

Kernenergie und Klima

(Version 1.0, Deutsch, 27. Okt. 2021)



Ben Wealer (TU Berlin, DIW Berlin), Christian Breyer (LUT University), Peter Hennicke (Wuppertal-Institut), Helmut Hirsch (cervus nuclear consulting), Christian von Hirschhausen (TU Berlin, DIW Berlin), Peter Klafka (Scientists for Future), Helga Kromp-Kolb (BoKu Wien), Fabian Präger (TU Berlin), Björn Steigerwald (TU Berlin, DIW Berlin), Thure Traber (Energy Watch Group), Franz Baumann (New York University), Anke Herold (Öko-Institut), Claudia Kemfert (DIW Berlin, SRU), Wolfgang Kromp (BoKu Wien), Wolfgang Liebert (BoKu Wien) und Klaus Müschen (Scientists for Future)¹

Danksagungen: Wir danken Pietro Altermatt, Christoph Gerhards, Wolfgang Lucht, Gregor Hagedorn, Nikolaus Müllner, Franz Ossing, Mycle Schneider und Petra Seibert für inhaltliche und sprachliche Verbesserungsvorschläge.

Dieser Text wurde von Mitgliedern der „Scientists for Future“ verfasst und durch Kollegen und Kolleginnen hinsichtlich der wissenschaftlichen Qualität (insbesondere der Belegbarkeit von Argumenten) ausführlich geprüft (peer reviewed).

Scientists for Future (S4F) ist ein überparteilicher und überinstitutioneller Zusammenschluss von Wissenschaftler*innen, die sich für eine nachhaltige Zukunft engagieren. Scientists for Future bringt als Graswurzelbewegung den aktuellen Stand der Wissenschaft in wissenschaftlich fundierter und verständlicher Form aktiv in die gesellschaftliche Debatte um Nachhaltigkeit und Zukunftssicherung ein. Mehr Informationen unter de.scientists4future.org.

Veröffentlicht unter [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Zitationsvorschlag / Suggested citation: Wealer, B. Breyer, C., Hennicke, P., Hirsch, H., von Hirschhausen, C., Klafka, P. Kromp-Kolb, H.... Müschen, K. (2021). Kernenergie und Klima. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 9, 98 pp. doi: [10.5281/zenodo.5573719](https://doi.org/10.5281/zenodo.5573719)

Zusammenfassung

Angesichts der sich beschleunigenden Klimakrise wird die Bedeutung der Kernkraft, die derzeit ca. 10% der weltweiten Stromproduktion ausmacht, für den zukünftigen Energieträgermix diskutiert. Einige Länder, internationale Organisationen, private Unternehmen sowie Forscher:innen messen der Kernenergie auf dem Weg zur Klimaneutralität und zum Ende fossiler Energien eine gewisse Bedeutung bei. Dies geht auch aus Energie- und Klimaszenarien des IPCC hervor. Dagegen legen die Erfahrungen mit der kommerziellen Nutzung der Kernkraft der letzten sieben Jahrzehnte nahe, dass ein solcher Pfad mit erheblichen technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Risiken verbunden ist. Der vorliegende Diskussionsbeitrag erörtert Ar-

¹Rolle der Autor:innen: Wealer (korrespondierender Autor, bw@wip.tu-berlin.de), Breyer, Hennicke, Hirsch, von Hirschhausen, Klafka, Kromp-Kolb, Präger, Steigerwald und Traber haben überwiegende Teile des Textes geschrieben und die Beiträge der übrigen Autor:innen koordiniert. Die übrigen in alphabetischer Reihenfolge aufgeführten Autor:innen haben themenspezifisch fachliche Beiträge geleistet sowie den Text im Hinblick auf Stimmigkeit und Korrektheit geprüft.

gumente in den Bereichen „Technologie und Gefahrenpotenziale“, „Wirtschaftlichkeit“, „zeitliche Verfügbarkeit“ sowie „Kompatibilität mit der sozial-ökologischen Transformation“ und zieht dann ein Fazit.

Technologie und Gefahrenpotenziale: In Kernkraftwerken sind jederzeit katastrophale Unfälle mit großen Freisetzungen radioaktiver Schadstoffe möglich. Dies zeigen nicht nur die Großunfälle, z.B. die Katastrophen von Tschernobyl und Fukushima, sondern auch eine Vielzahl von Unfällen, die sich seit 1945 in jedem Jahrzehnt und in jeder Region, die Kernenergie nutzt, ereignet haben. Von in Planung befindlichen SMR-Reaktorkonzepten („Small Modular Reactors“) ist keine wesentlich größere Zuverlässigkeit zu erwarten. Darüber hinaus besteht permanent die Gefahr des Missbrauchs von waffenfähigem Spaltmaterial (hochangereichertes Uran bzw. Plutonium) für terroristische Zwecke oder andere Proliferation. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle muss aufgrund hoher Halbwertszeiten für über eine Million Jahre sicher gewährleistet werden; die damit verbundenen Langfristrisiken sind aus heutiger Perspektive nicht überschaubar und weisen zukünftigen Generationen erhebliche Lasten zu.

Wirtschaftlichkeit: Die kommerzielle Nutzung von Kernenergie war in den 1950er Jahren ein Nebenprodukt militärischer Entwicklungen und hat seit dieser Zeit niemals den Sprung zu einer wettbewerbsfähigen Energiequelle geschafft. Selbst der laufende Betrieb von älteren Kernkraftwerken wird heute zunehmend unwirtschaftlich. Laufzeitverlängerungen sind technisch und wirtschaftlich riskant. Beim Neubau von Kernkraftwerken der aktuellen 3. Generation muss mit Verlusten in Höhe mehrerer Milliarden US-\$ bzw. € gerechnet werden. Zusätzlich fallen erhebliche und derzeit weitgehend unbekannte Kosten für den Rückbau von Kernkraftwerken und die Endlagerung radioaktiver Abfälle an. Energiewirtschaftliche Analysen zeigen, dass die Einhaltung ambitionierter Klimaschutzziele (globale Erwärmung 1,5° bis unter 2°C) ohne Kernenergie nicht nur möglich, sondern auch unter Berücksichtigung von Systemkosten mit erneuerbaren Energien kostengünstiger ist. Hierzu kommt, dass Unfallrisiken von Kernkraftwerken nicht versicherbar sind und Schäden daher immer sozialisiert werden müssen. Die in aktuellen Diskussionen genannten SMR-Konzepte („Small Modular Reactors“) und die Konzepte der sogenannten „Kernkraftwerke der 4. Generation“ (nicht-Leichtwasser-gekühlt) sind technisch unausgereift und weit von kommerziellen Einsätzen entfernt.

Zeitliche Verfügbarkeit: Angesichts des stagnierenden bzw. in allen Kernkraftstaaten (außer China) rückläufigen Kernkraftwerksbaus, Planungs- und Bauzeiten von zwei Jahrzehnten (und mehr) sowie absehbar geringen technischen Innovationen kann Kernkraft in den für die Bekämpfung der Klimakrise relevanten Zeiträumen von zwei bis maximal drei Jahrzehnten keine Rolle spielen. Die Anzahl des Baubeginns von Kernkraftwerken ist bereits seit 1976 rückläufig. Aktuell befinden sich lediglich 52 Kernkraftwerke im Bau und nur wenige Länder versuchen den Einstieg in die Kernenergie. Traditionelle Hersteller wie Westinghouse (USA) und Framatome (Frankreich) sind finanziell angeschlagen und nicht in der Lage, im nächsten Jahrzehnt eine große Anzahl an Neubauprojekten in Angriff zu nehmen.

Kernkraft in der sozial-ökologischen Transformation: Die größte Herausforderung der großen Transformation, d. h. von sozial-ökologischen Reformen in Richtung zu einem gesellschaftlich gestützten zukunftsfähigen, klimaneutralen Energiesystem, liegt in der Überwindung der Widerstände („Lock-in“) des alten, von fossilen Kraftwerken dominierten Energiesystems. Kernenergie ist nicht geeignet, diesen Transformationsprozess zu unterstützen, sondern blockiert diesen sogar: durch Innovations- und Investitionsblockaden. Nuklearer Wasserstoff ist weder aus technischen noch aus ökonomischen Gründen eine Option zur Steigerung der Auslastung von Kernkraftwerken. Japan ist ein plastisches Beispiel für Transformationsresistenz. In Deutschland schreitet die Atomwende zwar durch die Abschaltung der letzten sechs Kernkraftwerke (2021 bzw. 2022) voran, jedoch sind weitere Schritte zu einem vollständigen Atomausstieg notwendig, u. a. die Schließung der Atomfabriken in Lingen und Gronau. Die Atomwende ist auch eine notwendige Bedingung für eine erfolgreiche Endlagersuche.

Fazit: Im vorliegenden Diskussionsbeitrag wird eine Vielzahl von Argumenten geprüft und am bestehenden Stand der Forschung abgeglichen. Dabei bestätigt sich die Einschätzung der Scientists for Future aus dem Diskussionsbeitrag „Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland“ vom Juli 2021, dass Kernenergie nicht in der Lage ist, in der verbleibenden Zeit einen sinnvollen Beitrag zum Umbau zu einer klimaverträglichen Energieversorgung zu leisten. Kernkraft ist *zu gefährlich, zu teuer und zu langsam verfügbar*; darüber hinaus ist Kernkraft *zu transformationsresistent*, d. h. sie blockiert den notwendigen sozial-ökologischen Transformationsprozess, ohne den ambitionierte Klimaschutzziele nicht erreichbar sind.

Schlagwörter: Klimakrise, Kernenergie, Klimaschutz, Klimapolitik, Energiepolitik, EU-Taxonomie, Deutschland, Endlagersuche, Energiewende, Große Transformation

English Summary

In light of the accelerating climate crisis, nuclear energy and its place in the future energy mix is being debated once again. Currently its share of global electricity generation is about 10 percent. Some countries, international organizations, private businesses and scientists accord nuclear energy some kind of role in the pursuit of climate neutrality and in ending the era of fossil fuels. The IPCC, too, includes nuclear energy in its scenarios. On the other hand, the experience with commercial nuclear energy generation acquired over the past seven decades points to the significant technical, economic, and social risks involved. This paper reviews arguments in the areas of “technology and risks,” “economic viability,” “timely availability,” and “compatibility with social-ecological transformation processes.”

Technology and risks: Catastrophes involving the release of radioactive material are always a real possibility, as illustrated by the major accidents in Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima. Also, since 1945, countless accidents have occurred wherever nuclear energy has been deployed. No significantly higher reliability is to be expected from the SMRs (“small modular reactors”) that are currently at the planning stage. Even modern mathematical techniques, such as probabilistic security

analyses (PSAs), do not adequately reflect important factors, such as deficient security arrangements or rare natural disasters and thereby systematically underestimate the risks. Moreover, there is the ever-present proliferation risk of weapon-grade, highly enriched uranium, and plutonium. Most spent fuel rods are stored in scarcely protected surface containers or other interim solutions, often outside proper containment structures. The safe storage of highly radioactive material, owing to a half-life of individual isotopes of over a million years, must be guaranteed for eons. Even if the risks involved for future generations cannot be authoritatively determined today, heavy burdens are undoubtedly externalized to the future.

Nuclear energy and economic efficiency: The commercial use of nuclear energy was, in the 1950s, the by-product of military programmes. Not then, and not since, has nuclear energy been a competitive energy source. Even the continued use of existing plants is not economical, while investments into third generation reactors are projected to require subsidies to the tune of billions of \$ or €. The experience with the development of SMR concepts suggests that these are prone to lead to even higher electricity costs. Lastly, there are the considerable, currently largely unknown costs involved in dismantling nuclear power plants and in the safe storage of radioactive waste. Detailed analyses confirm that meeting ambitious climate goals (i.e. global heating of between 1.5° and below 2° Celsius) is well possible with renewables which, if system costs are considered, are also considerably cheaper than nuclear energy. Given, too, that nuclear power plants are not commercially insurable, the risks inherent in their operation must be borne by society at large. The currently hyped SMRs and the so-called Generation IV concepts (not light-water cooled) are technologically immature and far from commercially viable.

Timely availability: Given the stagnating or – with the exception of China – slowing pace of nuclear power plant construction, and considering furthermore the limited innovation potential as well as the timeframe of two decades for planning and construction, nuclear power is not a viable tool to mitigate global heating. Since 1976, the number of nuclear power plants construction starts is declining. Currently, only 52 nuclear power plants are being built. Very few countries are pursuing respective plans. Traditional nuclear producers, such as Westinghouse (USA) and Framatome (France) are in dire straits financially and are not able to launch a significant number of new construction projects in the coming decade. It can be doubted whether Russia or China have the capacity to meet a hypothetically surging demand for nuclear energy but, in any event, relying on them would be neither safe nor geopolitically desirable.

Nuclear energy in the social-ecological transformation: The ultimate challenge of the great transformation, i.e. kicking off the socio-ecological reforms that will lead to a broadly supported, viable, climate-neutral energy system, lies in overcoming the drag (“lock-in”) of the old system that is dominated by fossil fuel interests. Yet, make no mistake, nuclear energy is of no use to support this process. In fact, it blocks it. The massive R&D investment required for a dead-end technology crowds out the development of sustainable technologies, such as those in the areas of renewables, energy storage and efficiency. Nuclear energy producers, given the competitive environment they operate in, are incentivized to prevent – or minimize – investments in

renewables. For obvious technical as well as economic reasons, nuclear hydrogen – the often-proclaimed *deus ex machina* – cannot enhance the viability of nuclear power plants. Japan is an exhibit A of transformation resistance. In Germany the end of the atomic era proceeds, and the last six nuclear power stations will be switched off in 2021 and 2022, but further steps are still needed, most importantly the search for a safe storage facility for radioactive waste.

By way of conclusion: The present analysis reviews a whole range of arguments based on the most recent and authoritative scientific literature. It confirms the assessment of the paper *Climate-friendly energy supply for Germany – 16 points of orientation*, published on 22 April 2021 by Scientists for Future (doi.org/10.5281/zenodo.4409334) that nuclear energy cannot, in the short time remaining before the climate tips, meaningfully contribute to a climate-neutral energy system. Nuclear energy is too dangerous, too expensive, and too sluggishly deployable to play a significant role in mitigating the climate crisis. In addition, nuclear energy is an obstacle to achieving the social-ecological transformation, without which ambitious climate goals are elusive.

Key words: climate crisis, nuclear energy, climate protection, EU-taxonomy, Germany, final waste depository, great transformation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	8
Technologie und Gefahrenpotenziale	8
Wirtschaftlichkeit	11
Zeitliche Verfügbarkeit.....	13
Kernkraft in der sozial-ökologischen Transformation.....	14
Fazit.....	17
Langfassung	18
1. Technologie und Gefahrenpotenziale.....	19
1.1 Das System der Kernspaltung.....	19
1.2 Kernkraftwerke – Gefahren und Probleme.....	22
1.2.1 Überblick über die Probleme in Kernkraftwerken	22
1.2.2 Sicherheitsanforderungen.....	23
1.2.3 Möglichkeiten und Grenzen probabilistischer Sicherheitsanalysen.....	24
1.2.4 Alterung von Kernkraftwerken	25
1.2.5 Unfälle und Störungen.....	26
1.2.6 Fukushima und danach	27
1.2.7 Klimawandel und Risiken	30
1.2.8 Ausbreitung von radioaktiven Schadstoffen.....	32
1.2.9 SMR-Reaktorkonzepte („Small Modular Reactors“).....	33
1.3 Gefahren und Probleme der Ver- und Entsorgung.....	35
1.3.1 Vom Uranbergwerk zum Brennelement	35
1.3.2 Zwischenlagerung, Wiederaufarbeitung, Abfallströme.....	37
1.3.3 Transporte radioaktiver Stoffe.....	38
1.3.4 Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen	39
1.4 Zivil-militärische Ambivalenz der Kerntechnologie	41
1.5 Zwischenfazit.....	43
2. Wirtschaftlichkeit.....	44
2.1 Einzelwirtschaftliche (betriebswirtschaftliche) Sicht.....	45
2.1.1 Kurzfristig (Betrieb)	45
2.1.2 Mittelfristig (Laufzeitverlängerungen)	47
2.1.3 Langfristig (Neubauinvestitionen).....	49
2.2 Kosten für Rückbau und Endlagerung.....	53
2.2.1 Rückbau	53
2.2.2 Endlager	54
2.3 Energiewirtschaftliche Sicht und Energiesystemmodellierung	55
2.3.1 Vergleich internationaler Energieszenarien.....	55
2.3.2 Kernkraft Projektionen der IEA von 1993 bis 2021	62
2.3.3 Energieeffizienz („efficiency first“)	62
2.4 Gesamtwirtschaftliche Betrachtung und ethische Perspektive	63
2.4.1 Kernkraftrisiken und Versicherbarkeit	63
2.4.2 Ethik.....	64
2.5 Zwischenfazit.....	65
3. Zeitliche Verfügbarkeit.....	66

3.1 Kraftwerksneubauten.....	67
3.2 Bauzeiten.....	70
3.3 Konzentration von Reaktoraniern.....	71
3.4 SMRs und nicht-Leichtwasser-basierte Reaktorkonzepte sind auf absehbare Zeit nicht verfügbar.....	71
3.5 Zwischenfazit.....	73
4. Kernkraft in der sozial-ökologischen Transformation.....	74
4.1 Innovationsblockaden und Investitionsblockaden.....	75
4.1.1 Innovationsblockaden.....	75
4.1.2 Investitionsblockaden.....	76
4.2 Grad der Transformationsresistenz.....	78
4.2.1 Das Beispiel Deutschland.....	79
4.2.2 Das Beispiel Japan.....	80
4.3 Nuklearer Wasserstoff.....	82
4.4 Atomwende als Bedingung für erfolgreiche Endlagerung atomarer Abfälle.....	85
4.5 Zwischenfazit.....	86
5. Fazit.....	87
Literatur.....	88

Kurzfassung

Angesichts der sich beschleunigenden Klimakrise wird die Bedeutung der Kernkraft, die derzeit ca. 10% der weltweiten Stromproduktion ausmacht, für den zukünftigen Energieträgermix diskutiert. Einige Länder, insbesondere die fünf Länder mit permanentem Sitz im UN-Sicherheitsrat (USA, Vereinigtes Königreich, Frankreich, Russland, China) sehen auch in der Zukunft eine gewisse Bedeutung der Kernenergie und bringen das auch in die Szenarienbildung internationaler Organisationen ein, vor allem in die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO, englisch: International Atomic Energy Agency IAEA), die Internationale Energie Agentur (IEA) sowie die Europäische Union („European Green Deal“). Diese Szenarien sehen bis 2050 steigende Stromproduktion aus Kernenergie vor. In vielen Szenarien des IPCC spielt Kernkraft ebenfalls eine (teilweise erhebliche) Rolle. Andererseits legen die Erfahrungen der letzten sieben Jahrzehnte mit der kommerziellen Nutzung der Kernkraft nahe, dass ein solcher Pfad mit erheblichen technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Risiken verbunden ist. So kamen die Scientists for Future 2021 in ihrem Diskussionsbeitrag „Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland“ zu dem Ergebnis, dass die Kernenergie mit großen Risiken belastet ist, nicht hinreichend schnell aufgebaut werden kann und somit für die klimaverträgliche Energieversorgung Deutschlands keine Option ist.

