der Kernkraft als klimaneutral prägten die europäische Debatte.

In Hinblick auf die nationale und europäische Debatte über die Kernenergie ist es wichtig, sich mit den zugrundeliegenden Fakten hierzu auseinanderzusetzen. Dieses Faktenpapier der DIHK bietet einen umfassenden Überblick über die Kernenergie und soll helfen, die aktuelle Debatte einzuordnen. Es geht sowohl auf die etablierte Technologie der Kernspaltung als auch auf die noch in Entwicklung befindliche Kernfusion ein. Besonderes Augenmerk liegt auf dem aktuellen Stand der Technik, den wirtschaftlichen Aspekten und der potenziellen Realisierbarkeit der verschiedenen Konzepte für Deutschland.

1. Stand Deutschland, EU und International

Seitdem in (West-)Deutschland im Jahr 1960 das erste kommerzielle Kernkraftwerk (KKW) in Kahl ans Netz gegangen ist, wurde die Kernkraft in den folgenden drei Jahrzehnten sukzessive ausgebaut, auch in der damaligen DDR. Insgesamt 37 Reaktoren in BRD und DDR speisten unterschiedlich lang Strom ins deutsche Netz ein. Nach der deutschen Einheit wurde die Nutzung der KKW's in der ehemaligen DDR - aufgrund von Sicherheitsbedenken – eingestellt. Als Folge der Reaktorkatastrophe in Fukushima 2011 entschied sich die damalige große Koalition unter Bundeskanzlerin Merkel für einen vorgezogenen Ausstieg aus der Kernenergie, nachdem erst kurz vorher die Laufzeiten verlängert wurden. Bereits kurz nach der Jahrtausendwende leitete die damalige Regierung Schröder erstmals den Ausstieg aus der Kernenergie ein. Nach und nach wurden seither der Betrieb der laufenden KKW's eingestellt und der Rückbau bei den meisten Anlagen begonnen.

Die Forschungslandschaft zum Thema Kernfusion ist hingegen hierzulande sehr aktiv. So wird in Greifswald in einer Experimentieranlage an einer Fusionsanlage des Typs „Stellarator“ geforscht.

¹ Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2 machten zu diesem Zeitpunkt noch etwa sechs Prozent der Bruttostromerzeugung in Deutschland aus.

² [Deutsche Wirtschaft kommt nicht in Gang \(dihk.de\)](https://www.dihk.de/deutsche-wirtschaft-kommt-nicht-in-gang)

Gleichzeitig ist Deutschland als Mitglied der Europäischen Union an dem transnationalen Fusionsprojekt „ITER“ in Frankreich beteiligt.

In der Europäischen Union ist Kernenergie umstritten. Einige Staaten wie Frankreich, mit einem Kernenergieanteil von 70% am Energiemix, setzen stark auf Kernkraft und streben im europäischen Kontext die Anerkennung und Förderung an. Bereits 2022 fand sich auf ihr Bestreben hin Kernenergie – Fusion und Spaltung – als „grüne“ Energiequelle in der EU-Taxonomie wieder. Gegen diese Entscheidung sprachen sich Länder wie Luxemburg und Dänemark aus. Österreich strebt eine Klage vor dem Europäischen Gerichtshof gegen diese Entscheidung an³. Seitdem gab es weitere Vorstöße Kernenergie verstärkt und insbesondere auch aus europäischen Fördertöpfen zum Klimaschutz mitzufinanzieren. Der Net Zero Industry Act (NZIA) sieht beispielsweise eine Klassifizierung existierender und zukünftiger Kernenergieprojekte als „strategisch“ vor. Diese Kategorisierung würde eine Finanzierung solcher Projekte aus den zur Verfügung stehenden Mitteln erlauben. Gleichzeitig forscht die Europäische Union und einige ihrer Mitgliedstaaten an einer Weiterentwicklung der Kernenergie. So wurde Anfang des Jahres 2024 eine neue „European Industrial Alliance“ ins Leben gerufen, mit dem Ziel die Entwicklung von Small Modular Reactors (SMR) maßgeblich mitzugestalten⁴. Auch das erwähnte „ITER“ Fusionsprojekt wird von der EU mitgetragen.

Die in einigen Mitgliedstaaten der Europäischen Union stattfindende erneute Hinwendung zur Kernenergie lässt sich auch auf internationaler Bühne beobachten. In den letzten Jahrzehnten setzten die meisten „traditionellen“ Kernkraft-Staaten zwar primär auf die Verwaltung ihrer bestehenden Reaktoren, mittlerweile häufen sich Ankündigungen zur Ausweitung ihrer KKW-Flotten. Zu Hochzeiten, im Jahr 2005, trugen weltweit 440 Reaktoren zu einem nuklearen Anteil am weltweiten Strommix von rund 15 Prozent bei.⁵ Im Jahr 2022 war die Zahl auf 411 Reaktoren gesunken, die 9,2 Prozent des weltweiten Strommixes ausmachen⁶. Während die Europäische Union und die Vereinigten Staaten in dieser Zeit nur vereinzelte Neubauprojekte verfolgten, bauten vor allem die asiatischen Staaten die Kernenergie aus.

Allen voran bei der Entwicklung und Ausweitung des KKW- Bestandes war und ist China. Seit 2003 nahm das Land 49 neue Kraftwerke in Betrieb, 25 weitere befinden sich in Planung⁷. Insbesondere in Bezug auf neuere Reaktormodelle, wie SMRs oder Flüssigsalzreaktoren, schreitet China voran. 2023 nahm es den ersten Reaktor der IV. Generation, einen SMR der zugleich ein Flüssigsalzreaktor ist, in Betrieb⁸.

Zur gleichen Zeit erfährt die Nuklearindustrie in den Vereinigten Staaten von Amerika eine Renaissance. Während im vergangenen Jahrzehnt noch acht KKWs aufgrund ihrer mangelnden Wettbewerbsfähigkeit den Betrieb einstellen mussten, ging 2023 mit Vogtle 3 der erste Reaktorneubau seit drei Jahrzehnten ans Netz⁹. Als „grüne“ Energiequelle ist die Kernenergie fester Bestandteil der US-Klimapolitik. Der Inflation Reduction Act der Biden-Regierung sieht Steuererleichterungen für finanziell angeschlagene KKWs und die Wiederinbetriebnahme eines stillgelegten Kraftwerks in Michigan vor¹⁰.

³ [Atomkraft und Gas: Klage gegen Einstufung als klimafreundlich | tagesschau.de](#)

⁴ [Commission to ally with industry on Small Modular Reactors - European Commission \(europa.eu\)](#)

⁵ [Share of electricity production from nuclear \(ourworldindata.org\)](#)

⁶ [PRIS - Trend reports - Nuclear Power Capacity \(iaea.org\)](#); [Kernenergie weltweit 2024 | GRS gGmbH](#)

⁷ [PRIS - Country Details \(iaea.org\)](#).

⁸ [Ist der Flüssigsalzreaktor das "perfekte" Kraftwerk? - Energiewende \(edison.media\)](#)

⁹ Ursprünglich sollte der Reaktor bereits 2016 Strom liefern und gemeinsam mit Vogtle 4 14 Milliarden US-Dollar kosten. Mittlerweile werden die Kosten für beide Reaktoren auf 30 Milliarden US-Dollar geschätzt. [First new US nuclear reactor in three decades may be among the last \(ft.com\)](#)

¹⁰ Anders als bei den deutschen Kernkraftwerken wurde hier noch nicht mit dem Rückbau begonnen und das Kraftwerk in einem weitestgehend unveränderten Zustand belassen. [USA reanimieren stillgelegtes Atomkraftwerk: Ein Vorbild für Deutschland? \(faz.net\)](#)

Ähnlich wie China und einige EU-Mitgliedstaaten investieren auch die USA in die Forschung der IV. Generation an Kernreaktoren. Ein US-amerikanisches SMR-Projekt, NuScale, musste allerdings aufgrund der im Verhältnis enorm gestiegenen Kosten, und der daraus resultierenden höheren Abnahmepreise, eingestellt werden.