Vor dem Hintergrund dieser Diskussionen in Deutschland geht dieser Diskussionsbeitrag auf die Thematik „Kernenergie und Klima“ ein. Darin wird nur die Energieerzeugung durch Kernspaltung („Fission“) behandelt, während die Kernfusion, zu der ein erster Demonstrationsreaktor frühestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts entwickelt wird, nicht thematisiert wird. Der Diskussionsbeitrag erörtert Argumente in den Bereichen „Technologie und Gefahrenpotenziale“, „Wirtschaftlichkeit“, „zeitliche Verfügbarkeit“ sowie „Kernkraft in der sozial-ökologischen Transformation“ und zieht dann ein kurzes Fazit. Neben der Zusammenfassung liefert diese Kurzfassung sämtliche Ergebnisse in Übersichtsform; sie beruht auf einer Langfassung, welche vertiefende Erläuterungen und ausführliche Literaturverweise beinhaltet. (Siehe auch 1)

Technologie und Gefahrenpotenziale

1. Das System der Kernspaltung

Die wesentlichen Schritte zur Umsetzung von Kernspaltung in große Mengen Energie erfolgten in den 1930er/40er Jahren im Kontext des Zweiten Weltkriegs zur Entwicklung von Atombomben. In heutigen Kernkraftwerken wird durch die Spaltung der Kerne von Uran-235 und Plutonium-239 sowie durch den Zerfall der Spaltprodukte im Reaktor Wärme erzeugt und damit Wasserdampf zur Stromerzeugung hergestellt. Kernkraftwerke erfordern eine umfangreiche Infrastruktur der Ver- und Entsorgung, die mit erheblichen Gefahrenpotenzialen verbunden sind. Am Anfang steht der Abbau von Uran, gefolgt von dessen Aufbereitung. Es folgt die Umwandlung in Uranhexafluorid und die Anreicherung, dann die Konversion in Urandioxid und schließlich die Fertigung der Brennelemente. Nach ihrem Einsatz im Reaktor werden

die Brennelemente zunächst in den Abklingbecken der Kernkraftwerke, später in speziellen Zwischenlagern aufbewahrt. Nachdem die Radioaktivität und damit auch die Wärmeentwicklung im ausgedienten Brennstoff abgenommen haben, müssen die immer noch hochradioaktiven Brennelemente dauerhaft verpackt und eingeschlossen werden. Da nicht alle diese Schritte am selben Ort durchgeführt werden, sind mit dem Betrieb von Kernkraftwerken immer auch eine Vielzahl von Transporten mit teils hochradioaktiven Abfällen verbunden, die ein potenzielles Sicherheitsrisiko darstellen. Vereinzelt wird der Brennstoff nach dem Einsatz im Kraftwerk wiederaufgearbeitet. Das Plutonium wird dabei für die Herstellung neuer, sogenannter Mischoxid-Brennelemente (MOX) eingesetzt. Bei diesen primär chemischen Vorgängen entstehen zusätzliche radioaktive Abfallströme, schwach- und mittelradioaktive Abfälle ebenso wie hochradioaktive Reststoffe. Die letzte Station ist die Endlagerung radioaktiver Abfälle. (Siehe auch 1.1)

2. Unfälle mit Freisetzung radioaktiver Schadstoffe trotz verbesserter Methoden immer möglich

In Kernkraftwerken sind jederzeit katastrophale Unfälle mit großen Freisetzungen radioaktiver Schadstoffe möglich. Ein weites Spektrum von Ereignissen kann dazu führen: technische Ausfälle, naturbedingte Einwirkungen, unfallbedingte oder böswillige menschliche Einflüsse u. v. m. Derartige Unfälle haben räumlich und zeitlich weitreichende Auswirkungen. Dies zeigen nicht nur die Großunfälle, z. B. die Katastrophen von Tschernobyl und Fukushima, sondern auch eine Vielzahl von Unfällen, die sich seit 1945 in jedem Jahrzehnt und in jeder Region, die Kernenergie nutzt, ereignet haben. Moderne Modellrechenverfahren legen zwar teilweise niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten für Unfälle in Kernkraftwerken nahe, jedoch bilden sie die tatsächlichen Risiken nur unvollständig ab und können bisher unbekannte technische und menschliche Risiken nicht berücksichtigen, z. B. Mängel in der Sicherheitskultur oder seltene Naturereignisse; somit unterschätzen sie die Gefahren systematisch. Darüber hinaus besteht permanent die Gefahr des Missbrauchs von waffenfähigem Spaltmaterial, wie hochangereichertes Uran bzw. Plutonium, für terroristische Zwecke und andere Proliferation. Auch von SMR-Konzepten („Small Modular Reactors“, d. h. Anlagen mit einer Leistung unter 300 MW_{el}), welche derzeit entwickelt werden, kann keine signifikant höhere Zuverlässigkeit erwartet werden. Würde tatsächlich eine große Zahl von SMR-Anlagen realisiert, bedeutete dies auch eine große Zahl verschiedener Standorte und damit verbundener Transporte. (Siehe auch 1.2)

3. Hohes Gefahrenpotenzial auch bei der Ver- und Entsorgung

Auch bei der Versorgung von Kernkraftwerken mit Brennelementen und nach dem Einsatz im Reaktor können erhebliche Gefahren entstehen. Dies betrifft den Uranabbau (Abraumbildung, Wasserverschmutzung, Staub), die Rückstände der Urankonzentrationsanlagen (sogenannte „Tailings“) sowie die Abfallprodukte der Anreicherung im Gaszentrifugenverfahren (sogenanntes „abgereichertes“ Uran), welche in großen Mengen zwischengelagert werden müssen und deren langfristige Lagerung bis heute oftmals ungeklärt ist. Die Wiederaufarbeitung benutzter Brennstäbe ist ein

komplexes chemisches Verfahren zur Abtrennung von Uran und Plutonium; sie ist störanfällig und es entstehen radioaktive Abfälle verschiedener Kategorien. Der weltweit größte Teil der abgebrannten Brennelemente lagert derzeit relativ ungeschützt in Abklingbecken oder in als Zwischenlösung gedachten Nass- und Trockenlagern, meistens außerhalb des Schutzmantels („Containment“). Unkontrollierte, schwere radioaktive Freisetzungen aus den Becken, insbesondere bei einem Brand, sind möglich. Auch die Zwischenlagerung in Behältern („Castoren“) ist gefährlich und kann Ziel externer Angriff sein; allein in Deutschland gibt es 26 Zwischenlager, von denen einige in den kommenden Jahren an die Grenze der Genehmigungszeiten kommen. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle muss aufgrund hoher Halbwertszeiten für über eine Millionen Jahre sicher gewährleistet werden. Die damit verbundenen Langfristrisiken sind aus heutiger Perspektive nicht überschaubar und weisen zukünftigen Generationen erhebliche Lasten zu. (Siehe auch 1.3)

4. Dauerhafte Probleme zivil-militärischer Ambivalenz der Kernenergie

Die Nutzung der Kernenergie wurzelt in den militärischen wissenschaftlich-technologischen Kernwaffenprogrammen der 1940er und 1950er Jahre. Darauf sollte die Kerntechnologie für „zivile“, d.h. wirtschaftlich nutzbare, nicht-militärische Zwecke aufbauen, die ab den 1950er Jahren vorbereitet wurde und zu mehreren hundert Kernkraftwerken in heute etwa 30 Ländern führte. Weite Bereiche der in Kernenergieprogrammen genutzten Nukleartechnologien und Materialien sind daher zivil-militärisch ambivalent. So konnten und können Bestrebungen in Richtung auf Kernwaffenbesitz oder sogar regelrechte geheime Waffenprogramme unter dem Deckmantel zivil deklartierter Nuklearprogramme stattfinden. Als ein wesentliches internationales Instrumentarium, um zumindest die Ausweitung der Kernwaffen besitzenden Staaten einzudämmen, wird der Nichtverbreitungsvertrag (NVV) angesehen, der 1970 in Kraft trat und 1995 auf unbegrenzte Zeit verlängert wurde. Die Möglichkeiten und Befugnisse der Kontrollbehörde (IAEO) gehen allerdings nicht so weit, dass die intrinsische zivil-militärische Ambivalenz der Kernenergienutzung außer Kraft gesetzt werden könnte. Ein weiterer Aspekt ist das radiologische Gefahrenpotential durch Anlagen im Bereich der Kernenergienutzung in kriegerischen Auseinandersetzungen, welche zu massiven Radioaktivitätsfreisetzungen führen können, die radiologischen Folgewirkungen eines Kernwaffeneinsatzes bei weitem übertreffen. (Siehe auch 1.4)

5. Zwischenfazit: Kernkraft ist zu gefährlich

Kernkraftwerke sind keine konventionellen Stromerzeugungsanlagen, sondern wurden als Nebenprodukt militärischer Entwicklungsprogramme gebaut und unterliegen bis heute der zivil-militärischen Ambivalenz. Eine technische Betrachtung des Systemguts Kernkraft legt eine Vielzahl von nicht vollständig beherrschbaren Risiken und Unsicherheiten offen. Die Gefahren, die von Kernkraftwerken ausgehen, sind außerdem nicht zuverlässig quantitativ zu ermitteln. Gefahren für Menschen und Umwelt in den Bereichen der Ver- und Entsorgung (insbesondere Urangewinnung und -verarbeitung, Transport, Zwischenlagerung, Endlagerung) machen die Kernkraft für ein nachhaltiges Energiesystem untauglich. Die Gefahren der Proliferation

von kernwaffentauglichem Spaltmaterial sind erheblich. Besonders schwerwiegend sind die ungelösten Probleme der Endlagerung, die Sicherheitsbetrachtungen über eine Million Jahre erfordern. Vor dem Hintergrund zahlreich verfügbarer erneuerbarer Energiequellen ist Kernkraft zu *gefährlich*, um in der kommerziellen Energiewirtschaft eingesetzt zu werden und eine Rolle zur Bekämpfung des Klimawandels zu spielen. (Siehe auch 1.5)

Wirtschaftlichkeit

6. Kernkraft ist unwirtschaftlich

Die kommerzielle Kernenergieerzeugung war von Anfang an, d.h. den 1950er Jahren, teurer als andere Technologien. An dieser Tatsache, die anlässlich der überhöhten Kosten des ersten kommerziellen US-Reaktors in Shippingport (Pennsylvania, USA) im Jahr 1957 erstmals beobachtet wurde, hat sich bis heute nichts geändert. Im Gegenteil: Heute wie damals sind Kernkraftwerke nicht privatwirtschaftlich finanzierbar und benötigen staatliche Finanzierung oder spezifische Rahmenbedingungen, wie z.B. Gebietsmonopole oder Abnahmegarantien. Im letzten Jahrzehnt sind die Stromgestehungskosten für Kernenergie noch einmal um etwa ein Drittel gestiegen, während jene der Schlüsseltechnologien im erneuerbaren Bereich dramatisch gesunken sind. Beim Neubau von Kernkraftwerken der aktuellen 3. Generation muss mit Verlusten in Höhe mehrere Milliarden US-\$ bzw. € gerechnet werden. Kernkraftwerke sind selbst im laufenden Betrieb zunehmend anderen Energieträgern kostenseitig unterlegen. Auch der Klimawandel verschlechtert die Wettbewerbsfähigkeit. So senkt zum Beispiel der klimawandelbedingte Anstieg der Wassertemperaturen den Wirkungsgrad der Kernkraftwerke. Auch sind in Zukunft häufigere Ausfällen durch klimawandelbedingte Extremereignisse (z. B. Niedrigwasser, Überschwemmungen, Tornados) zu erwarten. Laufzeitverlängerungen sind nicht nur riskant, sondern erfordern i.d.R. auch teure Nachrüstungen, die aber auch nicht garantieren können, dass die betreffenden Kernkraftwerke nicht doch aus wirtschaftlichen Gründen vorzeitig vom Netz gehen, wie im letzten Jahrzehnt mehrfach in den USA beobachtet. (Siehe auch 2.1)

7. Hohe und unsichere Kosten bei Rückbau und Endlagerung

Zusätzliche Kosten für den Rückbau, die Endlagerung sowie auch die gesellschaftlichen Kosten von Unfällen werden in diesen Wirtschaftlichkeitsrechnungen noch nicht einmal berücksichtigt. Sowohl für den Rückbauprozess als auch die Endlagerung fehlen empirische Unterlegungen für die Kostenschätzungen. Mitte 2020 befanden sich weltweit 169 Reaktoren in verschiedensten Phasen des Rückbaus, insgesamt haben jedoch nur 20 Reaktoren den Rückbau technisch abgeschlossen. Wo erste Erfahrungen vorliegen, wie etwa in Deutschland, sind die Kosten für den Rückbau enorm und gleichzeitig mit hohen Unsicherheiten verbunden. Für die Endlagerung wurden in Deutschland 2017 24,1 Milliarden € in einen sogenannten Entsorgungsfonds eingezahlt. Durch entsprechende Anlagen sollen die darin zur Verfügung gestellten Mittel später auf rund 170 Milliarden Euro ansteigen. Aus heutiger Sicht

ist weder absehbar, ob die avisierten Renditen erreicht werden können, noch ob diese Summen letztendlich ausreichen werden. (Siehe auch 2.2)

8. Energiesystembetrachtung legt rückläufige Bedeutung von Kernkraft nahe

Energiewirtschaftliche Analysen zeigen, dass die Einhaltung des 1,5–2°-Ziels ohne Kernenergie nicht nur möglich, sondern auch unter Berücksichtigung von Systemkosten mit erneuerbaren Energien kostengünstiger ist. Im Gegensatz zum in den vergangenen Jahrzehnten tatsächlich beobachteten Realisierungsgrad gehen einige internationale Organisationen wie die IEA oder IAEO bei ihren Zukunftsprognosen nach wie vor von einem erheblichen Kapazitätszubau der Kernenergie aus. Dabei sind durchweg intransparente Kostenbetrachtungen festzustellen bzw. – im Falle von Szenarien für den IPCC – infolge erheblich verzerrter Kostenannahmen keine realistischen Szenarien im Bereich der Kernkraft zu erwarten. Insgesamt weisen Szenarien, die von einem deutlichen Anstieg der Stromerzeugung aus Kernkraft ausgehen, im Regelfall mindestens eines der folgenden Merkmale auf: unrealistisch niedrige Investitionskosten für Kernkraft, veraltete und damit zu hohe Kostenannahmen bei erneuerbaren Energien und deutlich zu hohe Systemintegrationskosten von erneuerbaren Energien. (Siehe auch 2.3)

9. Unfallrisiken sind nicht versicherbar und werden sozialisiert

Risiken der Kernkraft für Menschen und Umwelt sind weltweit nicht versicherbar. Zwar sind Unfallrisiken während der Bauphase und Betriebsausfallrisiken versicherbar, nicht jedoch das wesentliche Risiko von Betriebsunfällen und der Schädigung durch Verstrahlung. Aufgrund der potenziell riesigen Schadenssummen wäre die Versicherung nicht bezahlbar, wodurch sämtliche potenzielle Schäden, jenseits von relativ geringen Pauschalbeträgen, von der Gesellschaft getragen werden. Diese Beträge sind marginal im Vergleich zu den (schwer abschätzbaren) Kosten, die mit einem nuklearen Unfall verbunden sind. Die Haftpflicht der Kernkraftwerksbetreiber trägt einen eher symbolischen Charakter. So wurden 2019 die Gesamtkosten des Unfalls von Fukushima nur am Standort sowie außerhalb des Geländes des Kernkraftwerks auf 330–760 Mrd. US \$ geschätzt. (Siehe auch 2.4)

10. Zwischenfazit: Kernkraft ist zu teuer

Kernkraft ist *zu teuer*, um in einem nachhaltigen Energiesystem einen positiven Beitrag leisten zu können. Die einzelwirtschaftliche Analyse zeigt, dass Kernkraftwerke in der kurzen Frist, selbst im laufenden Betrieb, zunehmend anderen Energieträgern kostenseitig unterlegen sind. Laufzeitverlängerungen sind nicht nur riskant, sondern auch teuer und liefern keine Garantie, dass das Kernkraftwerk nicht doch aus wirtschaftlichen Gründen vorzeitig vom Netz geht. Investitionen in neue Kernkraftwerke sind nicht profitabel. Auch eine Verlängerung der Reaktorlaufzeiten auf 60 Jahre verbessert die Ergebnisse nicht wesentlich. Zusätzliche Kosten für den Rückbau, die Endlagerung, wie auch die gesamtgesellschaftlichen Kosten von Unfällen werden in den Gesamtbaukosten noch nicht einmal berücksichtigt. Die energiewirtschaftliche