2 Klassische Kernreaktoren

2.1 Übersicht

„Klassische“ Kernreaktoren prägen das heute verbreitete Bild in Deutschland: In ihnen findet eine kontrollierte Kettenreaktion statt, dabei werden Atomkerne – in den meisten Fällen Uran oder Plutonium – durch Neutronenbeschuss gespalten. Bei der Spaltung der Atomkerne werden enorme Energiemengen freigesetzt¹¹. Diese Energie, in Form von Hitzestrahlung, wird genutzt, um Wasser zum Sieden zu bringen. Der dadurch entstehende Wasserdampf wird anschließend an Turbinen zur Stromerzeugung weitergeleitet. Die weitläufig verbreitete Form dieser Stromerzeugung sind Siedewasser- und Druckwasserreaktoren, welche in Deutschland hauptsächlich zwischen 1960 und 1980 erbaut wurden¹².

Wenn die Kosten der Stromerzeugung aus Kernkraftwerken adressiert werden, bezieht man sich häufig auf die relativ geringen Grenzkosten der bereits abbeschriebenen Kraftwerke. Allerdings können die Kosten mit zunehmendem Alter des Reaktors steigen. Grund hierfür sind Fehlerhäufungen, steigende Wartungskosten und längere Ausfallzeiten, welche den Kapitalbedarf erhöhen. Schätzungen zufolge könnte für eine Laufzeitverlängerung von 10 Jahren Investitionen von 500 Millionen bis 1,1 Milliarden US-Dollar pro Gigawatt erforderlich werden¹³. Das durchschnittliche Reaktoralter in der EU liegt derzeit bei 35,6 Jahren¹⁴. Ursprünglich ging man von einer Laufzeit von maximal 30 bis 40 Jahren aus¹⁵.

Bei Neubauprojekten werden die erheblichen Investitionskosten deutlich. Im letzten Jahrzehnt zeigte sich ein Trend zu steigenden Kosten und Zeitaufwänden bei europäischen Neubauprojekten. Wobei auch hier die Kosten stark variieren können: Das finnische Reaktorprojekt Olkiluoto 3 kostete 12 Milliarden Euro für 1.600 Megawatt Leistung. Das britische Projekt Hinkley Point C, welches zwei Reaktoren umfasst, soll bis zu 53 Milliarden Euro für 3.200 Megawatt Leistung kosten.

2.2 Stand der Technik und Entwicklung

Die Entwicklung der Kernreaktoren verläuft in mehreren Generationen. In der ersten Generation aus den 1950er bis 60er Jahren, lag der Schwerpunkt auf Prototypreaktoren. Ihre Weiterentwicklung zu Leistungsreaktoren kennzeichnet die zweite Generation, die zwischen den 1970er und 80er Jahren stattfand. In dieser Phase entstand auch die Mehrheit der heute noch in Deutschland und in der EU betriebenen Anlagen. Obwohl die Leichtwasserreaktoren (LWR) dieser Generation nicht unbedingt den neuesten Stand der Technik repräsentieren, wird im Folgenden aufgrund ihrer Verbreitung und anhaltenden Bedeutung näher auf sie eingegangen. LWR sind Reaktoren, die Wasser sowohl als Moderator als auch als Kühlmittel verwenden. Innerhalb der LWR kann man zwischen Druckwasserreaktoren (DWR) und Siedewasserreaktoren (SWR) unterscheiden.

¹¹ Neben den enormen Energiemengen entstehen bei der Kernspaltung auch hochradioaktive Reststoffe.

¹² Der Bau eines Kraftwerks erfordert große Mengen an Beton – unter anderem für den Schutz des Reaktors und die Errichtung der Kühltürme. Der erforderliche Zement dafür ist aufgrund des hohen Energieaufwandes und der zugrundeliegenden chemischen Reaktion CO₂ intensiv in der Herstellung.

¹³ [Nuclear Power in a Clean Energy System \(iea.blob.core.windows.net\)](https://www.iea.blob.core.windows.net)

¹⁴ [Kernenergie weltweit 2024 | GRS gGmbH](#)

¹⁵ Allerdings prüfen einige Länder – darunter Frankreich und die USA – eine Verlängerung der Laufzeit auf 60 Jahre.

Die dritte Generation bezeichnet die Weiterentwicklung der LWR, die vergleichsweise weniger verbreitet ist. Mit dem Ziel, die Wirtschaftlichkeit und Sicherheit von Kernreaktoren zu verbessern, sind mittlerweile andere Reaktortypen in den Fokus der Forschung und Förderung gerückt. Von besonderem Interesse in der vierten Generation sind die sogenannten Schnellen Reaktoren, Hochtemperaturreaktoren, Flüssigsalzreaktoren und Small Modular Reactors (SMRs). Mit ihnen wird sich vom Einsatz normalen Wassers – also leichtem Wasser - als Moderator und Kühlmittel verabschiedet.

Üblicherweise lassen sich die Kernreaktortypen über die Generationen hinaus durch ihre Moderator- und Kühlmittelwahl differenzieren. Der Moderator dient zur Abbremsung der bei der Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen und ermöglicht zugleich die Kettenreaktion der Spaltung. Das Kühlmittel wiederum wird eingesetzt, um die Brennelemente abzukühlen.

2.2.1 Leichtwasserreaktoren

Kernelement des DWR sind die voneinander getrennten Kreisläufe. Im sog. Primärkreislauf steht der Reaktordruckbehälter unter hohen Druck (ca. 160 bar), um ein Sieden des Wassers zu verhindern. Wasser wird in den Reaktorkern gepumpt und dort dann von unten nach oben durch den Reaktorkern gespült. Das erwärmte Wasser verlässt im Anschluss den Reaktordruckbehälter und wird über die Heizungsrohre des Dampferzeugers zurück zu den Hauptkühlmittelpumpen geleitet. Währenddessen nimmt das Wasser im Sekundärkreislauf die Wärme des Primärkreislaufes über den Dampferzeuger auf. Da im Sekundärkreislauf ein vergleichsweise niedriger Druck (ca. 70 bar) herrscht, siedet das Wasser hier aufgrund der abgegebenen Wärme. Der dadurch entstehende Dampf treibt die Dampfturbinen an, welche wiederum mit einem Generator verbunden sind. Aufgrund der separierten Kreisläufe verbleiben die radioaktiven Stoffe im Primärkreislauf.

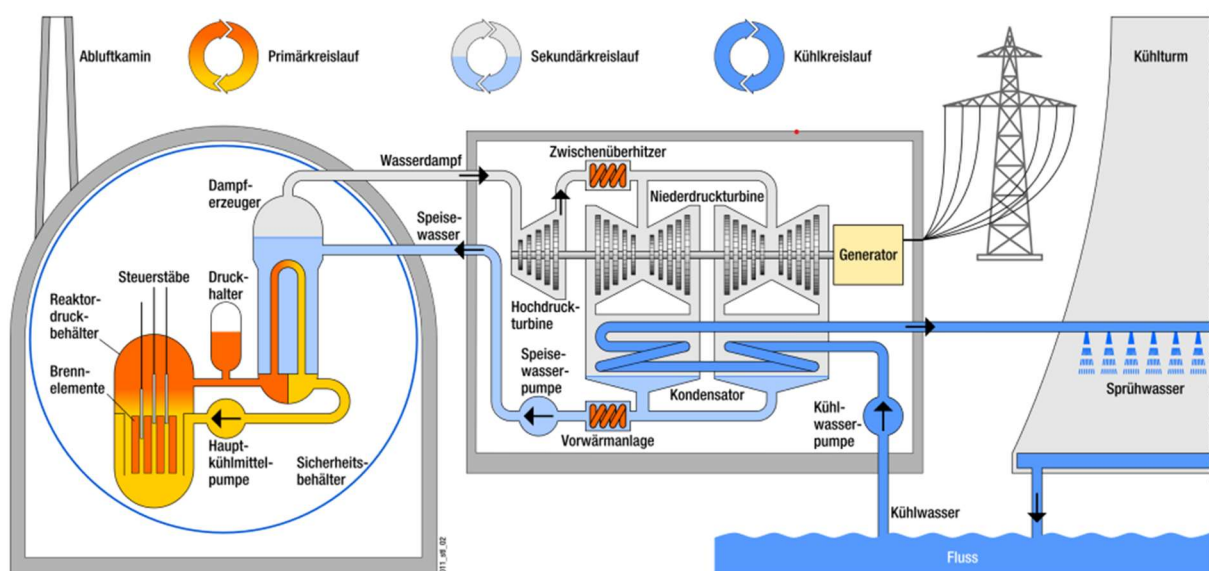


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Druckwasserreaktors ([Druckwasserreaktor \(DWR\) | GRS gGmbH](#))

Im Gegensatz dazu besteht der SWR aus einem einzigen Kreislauf. Auch in diesem Fall strömt das gewählte Kühlmittel – Wasser – von unten nach oben durch den Reaktorkern. Dieses verdampft (zumeist) oberhalb des Reaktorkerns. Anschließend wird der Dampf über einen Dampftrockner an die

Turbinen zur Stromerzeugung weitergeleitet. Aufgrund der Tatsache, dass der SWR auf nur einen Kreislauf setzt, enthält der Wasserdampf radioaktive Stoffe.

Basierend auf diesen Grundprinzipen wurde seit den 1980er Jahren an einer Weiterentwicklung der LWR gearbeitet. Allerdings konnte sich die III (+) Generation nicht im gleichen Ausmaß wie seine Vorgänger durchsetzen. Ein gemeinsames europäische Projekt – der sog. Europäische Druckwasserreaktor (EPR) – wurde zwar in einigen Ländern weltweit geplant, jedoch konnten bis jetzt nur vereinzelte Reaktoren fertiggestellt werden.

2.2.2 Schnelle Reaktoren

Schnelle Reaktoren verzichten auf einen Moderator und nutzen die dadurch ungebremsten, schnellen Neutronen gezielt zur Spaltung. Durch die Aktivität der ungebremsten Neutronen besteht die Möglichkeit zusätzliches Spaltmaterial aus eingangs nicht spaltbaren Isotopen - wie Uran-238 oder Thorium - zu „erbrüten“. Eine Aufbereitung der Isotope würde den erneuten Einsatz als Brennstoff im Reaktor erlauben. Theoretisch würde dadurch die Menge an notwendigen Brennelementen reduziert werden und ein teilweiser Brennstoffkreislaufschluss wäre erreicht.

Der Einsatz von diversen Kühlmitteln wird für Schnelle Reaktoren diskutiert, am relevantesten sind wohl aufgrund ihrer Nähe zur Marktreife gas- und natriumgekühlte Schnelle Reaktoren. Erstere verwenden Helium als Kühlmittel. Das Gas bietet den Vorteil, dass es besonders hohe Austrittstemperaturen erlaubt und dadurch der Wirkungsgrad des Reaktors im Vergleich zu herkömmlichen LWR erhöht wird. Natriumgekühlte Schnelle Reaktoren greifen auf das (verflüssigte) Element Natrium zurück. Die hohe Wärmekapazität des Elementes macht ein vollständiges Aufnehmen der Nachzerfallwärme der Brennelemente möglich und verhindert somit passiv eine Kernschmelze. Aufgrund der Reaktionsfreudigkeit des Natriums muss der Kontakt des Elements mit Wasser oder Luft verhindert werden. Bei Kontakt mit Wasser oder Luft beginnt das Alkalimetall Natrium sofort zu brennen.

Herausfordernd ist bei den Schnellen Reaktoren, dass die hohen Temperaturen im Reaktor ganz andere Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe stellen. Zudem dringen die unmoderierten schnellen Neutronen wesentlich tiefer in die Materialien ein, was Auswirkungen auf ihre Lebensdauer hat. Zwar ist die Erbrütung von neuem Brennstoff wie bereits erläutert theoretisch möglich, allerdings konnte eine vollständige Umwandlung des radioaktiven Abfalls bis jetzt nicht erzielt werden. Ein weiterer, nicht vernachlässigbarer Faktor bei Schnellen Reaktoren ist ihre Fähigkeit je nach Ausgestaltung auch waffenfähiges Plutonium zu erbrüten. Trotz dieser Bedenken wurden Prototypen Schneller Reaktoren bereits in Russland und China umgesetzt.

2.2.3 Hochtemperaturreaktoren

Mit Hochtemperaturreaktoren wird ein Konzept erneut aufgegriffen, welches in den 1960er Jahren schon Umsetzung gefunden hatte¹⁶¹⁷. Die bis zu 1.000 Grad Celsius reichenden Temperaturen im Reaktorinneren schließen den Einsatz von Wasser auch in diesem Fall als Moderator und/oder Kühlmittel aus. Stattdessen wird Helium als Kühlmittel verwendet, was einen niedrigeren Druck und eine leichtere Kontrolle der Temperaturen ermöglichen. Auf die verbreitete Anordnung des Brennstoffes in Stäben wird verzichtet. Stattdessen wird der Brennstoff in Kugeln aus Grafit eingelassen,

¹⁶ Deutschland war in den 1960er Jahren sehr aktiv in der Erforschung von Hochtemperaturreaktoren. In Jülich wurde mit dem AVR-Hochtemperaturreaktor der erste Forschungsreaktor seiner Art von 1967 bis 1988 betrieben. Die kommerzielle Umsetzung mit dem Kernkraftwerk THTR-300 in Hamm scheiterte aufgrund von technischen- und Sicherheitsbedenken nach knapp einem Jahr Betrieb.

welcher als Moderator dient. Eine Vielzahl solcher Kugeln bildet den Reaktorkern, der mit Kühlmittel umspült wird. Die im Reaktorinneren herrschenden Temperaturen ermöglichen einen gesteigerten Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung. Ähnlich wie bei den Schnellen Reaktoren stellen die hohen Temperaturen erhöhte Anforderungen an das verwendete Material. Nach dem Scheitern des in Deutschland betriebenen Kugelhaufreaktors in Hamm aufgrund (sicherheits-)technischer und wirtschaftlicher Herausforderungen, wurde die Forschung zu diesem Reaktortyp in Deutschland nicht weiterverfolgt. Einzig China treibt derzeit die Entwicklung von Hochtemperaturreaktoren wieder voran und hat drei Reaktoren in Betrieb genommen.

2.2.4 Flüssigsalzreaktoren

Das Prinzip des Flüssigsalzreaktors rückt ebenfalls von dem Einsatz von Brennstäben ab. Stattdessen wird der Brennstoff (meist Thorium) in flüssigem Salz gelöst. Diese Mischung nimmt die Rolle des Moderators, Kühlmittels und Brennelements ein. Um die Kettenreaktion in der Lösung auszulösen, wird auf schnelle Neutronen zurückgegriffen. Die Tatsache, dass der Kern sich bereits im geschmolzenen Zustand befindet, schließt eine Kernschmelze im klassischen Sinne theoretisch für diesen Reaktortyp aus. Ähnlich wie bei den Schnellen Reaktoren, würde aufgrund der ständigen Wiederaufbereitung der Brennelemente ein gewisses Proliferationsrisiko entstehen. Die Verwendung von aggressiven Salzen in der Lösung stellt derzeit noch eine ungelöste Herausforderung in Bezug auf Korrosion und Materialbeständigkeit dar. Derzeit konnte noch kein geeignetes Material ausgemacht werden, welches Reaktorlecks ausschließt. Der Zeithorizont für ein funktionsfähigen Demonstrationsreaktor wird auf 20 bis 30 Jahre geschätzt¹⁸.