Analyse zeigt, dass die Einhaltung des 1,5°-Ziels ohne fossile Energieträger und ohne Kernenergie nicht nur möglich ist, sondern auch unter Berücksichtigung von Systemkosten der erneuerbaren Energien kostengünstig ist. (Siehe auch 2.5)

Zeitliche Verfügbarkeit

11. Wenige KKW-Neubauten weltweit

Die Anzahl von Kernkraftwerksneubauten ist bereits seit 1976 stark rückläufig. Aktuell werden weltweit lediglich 52 Kernkraftwerke gebaut, davon 15 in China, sieben in Indien und drei in Russland. In westlichen Marktwirtschaften findet mit wenigen Ausnahmen (u. a. Frankreich, Großbritannien, Finnland und USA) kein Bau von neuen Kernkraftwerken mehr statt. Jährlich werden mehr Kernkraftwerke abgeschaltet als neue in Betrieb genommen werden. Es gibt sehr wenige Länder, die neu in die Kernenergie einsteigen. Nach dem Einstieg der Volksrepublik China im Jahr 1991 mit der Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerks haben lediglich drei weitere Länder zum ersten Mal einen Reaktor in Betrieb genommen: Rumänien (1996), die Vereinigten Arabischen Emirate (2020) und Belarus (2020). Zwei weitere Länder haben mit dem Bau von Kernkraftwerken begonnen, aber noch keinen Reaktor in Betrieb genommen: Bangladesch (Baubeginn in 2017) und die Türkei (Baubeginn 2018). Ob, und wenn ja, wann diese Reaktoren Strom ins Netz einspeisen werden, ist unklar. (Siehe auch 3.1)

12. Starke Verzögerungen bei Planung und Bau

Angesichts des geringen Ausbaus in den vergangenen Jahrzehnten ist eine Vervielfachung des Kernkraftausbaus in den nächsten beiden Jahrzehnten unwahrscheinlich. Dazu kommt, dass die geplanten Bauzeiten für Kernkraftwerke systematisch unterschätzt werden. Mitte 2020 waren für die 52 im Bau befindlichen Reaktoren durchschnittlich 7,3 Jahre seit Baubeginn vergangen und viele waren noch weit von der Fertigstellung entfernt. Im letzten Jahrzehnt wurden in neun Ländern 63 Reaktoren fertiggestellt (davon 37 alleine in China), mit einer durchschnittlichen Bauzeit von fast 10 Jahren. Sollten die aktuell gebauten drei Kernkraftwerke in den USA, Frankreich und Finnland Mitte der 2020er Jahre ihren Betrieb aufnehmen, waren diese mehr als 15 Jahre im Bau, mehr als drei Mal so lang wie ursprünglich geplant. Nicht enthalten in diesen langen Zeiträumen sind Planungs-, Entwicklungs- und Lizenzierungszeiten, die noch vor einem etwaigen Baustart einzuplanen sind. (Siehe auch 3.2)

13. Konzentration von Reaktoraniern

Ein massiver Ausbau der Kernkraft scheitert aber auch an der industriellen Durchführbarkeit. Die große Anzahl von Reaktorherstellern in der Anfangszeit der Kernenergie wurde zunächst durch eine industrielle Umstrukturierung in den 1970er Jahren reduziert, da der Markt nicht groß genug war. Der Rückgang der Bautätigkeit in den 1980er Jahren förderte eine weitere Konsolidierung. Traditionelle Hersteller wie Westinghouse (USA) und Framatome (Frankreich) sind finanziell angeschlagen und nicht in der Lage, im nächsten Jahrzehnt eine große Anzahl an Neubauprojekten in

Angriff zu nehmen. Zwar ist Russland seit 2000 international zu einem aufstrebenden Anbieter geworden; daneben ist China mit einem eigenen Reaktordesign auch in diesen Markt eingetreten. Jedoch ist zu bezweifeln, dass Russland oder China in der Lage sind, eine eventuell auftretende internationale Nachfrage nach Kernkraftwerken zu versorgen. Darüber hinaus wäre diese Entwicklung auch aus geopolitischen Überlegungen bzgl. der Abhängigkeit des Energiesystems von diesen Ländern nicht anstrebenswert. (Siehe auch 3.3)

14. SMR-Konzepte („Small Modular Reactors“) auf absehbare Zeit nicht verfügbar

Vor dem Hintergrund der Bekämpfung der Klimakrise werden vermehrt SMR-Konzepte (sog. „Small Modular Reactors“) und Kernkraftwerke der sogenannten vierten Generation als mögliche Lösungen angebracht. Beide Konzeptgruppen sind nicht neu; im Gegenteil beide gehen auf die Frühzeit der Kernkraft in den 1950er Jahre zurück. Aber auch hier scheitert es an der industriellen Umsetzbarkeit und langen Zeiträumen. In den kommenden zwei bis drei Jahrzehnten ist nicht mit einem kommerziellen Einsatz zu rechnen. Die aktuell diskutierten SMR-Konzepte sind noch sehr weit von einem möglichen kommerziellen Einsatz entfernt. Aktuelle Beobachtungen zeigen, dass Planungs-, Entwicklungs- und Bauzeiten die ursprünglich geplanten Zeithorizonte in der Regel auch hier erheblich übersteigen. Aktuell diskutierte SMR-Konzepte sehen eine geplante elektrische Leistung von 1,5–300 Megawatt vor. Dies bedeutet, dass alleine zum Ersatz des aktuellen Kraftwerksparks mehrere tausend SMR-Anlagen gebaut werden müssten. Außerdem würde ein weltweiter Einsatz auch eine internationale Standardisierung der regulatorischen Anforderungen erforderlich machen. Jedoch liegen bislang keine spezifischen nationalen oder internationalen Sicherheitsstandards vor. (Siehe auch 3.4)

15. Zwischenfazit: Kernkraft ist zu langsam verfügbar

Aus der Dringlichkeitsperspektive des Klimawandels kann die Kernenergie somit keinen wesentlichen Beitrag zur Emissionsminderung leisten, weil sie *zu langsam verfügbar* wäre. Wenn, wie in Deutschland, ein Zielkorridor bis zur Klimaneutralität 2035–2045 vorausgesetzt wird, können der Neubau oder gar die Entwicklung neuer Reaktorlinien wegen der langen Entwicklungs- bzw. Bauzeiten von Kernkraftwerken keine Rolle spielen. Selbiges gilt auch für europäische bzw. globale Klimaschutzziele. (Siehe auch 3.5)

Kernkraft in der sozial-ökologischen Transformation

16. Kernkraft schafft Innovations- und Investitionsblockaden

Die Weiterführung der Kernkraft bzw. sogar evtl. der Bau neuer Kernkraftwerke gefährden den Prozess der „großen Transformation“, d.h. der sozial-ökologischen Reformen in Richtung zu einem gesellschaftlich gestützten, zukunftsfähigen, klimaneutralen Energiesystem. Im Mittelpunkt steht hierbei der Ausstieg aus allen fossilen

Energieträgern (Kohle, Öl und Erdgas) und dem gleichzeitigen Umbau des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energieträgern. Die größeren Herausforderungen sind die Überwindung von Lock-In-Effekten, die uns von fossil-fissiler Infrastruktur abhängig gemacht haben, welche auf zentralen Großkraftwerken zur Stromproduktion und einer Grundlastlogik beruht. Die Stromerzeugung durch Kernkraft und durch variable erneuerbare Energien stehen in Konkurrenz zueinander, sowohl bei der Vermarktung des erzeugten Stromes als auch im Wettbewerb um die Akquise von Forschungsgeldern zur Entwicklung von Innovationen. Gleichzeitig werden die Betreiber von Kernkraftwerken aus betriebswirtschaftlichen Gründen, also der Sicherstellung der Abnahme ihres produzierten Stromes, Investitionen in konkurrierende erneuerbare Energien stark zu beschränken versuchen. Kernkraftinvestitionen, privat- oder staatlich, stellen daher immer eine Investitionsblockade für den benötigten radikalen Ausbau der erneuerbaren Energien dar. Eine erhebliche Förderung von Kernenergieforschung und -entwicklung würde gleichsam eine Innovationsblockade für risikominimale Klimaschutztechnologien wie erneuerbare Energien und Energieeffizienz darstellen und wirkt dadurch transformationsresistent. (Siehe auch 4.1)

17. Transformationsresistenz am Beispiel von Deutschland und Japan

In Deutschland wurde im Jahre 2011 mit dem Atomgesetz die Beendigung der kommerziellen Erzeugung von Kernenergiestrom eingeleitet. Vorausgegangen war dieser Entscheidung ein jahrzehntelanger Konflikt, der in den 1970er Jahren von Umweltschützer:innen, der Zivilgesellschaft und weiteren Kritiker:innen der Kernkraft begonnen wurde; dies war gleichsam auch der Startschuss für die „Energiewende“ in Deutschland, welche 2011 entscheidend beschleunigt wurde. Auch deswegen befindet sich das Energiesystem in Deutschland in einer Situation, in welcher die Transformation hin zu einem klimaneutralen Energiesystem nicht nur technisch möglich ist, sondern sich auch als ökonomisch sinnvoll gegenüber einem Weiterbetrieb des fossil und kerntechnisch geprägten Energiesystems der Vergangenheit darstellt. Dem gegenüber steht das Beispiel von Japan, das sich als Inselnd u. a. aus Gründen der Versorgungssicherheit nach den Ölkrisen der 1970er Jahre in die scheinbar versorgungssichere Abhängigkeit von Kernenergie begeben hat. Das Ende 2020 von der japanischen Regierung gesetzte, neue Ziel „netto Nullemissionen in 2050“ ist erstens nur mit massivem Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung und zweitens dem dafür notwendigen enormen jährlichen Investitionsaufwand (für Effizienztechnologien, Erneuerbare und Wasserstoff aus Erneuerbaren) erreichbar. Solange jedoch ein endgültiges Ausstiegsdatum für die bestehenden, aber nicht genutzten nuklearen Kraftwerkskapazitäten – derzeit 24 Blöcke – ungeklärt bleibt, wird die Innovations- und Investitionsneigung für klimaverträglichere und risikoärmere Alternativen bei den Kernkraftwerksbetreibern gering bleiben.

18. Nuklearer Wasserstoff ist keine Alternative

Die Rolle des Wasserstoffes bzw. dessen Derivate wird aktuell ebenfalls kontrovers diskutiert. Fest steht, dass Wasserstoff für eine saisonale Langzeitspeicherung in ei-

nem erneuerbaren Energiesystem wichtig ist, und dass bestimmte industrielle Prozesse auf Wasserstoff angewiesen sein werden. Es ist jedoch auch klar, dass nur solcher Wasserstoff als klimaneutral bezeichnet werden kann, der aus zusätzlich installierten erneuerbaren Energien hergestellt wird. Aus technischer Sicht kann Strom aus Kernkraft die Elektrolyse betreiben und damit nuklearen Wasserstoff produzieren. Um einen Elektrolyseur wirtschaftlich betreiben zu können, braucht dieser jedoch eine hohe Auslastung (Volllaststunden), welche ein Kernkraftwerk nur durch Überschussstrom nicht bereitstellen kann. Gleichzeitig wird der nukleare Wasserstoff immer in Konkurrenz zu erneuerbar erzeugtem Wasserstoff stehen, welcher aufgrund der deutlich geringeren Stromgestehungskosten die günstigere Variante sein wird. Neue Technologien, wie zum Beispiel die Hochtemperaturdampf-Elektrolyse oder die thermochemische Wasserspaltung sind noch nicht Stand der Technik und können nicht im laufenden Jahrzehnt realisiert werden. Damit bieten diese Optionen, ungeachtet der weiteren sozio-technischen Problematiken, allein schon aufgrund der zeitlichen Dringlichkeit des Transformationsprozesses keine Lösung. (Siehe auch 4.3)

19. Atomwende als Bedingung für erfolgreiche Endlagerung

Die Beendigung der kommerziellen Nutzung von Kernkraft, und damit die Beendigung der Erzeugung zusätzlicher radioaktiver Abfälle, ist auch notwendig, um den sozio-technischen Prozess der Endlagerung erfolgreich zu bewältigen. In Deutschland fällt die atompolitische Wende gleichsam originär mit der Energiewende zusammen, entstand letztere doch vor allem aus der Anti-Atombewegung der 1960er/70er Jahre. Die Atomwende reicht weit über die bevorstehende Schließung von Kernkraftwerken und der Endlagersuche hinaus und beinhaltet u.a. die Schließung der Atomfabriken in Lingen und Gronau, den Schulterchluss der atomkritischen Staaten, das Eintreten gegen Laufzeitverlängerungen sowie die Beendigung der Subventionen von Kernkraftwerken in der EU und darüber hinaus. Auch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung in Deutschland (BASE), die Regulierungsbehörde für das Standortauswahlverfahren, hat die Atomwende als eine Erfolgsbedingung für die Endlagersuche identifiziert und Laufzeitverlängerungen oder gar den Neubau von Kernkraftwerken damit ausgeschlossen. (Siehe auch 4.4)

20. Zwischenfazit: Kernenergie ist zu transformationsresistent

Für die weltweiten Dekarbonisierungsszenarien bis 2050 sind ein stark forcierter Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung und eine massive Steigerung der Energieeffizienz als Hauptstrategien gesetzt. Für diesen fundamentalen Strukturwandel ist das Nuklearsystem und die Kernkraftproduktion in zeitlicher, ökonomischer und systemorientierter Hinsicht ein massives Innovations- und Investitionshemmnis. Japan ist für diesen strukturellen Lock-in-Effekt bisher ein besonders plastisches Negativbeispiel, Deutschland nach dem endgültigen Ausstiegsbeschluss 2011 insofern ein Positivbeispiel, weil dadurch – u.a. gestützt auf das EEG – Dynamiken für einen erneuerbaren Stromausbau möglich wurden. Doch auch nach der Beendigung der kom-

merziellen Nutzung der Kernkraft in Deutschland stellt die Herausforderung der Schaffung eines Endlagers für die hochradioaktiven Hinterlassenschaften eine gewaltige gesamtgesellschaftliche Aufgabe dar. (Siehe auch 4.5)

Fazit

Im vorliegenden Diskussionsbeitrag wird eine Vielzahl von Argumenten geprüft und am Stand der Forschung abgeglichen. Dabei bestätigt sich die Einschätzung der Scientists for Future aus dem Diskussionsbeitrag „Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland“, dass Kernenergie nicht in der Lage ist, in der verbleibenden Zeit einen sinnvollen Beitrag zum Umbau zu einer klimaverträglichen Energieversorgung zu leisten. Kernkraft ist *zu gefährlich, zu teuer und zu langsam verfügbar*; darüber hinaus ist Kernkraft *zu transformationsresistent*, d. h. sie blockiert den notwendigen sozial-ökologischen Transformationsprozess, ohne den ambitionierte Klimaschutzziele nicht erreichbar sind. Dies gilt auch für aktuelle diskutierte Laufzeitverlängerungen und Forschungsbemühungen um noch nicht etablierte Reaktorkonzepte. Angesichts der Perspektive einer technisch und ökonomisch darstellbaren Vollversorgung mit erneuerbaren Energien ist Kernkraft nicht nur keine sinnvolle Option zur Bekämpfung der Klimakrise, sondern es sollte proaktiv auf das Blockadepotenzial von Kernkraft für die sozial-ökologischen Transformation hingewiesen werden.

Langfassung

Angesichts der sich beschleunigenden Klimakrise wird die Bedeutung der Kernkraft, die derzeit ca. 10% der weltweiten Stromproduktion ausmacht, für den zukünftigen Energieträgermix diskutiert. Sowohl in Deutschland als auch international gibt es einen breiten Konsens zur raschen Beendigung der Nutzung fossiler Energieträger und den Übergang zu einem weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhendem System. Jedoch gibt es hinsichtlich der Kernkraft unterschiedliche Einschätzungen.

Einige Länder, insbesondere die fünf Länder mit permanentem Sitz im UN-Sicherheitsrat (USA, Vereinigtes Königreich, Frankreich, Russland, China) sehen auch in der Zukunft eine gewisse Bedeutung der Kernenergie² und bringen das auch in die Szenarienbildung internationaler Organisationen ein, vor allem in die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO, engl.: International Atomic Energy Agency IAEA), die Internationale Energie Agentur (IEA) sowie die Europäischen Union („European Green Deal“); diese Szenarien sehen bis 2050 steigende Stromproduktion aus Kernenergie vor.³ In vielen Szenarien des IPCC spielt Kernkraft ebenfalls eine (teilweise erhebliche) Rolle (IPCC, 2014b, 2018). Neben traditionellen Forschungsinstituten gibt es seit einigen Jahren auch zunehmend privatwirtschaftliche Unternehmen, die sich um staatlich finanzierte Forschungsaufträge bewerben, z. B. TerraPower, an der Bill Gates beteiligt ist.⁴ Auch im Bereich der Grundlagenforschung werden in Deutschland, der EU und weltweit noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten finanziert, u. a. im Bereich der Reaktorentwicklung⁵ sowie der Partitionierung und Transmutation. Zwar erfolgt in Deutschland das Ende der kommerziellen Nutzung entsprechend der 13. Novelle des Atomgesetzes (2011) zum Ende 2022, jedoch gibt es auch hierzulande eine Diskussion zur Kernkraft und zur Beteiligung deutscher Unternehmen sowie des Staates an Kerntechnik wie Anreicherung (Urenco in Gronau), Brennelementeherstellung (Lingen) und Forschung (z. B. KIT Karlsruhe).