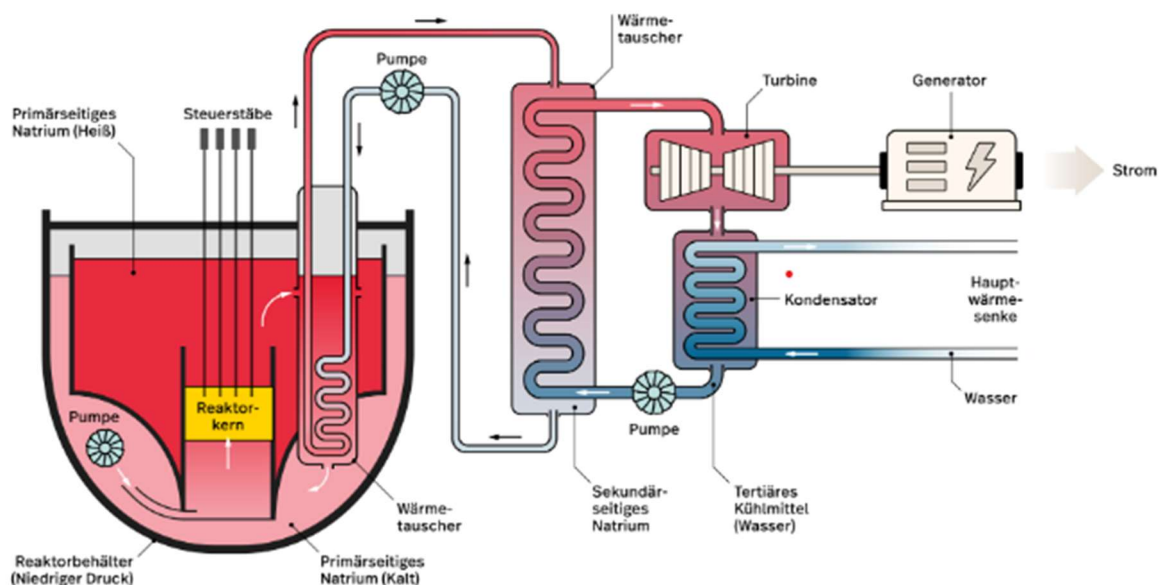


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Natriumgekühlten Schnellen Reaktors ([BASE - Alternative Reaktorkonzepte \(bund.de\)](https://www.bundestag.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/07/190716_base_alternative_reaktorkonzepte_bund_de))

2.3 Kosten der Stromerzeugung und des Anlagenbaus

Eine Quantifizierung der tatsächlich entstehenden Kosten der Stromerzeugung bzw. des Anlagenbaus ist schwierig¹⁹. Die Stromgestehungskosten werden häufig als vergleichsweise niedrig angesehen. Für eine

¹⁸ [WD-8-049-20-pdf-data.pdf \(bundestag.de\)](https://www.bundestag.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/07/190716_base_alternative_reaktorkonzepte_bund_de)

¹⁹ Siehe für eine vergleichende Betrachtung der Gestehungskosten von Strom eine Ausarbeitung des Wissenschaftlichen Dienst aus dem Jahr 2022:

genauere Einschätzung der Kosten sind die Baukosten, Instandhaltungskosten und die Beschaffung von Uran von Bedeutung. Zusätzlich zu diesen Kostenfaktoren müssen auch die Kosten für den Rückbau der KKW's und insbesondere die Endlagerung des radioaktiven Abfalls berücksichtigt werden. Derzeit gehen die Kraftwerksbetreiber von Rückbaukosten zwischen 500 Millionen bis 1 Milliarde Euro aus²⁰. Die Thematik der Endlagerung – inklusive der erwartbaren Kosten – wird in einem späteren Kapitel genauer erläutert. Darüberhinausgehende Umweltkosten wie auch Risikoprämien für mögliche Versicherungen gegen Unfälle und Schäden werden hingegen nicht weiter betrachtet, da keine belastbaren Zahlen vorliegen und Risiken der Kernenergie vielfach unversichert vergesellschaftet werden.

Allgemeingültige Aussagen über die mit dem Bau eines KKW's verbundenen Kosten zu treffen, ist kaum möglich. Hierzu sei angemerkt, dass der Großteil der KKW's in irgendeiner Ausformung staatliche Zuwendungen erhalten hat²¹. Diese Unterstützungsleistungen können von Subventionen für den Bau der Kraftwerke bis zur Gewährleistung spezifischer Rahmenbedingungen, wie bspw. Abnahmegarantien, reichen²²²³. Hochrechnungen und Schätzungen für die Bauhochphase in der Periode von 1960 bis 1990 unterliegen Schwankungen. Länderspezifische Vorgehensweise und der Bau verschiedener Reaktortypen beeinflussten die entstandenen Kosten²⁴. Seit den 90er Jahren sind massive Kostenanstiege zu beobachten, die in vielen Teilen bis heute andauern. Aktuelle Schätzungen sprechen von Baukosten in Höhe von 7.000 bis 8.000 US-Dollar pro Kilowatt für ein „großes“ KKW der III. Generation²⁵. Getrieben werden die Baukosten unter anderem von Verzögerungen bei der Fertigstellung, fehlender Standardisierung und technischen Herausforderungen. Aufgrund des vor allem in Europa in den letzten Jahrzehnten stagnierenden (bis rückläufigen) Kernkraftausbaus können sich die Bauzeiten über zwei Jahrzehnte erstrecken. Weltweit geht man mittlerweile von einer durchschnittlichen Bauzeit von zehn Jahren aus.

Eines der letzten fertiggestellten Reaktorprojekte, Olkiluoto 3 in Finnland, ging 2023 mit 13 Jahren Verspätung und einer Bauzeit von 18 Jahren ans Netz²⁶. Ursprünglich sollte der größte europäische Reaktor 2009 mit einem geschätzten Investitionsvolumen von 3 Milliarden Euro in Betrieb genommen werden. Sicherheitsbedenken und fehlerhafte Bauteile verzögerten die Fertigstellungen und ließen die Kosten auf circa 12 Milliarden Euro anwachsen.

Kostenintensiver ist die französisch-chinesische Kollaboration Hinkley Point C in Großbritannien. Zunächst waren Baukosten in Höhe von 18 Milliarden Pfund und der Netzanschluss für 2025 geplant. Ungelöste Material- und Personalherausforderungen verzögern die Fertigstellung allerdings bis

<https://www.bundestag.de/resource/blob/887090/1867659c1d4edcc0e32cb093ab073767/WD-5-005-22-pdf-data.pdf>

²⁰ Finanziert wird der Rückbau der Kraftwerke durch die Rücklagen der Betreiber. Die Kosten des Rückbaus wurden bereits in den Strompreisen einkalkuliert.

²¹ [Steuerwandel \(diw.de\)](https://www.diw.de)

²² Ein aktuelles Beispiel einer solchen staatlichen Unterstützung ist der geplante KKW-Bau in Tschechien. In diesem Fall wird nicht nur ein Stromliefervertrag mit staatlichem Abnehmer (Einnahmesicherstellung über 40 Jahre) geschlossen, sondern ein staatlicher Kredit deckt zusätzlich einen Großteil der Baukosten und eventuelle Risiken ab.

²³ Gleichzeitig wurde die (Er-)Forschung der Kernenergie häufig durch staatliche Programme gefördert. In Deutschland wurden innerhalb von 19 Jahren knapp 4,5 Milliarden Euro für Kernenergie-Forschungsprogramme aufgewendet. [Welt der Physik: Die vier Atomprogramme von 1957 bis 1976](#)

²⁴ So profitierte der Ausbau der französischen Kernkraftindustrie von dem fast ausschließlichen Bau eines Reaktortyps und konnte dadurch im internationalen Vergleich Kosten senken. Andere Länder wie die USA erbauten eine Vielzahl unterschiedlicher Reaktoren und sahen sich daher höheren Kosten ausgesetzt.

²⁵ [Nuclear Power in a Clean Energy System \(iea.blob.core.windows.net\)](#), S.22

²⁶ [Atomkraft: Finnischer Reaktor Olkiluoto 3 produziert regulär Strom | heise online](#)

mindestens 2029. Kostenschätzungen gehen mittlerweile von 46 Milliarden Pfund (53 Mrd. €) aus²⁷. Der britische Staat subventionierte den Bau zwar nicht direkt, sicherte den Betreibern aber Strompreise von 92,50 Pfund (rund 110 €) pro MWh zu²⁸.

Wenn das KKW einmal Strom ins Netz einspeist, sind die laufenden Betriebskosten, beispielsweise im Vergleich zu Gas- oder Wasserstoffkraftwerken, meist gering. Allerdings können niedrige Strompreise dazu führen, dass die immensen Kapitalkosten nicht wieder verdient werden können. Zudem kann das zunehmende Alter eines Reaktors einen Kostenfaktor darstellen. Die Häufung von Fehlern, der Anstieg von Wartungskosten und längere Ausfallzeiten können zu einer Kostensteigerung führen. Dies ist besonders in Europa von Interesse, weil über 80 Prozent der europäischen Kernreaktoren älter als 30 Jahre sind. Bei der Inbetriebnahme der Reaktoren ging man ursprünglich von einer Laufzeit von 30 Jahren aus – viele europäische KKW's befinden sich somit bereits in einer Laufzeitverlängerung²⁹. Nach Schätzungen der International Energy Agency kann eine Laufzeitverlängerung um 10 Jahre mit Kosten von 500 Millionen bis 1,1 Milliarden US-Dollar pro GW einhergehen³⁰.

Die Auswirkungen alternder Kernkraftwerke zeigen sich in Frankreich. Aufgrund von intensiven und langanhaltenden Wartungsarbeiten kam es in den letzten Jahren zu einer Häufung von Ausfallzeiten. Aufgrund dieser Ausfallzeiten und der dadurch rückläufigen Stromproduktion war Frankreich 2022 – zum ersten Mal seit knapp 40 Jahren – Nettostromimporteur. Damit waren Kostenzunahmen verbunden, welche dazu führten, dass der französische Staat den Energiekonzern EDF durch eine Verstaatlichung übernommen hat. Aktuell plant Frankreich die Laufzeit seiner KKW's auf 50 Jahre auszudehnen. Die hierfür notwendigen Investitionen schätzt der nationale Rechnungshof auf 100 Milliarden Euro – 1,7 Milliarden Euro pro KKW³¹. Damit einhergehend sind Strompreiszuwächse in Frankreich anzunehmen, die sich auch im europäischen Strommarkt zeigen werden.

Obwohl die Uranbeschaffung nicht eindeutig thematisch den Stromgestehungskosten oder dem Anlagebau zuordbar ist, ist es wichtig kurz näher darauf einzugehen. Die laufenden europäischen Reaktoren verwenden zurzeit mehrheitlich Uran als Brennstoff. Kein europäisches Land kann dabei den Bedarf durch eigene Exploration abdecken. 2021 wurde daher aus Niger (24 %), Kasachstan (23%), Russland (20 %) sowie Australien (16 %) und Kanada (14%) Uran importiert³². Diese weitreichenden Lieferketten deuten auf eine gewisse Vulnerabilität und Sensibilität gegenüber (geo-)politischen Entwicklungen hin.

3 Small Modular Reactors (SMR)

3.1 Übersicht

Small Modular Reactors (SMRs) sind Teil der vierten Generation von Kernreaktoren und zeichnen sich durch ihre kleine Größe und Modularität aus. Wie „klassische“ Reaktoren erzeugen sie Energie durch Kernspaltung³³. Ihre maximale Leistung von 300 MW liegt nur bei circa einem Drittel der Leistung eines herkömmlichen Reaktors (1.000 – 1.200 MW).

²⁷ [UK nuclear plant hit by new multiyear delay and could cost up to £46bn \(ft.com\)](https://www.ft.com/content/2022-07-28/uk-nuclear-plant-hit-by-new-multiyear-delay-and-could-cost-up-to-46bn)

²⁸ [Atomkraft: Ausufernde Kosten und chinesische Beteiligung \(wiwo.de\)](https://www.wiwo.de/energie/atomkraft/atomkraft-ausufernde-kosten-und-chinesische-beteiligung)

²⁹ [EU: age of nuclear fleet 2023 | Statista, Europe's nuclear reactors are getting old \(reuters.com\)](https://www.statista.com/chart/11111/european-nuclear-reactors-are-getting-old)

³⁰ [Nuclear Power in a Clean Energy System \(iea.blob.core.windows.net\)](https://www.iea.org/blogs/clean-energy-systems/nuclear-power-in-a-clean-energy-system), S.26

³¹ Basierend auf der Kostenentwicklung wird ab 2026 der festgelegte Preis von 42€ pro Megawattstunde Atomstrom auf rund 70 € pro Megawattstunde ansteigen. Eventuelle Preisspitzen, die über die vereinbarten 70€ hinaus gehen sollten, trägt der französische Staat. [Kernenergie wird teurer: Strompreis in Frankreich steigt - ZDFheute](https://www.zdf.de/energie/kernenergie-wird-teurer-strompreis-in-frankreich-steigt-zdfheute)

³² Anzumerken ist hier, dass die kanadischen Uranminen zu teilen dem russischen Atomkonzern Rosatom gehören. ([Nuclear Power in the European Union - World Nuclear Association \(world-nuclear.org\)](https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-power-in-the-european-union))

³³ Damit entsteht in ihrem Betrieb, wie bei herkömmlichen Kernreaktoren, (hoch)radioaktive Abfälle.

Die Modularität und Kompaktheit der SMRs soll eine Fabrikfertigung der Bauteile ermöglichen. Ziel ist es dabei, die normalerweise hohen Anfangsinvestitionen in einen Kernreaktor zu senken und eine zeitsparende Fertigstellung zu schaffen. Aufgrund ihrer kompakten Größe sollen sie zukünftig als eine alternative Stromquelle für abgelegene Gemeinden oder energieintensive Industrien dienen.

3.2 Stand der Technik und Entwicklung

Nach derzeitigem Stand befinden sich 80 SMR-Designkonzepte in Entwicklung³⁴. Die ersten kommerziellen Reaktoren werden Anfang der 2030er Jahre erwartet³⁵. Diese unterscheiden sich primär durch die Auswahl des eingesetzten Kühl- und Brennstoffs. Etwa die Hälfte basiert auf den etablierten LWRs der II. und III. Generation. Der Rückgriff auf bereits bestehende Verfahren und Erfahrungen führt dazu, dass die Entwicklung von Leichtwasser-SMRs bereits weiter fortgeschritten ist. Daher ist auch davon auszugehen, dass SMRs nach dieser Bauart als erstes und bedeutend schneller die Marktreife erlangen werden. So ist der russische Prototyp Akademik Lomonossow, einer der zwei schon in Betrieb gegangenen SMRs, ein Druckwasserreaktor mit HALEU-Brennstoff³⁶.

Die andere Hälfte der Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung nicht-wassergekühlter Reaktoren wie die bereits erläuterten Hochtemperaturreaktoren, Schnellen Reaktoren und Salzschnmelzreaktoren. Aufgrund von vergleichsweise geringeren Erfahrungswerten und technologischen Entwicklungsrisiken dieses Reaktortyps sind längere Entwicklungszeiträume zu erwarten. Nichtsdestotrotz handelt es sich bei dem zweiten in Betrieb befindlichen SMR-Forschungsreaktor in China um einen Hochtemperaturreaktor.

Einige SMR-Forschungsprojekte planen den Einsatz von high-assay low-enriched uranium (HALEU) als Brennstoff anstatt des sonst üblichen low-enriched uranium (LEU). Mit einer Urankonzentration zwischen 5 und 20 Prozent soll HALEU es ermöglichen, die Effizienz des Reaktors zu steigern und die Zeiten zwischen den Brennstoffnachfüllungen auszudehnen. Auswertungen des Wissenschaftlichen Dienstes des Europäischen Parlamentes gehen davon aus, dass das russische Unternehmen Tenex, ein Tochterunternehmen von Rosatom, derzeit das einzige Unternehmen weltweit ist, welches HALEU in den notwendigen Mengen kommerziell zur Verfügung stellen könnte³⁷. Zur Senkung einer solchen Abhängigkeit investieren Länder wie die USA 700 Millionen US-Dollar in den Ausbau einer heimischen HALEU-Lieferkette³⁸.