Andererseits legen die Erfahrungen der letzten sieben Jahrzehnte mit der kommerziellen Nutzung der Kernkraft nahe, dass ein solcher Pfad mit erheblichen technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Risiken verbunden ist.⁶ Darüber hinaus weisen Entwicklungen in der Energiesystemanalyse und der Praxis darauf hin, dass eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien sowohl technisch als auch ökonomisch darstellbar ist und auch gesellschaftlich eine höhere Akzeptanz aufweist. So kamen die Scientists for Future in ihrem Diskussionsbeitrag „Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland“ zu dem Ergebnis: „Die Kernenergie ist mit großen

²Vgl. die umfassenden Länderberichte der IAEA (www.iaea.org/) sowie des World Nuclear Industry Status Report (www.worldnuclearreport.org/) (online verfügbar, abgerufen am 29. 09.2021. Dies gilt auch für alle anderen Online-Quellen dieses Berichts, sofern nicht anders vermerkt).

³European Commission, 2020; IAEA, 2020b; IEA, 2020, 2021.

⁴www.terrapower.com/ sowie Gates, 2021.

⁵www.gen-4.org/gif/ (zuletzt geprüft am 29.09.21), bzw. Frieß et al. (2021).

⁶Bracken, 2012; Davis, 2012; Pistner & Englert, 2017.

Risiken belastet und kann nicht hinreichend schnell aufgebaut werden“, sodass sie für die klimaverträgliche Energieversorgung Deutschlands keine Option ist.⁷

Vor dem Hintergrund dieser Diskussionen sowohl in Deutschland als auch in Europa und weltweit legen die Scientists for Future Deutschland die vorliegende Stellungnahme zu „Kernenergie und Klima“ vor. Nach einer eingehenden Diskussion hat sich Ende 2020 eine Arbeitsgruppe gebildet, die im Juni 2021 einen Entwurf vorgelegt hat. Nach einem Review-Prozess wird dieser Beitrag nunmehr veröffentlicht. Die Stellungnahme fokussiert auf Kernspaltung, die im Mittelpunkt der Diskussionen steht; auf Kernfusion, die noch Jahrzehnte von ernsthaften Demonstrationsanlagen entfernt ist, wird nicht eingegangen.⁸ In dem Diskussionsbeitrag werden die Argumente in vier Bereichen vertieft: Technologie und Gefahrenpotenziale (Abschnitt 1), Wirtschaftlichkeit (Abschnitt 2), zeitliche Verfügbarkeit (Abschnitt 3) sowie Kompatibilität mit dem sozial-ökologischen Transformationsprozess, ohne den ambitionierte Klimaschutzziele nicht erreichbar sind (Abschnitt 4). Abschnitt 5 zieht das Gesamtfazit.

1. Technologie und Gefahrenpotenziale

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten der Nutzung von Kernenergie. Bei der *Kernspaltung* („Fission“) zerbricht ein schwerer Atomkern in leichtere Elemente und gibt dabei Energie ab; bei der *Kernfusion* verschmelzen dagegen leichte zu schwereren Kernen und geben dabei Energie ab. Da Kernfusion als industriell nutzbare Energiequelle auf absehbare Zeit nicht zur Verfügung steht,⁹ betrachten wir an dieser Stelle nur die Kernspaltung sowie die vor- und nachgelagerten Stufen. Dabei wird insbesondere auf Probleme und Gefahrenpotenziale entlang der Prozesse eingegangen, die durch technische und menschliche Risiken bei der Kernenergie auftreten.

1.1 Das System der Kernspaltung

Die wesentlichen Schritte zur Umsetzung von Kernspaltung in große Mengen Energie erfolgten in den 1930er/40er Jahren im Kontext des Zweiten Weltkriegs zur Entwicklung von Atombomben. Im Juli 1945 fand der erste Atombombentest statt, gefolgt von den Atombombenabwürfen auf die japanischen Städte Hiroshima und Na-

⁷Gerhards et al., 2021.

⁸Die immer kostspieliger werdende Erforschung von Fusionsreaktoren könnte frühestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zu ersten Fusionskraftwerken führen, wenn die Demonstration eines funktionsfähigen Reaktors in einigen Jahrzehnten gelingen sollte (Grunwald et al., 2002). Derzeit läuft ein Langfristprojekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), welches die Grundlage eines in Zukunft zu entwickelnden Folgeprojekts legen soll, das DEMO (Demonstration Fusion Powerplant). Selbst bei optimistischer Betrachtung wäre eine Demonstrationsanlage erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts verfügbar (EUROfusion et al., 2018; Reinders, 2021). Von einer breiten Diffusion sowie einer evtl. ökonomischen Nutzung wäre man selbst dann noch weit entfernt. Die Kernfusion wird daher in diesem Text nicht weiter untersucht, da sie für eine ausreichend schnelle Transformation hin zu einer klimaverträglichen Energieversorgung nicht rechtzeitig zur Verfügung steht (Entler et al., 2018).

⁹Neles & Pistner, 2012, S. 22.

gasaki im August 1945.¹⁰ Nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs und im sich anbahnenden Kalten Krieg zwischen den USA und der Sowjetunion, in dem Atomwaffen eine strategische Bedeutung erhielten, wurden neben den militärischen auch kommerzielle Anwendungen der Kernspaltung entwickelt, vor allem für Stromerzeugung und medizinische Anwendungen. Heute trägt die Kernenergie mit ca. 10% zur weltweiten Stromerzeugung und ca. 4% zur Primärenergieversorgung bei.¹¹ Dies ist weniger als in den 90er Jahren und der Trend ist leicht rückläufig.¹²

In heutigen Kernkraftwerken wird durch die Spaltung der Kerne von Uran-235 und Plutonium-239 sowie durch den Zerfall der Spaltprodukte im Reaktor Wärme erzeugt und damit Wasserdampf hergestellt. Dieser treibt in einer Turbine einen Generator zur Elektrizitätserzeugung an. Der Wirkungsgrad solcher Anlagen liegt dabei meist bei etwa 35%. Die heute weltweit betriebenen Kernkraftwerke sind zum Großteil mit Leichtwasserreaktoren (LWR) ausgerüstet (Druck- und Siedewasserreaktoren); es kommen aber auch andere Reaktortypen zum Einsatz, z. B. Schwerwasserreaktoren und gasgekühlte Reaktoren.¹³ Sie verwenden mit dem Isotop U-235 überwiegend schwach angereichertes Uran als Brennstoff. Gleichzeitig entsteht in den Brennelementen während des Betriebs auch Plutonium. Dieses wird teilweise im Reaktorbetrieb gespalten, verbleibt aber auch in den abgebrannten Brennelementen. Ebenso entstehen Spaltprodukte, sowie durch die Spaltneutronen auch weitere Transurane.

Kernkraftwerke erfordern eine umfangreiche Infrastruktur der Ver- und Entsorgung, die mit erheblichen Gefahrenpotenzialen verbunden sind.¹⁴ Am Anfang steht der Abbau von Uran, gefolgt von dessen Aufbereitung. Es folgt die Umwandlung in Uranhexafluorid und die Anreicherung, dann die Konversion in Urandioxid und schließlich die Fertigung der Brennelemente.

Nach ihrem Einsatz im Reaktor werden die Brennelemente zunächst in den Abklingbecken der Kernkraftwerke, später in speziellen Zwischenlagern aufbewahrt. Nachdem die Radioaktivität und damit auch die Wärmeentwicklung im ausgedienten Brennstoff abgenommen haben, müssen die immer noch hochradioaktiven Brennelemente dauerhaft verpackt und eingeschlossen werden. Da nicht alle diese Schritte am selben Ort durchgeführt werden, sind mit dem Betrieb von Kernkraftwerken immer auch eine Vielzahl von Transporten mit teils hochradioaktiven Abfällen verbunden, die ein potenzielles Sicherheitsrisiko darstellen.

Neben dem ausgedienten Brennstoff entstehen auch andere Arten radioaktiver Abfälle.¹⁵ So entstehen beim Uranabbau radioaktiver Abraum und Schlamm. Insbeson-

¹⁰ Groves, 1983.

¹¹ BP, 2020.

¹² Schneider et al., 2020.

¹³ Eine detaillierte technische Übersicht geben u. a. Neles & Pistner (2012).

¹⁴ Die Schritte der Ver- und Entsorgung insgesamt werden manchmal als Brennstoffkreislauf bezeichnet. Dieser Begriff ist jedoch irreführend, da, wenn überhaupt, nur ein geringer Teil der abgebrannten Brennstoffe tatsächlich rezykliert wird (Brunnengräber & Di Nucci, 2019).

¹⁵ Eine detaillierte Übersicht findet sich in Der Welt-Atommüll-Bericht (2019).

dere beim Betrieb der Kernkraftwerke fallen schwach- und mittelradioaktive Betriebsabfälle an, die ebenfalls endgelagert werden müssen.

Nach der Kernspaltung enthält der ausgediente Brennstoff noch spaltbare Stoffe (insbesondere U-235 und Pu-239). Vereinzelt wird der Brennstoff nach dem Einsatz im Kraftwerk wiederaufgearbeitet. Das Plutonium wird dabei für die Herstellung neuer, sogenannter Mischoxid-Brennelemente (MOX) eingesetzt. Bei diesen primär chemischen Vorgängen entstehen zusätzliche radioaktive Abfallströme, schwach- und mittelradioaktive Abfälle ebenso wie hochradioaktive Reststoffe, deren Strahlung mit jener von ausgedienten Brennelementen vergleichbar ist. Neben den technischen Anlagen zur Bewältigung dieser Abfallströme wird zusätzliche Infrastruktur in Form von Aufbereitungsanlagen und Brennelementefabriken benötigt.

Nach Ablauf der Betriebszeit werden die Kernenergie-Anlagen stillgelegt und rückgebaut. Auch dabei entstehen erhebliche Mengen von Abfällen, die teilweise radioaktiv sind.¹⁶

Letzte Stationen sind die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle. Die Zwischenlagerung findet heutzutage in den meisten Fällen am Standort der Kernkraftwerke oder in größeren überregionalen Zwischenlagern statt. Ein Teil lagert in Trockenlagern in Behältern, die die Umwelt vor dem größten Teil der von den Brennelementen ausgehenden Strahlung schützen und die zudem einen Schutz gegen Störungen von außen bieten sollen. Der Großteil der abgebrannten Brennelemente lagert aber relativ ungeschützt in sogenannten Nasslagern, in Abklingbecken oder ähnlichen mit Wasser gefüllten Lagern, die kontinuierlich überwacht werden müssen. Allein in Europa lagern noch rund 80% der abgebrannten Brennelemente in Nasslagern.¹⁷ Da diese Nasslagerung – im Gegensatz zur trockenen Zwischenlagerung – keine Sicherheitsbehälter vorsieht, fehlt hier eine Sicherheitsebene.¹⁸ Derzeit gibt es in fast allen Staaten, die Kernkraftwerke betreiben, das Bestreben, langfristig abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle in tiefengeologische Endlager zu verbringen. Mittel- und schwachradioaktive Abfälle werden teils oberflächennah entsorgt, teils ebenfalls in großer Tiefe eingelagert. Jedoch ist weltweit noch kein einziges tiefengeologisches Endlager für hochradioaktiven Müll aus Kernkraftwerken in Betrieb. In Finnland wird zurzeit das weltweit erste tiefengeologische Endlager errichtet, dessen Ausbau auch während des Betriebes weitergeführt werden soll. Aktuell fehlt noch die Betriebsgenehmigung, die Aufnahme des Betriebs soll 2025 erfolgen.¹⁹

¹⁶ Wealer et al., 2019.

¹⁷ Der Welt-Atommüll-Bericht, 2019.

¹⁸ BASE, 2021.

¹⁹ Lehtonen, 2021.

1.2 Kernkraftwerke – Gefahren und Probleme

1.2.1 Überblick über die Probleme in Kernkraftwerken

Für den Bau und den Betrieb von Kernkraftwerken müssen drei Schutzziele²⁰ beachtet werden: a) der sichere Einschluss der radioaktiven Brennelemente und anderer Gefahrstoffe, b) die Kontrolle der Leistung („Reaktivität“), sowie c) die Abführung der im Reaktorkern entstehenden Wärme und die Kühlung der Brennelemente. Weitere Probleme in vor- bzw. nachgelagerten Bereichen werden im Anschluss diskutiert.

Die Wärmeerzeugung im Reaktor lässt sich nicht sofort vollständig zurückfahren. Etwa 93% der Wärmeleistung kommen aus der Kettenreaktion der Kernspaltung und können durch Abschaltvorrichtungen mit hoher Zuverlässigkeit gestoppt werden. Die restlichen 7% liefert jedoch der radioaktive Zerfall von Spalt- und Aktivierungsprodukten, der auch nach einer Reaktor-Abschaltung weiterläuft.²¹

Wird daher der Brennstoff im Reaktor nach dem Abschalten nicht dauernd angemessen gekühlt, überhitzt er sich. Exotherme chemische Reaktionen verstärken ab einer gewissen Temperatur die Aufheizung. Im Extremfall kommt es zur Kernschmelze, verbunden mit dem Freiwerden großer Mengen radioaktiver Stoffe im Reaktorgebäude innerhalb des Sicherheitseinschlusses (Containment). Versagt das Containment, werden radioaktive Nuklide in die Umwelt freigesetzt, wobei die Menge abhängig von Zeitpunkt und Art des Versagens ist. Bei flüchtigen Substanzen kann dies ein erheblicher Anteil des Gesamtinventars der Radioaktivität sein.

Ausgediente Brennelemente in Abklingbecken müssen gekühlt werden, um ein Schmelzen der Brennelemente zu vermeiden. Im Verlauf der Abklingzeit des Brennstoffs werden die Anforderungen an die Kühlung geringer und Kühlungsausfälle können für begrenzte Zeiträume noch aufgefangen werden. Zu beachten ist allerdings: Da die Abklingbecken oft auch als Zwischenlager genutzt werden, sind die in ihnen liegenden Mengen langlebiger radioaktiver Stoffe erheblich größer als im Reaktor. Da sich die Abklingbecken zudem nur in wenigen Fällen innerhalb des Containments befinden, sind unkontrollierte, schwere Freisetzungen von Radioaktivität aus den Becken möglich, insbesondere bei einem Brand.²²

Ein weites Spektrum von Ereignissen, kann zu derartigen Unfällen führen:

- Technische Ausfälle (z. B. Versagen von Pumpen, Ventilen, Rohrleitungen, Behältern...) aufgrund von Mängeln bei Auslegung, Fertigung, Wartung, Reparatur oder Prüfungen.
- Übergreifende Einwirkungen von innen (z. B. Brände, interne Überflutung) aufgrund von technischen Ausfällen oder menschlichem Fehlverhalten.
- Einwirkungen von außen mit natürlichen Ursachen (z. B. Erdbeben, Extremwetter, externe Überflutung).

²⁰ Neles & Pistner, 2012.

²¹ Dieser Teil der Wärmeproduktion nimmt nach einer Stunde auf ca. 1,5% ab und nach einem Tag auf knapp 1%. Danach geht er nur allmählich zurück, weswegen auch der ausgediente Brennstoff in der Regel jahrelang aktiv gekühlt werden muss.

²² von Hippel et al., 2019, Kapitel 5.

- Anthropogene, unfallbedingte Einwirkungen von außen (z. B. Unfälle in nahegelegenen Fabriken oder auf Transportwegen, Flugzeugabstürze).
- Böswilliges menschliches Eingreifen in Form von Sabotageakten oder Terrorangriffen.
- Kriegseinwirkungen.

Ein Kernkraftwerk wird bei seiner Errichtung für eine bestimmte Betriebszeit ausgelegt und bewilligt. Eine Verlängerung über die ursprünglich geplante Betriebszeit hinaus kann wegen der Alterung der Materialien von Strukturen, Systemen und Komponenten und wegen veränderter klimatischer Bedingungen zu erhöhter Gefahr von Aus- und Unfällen führen. Während der sehr langen Betriebszeiten der meisten in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke hat sich der Stand von Wissenschaft und Technik so grundlegend weiterentwickelt, dass es oft nicht möglich ist, die Sicherheitskonzepte auf den neuesten Stand nachzurüsten. Abgesehen davon kann das Veralten von Technologien die Beschaffung von Ersatzteilen erschweren oder verunmöglichern (siehe auch Abschnitt 1.2.4).

1.2.2 Sicherheitsanforderungen

Den mit dem Betrieb von Kernkraftwerken verbundenen Risiken und Gefahrenpotenzialen soll mit einem System gestaffelter Sicherheitsebenen im Schadensfall begegnet werden. Ziel ist, sämtliche Anlagenzustände vom Normalbetrieb bis zu Kernschmelzunfällen (einschl. Brennstoffschmelze im Lagerbecken, üblicherweise aber nicht Brände) abzudecken. Auf jeder dieser Zustandsebenen sind Einrichtungen und Maßnahmen vorgesehen, welche die Situation beherrschen und ein Übergreifen auf die nächste Sicherheitsebene verhindern sollen.²³

Viele Unfälle entwickeln sich schrittweise und schreiten von Ebene zu Ebene fort, d. h. erst nach Versagen mehrerer Sicherheitsebenen kann es zu großen Freisetzungen von Radioaktivität kommen. Es gibt jedoch auch Unfallabläufe, bei denen Ebenen übersprungen werden können, etwa das Versagen des Reaktordruckbehälters.