3.3 Kosten der Stromerzeugung oder Anlagenbau

Die Kosten für die Stromerzeugung oder den Anlagenbau sind aufgrund des Fehlens kommerzieller SMRs schwer zu beziffern. Es kann davon ausgegangen werden, dass bisher eine nicht unerhebliche Summe an Fördermitteln und privaten Investitionen in die Forschung und Entwicklung geeigneter Reaktorkonzepte geflossen ist³⁹. So finanzierte Rolls-Royce sein SMR-Projekt aus 195 Millionen Pfund privaten und 210 Millionen Pfund öffentlichen Geldern⁴⁰.

³⁴ [What are Small Modular Reactors \(SMRs\)? | IAEA](#)

³⁵ [Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities \(oecd-nea.org\)](#)

³⁶ Alleinstellungsmerkmal des russischen Forschungsreaktors ist die Tatsache, dass es sich hierbei um einen schwimmenden Reaktor handelt.

³⁷ [Strategic autonomy and the future of nuclear energy in the EU \(europa.eu\)](#)

³⁸ In Rahmen des IRA wurden Investitionen in Höhe von 700 Millionen US-Dollar in eine heimische HALEU-Lieferkette und 2,7 Milliarden US-Dollar in die Förderung der US-amerikanischen Uran-Anreicherung investiert.

³⁹ Der französische Staat gewährte beispielsweise weitere Beihilfen in Höhe von 300 Millionen Euro für die Entwicklung von SMRs.

⁴⁰ [Rolls-Royce gets funding to develop mini nuclear reactors \(bbc.com\)](#)

Aufgrund ihrer begrenzten Leistung ist es SMRs nicht möglich, von den gleichen Skaleneffekten am Strommarkt zu profitieren, wie dies herkömmlichen Kraftwerken möglich ist. Ihren Größennachteil sollen die Reaktoren durch ihre Modularität kompensieren. Diese soll, gemeinsam mit einer Standardisierung und Vereinfachung des Produktes, eine rentable Massenproduktion ermöglichen. Allerdings können die Vorteile der Masseproduktion nur ab einer gewissen Marktgröße abgeschöpft werden. Laut Schätzungen des Öko-Instituts, unter Berücksichtigung von Skalen-, Massen- und Lerneffekten, werden dafür mindestens 3.000 SMRs benötigt⁴¹. Eine Produktion in diesem Umfang würde einen globalen Markt mit nur wenigen SMR-Konzepten voraussetzen. Nur durch ein hohes Maß an regulatorischer Harmonisierung und einer starken Verdichtung möglicher SMR-Varianten auf einige wenige Modell erscheint dies jedoch erreichbar⁴². Trotz alledem ist bisher offen, inwieweit die auf der verminderten Größe beruhenden Kostennachteile in Zukunft durch andere Effekte kompensiert werden können. Zudem entsteht auch bei den SMRs radioaktiver Abfall, dessen Entsorgung und die damit verbundenen Kosten, ebenso evaluiert werden müssen.

4 Fusionskraftwerke

4.1 Übersicht

Fusionsenergie zielt darauf ab, die Energieerzeugungsprozesse der Sonne and anderer Sterne zu simulieren. Dies geschieht durch die Fusion von zwei Atomkernen unter extremen Temperatur- und Druckbedingungen, was eine erhebliche Menge an Energie freisetzt.

In der irdischen Umsetzung dieser Reaktion wird zumeist ein Brennstoffgemisch aus den Wasserisotopen Deuterium und Tritium verwendet. Unter extrem hohen Temperaturen von etwa 100 Millionen Grad fusionieren diese Elemente zu Helium. Im Zuge dieses Prozesses wird ein Neutron freigesetzt, das eine erhebliche Menge an Energie trägt.

Fusionskraftwerke würden sich diese Energie zu Nutze machen. Ein Großteil der vom Neutron getragenen Energie wird von den Wänden des Reaktionsbehälters absorbiert und in Wärme umgewandelt. Diese Wärme wird anschließend verwendet, um Dampf zu erzeugen, der Turbinen antreibt und somit, ähnlich wie in einem konventionellen Kraftwerk, Strom erzeugt. Im Gegensatz zur Kernspaltung, der bekannten Form der Kernenergie, verläuft der Fusionsprozess ohne die Freisetzung von hochradioaktivem Material⁴³.

Trotz der theoretischen Machbarkeit der Energiegewinnung durch Kernfusion, ist ihre praktische Anwendung noch in der Entwicklung. Derzeit sind mehrere Versuchsreaktoren in Betrieb, deren primäres Ziel jedoch die Erzeugung von Fusionsleistung und nicht die Stromerzeugung ist. Einzig das Demonstrationskraftwerk (DEMO) des Konsortiums EUROfusion, das sich derzeit noch in Frankreich im Bau befindet, soll die kommerzielle Nutzung der Fusionsenergie erforschen⁴⁴. Aktuell wird nicht erwartet, dass ein voll funktions- und marktfähiges Fusionskraftwerk vor Mitte des Jahrhunderts verfügbar sein wird⁴⁵.

⁴¹ [Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten \(Small Modular Reactors\) \(bund.de\)](#)

⁴² [Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities \(oecd-nea.org\)](#)

⁴³ Die Fusionsenergie wird dennoch schwach- bis mittelradioaktiven Abfall produzieren. Dieser unterliegt allerdings nicht die gleichen Einlagerungs- und Sicherheitsanforderungen wie hochradioaktive Reststoffe.

⁴⁴ Mitglieder sind die EU-Staaten und die Schweiz.

⁴⁵ Allerdings würde ein angestrebter Neubau eines „klassischen“ Kernkraftwerkes, unter Berücksichtigung der derzeitigen Bauzeiten in Europa, mit hoher Wahrscheinlichkeit auch erst in zwei bis drei Jahrzehnten (inklusive Planungsphase) ans Netz gehen.

4.2 Stand der Technik und Entwicklung

Die technische Umsetzung der Fusionsenergie ist eine Herausforderung. Insbesondere die extrem hohen Temperaturen (100 Millionen Grad Celsius), bei denen das Fusionsbrennstoffgemisch als Plasma vorliegt, stellen hohen technische Anforderungen dar. Um die für die Energiegewinnung erforderliche Reaktion aufrechtzuerhalten, müssen diese Temperaturen konstant gehalten werden. Allerdings sind die hohen Temperaturen herausfordernd, da sie einerseits das umgebende Material überfordern und andererseits das Plasma bei Kontakt mit den umgebenden Wänden abkühlen würde. Um den Kontakt zwischen den Gefäßwänden und dem Plasma zu vermeiden, haben sich zwei Hauptansätze etabliert: die Magnetfusion und die Laser-/Trägheitsfusion.

4.2.1 Magnetfusion

Bei der Magnetfusion wird das Plasma durch ein Magnetfeld in einem Vakuum stabilisiert. Zwei verschiedene Reaktorkonzepte werden dafür verfolgt: der Tokamak und der Stellarator. Im Tokamak wird der notwendige magnetische Käfig, der das Plasma stabilisiert, durch externe Spulen und einen Strom im Plasma selbst erzeugt. Aufgrund seiner Konzeption kann er nicht kontinuierlich betrieben werden. Das Projekt JET (Joint European Torus) in Großbritannien und der ITER-Versuchsreaktor in Frankreich basieren auf dem Tokamak-Prinzip⁴⁶. Der Tokamak gilt als das am weitesten fortgeschrittenen Fusionsreaktorkonzept.

Im Gegensatz zum Tokamak erzeugt der Stellarator den magnetischen Käfig ausschließlich durch ein Spulensystem, was einen Dauerbetrieb ermöglicht. Derzeit befindet sich der Stellarator Wendelstein 7-X in Greifswald im Testbetrieb. In seiner Entwicklung liegt der Stellarator noch mehrere Generationen hinter dem Tokamak zurück.

4.2.2 Laser-/Trägheitsfusion

Bei der Laser-/Trägheitsfusion wird auf ein Magnetfeld verzichtet. Stattdessen wird ein kleines Pellet, welches mit Deuterium und Tritium gefüllt ist, mit einem hochenergetischen Laser beschossen. Dadurch erreicht das Pellet das Hundertfache seiner Dichte und Temperaturen von bis zu 120 Millionen Grad Celsius. Der stark komprimierte Zustand des Pellets erlaubt das Stattfinden von Fusionsreaktionen. Diese Art der Fusionsforschung wird hauptsächlich in den USA durchgeführt. Die dortige National Ignition Facility (NIF) gelang es zuletzt nachzuweisen, dass bei einer Fusionsreaktion mehr Energie freigesetzt wurde, als durch die verwendeten Laser eingestrahlt wurde.