Diesem versucht die EU-Richtlinie 2014/87/Euratom zur nuklearen Sicherheit Rechnung zu tragen. Sie unterscheidet zunächst zwei Unfallkategorien: (1) Unfälle, bei denen es frühzeitig zu Freisetzung von Radioaktivität kommt und die eigentlichen Maßnahmen des Katastrophenschutzes erfordern würden, bei denen aber aufgrund des Unfallablaufs keine Zeit zum Ergreifen solcher Maßnahmen zur Verfügung steht; (2) Unfälle mit großen Freisetzungen radioaktiver Stoffe, die Schutzmaßnahmen erfordern würden, welche in Raum und Zeit nicht begrenzt sind. Die EU-Richtlinie fordert, dass solche Ereignisse bei Entwurf und Bau neuer Kernkraftanlagen vermieden werden. Diese Forderung gilt auch als Referenz für bestehende Anlagen, allerdings mit der wesentlichen Einschränkung, dass solche Maßnahmen „vernünftig umsetzbar“ seien müssen, d. h. der Aufwand ist im Vergleich zum sicherheitsmäßigen Nutzen nicht unverhältnismäßig groß.²⁴

²³ WENRA, 2013; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit & Cloosters, 2015; Hirsch, Becker & Nünighoff, 2018.

²⁴ WENRA, 2017; The Council of the European Union, 2014.

Dafür muss nachgewiesen werden, dass sämtliche Szenarien, die zu derartigen Freisetzungen führen, praktisch ausgeschlossen werden können. Praktisch ausgeschlossen bedeutet: solche Unfallszenarien sind entweder physikalisch unmöglich oder sie sind mit hoher Zuverlässigkeit äußerst unwahrscheinlich. Meist wird versucht, die Nachweise über das zweite dieser Kriterien zu führen. Für diesen Fall des Nachweises nach dem zweiten Kriterium („mit hoher Zuverlässigkeit äußerst unwahrscheinlich“) muss dieser sowohl deterministische als auch probabilistische Anforderungen erfüllen.²⁵

1.2.3 Möglichkeiten und Grenzen probabilistischer Sicherheitsanalysen

Befürworter der Kernenergie argumentieren häufig mit Wahrscheinlichkeiten, um zu belegen, dass die Risiken der Kernenergie gering sind, keinesfalls aber höher als die anderen Formen der Elektrizitätserzeugung. Dies bezieht sich insbesondere auf den Vergleich mit fossilen Energieträgern wie Kohle, die pro Megawattstunde erzeugtem Strom mehr statistische Todesfälle zur Folge haben soll.²⁶ Auch das „Technical assessment of nuclear energy“ des Joint Research Centre der Europäischen Kommission beruft sich auf Ergebnisse von sogenannten probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA).²⁷ Diesen Analysen und den damit verbundenen probabilistischen Anforderungen kommt somit eine zentrale Rolle in der Diskussion um die Kernenergie zu.

Eine PSA ist gemäß der Definition der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) eine umfassende, strukturierte Vorgehensweise zur Identifizierung von Versagens-Szenarien und deren Folgen, die ein konzeptionelles und mathematisches Werkzeug zur Ableitung numerischer Schätzwerte für das Risiko darstellen soll.²⁸ In der Folge wird erörtert, inwieweit dieser Anspruch zutreffend ist.

Der wichtigste Nutzen einer PSA besteht darin, Schwachstellen einer Anlage zu erkennen und daraus ein Verbesserungspotenzial abzuleiten.²⁹ Die in einer PSA ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Unfällen sowie die damit verbundenen Freisetzungen dagegen sind wenig belastbar, weil die Schätzungen notwendigerweise mit einem hohen Maß an subjektiven Einschätzungen verbunden sind.³⁰ Die Ergebnisse mögen darstellen, dass große Freisetzungen äußerst unwahrscheinlich sind – die Zuverlässigkeit derartiger Aussagen ist jedoch nicht hoch. PSA können die Realität nicht vollständig abbilden, und es ist aus heutiger Sicht offen, in welchem Ausmaß die Zuverlässigkeit tatsächlich gesteigert werden kann. U. a. zeigen die tatsächlich

²⁵ Deterministische Anforderungen sind Festlegungen, welche sich auf die Auslegung der Anlage, Maßnahmen zur Beherrschung von Unfällen, Analysen von Unfallabläufen und ähnlichem beziehen. Probabilistische Anforderungen beziehen sich auf die Unterschreitung quantitativ festgelegter Unfallwahrscheinlichkeiten (RHWG, 2019).

²⁶ ourworldindata.org/grapher/death-rates-from-energy-production-per-twh (zuletzt geprüft am 29.9.2021).

²⁷ JRC, 2021, S. 175.

²⁸ IAEA, 2019, S. 7 (Es gibt drei PSA-Stufen: PSA Level 1 analysiert Unfallabläufe, die zur Kernschmelze führen können. Level 2 baut auf den Ergebnissen von Level 1 auf und ermittelt das Verhalten des Sicherheitseinschlusses (Containment) sowie die resultierenden radioaktiven Freisetzungen bei Kernschmelzunfällen. In Level 3 werden die radiologischen Folgen ermittelt.).

²⁹ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 2005.

³⁰ Hirsch & Inradiningrat, 2012; Pistner, Englert, & Wealer, 2021.

aufgetretenen Ereignisse in Kernkraftwerken die Grenzen von PSA. So können etwa komplexes menschliches Fehlverhalten, gemeinsam verursachte Ausfälle oder Alterungsvorgänge in derartigen Studien nur unvollkommen erfasst werden, weitere Faktoren überhaupt nicht, wie zum Beispiel neue, bisher unbekannte physikalische und chemische Phänomene (etwa Korrosionserscheinungen beim Einsatz neuer Werkstoffe oder Ansammlung von Wasserstoffgas an unerwarteten Stellen) sowie unerwartete Ereignisse. Ferner ist es unmöglich, Terror- oder Sabotagehandlungen in PSA zu berücksichtigen.

Im Jahrzehnt vor dem Fukushima-Unfall 2011 traten Ereignisse ein, die in dieser Form nicht vorhergesehen, und daher in PSA nicht berücksichtigt worden waren. Einige hatten das Potenzial zu Unfällen mit frühen und/oder großen Freisetzen zu führen, aber glückliche Zufälle haben dies verhindert:

- Davis Besse (USA) 1999–2002 – Mangelhafte Sicherheitskultur: Korrosion des Reaktordruckbehälterdeckels blieb unbemerkt, bis die Restwandstärke fast nur noch aus Plattierung bestand. Diese war nicht dafür ausgelegt, dem Innendruck standzuhalten.³¹
- Forsmark (Schweden) 2006 – Ausfall der Gleich- und Wechselrichter in zwei von insgesamt vier Notstromanlagen während eines Störfalls. Ursache waren ungünstig gesetzte Schutzkriterien bei allen vier Strängen. Es war reiner Zufall, dass zwei Stränge nicht ausfielen.³²
- Biblis (Deutschland) 2006 – Mängel an der Schnittstelle von Anlagen- und Bautechnik: In beiden Blöcken waren insgesamt 7 500 Dübel fehlerhaft montiert, mit denen u.a. sicherheitstechnisch wichtige Rohrleitungen befestigt waren. Die Dübelverbindungen waren 2002 nachgerüstet worden, um die seismische Widerstandsfähigkeit des Kernkraftwerks zu erhöhen.³³
- Cruas (Frankreich) 2009 – unvorhergesehene Einwirkung von außen: Schnell ansteigender Wasserstand der Rhône führte dazu, dass eine große Menge von Wasserpflanzen in die Einlaufbauwerke des Kernkraftwerks gespült wurde. In einem der vier Blöcke kam es zu Totalausfall der Kühlwasserversorgung, in zwei weiteren zum Teilausfall. Es war Zufall, dass kein Totalausfall eintrat.³⁴

All diese Ereignisse wurden nachträglich genau analysiert, und haben den Erfahrungsschatz erweitert. Das ändert aber nichts daran, dass unvorhergesehene Ereignisse und Fehlerketten weiterhin möglich und infolge der Komplexität der Systeme³⁵ auch nicht auszuschließen sind.

1.2.4 Alterung von Kernkraftwerken

Bei einer Laufzeitverlängerung, also der Verlängerung der Betriebszeit älterer Kernkraftwerke, die über die bei der Genehmigung geplante Betriebszeit hinaus geht,

³¹ Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2014.

³² Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen, 2007.

³³ energie-chronik.eu/061006.htm (zuletzt geprüft am 29.09.2021) bzw. Wealer, von Hirschhausen, et al. (2021).

³⁴ Hirsch & Indradiningrat, 2012.

³⁵ Perrow, 1992.

können sich die Sicherheitsproblem verschärfen.³⁶ Die Wahrscheinlichkeit, dass unerwartete Probleme auftauchen, steigt, weil herstellungsbedingte Fehler erst durch neue Prüftechniken entdeckt werden (wie im Falle von Doel-3/Tihange-2 in Belgien), Alterungsphänomene oder nicht berücksichtigte Extremwetterereignisse auftreten.³⁷ Durch ein umfassendes Alterungsmanagement soll gewährleistet werden, dass ein sicherer Betrieb weiterhin möglich ist. Dieses Thema war in den letzten Jahren Gegenstand erhöhter Aufmerksamkeit. Die EU-Richtlinie 2014/87/EURATOM zur nuklearen Sicherheit schreibt vor, dass im Abstand von sechs Jahren EU-weite Peer Reviews zu einem Fragenkomplex der nuklearen Sicherheit durchgeführt werden sollen.³⁸ Der erste dieser Peer Reviews betraf das Alterungsmanagement; es beteiligten sich alle 16 EU-Mitglieder, die Kernkraftwerke oder Forschungsreaktoren betreiben, sowie Norwegen, die Schweiz und die Ukraine. Im Endbericht wird zusammenfassend betont, dass an den betrachteten Kernkraftwerken keine größeren Mängel festgestellt worden wären. Tatsächlich wurden jedoch im Einzelnen durchaus verschiedene ernste Probleme identifiziert, etwa bei der Inspektion verdeckter Rohrleitungen und der Festlegung von Akzeptanzkriterien für die Degradation von Betonstrukturen.³⁹

Der EU-Peer Review konzentrierte sich auf die physische Alterung von ausgewählten Strukturen, Systemen und Komponenten. Um ein umfassendes Bild zu erhalten, müssten allerdings noch zwei weitere Komponenten der Alterung einbezogen werden: Veralten (konzeptionelle und technologische Alterung) sowie Kompetenz- bzw. Know-how-Verlust durch Ausscheiden von Erfahrungsträgern. Im Zusammenhang mit der Laufzeitverlängerung gealterter Kernkraftwerke ist weiterhin zu berücksichtigen, dass neue Bedrohungsszenarien hinzukommen, die im ursprünglichen Design der Anlagen beim Bau noch nicht angemessen berücksichtigt werden konnten. (z. B. Terrorangriffe sowie Natureinwirkungen als Folgen des Klimawandels).⁴⁰

Insgesamt ist davon auszugehen, dass Alterungsprozesse das Risiko von Störungen und Störfällen erhöhen und insbesondere Laufzeitverlängerungen die Risiken deutlich erhöhen. Die ursprünglich vorhandenen Sicherheitsreserven von Kernkraftwerken bauen sich durch Alterung der Anlagen ab, zugleich sind die Möglichkeiten von Nachrüstungen vermindert.⁴¹ In der Praxis ist es nicht möglich, physische Alterungsvorgänge und die anderen hier genannten Komponenten in umfassender und angemessener Form in PSA abzubilden.

1.2.5 Unfälle und Störungen

Seit Beginn der Nutzung der Kernenergie kam es immer wieder zu Störungen mit teilweise erheblichen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt. Zwar sind die als

³⁶ Laufzeitverlängerungen gehen über die ursprünglich vorgesehene Genehmigungsdauer hinaus. Sie unterscheiden sich i. d. R. von Restlaufzeiten, die in Deutschland (und anderswo) für verbleibende Kernkraftwerke politisch verhandelt werden können.

³⁷ INRAG et al., 2021.

³⁸ Rat der Europäischen Union, 2014.

³⁹ ENSREG, 2018.

⁴⁰ INRAG et al., 2021.

⁴¹ INRAG et al., 2021.

katastrophal klassifizierten Unfälle selten, jedoch gibt es eine Vielzahl von Zwischenfällen und von Ereignissen, die nur durch Zufall nicht zu Unfällen geführt haben.⁴²

Neben Fukushima ist auch der Unfall im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl von der IAEA als katastrophal klassifiziert (INES-Skala 7). Dort kam es am 26. April 1986 während der Durchführung eines vorgeschriebenen Tests zu einem drastischen Leistungsanstieg, der zur Explosion des Reaktors Nr.4 und anschließenden, langanhaltenden Bränden führte.⁴³ Tausende von als „Liquidatoren“ bezeichnete Arbeiter wurden bei den Rettungsarbeiten stark verstrahlt. Die entstandene radioaktive Wolke breitete sich über die Nord-Ukraine, Weißrussland bis nach Mittel- und Westeuropa aus.⁴⁴

Im Kernkraftwerk Three Mile Island in Harrisburg (TMI, Pennsylvania, USA) fielen 1979 zwei Hauptspeisepumpen aus. Durch Bedienungsfehler bei der Reaktorkühlung kam es zu einer Teil-Kernschmelze und der Freisetzung großer Mengen radioaktiver Gase, das Versagen des Reaktordruckbehälters konnte gerade noch verhindert werden.⁴⁵

In einer statistischen Analyse von 216 kerntechnischen Zwischenfällen wurde festgestellt, dass es in jeder Dekade seit den 1970er Jahren schwere Unfälle und eine Vielzahl kleinerer Zwischenfälle gab.⁴⁶ Dieser Analyse zufolge kommt es, bezogen auf den weltweiten Kraftwerkspark, mit einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit alle 60 bis 150 Jahre zu einem Zwischenfall mit Ausmaßen des Fukushima-Unglücks. Ein Vorfall wie im US-Kernkraftwerk Three Mile Island bei Harrisburg (Pennsylvania, USA) würde demnach alle zehn bis 20 Jahre auftreten.

Besonders besorgniserregend ist, dass den Unfällen, Beinahe-Unfällen und Ereignissen dieselben strukturellen Probleme zugrunde liegen, die zwar nicht kernenergiespezifisch sind, sondern vielen komplexen, technologischen Systemen inhärent sind, aber im Bereich der Kernenergie besonders dramatische Auswirkungen haben können.⁴⁷ Zu diesen zählen fehlende unabhängige Kontrollen (checks and balances), Intransparenz, Vertuschung und Geheimhaltung, ökonomische Rücksichten und mangelnde Berücksichtigung schwerer Unfälle bei Genehmigungen sowie Fehler in der Einschätzung.⁴⁸ Als spezifisch für die Nuklearindustrie wird eine internationale „nukleare Allianz“ beobachtet, deren primäres Interesse nicht Sicherheit, sondern das Abwenden von Schaden für die nuklearen Interessen sei.⁴⁹

1.2.6 Fukushima und danach

Dass unerwartete Ereignisse nicht immer mit glücklichen Zufällen verbunden sind, die das Schlimmste verhindern, zeigte sich im März 2011 im Kernkraftwerk Daiichi

⁴² Liebert et al., 2016 bzw. Wealer, von Hirschhausen Christian, et al. (2021).

⁴³ Müllner, 2016, 57–74.

⁴⁴ Petryna, 2011.

⁴⁵ Walker, 2005.

⁴⁶ Wheatley et al., 2017, bzw. zu statistischen Analysen: Rose & Sweeting (2016).

⁴⁷ Perrow, 1992.

⁴⁸ Kromp & Kromp-Kolb, 2016; NAIIC et al., 2012; Perrow, 1992.

⁴⁹ Nucleonics Week, 1991; Renneberg, 2015.

in Fukushima. Ein schweres Erdbeben, gefolgt von einem Tsunami, führte zu einer dreifachen Kernschmelze, verbunden mit großen Freisetzungen von Radioaktivität.

Die Blöcke 1 bis 4 waren gegen eine Tsunamihöhe von ca. 6 m geschützt – auf Basis von Berechnungen aus 2002, die im Bereich dieser Blöcke eine Höhe von maximal 5,7 m voraussagten. Erneute Untersuchungen in den Jahren 2006 bis 2009 ergaben eine maximal mögliche Höhe von 9,3 m. Der Jogan-Tsunami im Jahr 869 hatte nach den Rekonstruktionen noch größere Ausmaße erreicht, doch ist umstritten, inwieweit das als ausreichende Basis zur Vorhersage weiterer Tsunami geeignet ist.⁵⁰ Bis März 2011 wurden noch weitere Auswertungen durchgeführt, die jedoch zu keinen konkreten Ergebnissen führten: Es wurden jedenfalls keine Maßnahmen ergriffen, um den Schutz gegen Tsunami zu verbessern. Ähnlich verhält es sich mit den Auslegungswerten für Erdbeben: Es wurden „worst case“-Szenarien nicht berücksichtigt. Eine wissenschaftliche Studie, die darlegte, dass wesentlich stärkere Erdbeben auftreten könnten als angenommen, wurde im Frühjahr 2010 dem zuständigen Headquarter of Earthquake Research Promotion übermittelt, erregte auch in japanischen Medien viel Aufsehen, veranlasste aber weder Kernkraftwerksbetreiber noch die Aufsichtsbehörde, Maßnahmen – und sei es auch nur zur Information der Bevölkerung – zu ergreifen.⁵¹

Das tatsächliche Tsunami- Ereignis am 11. März übertraf dann auch noch die neueren Ergebnisse – mit einer Auflaufhöhe von 14–15 m direkt im Bereich der Blöcke 1 bis 4 des KKW Daiichi.⁵² Hier waren also zwei Faktoren wirksam, die in PSA nicht berücksichtigt werden können: Zum einen zögerliches Handeln beim Umsetzen neuer Ergebnisse über Gefahren, zum anderen ein Naturereignis, das über die vorliegenden Schätzungen hinausging. Es bleibt offen, inwieweit ein rasches Umsetzen der neuen Ergebnisse den Unfallablauf zumindest abgemildert hätte.

PSA Level 1 und 2 betrachten darüber hinaus jeweils nur einzelne Kernkraftwerksblöcke, die gleichzeitige Betroffenheit von zwei oder mehr Blöcken, die wesentlich höhere Anforderungen an Katastrophenschutzmaßnahmen stellen, war bis Fukushima in den Risikoanalysen nicht üblich.

Der Unfall von Fukushima löste internationale Bestrebungen zur Verbesserung der Sicherheit von Kernkraftwerken aus. Beim EU-Stresstest für Kernkraftwerke im darauffolgenden Jahr wurden Naturereignisse als Auslöser sowie Folgen des Ausfalls von Sicherheitsfunktionen und Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes betrachtet. Besondere Aufmerksamkeit galt Ereignissen bzw. Ereigniskombinationen, die bisher als zu weit hergeholt galten und daher nicht bzw. nicht systematisch betrachtet wurden. Der Stresstest, der im Wesentlichen aus einer Selbstevaluierung der Kernkraftwerksbetreiber zusammen mit den jeweils zuständigen Aufsichtsbehörden bestand, führte zu Einsichten und Empfehlungen zu Nachrüstungen. Allerdings verzögerte sich die Umsetzung der Nachrüstungen erheblich. So waren zum

⁵⁰ Sugawara et al., 2012.

⁵¹ Okamura, 2012.

⁵² Internationale Atomenergie-Organisation, 2015.

Zeitpunkt des Erscheinens des gegenständlichen Berichts, zehn Jahre nach dem Unfall, an manchen Kernkraftwerken wichtige Maßnahmen immer noch nicht umgesetzt.⁵³

Das Grundproblem der nuklearen Sicherheit im Allgemeinen und von PSA im Besonderen konnte dadurch nicht gelöst werden – es muss auch weiterhin mit unvorhergesehenen Problemen und Abläufen gerechnet werden.

Im Juni 2014 wurde im Kernkraftwerk Leibstadt (Schweiz) festgestellt, dass die Halterungen zweier Feuerlöcher durch wanddurchdringende Bohrungen an der Stahlwand des Containments angebracht waren. Diese Halterungen waren 2008 von externen Mitarbeitern montiert worden. Das Containment hat in allen Betriebszuständen vom Normalbetrieb bis zum schweren Unfall eine wichtige Barrierefunktion beim Einschluss radioaktiver Stoffe. Dennoch blieb seine Beschädigung fast sechs Jahre lang unentdeckt. Aus Sicht der schweizerischen Atomaufsichtsbehörde ENSI zeigt das Vorkommnis bedeutende organisatorische Mängel. ENSI geht aber davon aus, dass der Einschluss der Schadstoffe dennoch auch unter Störfallbedingungen gewährleistet gewesen wäre.⁵⁴ Bei einem Kernschmelzunfall wäre jedoch – abhängig vom Szenario – eine deutliche Erhöhung der radioaktiven Freisetzungen über das Erwartete hinaus möglich gewesen.

2012 wurde bei Ultraschallprüfungen mit einer neu eingeführten Methode in den Reaktordruckbehältern der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 und Tihange-2 eine große Anzahl von möglicherweise wasserstoffinduzierten Rissen festgestellt. Nach umfangreichen weiteren Prüfungen und Analysen kam die belgische Atomaufsichtsbehörde FANC zu dem Schluss, dass es sich um herstellungsbedingte Risse handelte, für die während des Betriebes kein Wachstum festgestellt worden sei. Laut FANC konnten alle Sicherheitsbedenken zufriedenstellend gelöst werden; sie autorisierte die Wiederaufnahme des Betriebes um die Jahreswende 2015/16. Die deutsche Reaktorsicherheitskommission stimmte FANC in vielen Punkten zu, wies jedoch darauf hin, dass die Frage nach einer ausreichenden experimentellen Absicherung der Berechnungsmethoden für Rissfelder noch offen sei und die Konservativität der Rechenmethoden nicht nachgewiesen sei.⁵⁵ Noch weiter in der Kritik geht INRAG, ein Netzwerk unabhängiger, internationaler Nuklearexpert:innen. Sie betonen, dass ein Risswachstum während des Betriebs nicht ausgeschlossen werden könne, und kritisieren die angewandte bruchmechanische Methodik als teilweise nicht validiert.⁵⁶

Es handelt sich hier um ein besonders kritisches Problem. Der Reaktordruckbehälter eines Leichtwasserreaktors ist das Herzstück der Anlage und enthält den nuklearen Brennstoff während des Betriebes bei hohem Druck und hoher Temperatur. Versagt dieser Behälter großflächig, kommt es zu einem schweren Unfall mit großen, frühzeitigen Freisetzungen. Die verbleibende technische Ebene der gestaffelten Sicherheitsebenen, das Containment, ist für diesen Fall nicht ausgelegt. Die Severe Accident Management Guides, die letzte Sicherheitsebene, können den schweren Unfall

⁵³ Hirsch, 2016; Hirsch et al., 2018.

⁵⁴ ENSI, 2014a, 2014b.

⁵⁵ RSK/ESK-Geschäftsstelle, 2019.

⁵⁶ INRAG et al., 2018.

mit Freisetzung von Radioaktivität nur mehr verzögern und mildern, aber nicht verhindern. Dennoch durfte die Anlage trotz fundierter fachlicher Zweifel wieder in Betrieb gehen.

Die angemessene Berücksichtigung von Naturereignissen bleibt auch nach Fukushima unzureichend. Bei dem geplanten ungarischen Kernkraftwerk Paks II etwa geht die ungarische Atomaufsichtsbehörde HAEA davon aus, dass am Standort wesentliche Oberflächenverschiebungen durch seismische Ereignisse auf einer Zeitskala von 100 000 Jahren nicht zu erwarten sind. Eine kürzlich veröffentlichte Studie verweist hingegen auf Verwerfungen, die in den letzten 20 000 Jahren eingetreten sind.⁵⁷ Derartige Oberflächenverschiebungen haben das Potenzial, einen Unfall mit großen und frühzeitigen Freisetzungen hervorzurufen. Ein solcher Unfall müsste gemäß den derzeitigen Sicherheitsanforderungen praktisch ausgeschlossen werden (siehe 2.2.3). Selbst die Demonstration einer Wahrscheinlichkeit von 1:100 000 pro Jahr hätte eine Genehmigung ausschließen müssen.

1.2.7 Klimawandel und Risiken

Neben Erdbeben stellen auch andere Naturereignisse wichtige Gefahrenmomente dar. Diese werden durch den Klimawandel verschärft; es treten Veränderungen in den meteorologischen Verhältnissen auf, die im Einzelnen nicht immer vorhersehbar sind.

Die klimatischen Verhältnisse per se stellen – sieht man von einigen extremen Standorten ab – keine Einschränkung für den Einsatz von Kernenergie dar. Probleme können aber entstehen, wenn sich die klimatischen Verhältnisse während der Betriebszeit von Kernkraftwerken derart verändern, dass die Genehmigungsvoraussetzungen nicht mehr oder nicht mehr ohne Nachrüstungen erfüllt sind. Von den rund 70 natürlichen und menschengemachten Bedrohungen, die bei der Genehmigung von Kernkraftwerken zu berücksichtigen sind, können etwa 75 % von Klimaänderungen beeinflusst sein⁵⁸. Der gegenwärtige, menschenverursachte Klimawandel kann die Sicherheit von Kernkraftwerken durch extreme Wetterereignisse gefährden, die entweder wesentlich häufiger oder in extremerer Form auftreten, als bei der Genehmigung angenommen wurde.⁵⁹ Erhöhte Niederschlagsintensitäten, eventuell kombiniert mit unzureichend dimensionierten Rückhaltebecken und Stauräumen, heftige Gewitter, kleinräumige Wetterereignisse wie Tornados und andere Extremwetterphänomene, können einzelne Anlagen betreffen. Großräumige Ereignisse, wie etwa die Hitzewelle 2003 in Europa, können alle thermischen Kraftwerke, einschließlich der Kernkraftwerke, in der Region betreffen. Dürren führten zu sinkenden Flusswasserpegeln und nachfolgend Kühlwassermangel, wodurch Kernkraftwerke heruntergefahren werden müssen. Die Versauerung der Ozeane, häufigere Sandstürme

⁵⁷ Decker et al., 2021.

⁵⁸ Kastchiew et al., 2007.

⁵⁹ WMO World Meteorological Organization et al., 2021

und Asche aus Waldbränden können die Lebensdauer von Komponenten beeinträchtigen; im Fall von Ascheablagerungen auf Transformatoren kommt eine zusätzliche Sicherheitskomponente ins Spiel.

Auch Extremereignisse im Umland können indirekt auf die Sicherheit der Kernkraftwerke wirken, wenn sie die Zugänglichkeit beschränken (z.B. Waldbrände oder Überschwemmungen), die Zuleitung oder Abnahme von Strom betreffen (z.B. Störung der Hochspannungsleitungen durch umstürzende Bäume), oder wenn sie kaskadische Probleme auslösen (z.B. ein Dammbbruch stromaufwärts). In Teilen Kanadas führte z.B. 1998 ungewöhnlicher Eisregen zum mehrtägigen Zusammenbruch des Stromnetzes.⁶⁰ Extrem niedrige Temperaturen in Texas im Winter 2021 führten zu einem mehrtägigen Blackout, der rund 4,5 Millionen Menschen betraf und mehrere Tage anhielt. Ein Kernkraftwerk musste wegen eingefrorener Wasserpumpen heruntergefahren werden.⁶¹

Eine weitere besonders gefährliche Wirkung klimabedingter Extremereignisse auf die Sicherheit der Kernkraftwerke kann durch Beschädigungen des länderübergreifenden Stromnetzes (mit kaskadischer Ausbreitung von Stromausfall) und dadurch erhöhtem Risiko eines langdauernden und weitreichenden Strom-Blackouts erwachsen. Zusätzlich zu den ohnehin bereits katastrophalen Auswirkungen eines derartigen „Mega“-Blackouts – d.h. kaum vorstellbares Fehlen jeglichen elektrischen Stroms aus dem Netz, auf schweizerisch „Strommangellage“ – ist hier mit zusätzlichen Verschärfungen durch im betroffenen Gebiet befindliche Kernkraftwerke zu rechnen, die auf Blackout nach relativ kurzer Zeit von Stunden bis Tagen mit Kernschmelze reagieren können. Die meisten Kernkraftwerke würden nach plötzlichem Netzverlust relativ bald, nach Ausfall der nur kurze Zeit einsetzbaren Diesel-Notstromaggregate, langfristige Stromversorgung für ihre Hauptkühlmittelpumpen zur Nachzerfallswärmeabfuhr (MW-Bereich pro Reaktor) vom dann nicht zur Verfügung stehenden Stromnetz benötigen. Das resultierende Risiko vielfacher Kernschmelzen mit Gefahr massiver Radioaktivitätsfreisetzungen wäre dann abhängig von der Zahl betroffener Kernkraftwerke. Zurückfahren auf Eigenversorgung ist nur einem geringen Prozentsatz von Reaktoren möglich und bei unerwartetem Netzverlust fraglich. Dem Eintritt eines weitreichenden und langdauernden Blackouts wird zwar absolut gesehen nach Meinung mit Netzsicherheit befasster Fachleute zurzeit noch geringe Wahrscheinlichkeit zugemessen, sie nimmt jedoch zu, wie aus der steigenden Zahl, der vom Netzüberwachungspersonal erforderlichen „händischen“ Eingriffe ins weitgehend automatisierte Stromnetz abgeleitet werden kann.⁶²

Küstennahe Standorte können durch den Anstieg des Meeresspiegels bedroht sein, insbesondere wegen extremer Wasserstände bei Stürmen. Bis Ende dieses Jahrhunderts muss mit einem Anstieg des Meeresspiegels um 50 bis 90 cm gerechnet werden⁶³, im ungünstigsten Fall sogar mit über 2 m bis 2070.⁶⁴

⁶⁰ Francis & Hengeveld, 1998.

⁶¹ Faw, 2021.

⁶² Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), 2020.

⁶³ IPCC, 2014a.

⁶⁴ Hansen et al., 2016.

Die Häufigkeiten seltener Ereignisse werden meist aus Daten der Vergangenheit mittels statistischer Verfahren abgeleitet; diese Statistiken verlieren aber in Zeiten des Klimawandels ihre Gültigkeit. Eine verlässliche Abschätzung des Risikos und – im Falle längerer Laufzeiten – des Nachrüstbedarfes ist schwierig. Bei Laufzeiten und Laufzeitverlängerungen für Kernkraftwerke von mehreren Jahrzehnten sind die zu erwartenden Änderungen jedenfalls bedeutsam.⁶⁵

1.2.8 Ausbreitung von radioaktiven Schadstoffen

Bei einem Unfall können ganze Landstriche stark betroffen sein. Das Risiko, vom radioaktiven Fallout infolge eines Unfalls in einem Kernkraftwerk betroffen zu sein, hängt von der Entfernung des Standortes von Kernkraftwerken ab, von deren relativer Sicherheit, Ausmaß und Form möglicher Freisetzungen, sowie von den meteorologischen Verhältnissen, insbesondere der Niederschlagsverteilung zum Zeitpunkt des Unfalles. Abbildung 1 gibt als Fallbeispiel die kumulierte Bodenbelastung durch Cäsium (Cs-137) nach einem hypothetischen Unfall im Block 1 des KKW Neckarwestheim am 5.1.1995 um 23 Uhr wieder – eine Wetterlage, bei welcher die radioaktive Wolke zunächst nach Norden, dann nach Osten verfrachtet worden wäre.⁶⁶ In diesem konkreten (hypothetischen) Fall wären in Mainz und Wiesbaden Depositionen von über 1000 kBq Cs-137 pro m² aufgetreten, in Bremen, Hamburg und Kiel wären die Werte noch deutlich höher gewesen. Nach dem Kernkraftwerksunfall von Tschernobyl wurde die Bevölkerung aus Zonen mit über 1480 kBq/m² ausgesiedelt, bei mehr als 185 kBq/m² bestand ein Recht auf Aussiedlung.

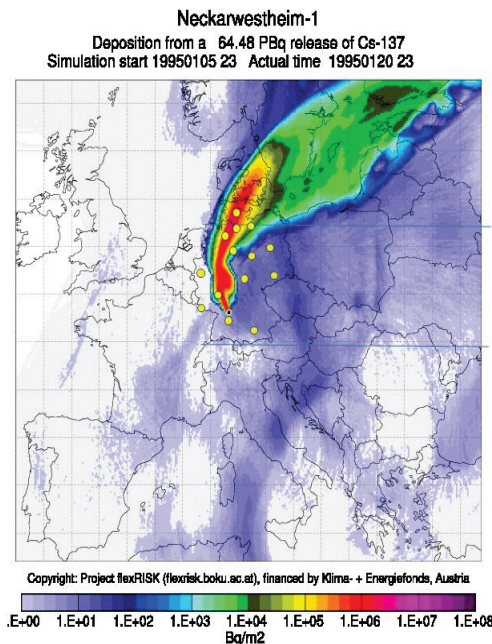


Abbildung 1: Berechnete kumulierte Deposition von Cs137 in Bq/m², verursacht durch einen hypothetischen Unfall im Block 1 des KKW Neckarwestheim am 5.1.1995 ab 23 Uhr.⁶⁷

⁶⁵ INRAG et al., 2021.

⁶⁶ Darstellung der interaktiven Webseite flexrisk.boku.ac.at/en/index.html (Seibert et al., 2013) entnommen.

⁶⁷ Der unmittelbare Nahbereich des KKW's ist ausgeblendet, Quelle: flexrisk.boku.ac.at/ (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

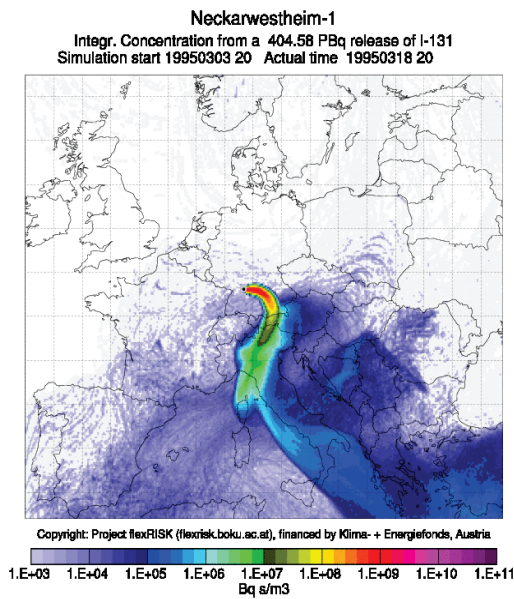


Abbildung 2: Berechnete kumulierte Deposition von Cs137 in Bq/m², verursacht durch einen hypothetischen Unfall im Block 1 des KKW Neckarwestheim am 3.3.1995 ab 20 Uhr.⁶⁸

Als zweites Beispiel (Abbildung 2) ist die Belastungssituation bei dem gleichen hypothetischen Unfall im KKW Neckarwestheim, aber am 3.3.1995 bei einer anderen Wetterlage dargestellt. Diesmal wäre der Süden Deutschlands und Teile Österreichs von ähnlich hoher Radioaktivitätsbelastung am Boden betroffen gewesen.⁶⁹

1.2.9 SMR-Reaktorkonzepte („Small Modular Reactors“)

Schon vor der oben genannten EU-Richtlinie, seit den 1990er Jahren, gab es Bemühungen, bestehende Reaktortypen weiterzuentwickeln, um frühzeitige und große Freisetzungen unwahrscheinlicher zu machen. Die daraus resultierenden Reaktoren der Generation III, wie z. B. der französische EPR (European Pressurized Water Reactor) oder der russische VVER-1200/V4191, verfügen über einen sogenannten „Core Catcher“ zur Abmilderung von Kernschmelzunfällen. Dies führte jedoch lediglich zu begrenzten Verbesserungen, die grundlegenden Probleme der Reaktorsicherheit bleiben auch bei Generation III bestehen.⁷⁰

In letzter Zeit erfährt das Konzept der SMR („Small Modular Reactors“) größere Aufmerksamkeit.⁷¹ Dabei handelt es sich um Anlagen, deren elektrische Leistung unter 300 MW_{el} liegt. Im Gegensatz zu den Anlagen der Generation III sollen diese einen qualitativen Sprung bei der Reaktorentwicklung darstellen und ein höheres Sicherheitsniveau erreichen. Die überwiegende Mehrzahl davon befindet sich jedoch noch in der frühen Phase der Konzeptentwicklung, während andere Konzepte bereits eine sehr lange Entwicklungshistorie aufweisen. Die Bandbreite, der durch den Begriff SMR erfassten Konzepte ist sehr breit und reicht von wassergekühlten bis hin zu

⁶⁸Der unmittelbare Nahbereich des KKW's ist ausgeblendet, Quelle: flexrisk.boku.ac.at/ (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

⁶⁹Die zugehörigen Schilddrüsendaten und effektiven Dosen sowie weitere Beispiele finden sich auf flexrisk.boku.ac.at/.