4.3 Kosten der Stromerzeugung oder Anlagenbau

Bei der Fusionsenergie handelt es sich um eine Technologie, die sich noch in der Entwicklungsphase befindet und voraussichtlich noch einige Zeit von der Marktreife entfernt ist. Daher gibt es derzeit keine belastbaren Angaben über die zukünftigen Kosten für die Stromerzeugung und den Bau von Anlagen.

In den letzten Jahren ließ sich ein Anstieg der staatlichen und privaten Investitionen in die Fusionsforschung beobachten. Im Jahr 2023 beliefen sich die Fördermittel in den USA auf 736 Millionen US-Dollar, und für das laufende Jahr 2024 ist eine Erhöhung auf fast 1 Milliarde US-Dollar geplant ⁴⁷.

⁴⁶ Der JET-Reaktor wurde bis zu seiner Betriebseinstellung 2023 von den Mitgliedern der Europäischen Atomgemeinschaft betrieben. ITER ist ein Gemeinschaftsprojekt der EU, Chinas, Indiens, Japans, Südkoreas, Russlands und den USA.

⁴⁷ [Positionspapier Fusionsforschung \(bmbf.de\)](https://www.bmbf.de/Positionspapier-Fusionsforschung)

Das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung hat zudem Fördermittel in Höhe von einer Milliarde Euro bis 2028 zugesichert⁴⁸.

Für die bereits laufenden größeren Forschungsprojekte liegen nur begrenzte Zahlen vor. Beim aktuell größten Forschungsreaktor, dem ITER, wird von Investitionen in Höhe von bis zu 20 Milliarden Euro ausgegangen⁴⁹. Der amerikanische Laserfusionsreaktor NIF verursachte Kosten in Höhe von 3,5 Milliarden Euro⁵⁰.

5 Recycling, radioaktive Abfälle und Endlager

5.1 Übersicht

Bei dem im Reaktor ablaufenden Prozess der Kernspaltung entstehen radioaktive Spaltprodukte. Der Umgang mit den verschiedenen radioaktiven Abfällen, die während der Kernspaltung entstehen, stellt eine bislang ungelöste Herausforderung dar. Aufgrund ihrer Radioaktivität müssen gesonderte Überlegungen und Sicherheitsvorkehrungen bei ihrer Entsorgung angewendet werden. Allein in Deutschland belaufen sich Schätzungen zufolge die hochradioaktiven Abfälle auf 27.000 Kubikmeter und die schwach- bis mittelradioaktiven Abfälle auf 300.000 Kubikmeter. Bisher befinden sich diese in sogenannten Zwischenlagern, häufig in der Nähe von ehemaligen KKW.

Die endgültige Lagerung, insbesondere der hochradioaktiven Abfälle, ist in Deutschland noch nicht geklärt. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung, die mit der Suche nach einem geeigneten Endlager beauftragt ist, wird voraussichtlich erst 2046 ein geeignetes Gebiet ausweisen können. Weltweit hat einzig in Finnland der Bau eines Endlagers begonnen⁵¹.

Die Zwischen- und Endlagerung von Abfällen erfordert einen erheblichen Einsatz von Ressourcen, insbesondere für Überwachungsmaßnahmen und die Abfuhr der Nachwärme. Zukünftige Sicherheitsmaßnahmen und Abdichtungen in unterirdischen Lagerstätten werden eine große Menge an Beton erfordern.

Neben der Endlagerung wird auch die Möglichkeit des „Recyclings“ von radioaktivem Abfall erforscht und diskutiert. Die sog. Partitionierung und Transmutation (P & T) könnte eine Reduzierung des hochradioaktiven Abfalls ermöglichen. Das Verfahren der Partitionierung findet, in einem kleineren Umfang, bereits in der Wiederaufbereitung Anwendung. Dafür werden Plutonium und Uran aus ausgebrannten Brennelementen extrahiert und in Mischoxidbrennelementen (MOX-Brennelemente) wiederverwendet. Es wird geschätzt, dass die Forschung und Entwicklung der P & T noch mindestens vier bis fünf Jahrzehnte dauern wird, bevor sie in größerem Umfang angewendet werden kann. Für Deutschland wird ein Zeitraum zwischen 100 bis 150 Jahren erwartet, bis alle hochradioaktiven Abfälle

⁴⁸ [Eine Milliarde Euro für die Fusionsforschung bis 2028 - BMBF](#)

⁴⁹ [Kernfusion: Wann bekommen wir die unerschöpfliche Energiequelle? | BR24](#) Wobei sich hier die Kosten auf die ITER-Mitglieder aufteilen. Der Größte Anteil mit knapp 48 Prozent wird von der EU getragen, alle andere Mitglieder stellen jeweils 9 Prozent (China, Japan, Südkorea, Russland und die USA).

⁵⁰ [Fusionsreaktor: Forschern stehen an der Schwelle der Kernfusionszündung - DER SPIEGEL](#)

⁵¹ Dieses soll Mitte des Jahrzehnts, mit Baukosten von 3,5 Milliarden Euro, in Betrieb genommen werden. Die finnischen Behörden gehen von circa 120 Jahren für den Prozess der Einlagerung aus.

so „umgewandelt“ worden sind⁵². Hierbei sei hervorzuheben, dass auch dabei schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen.

5.2 Recycling der Brennelemente

Die Forschung zum Recycling von hochradioaktivem Abfall konzentriert sich auf den Prozess der Partitionierung und Transmutation. Die Partitionierung trennt gezielt die radioaktiven Stoffe ab, indem abgebrannte Brennelemente in einer chemischen Lösung aufgelöst werden. In mehreren Prozessschritten werden die enthaltenen radioaktiven Elemente in unterschiedliche Produktströme separiert. Nicht weiter verwertbare Spalt- und Aktivierungsprodukte werden in Glas eingeschmolzen und in einem Endlager entsorgt⁵³. Entsprechend muss bei dieser Technologie auch weiterhin ein Großteil des Materials entsorgt werden und kann nicht wiederverwendet werden.

Die Transmutation, der zweite Schritt des P & T, ist in ihrer Forschung und Entwicklung weniger fortgeschritten. Sie erfordert einen speziellen Reaktor, um hochradioaktive Stoffe in weniger radioaktive umzuwandeln. Hierbei werden die durch die Partitionierung separierten Stoffe, wie Plutonium und Minore Aktinide, mit schnellen Neutronen beschossen, um bis zu 90 Prozent der Stoffe in kurzlebige oder stabilere Atomkerne umzuwandeln. Diese müssen weiterhin endgelagert werden. Bisher konnte kein Reaktor entwickelt werden, der die technischen Anforderungen der Transmutation erfüllt⁵⁴. Es wird angenommen, dass die Entwicklung eines geeigneten Reaktors noch mindestens vier bis fünf Jahrzehnte dauern wird.

Es ist unwahrscheinlich, dass der gesamte hochradioaktive Abfall so in weniger radioaktiven Abfall umgewandelt werden kann. Schätzungen zufolge könnte die tatsächliche P & T der deutschen radioaktiven Reststoffe 100 bis 150 Jahre dauern und ist auf ein Endlager angewiesen⁵⁵.

Die Separierung der abgebrannten Brennelemente in verschiedenen Produktströme findet seit mehreren Jahrzehnten in der Wiederaufbereitung Anwendung. Das so extrahierte Plutonium wird Natururan beigemischt, um in einem energieintensiven Prozess MOX-Brennelemente herzustellen. Diese können dann in entsprechend ausgestatteten Leichtwasserreaktoren und theoretisch auch in Reaktoren der IV. Generation verwendet werden⁵⁶. Aufgrund der initial höheren Strahlendosis, erfordert diese Art von Brennelementen erhöhte Sicherheitsstandards in ihrem Transport und Einsatz.