⁷⁰Hirsch, 2009; Hirsch & Indradiningrat, 2015.

⁷¹IAEA, 2020a; Christopf Pistner, et al., 2021.

andersartigen Konzepten, für die bislang wenig oder keine industrielle Vorerfahrung vorliegt (wie beispielsweise Hochtemperatur- oder Salzschnmelze-Reaktorkonzepte).⁷²

Ein potenzieller sicherheitstechnischer Vorteil gegenüber großen Kraftwerken wäre ein geringeres radioaktives Inventar pro Reaktor. Jedoch erhöht die hohe Anzahl an Reaktoren, die für die gleiche Produktionsmenge an elektrischer Leistung notwendig ist, das Risiko wiederum um ein Vielfaches.⁷³ Als weiterer sicherheitstechnischer Vorteil von SMR wird die Möglichkeit genannt, in größerem Umfang als in heutigen Kernkraftwerken passive Systeme zur Kühlung der Brennelemente einzusetzen.⁷⁴ Derartige Systeme haben einerseits theoretisch das Potenzial einer Verbesserung der Sicherheit, da der Verzicht auf aktive Komponenten zu einer höheren Zuverlässigkeit führen kann. Andererseits bestehen bei passiven Systemen spezifische Herausforderungen und Wissenslücken:⁷⁵

- Die Inangsetzung der Systeme muss zuverlässig erfolgen – dies kann angesichts schwacher Antriebskräfte problematisch sein.
- Die Ungewissheiten bei der Analyse der Funktion der Systeme können besonders groß sein.
- Umgebungsbedingungen können besonders starken Einfluss haben; schon kleine Änderungen können die Funktion des Systems in Frage stellen.
- In der Analyse aktiver Systeme bewährte Computermodelle können u.U. nicht angewandt werden; neue Modelle müssen erst entwickelt und validiert werden.
- Das Skalieren von Tests könnte schwieriger sein.
- Die Möglichkeiten für menschliches Fehlverhalten sind bei passiven Systemen reduziert, jedoch könnten auch die Möglichkeiten für sinnvolles Eingreifen beeinträchtigt sein.
- Passive Systeme stellen neue Anforderungen an PSA (z. B. Häufigkeit des Ausfalls eines Phänomens, das zur Inangsetzung erforderlich ist).
- Die Erfahrungen mit dem Betrieb passiver Systeme sind begrenzt. Wo sie bisher eingesetzt wurden, waren sie oft durch aktive Systeme ergänzt.

Daher kann aufgrund der Eigenschaften der Passivität noch nicht von einer erhöhten Zuverlässigkeit ausgegangen werden. „Theoretische und experimentelle Nachweise der tatsächlichen Zuverlässigkeit eines konkreten passiven Nachwärmeabfuhrsystems sind ebenso erforderlich wie detaillierte Analysen der zu unterstellenden Einsatzrandbedingungen bei verschiedenen möglichen Stör- und Unfallszenarien“.⁷⁶

⁷² Dieser Abschnitt bezieht sich weitgehend auf die Studie (Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021).

⁷³ Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021.

⁷⁴ Dieser Begriff wird im internationalen Rahmen unterschiedlich verstanden und gebraucht. Die in der WENRA zusammengeschlossenen Europäischen Nuklearaufsichtsbehörden verstehen darunter Systeme, deren Antriebskraft auf natürlichen Kräften beruht, also auf Schwerkraft, Unterschieden in der Dichte, Wärmeaustausch u. a. Es ist für sie akzeptabel, wenn zum Inangsetzen dieser Systeme eine einmalige Zustandsänderung erforderlich ist, sofern diese nur von gespeicherter Energie abhängt und keine andauernde Funktion unterstützender Systeme erfordert.

⁷⁵ WENRA, 2018.

⁷⁶ Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021.

Wird tatsächlich eine große Zahl von SMR-Anlagen realisiert, bedeutet dies auch eine große Zahl verschiedener Standorte und damit verbundener Transporte. Aktuell diskutierte SMR-Konzepte sehen eine geplante elektrische Leistung von 1,5 bis 300 Megawatt vor. Im Vergleich dazu: Heutige (neue) Kernkraftwerke verfügen in der Regel über elektrische Leistungen im Bereich von 1 000–1 600 MW und sind somit um einen Faktor 3 bis 1 000 größer. Bezieht man dies auf den aktuellen Kraftwerkspark, müssten alleine viele tausend bis zehntausend SMR-Anlagen gebaut werden, nur um den aktuellen Kraftwerkspark von 400 Reaktoren mit großer Leistung zu ersetzen.⁷⁷

Die Standorte rücken viel näher an Siedlungsgebiete heran. Proliferation und Einwirkungen von außen werden (beispielsweise in Form terroristischen Missbrauchs) zu noch größeren Problemen, und im Fall eines Unfalles sind wegen der Siedlungsnähe möglicherweise mehr Menschen betroffen.⁷⁸ Somit ist aus heutiger Sicht von der Einführung von SMR keine signifikante Verbesserung der Sicherheit zu erwarten. Dazu kommt, dass auch bei den SMR die Gefahren nicht umfassend und belastbar zahlenmäßig abgeschätzt werden. Sie erfordern eine Weiterentwicklung der Methodik der PSA, die grundlegenden Schwächen dieser Analysen bleiben bestehen.⁷⁹

1.3 Gefahren und Probleme der Ver- und Entsorgung

1.3.1 Vom Uranbergwerk zum Brennelement

Unverzichtbar bei der Nutzung der Kernenergie sind Abbau und Aufbereitung von Uran.⁸⁰ Damit sind zahlreiche Risiken verbunden:⁸¹ Der Abbau erfolgt überwiegend als Tagebau. Untertagebergwerke werden aus wirtschaftlichen Gründen in immer geringerem Ausmaß genutzt – mit Ausnahme von Reicherz-Bergwerken, die aber insgesamt nur einen kleinen Anteil an der Produktion haben. Typische Urankonzentrationen im Erz liegen im Bereich von 0,03%, bei Reicherz bis 20%. Der Trend geht zu immer ärmeren Erzen (bis 0,01%). Mit sinkender Konzentration sinkt die Effizienz der Aufarbeitung und der Energiebedarf pro t Uran nimmt zu.⁸²

Beim Abbau entstehen große Volumina von Abraum, die an der Oberfläche gelagert werden und teilweise auch Uran und andere radioaktive Stoffe enthalten. Um den Jahresbedarf eines typischen Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor und 1 300 MW_{el} Leistung (ca. 30 t Brennstoff) zu decken, fallen mehrere 100 000 t Abraum an.

⁷⁷Steigerwald, 2021.

⁷⁸Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021.

⁷⁹Dies trifft analog auch auf Reaktorkonzept der sogenannten „IV. Generation“ zu, an denen ebenfalls seit mehreren Jahrzehnten gearbeitet wird und die evtl. in einigen Jahrzehnten als Demonstrationsanlagen zur Verfügung stehen, siehe Pistner & Englert (2017). Eine ökonomische Einordnung von SMR-Konzepten erfolgt in Abschnitt 2.1.3.2

⁸⁰Theoretisch ist auch Thorium für Kettenreaktionen nutzbar und es liegt in noch höherer Intensität vor als Uran; jedoch gibt es diesbezüglich bis heute keine industriellen Anwendungen und wird daher hier nicht weiterverfolgt.

⁸¹Diehl, 2016; W. Neumann, 2019). Auch erneuerbare Energien und Speichertechnologien erfordern Rohstoffe, deren Abbau mit Gefahren und Umweltzerstörung verbunden sein kann.

⁸²Vergleiche den Uran-Atlas mit einer Übersicht über den Uranabbau und die Rolle der Europäischen Union, siehe BUND (2019).

Abdeckungen sind erforderlich, um die Umweltauswirkungen durch eindringendes Wasser, verwehten Staub und das Gas Radon zu reduzieren.

Das Uranerz wird zuerst mechanisch, dann durch nasschemisches Herauslösen aufbereitet. Endprodukt ist Uranerzkonzentrat (U_3O_8 , sogenannter „yellow cake“).⁸³ Bei der Aufbereitung fallen Rückstände (sogenannte Tailings) an, die die gesamten Zerfallsprodukte des Urans enthalten und ebenfalls beträchtliche Volumina haben – auf den Jahresbedarf eines Kernkraftwerks entfallen ca. 100 000 t Tailings. Diese weisen einen hohen Wassergehalt auf und müssen hinter Dämmen gelagert werden. Sobald sie getrocknet sind, droht das Verwehen von radioaktivem Staub. Abdeckungen oder Begrünungen können auch hier die Belastung reduzieren, werden aber in manchen Ländern (z. B. Südafrika) nicht eingesetzt.

Ein Verfahren, das zunehmend genutzt wird und auf das mittlerweile mehr als die Hälfte der Uran-Produktion entfällt, ist der Lösungsbergbau. In Lagerstätten mit porösem Gestein werden dabei saure oder alkalische Lösungen eingepresst und dann, beladen mit gelöstem Uran, wieder an die Oberfläche gepumpt. Immer wieder treten Leckagen auf, z. B. im Januar 2014 in Willow Creek, Wyoming, USA. Auch die Bohrlöcher stellen, trotz Auskleidung, eine Schwachstelle dar – bei seitlichem Austritt der Lösungen wird das Grundwasser gefährdet.⁸⁴

In vielen Staaten (USA, Kanada, Deutschland, Tschechien...) gibt es Altlasten von historischem Abbau. Einiges spricht dafür, dass die Probleme in Zukunft nicht geringer werden: Mehrere neue Projekte liegen in Ländern, die bisher keine Erfahrung mit dem Uranbergbau hatten und daher mit den Risiken nicht vertraut sind – etwa in Malawi und anderen Ländern Afrikas.⁸⁵

Für Leichtwasserreaktoren und auch die meisten anderen heutigen Reaktortypen ist der nächste Schritt die Anreicherung im Isotop U-235 von 0,7% im Natururan auf etwa 3–6%. Dazu ist es erforderlich, Uran in den gasförmigen Zustand zu überführen. Die einzige Uranverbindung, die dafür in Frage kommt, ist Uranhexafluorid (UF_6), das bereits bei einer Temperatur von 56,5 °C aus dem festen direkt in den gasförmigen Zustand übergeht.

Es gibt verschiedene Methoden der Anreicherung. International am weitesten verbreitet ist das Gaszentrifugenverfahren. Bei der Herstellung des typischen Jahresbedarfs eines Druckwasserreaktors fallen etwa 200 t abgereichertes Uran an. Teilweise wird dieses Material der Wiederanreicherung⁸⁶ zugeführt; es wird auch als Bestandteil panzerbrechender Munition eingesetzt. Überwiegend wird es jedoch ohne eine klare Perspektive der Weiterverwendung zwischengelagert.

⁸³ Es kommt regelmäßig zu Unfällen. So brachen etwa im Dezember 2013 je ein Laugungstank bei der Rössigmine in Namibia, und ein Tank bei der Ranger-Mine in Australien. Schwefelsaurer Erzschlamm ergoss sich auf die Betriebsgelände.

⁸⁴ Alley & Alley, 2013.

⁸⁵ NEA & IAEA, 2020.

⁸⁶ Von Anreicherung und Wiederanreicherung spricht man in Zusammenhang mit der Erzeugung von Kernbrennstoff aus Natururan. Wiederaufbereitung umschließt den gesamten Prozess mit den abgebrannten Brennelementen zu MOX aufbereitet werden

Das angereicherte UF_6 wird in Urandioxid (UO_2) umgewandelt, aus dem dann die Brennelemente für Kernkraftwerke hergestellt werden.

1.3.2 Zwischenlagerung, Wiederaufarbeitung, Abfallströme

Nach dem Einsatz im Reaktor wird der abgebrannte Brennstoff zwischengelagert. In Europa werden dabei drei Verfahren angewandt – Nasslagerung, Wasserbecken oder Trockenlagerung in Behältern bzw. Betonblöcken. Der weltweit größte Teil der abgebrannten Brennelemente lagert derzeit relativ ungeschützt in Abklingbecken oder in als Zwischenlösung gedachten Nasslagern (zu damit verbundenen Problemen siehe Abschnitt 1.2.1). Die Behälterlagerung ist sicherheitstechnisch vorteilhaft. Wichtig ist dabei aber ein angemessener Schutz gegen Einwirkungen von außen durch zwei Barrieren (Behälter und umgebendes Bauwerk) sowie die Sicherstellung der Integrität der gelagerten Materialien und der Behälter, bis ein Endlager zur Verfügung steht.

Nach der Zwischenlagerung ist der abgebrannte Brennstoff, wenn er nicht zu Plutonium aufgearbeitet wird, hochradioaktiver Abfall und muss konditioniert und endgelagert werden.⁸⁷ Teilweise wird der Brennstoff auch wiederaufgearbeitet.⁸⁸ Die Wiederaufarbeitung ist ein komplexes chemisches Verfahren zur Abtrennung von Uran und Plutonium. Sie ist störanfällig und es entstehen radioaktive Abfälle verschiedener Kategorien: Hochradioaktive Abfälle, deren Gefahrenpotenzial dem des abgebrannten Brennstoffs vergleichbar ist (und die ebenfalls über längere Zeiträume zwischengelagert werden müssen), verschiedene Arten von mittelradioaktiven Abfällen sowie auch große Volumina schwachradioaktiver Abfälle. Das rückgewonnene Plutonium wird teilweise in speziellen Brennelementen (Mischoxid, MOX) wieder im Reaktor eingesetzt. Die Fertigung von MOX-Brennstoff ist aufwendiger und gefährlicher als die von gewöhnlichem Uranbrennstoff. Abgebrannter MOX-Brennstoff ist toxischer als abgebrannter U-Brennstoff und für nochmalige Wiederaufarbeitung kaum geeignet. Aufgrund der technischen Probleme sowie auch der hohen Kosten ist das Volumen ziviler Wiederaufarbeitung und damit auch die MOX-Herstellung international immer weniger genutzt. Der Betrieb der Wiederaufarbeitungsanlage THORP in Großbritannien wurde 2018 beendet. Derzeit betreiben lediglich Frankreich und Russland Aufbereitungsanlagen; die japanische Anlage ist noch nicht in Betrieb und China versucht, sich durch den Bau von eigenen Anlagen auch in diesem Technologiesegment zu platzieren.⁸⁹

Seit einigen Jahrzehnten werden erhebliche Mittel für die Forschung zur Trennung und Umwandlung (Partitioning and Transmutation, P&T) von Radionukliden aus hochradioaktivem Abfall aufgewandt. Dabei sollen langlebige Nuklide in stabile oder kurzlebige umgewandelt werden. Das ursprüngliche Ziel war, damit die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zu reduzieren. Nach mehreren Jahrzehnten Forschung ist inzwischen klar, dass dieses Ziel nicht erreicht werden kann. Die Prozesse sind

⁸⁷ Brunnengräber, 2016b, 29–33.

⁸⁸ von Hippel et al., 2019.

⁸⁹ Siehe von Hippel et al. (2019) sowie fissilematerials.org/blog/2021/03/china_starts_construction.html (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

zwar theoretisch bekannt, aber nicht großtechnisch umsetzbar, die Zeiträume strecken sich über mehrere Jahrhunderte, die Kosten sind nicht abschätzbar und der Prozess produziert seinerseits zusätzliche Mengen an radioaktivem Abfall.⁹⁰ Darüber hinaus ist durch die Abtrennung von Plutonium und der Gefahr der Proliferation von einer Erhöhung des Gefahrenpotenzials der Kernenergie durch die Nutzung von P&T auszugehen.⁹¹

Neben Abraum und Tailings, dem abgebrannten Brennstoff und ggf. den Abfällen aus Wiederaufarbeitung und MOX-Fertigung entstehen an allen Schritten der Ver- und Entsorgung noch weitere Abfallströme. Bedeutsam sind dabei die mittel- und schwachradioaktiven Betriebsabfälle der Kernkraftwerke, etwa 200 m³ pro Jahr bei einem Druckwasserreaktor.