Aufgrund des noch ausreichenden Uranvorkommens konnte sich die aufwändige Herstellung der MOX-Brennelemente wirtschaftlich nicht durchsetzen. In Frankreich befindet sich die letzte kommerzielle europäische Wiederaufbereitungsanlage, die auch für ausländische Kunden MOX-Brennelemente herstellt. Andere Wiederaufbereitungsprojekte, wie die Sellafield MOX Plant in Großbritannien, mussten aufgrund technischer und finanzieller Schwierigkeiten den Betrieb einstellen. Während des 9-

⁵² Hierbei sei anzumerken, dass eine solche Umwandlung von hochradioaktiven Abfällen mit einer nicht unerheblichen Summe an schwach- bis mittelradioaktiven Abfällen einhergehen würde. Zugleich würde selbst nach einer erfolgreichen Durchführung der P & T noch hochradioaktive Abfälle verbleiben.

⁵³ Bei den derzeit geläufigen Trennverfahren liegt ein Proliferationsrisiko vor, d.h. die Zweckentfremdung des abgespaltenen Plutoniums für die Waffenentwicklung.

⁵⁴ Theoretisch in Frage kämen Abwandlungen der bereits vorgestellten Reaktorkonzepte Schneller Brüter oder Flüssigsalzreaktoren.

⁵⁵ Selbst nach erfolgreicher Durchführung der P & T Prozesse wird erwartet, dass ein – wenn auch kleinerer Bestand – an hochradioaktiven Abfällen eingelagert werden müssen.

⁵⁶ In der Praxis wurden MOX-Brennelemente nur in Russland in einen Schnellen Brüter, der IV. Reaktorgeneration, eingesetzt.

jährigen Betriebes konnten in Sellafield lediglich 15 Tonnen MOX-Brennstoff hergestellt werden. Demgegenüber stehen Konstruktions- und Betriebskosten von 1,2 Milliarden Pfund⁵⁷.

5.3 Radioaktive Abfälle und Endlager

Seit 2017 regelt das Standortauswahlgesetz (StandAG) in Deutschland die Suche und Auswahl eines geeigneten Endlagers für die hochradioaktiven Abfälle. Dieses unterteilt die Suche nach einem geeigneten Standort in 3 Phasen, die bis 2031 abgeschlossen sein sollen. Die erste Phase beinhaltet die Ermittlung geeigneter Standortregionen, während der zweiten und dritten Phasen werden die übertägigen und untertägigen Erkundungen potenzieller Standorte durchgeführt. Bisher liegt lediglich ein Zwischenbericht des ersten Teils von Phase I vor. Fest steht, dass die Endlagerung in tiefen Gesteinsschichten stattfinden soll.

Drei potenzielle Wirtsgesteine stehen zur Auswahl: Kristallgestein, Steinsalz und Tongestein. Jedes Gestein hat individuelle Vor- und Nachteile, gemein ist ihnen aber ihre gute Wärmeleitfähigkeit⁵⁸. Zusätzliche Vorgaben schließen ehemalige Bergbaugebiete, Gebiete mit Vulkanaktivität und Erdbebengefahr als Standort aus. Laut StandAG müssen die hochradioaktiven Abfälle während des Einschlusses und 500 Jahre nach der Versiegelung des Endlagers rückholbar sein.

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung liegt derzeit deutlich hinter dem gesetzlich vorgesehenen Zeitplan. Eine Fertigstellung der Sucharbeiten bis 2031 ist derzeit nicht zu erwarten. Neue Pläne reichen von einer Fertigstellung bis 2046 im optimistischsten und bis 2068 im pessimistischsten Fall.

Die Kernkraftwerk-Betreiber und der Bund haben vereinbart, dass der Bundeshaushalt die Kosten für die Zwischen- und Endlagerung übernimmt. Dafür haben die Unternehmen ihre Rücklagen in den Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO) übertragen. Die Verantwortung und Kosten für die Stilllegung und Rückbau tragen die Energieunternehmen weiterhin⁵⁹. 2017 zahlten die Betreiber einmalig 24 Milliarden in den Fond ein⁶⁰.

Die tatsächlichen Kosten für die Zwischen- und Endlagerung sind schwer zu ermitteln. Der Abschlussbericht der Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernausstiegs von 2014 ging von 47,5 Milliarden Euro für die Entsorgung des radioaktiven Abfalls aus⁶¹. Die Befüllung des KENFO erfolgte in der Erwartung, dass bis 2031 eine Entscheidung über ein Endlager getroffen wird. Die erwartete Verlängerung des Suchzeitraums führt zu steigenden Kosten für die Finanzierung der Zwischenlager. Zukünftige Finanzierungsschwierigkeiten für die Endlagersuche und die tatsächliche Endlagerung sind nicht auszuschließen.

⁵⁷ <https://www.nature.com/articles/476140a.pdf>

⁵⁸ Es ist davon auszugehen, dass die hochradioaktiven Abfälle noch mehrere Jahrhunderte Wärme abgeben werden.

⁵⁹ Ausnahme sind hier die KKW der ehemaligen DDR. Die Kosten für ihre Stilllegung und Rückbau trägt der Bund.

⁶⁰ [Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung \(kenfo.de\)](#)

⁶¹ [bericht-der-expertenkommission-kernenergie.pdf \(bmwk.de\)](#)

Die unterschiedlichen Technologien zeigen, wie vielfältig Kernreaktoren ausgestaltet sein können. Dabei wurden in Deutschland in der Vergangenheit hauptsächlich Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren gebaut. Interessanterweise wird auch im Rahmen der aktuell viel diskutierten Small Modular Reactors (SMRs) auf diese Reaktortypen zurückgegriffen. Wobei sich die Innovation nicht auf die Technik, sondern vielmehr auf die Baugröße und -weise bezieht. Die Annahme ist, dass sich bei einer kleineren Ausführung von Kernkraftwerken eine massenfähige Produktion ermöglichen lässt. Aufgrund von Skaleneffekte könnten die vergleichsweise hohen Initialkosten der Stromproduktion von Kernkraftwerken reduziert werden. Da praktische Erfahrungen bisher fehlen, sind die dafür notwendigen Baukosten kaum zu kalkulieren und Bauzeiten anzunehmen, die auch aufgrund der notwendigen Genehmigungsprozesse wie auch bei anderen Großbauprojekten deutlich über 15 Jahren anzusetzen sind. Damit ist die Nutzung der Kernenergie keine kurzfristige Lösung und setzt eine lange Planungs- und Nutzungsphase voraus. Dazu kommen die hohen Unsicherheiten über künftige Erlösmöglichkeiten am Strommarkt.

Durchaus beachtlich ist, dass die Thematik der Endlagersuche in Deutschland bisher ungelöst ist und ein adäquates Verfahren zum Recycling aussteht. Vor dem Hintergrund, dass ein tatsächliches Recycling alter Brennelemente über wenige Prozentanteile hinaus bisher nicht stattfindet, ist die Endlagersuche eine ungelöste Herausforderung. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass bisher für hochradioaktive Abfälle, der aus abgebrannten Brennelementen stammt, weltweit noch kein Endlager existiert. In der EU haben bisher nur Finnland und Schweden den konkreten Entschluss für den Bau eines Endlagers gefasst. Dabei ist Finnland beim Bau eines Endlagers bereits fortgeschritten. In Schweden hingegen stehen die Genehmigungen teilweise noch aus. In beiden Projekten kann jedoch von einer Bauzeit von deutlich über zehn Jahren ausgegangen werden.

Im Vergleich zu bestehenden Kernkraftwerken ist die Herausforderung der Endlagerung bei der Nutzung der Fusionskraft ungleich geringer. Die Nutzung der Fusionsenergie hat keine hochradioaktiven Abfälle zur Folge. Zwar erzeugt auch die Fusionskraft schwach- bis mittelradioaktive Abfälle, für welche allerdings bereits Endlager bestehen, die genutzt werden könnten. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass eine kommerzielle Nutzung der Fusionsenergie nur sehr langfristig zur Verfügung stehen könnte.