Auch beim Abriss von Kernkraftwerken entstehen Abfälle. Von insgesamt etwa 600 000 t Abrissmaterial bei einem Druckwasserreaktor sind etwa 50 000 t radioaktiv kontaminiert. Etwa 10% davon werden in Deutschland als radioaktive Abfälle behandelt, der Rest kann theoretisch für anderweitige Verwendung freigegeben werden.⁹²

1.3.3 Transporte radioaktiver Stoffe

Die verschiedenen Anlagen im System der Kernenergienutzung befinden sich i. A. nicht am gleichen Standort. Dies betrifft Erzaufbereitung, Brennelementfertigung, teilweise Zwischenlagerung und Abfallkonditionierung, sowie Endlagerung schwachradioaktiver Abfälle. Auch die Konversionsanlagen, in denen das aus dem Erz gewonnene U₃O₈ in Uranhexafluorid (UF₆), bzw. dieses nach der Anreicherung in Uranoxid (UO₂) umgewandelt werden, befinden sich meistens nicht am gleichen Standort wie die Anreicherungsanlagen. So wird Uran zur Wiederanreicherung aus der Europäischen Union nach Russland transportiert.

Somit ist zum Betrieb von Kernkraftwerken ein umfangreiches Netzwerk von Transporten radioaktiver Stoffe erforderlich. Diese umfassen insbesondere:⁹³

- Uran in verschiedenen chemischen Verbindungen und Anteilen von U-235 (einschließlich UF₆)
- unbestrahlte und bestrahlte Uran- und MOX-Brennelemente
- verschiedene Kategorien hoch-, mittel- und schwachradioaktiver Abfälle
- Abfälle vom Abriss von Kernkraftwerken, u. a. Großkomponenten

Besonders hohes Gefahrenpotenzial haben die Transporte von Uranhexafluorid. Die Transportbehälter können bei schweren Unfällen versagen. Uranhexafluorid ist chemisch und radiologisch hochtoxisch. Bei Freisetzungen reagiert es mit dem Wasserdampf der Luft. Dabei bildet sich Fluorwasserstoff (HF), eine der gefährlichsten und giftigsten Substanzen, die es gibt. Bei Menschen in der Nähe des Unfallortes können

⁹⁰Frieß et al., 2021, S. 202; Pigford & Rasmussen, 1996.

⁹¹Frieß et al., 2021; Kreusch et al., 2019.

⁹²Allerdings ist in einigen Ländern die Freimessung für die Nutzung von Stoffen außerhalb des Nuklearsektors noch verboten (Beispielsweise in Frankreich). In vielen Fällen scheitert die Freigabe aber auch an fehlenden Märkten für die freigegebenen Stoffe. (W. Neumann, 2019; OECD/NEA, 2020).

⁹³W. Neumann, 2011.

bereits geringe Mengen zu starken Verätzungen bis zum Tod führen. Beim Transport von Plutoniumoxid (PuO_2) oder frischen MOX-Brennstäben könnte z. B. ein Brand in einem Tunnel zu beträchtlichen Freisetzungen führen. Großes Gefahrenpotenzial besteht auch beim Transport hochradioaktiver abgebrannter Brennelemente. Diese sind allerdings im Behälter relativ fest eingebunden, somit sind größere Freisetzungen nur bei einem schweren Unfall mit länger anhaltendem Folgebrand möglich.

Schwach- und mittelradioaktive Abfälle werden in verschiedensten Formen transportiert. Das Freisetzungspotenzial ist daher sehr unterschiedlich. Ein besonderes Problem der Transporte radioaktiver Stoffe ist ihre weite Verbreitung, und damit auch die weite Streuung der Gefährdung. Sie werden auf Autobahnen, Bahnstrecken und auch per Schiff transportiert, über Straßenknoten und Rangierbahnhöfe, durch Großstädte und Häfen, und über Grenzen. Die Transparenz bzgl. der Routen ist gering, auch werden zu den Transportwegen nur wenige Angaben veröffentlicht, um Terroranschläge zu erschweren und Gegendemonstrationen zu verhindern, was aber nicht immer gelingt.

Zur Bewertung der Strahlenbelastung nach Transportunfällen wird häufig der PSA-Ansatz gewählt. Die Schwächen dieser Methodik wirken sich hier jedoch ebenso aus wie bei der Analyse von Kernkraftwerksunfällen (siehe Abschnitt 1.2.3). Die Abläufe sind z. T. sehr komplex und müssen vereinfacht werden. Üblicherweise werden über Abschneidekriterien Bedingungen festgelegt, die noch in Betracht gezogen werden und solche, die als zu unwahrscheinlich betrachtet und daher nicht mehr berücksichtigt werden. Dadurch besteht die Gefahr, dass seltene, aber mögliche Ereignisse mit sehr großen Freisetzungen ausgeblendet werden. Darüber hinaus ist es sehr schwierig, durchgängig ein vollständiges Inventar an radioaktiven Stoffen sowie die Anteile des radioaktiven Inventars festzulegen, die bei bestimmten Unfallsequenzen im schlimmsten Fall freigesetzt werden.⁹⁴

1.3.4 Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen

Die letzte Station des nuklearen Brennstoffes stellt das sog. Endlager dar. Für hochradioaktive Abfälle aus zivilen Kernkraftwerken⁹⁵ gibt es ein solches betriebsfähiges Lager weltweit noch nicht.⁹⁶ Für hochradioaktive Abfälle – die 99% der Gesamtradioaktivität enthalten – wird international derzeit überwiegend eine Lagerung im tiefen geologischen Untergrund angestrebt.⁹⁷ Teilweise sind, in unterschiedlichem Maße, Vorkehrungen zur Rückholung der Abfälle geplant.

Weltweit werden für hochradioaktive Abfälle drei Gesteinsarten als Wirtsgesteine in Betracht gezogen: Salz, Ton und kristalline Gesteine wie Granit. In Deutschland

⁹⁴ INTAC, 2012.

⁹⁵ Für Nuklearabfälle aus militärischen Anlagen wird in den USA das Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in einer Salzformation in der Nähe von Carlsbad im US-amerikanischen Bundesstaat New Mexico betrieben.

⁹⁶ Brunnengräber & Di Nucci, 2019.

⁹⁷ Siehe zu der Problematik die Ergebnisse des interdisziplinären Forschungsprojekts ENTRIA (www.irs.uni-hannover.de/de/forschung/entria/entria/, zuletzt geprüft am 29.09.2021) sowie die Darstellung von Länderstudien und Querschnittsthemen in Brunnengräber & Di Nucci (2019); Di Nucci et al. (2015, 2018).

kommen dafür potenziell 90 sogenannte Teilgebiete in Frage, die im Laufe der Endlagersuche weiter untersucht werden.⁹⁸ Salz war für viele Jahre in Deutschland das bevorzugte Wirtsgestein. Diese Festlegung wurde mit dem Standortauswahlgesetz von 2017 aufgegeben, nunmehr werden auch die anderen Gesteinsarten in die Standortsuche einbezogen.

In den meisten Staaten wird bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen ein sogenannter „Sicherheitsnachweis“ für Zeiträume von 1 Million Jahren und mehr gefordert.⁹⁹ Das bedeutet den nach heutigem Wissensstand bestmöglichen Ausschluss von Risiken für Millionen Jahre, u. a. die Vermeidung radioaktiver Freisetzungen aus dem Lager bzw. die Unterschreitung vorgegebener Grenz- oder Richtwerte. Bei Salz und Ton soll dies primär durch die geologische Barriere gewährleistet werden – ergänzt durch geotechnische Barrieren in den Hohlräumen und Zugangswegen. Bei Granit, der Klüfte aufweist, in denen Grundwasser zirkulieren kann, müssen technische Barrieren für den Einschluss sorgen. Nach heutigem Kenntnisstand gibt es bei allen drei favorisierten Optionen Vor- und Nachteile.¹⁰⁰ Die Festlegung möglicher Standorte für die Endlagerung hängt neben naturwissenschaftlichen Kriterien auch von politischen Auseinandersetzungen, wirtschaftlichen Interessen und unterschiedlichen Betroffenheiten im föderalen System ab.¹⁰¹

Die Suche nach möglichen Standorten ist kompliziert und sehr langwierig. Frankreich und die Schweiz erkunden Standorte mit Tonsteinvorkommen. In Schweden und Finnland werden Standorte in kristallinem Wirtsgesteine erkundet. Eine wichtige Rolle spielt die Wärmeentwicklung hochradioaktiver Abfälle. Je höher die Temperaturen im Endlager, desto komplizierter wird dessen Auslegung und desto höher sind die Ungewissheiten – dies gilt für alle in Betracht gezogenen Wirtsgesteine.

In manchen Staaten (darunter Deutschland, Frankreich, Schweiz, USA) wird eine zeitlich befristete Rückholbarkeit der hochradioaktiven Abfälle vorgesehen, verbunden mit einem Monitoring des Endlagers. So sollen unvorhergesehene und potenziell gefährliche Entwicklungen frühzeitig erkannt werden und es besteht die Möglichkeit, im schlimmsten Fall die Abfälle wieder auszulagern. Die Zeiträume, für die eine zuverlässige Überwachung durchgeführt werden kann, sind allerdings begrenzt, ebenso die Zeit, für die eine Rückholung der Abfälle mit vertretbarem Aufwand noch möglich ist. In Deutschland wird Rückholbarkeit lediglich für die Befüllungsphase des Endlagers vorgesehen. Anschließend soll für 500 Jahre eine Bergung der Behälter (ungeplantes Herausholen) möglich sein. In der Schweiz soll nach Ende der Einlagerung für einen längeren Zeitraum der Zugang ins Lager offengehalten werden, wobei etwa 100 Jahre vorgesehen sind.

Das Konzept mit Monitoring und Rückholbarkeit weist spezielle Vor- und Nachteile auf. Positiv fällt ins Gewicht, dass unerwartete Entwicklungen in der ersten Phase der Endlagerung erkannt werden können und gegengesteuert werden kann. Neue

⁹⁸Eine Karte mit den Teilgebieten findet sich unter: (www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/), zuletzt geprüft am 29.09.2021), bzw. (BGE, 2020b).

⁹⁹ Appel et al., 2015.

¹⁰⁰ Siehe für eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der einzelnen Gesteinsarten BGE (2020a).

¹⁰¹ Brunnengräber, 2019a, S. 76

wissenschaftliche Erkenntnisse können gewonnen werden. Dagegen spricht, dass Monitoring die Barrieren schwächen und somit die Langzeitsicherheit gefährden kann. Schadensereignisse wie Wassereintrich über Schächte werden wahrscheinlicher, wenn der Zugang zum Lager länger offengehalten wird.¹⁰² Weiterhin spricht dagegen, dass bei längerfristiger Rückholbarkeit Plutonium im Endlager in zunehmendem Maße zugänglich wird, da die Strahlung von kurzlebigen Spaltprodukten, die vor dem Zugriff abschreckt, mit der Zeit abnimmt (auch ziviles Plutonium ist für den Bau von atomaren Sprengsätzen geeignet).

Letztlich handelt es sich bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen aber nicht um ein rein technisches, sondern ein sozio-technisches Problem, das nur gesellschaftlich ausverhandelt werden (siehe hierzu Abschnitt 4)

1.4 Zivil-militärische Ambivalenz der Kerntechnologie

Die Nutzung der Kernenergie wurzelt in den militärischen wissenschaftlich-technologischen Programmen der 1940er und 1950er Jahre.¹⁰³ Für die Kernwaffenprogramme waren insbesondere effektive Wege zur Urangeinnung und -bearbeitung, zur Urananreicherung des spaltbaren Isotops Uran-235 zu entwickeln sowie erste Kernreaktoren zur Plutoniumproduktion und eine chemische Abtrennung des Plutoniums aus abgebranntem hochradioaktivem Uranbrennstoff zu realisieren. Darauf sollte die Kerntechnologie für „zivile“, d. h. wirtschaftlich nutzbare, nicht-militärische Zwecke aufbauen, die ab den 1950er Jahren vorbereitet wurde und in den 1970er und 1980er Jahren zum Bau und zur Inbetriebnahme von mehreren hundert Kernkraftwerken in heute etwa 30 Ländern führte.

Die Atomwaffen sind seit 1945 in der Welt. Die entscheidende Voraussetzung für den Bau von Atomwaffen ist heute der Zugriff auf ausreichende Mengen an atomwaffenrelevanten Materialien. Das sind insbesondere geeignete Spaltstoffe (wie hochangereichertes Uran und Plutonium), aber auch fusionsfähiges Tritium (superschwerer Wasserstoff). Ihre Produktion wird durch Urananreicherungstechnologien, durch („Wiederaufarbeitung“ genannte) Abtrenntechnologie aus Reaktorbrennstoffen, weitere Abtrennprozeduren oder durch Beschleunigeranlagen ermöglicht. Solche „sensitiven“ oder „Dual-use“-Technologien finden sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich ihre Anwendung bzw. sind dort erforderlich. Weite Bereiche der in Kernenergieprogrammen genutzten Nukleartechnologien und Materialien sind daher zivil-militärisch ambivalent.¹⁰⁴ In den letzten zehn Jahren erfolgten acht der zehn neu in Betrieb genommenen Kernkraftwerke durch Kernwaffenstaaten, bzw. von diesen kontrollierten Firmen in anderen Ländern.¹⁰⁵ Der Zusammenhang der zivilen Kerntechnologieentwicklung und -nutzung mit der andauernden Gefahr der Kernwaffenverbreitung (nukleare Proliferation) wird seit dem Beginn der Ära der

¹⁰² Kreusch et al., 2019.

¹⁰³ Groves, 1983; Lovins & Lovins, 1981.

¹⁰⁴ Liebert, 1991, 2002; Pistner et al., 1999, S. 134 ff..

¹⁰⁵ Schneider et al., 2020.

Kernenergie diskutiert und ist in den 1970er Jahren vertieft worden.¹⁰⁶ Die Fortentwicklung von Technologien, die ursprünglich im militärischen Kontext entstanden sind, hat zur zivilen Nutzung von Nukleartechnologien geführt, diese sind aber selbst wieder Quelle für militärische Möglichkeiten oder entsprechende technische Optionen geworden. So konnten und können Bestrebungen in Richtung auf Kernwaffenbesitz oder sogar regelrechte geheime Waffenprogramme unter dem Deckmantel zivil deklarierter Nuklearprogramme stattfinden. Beispiele betreffen einige der inzwischen neun Kernwaffenstaaten, in der Vergangenheit einige europäische Staaten¹⁰⁷ und in jüngerer Zeit auch Libyen¹⁰⁸. Der damalige Generaldirektor der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO), Mohammed el-Baradei, sprach 2006 darüber hinaus von einer größeren Anzahl nukleartechnisch weit entwickelter „virtueller Kernwaffenstaaten“¹⁰⁹, die bereits Zugriff auf sensitive Technologien und Materialien hätten, um quasi jederzeit in kürzester Zeit Kernwaffenstaaten zu werden, falls die Entscheidung dazu fallen sollte (z. B. in Japan oder Korea).¹¹⁰

Als ein wesentliches internationales Instrumentarium, um zumindest die Ausweitung der Kernwaffen besitzenden Staaten (horizontale Proliferation¹¹¹) einzudämmen, wird der Nichtverbreitungsvertrag (NVV) angesehen, der 1970 in Kraft trat und 1995 auf unbegrenzte Zeit verlängert wurde. Unter anderem verpflichten sich darin die Nichtkernwaffenstaaten, alle ihre kerntechnischen Anlagen, in denen mit sensitiven Spaltstoffen umgegangen wird, unter Safeguards (Sicherungsmaßnahmen) der IAEO zu stellen. Die Möglichkeiten und Befugnisse der IAEO gehen allerdings nicht so weit, dass die intrinsische zivil-militärische Ambivalenz der Kernenergienutzung außer Kraft gesetzt werden könnte. Das hat auch damit zu tun, dass der Nichtverbreitungsvertrag (NVV) allen Mitgliedsstaaten die Entwicklung der Kernenergie in all ihren Aspekten als „unveräußerliches Recht“ garantiert. Manche Schwachstellen der Safeguards wurden erkannt und seit 1997 können die Mitgliedsländer auf freiwilliger Basis der IAEO erweiterte Überwachungsrechte über sogenannte Zusatzprotokolle zu den Safeguards-Vereinbarungen geben.

Dennoch bleiben fundamentale Probleme. Durch Safeguard-Maßnahmen der IAEO können nur erfolgte Abzweigungen von Waffensstoff mit hoher Wahrscheinlichkeit – und dies nur im Nachhinein – entdeckt werden. Die internationale Konstellation und die politischen Rahmenbedingungen in Mitgliedsländern können sich so ändern, dass die erhoffte Wirkung von Safeguards, die auf wechselseitiger Kooperation und Vertrauensbildung unter den Staaten setzen, außer Kraft gesetzt wird. Die einmal

¹⁰⁶ Acheson-Lilienthal, 1946 bzw. Ford Foundation, 1979; Lovins & Lovins, 1981; SIPRI, 1979.

¹⁰⁷ Beispielsweise Schweden, siehe Jonter (2010).

¹⁰⁸ Braut-Hegghammer, 2008.

¹⁰⁹ Als „break-out“-fähig bezeichnet Sholly (2007) Staaten, die innerhalb kürzester Zeit eine größere Zahl von Kernwaffen herstellen könnten, und zählt dazu Argentinien, Belgien, Brasilien, Deutschland, Iran, Italien, Japan, Kanada, Niederlande, Schweden, Schweiz, Spanien und die Tschechische Republik. Zu den kernwaffenfähigen Ländern zählt er Armenien, Bulgarien, Finnland, Kasachstan, Litauen, Mexiko, Rumänien, Slowakei, Slowenien, Süd-Korea, die Ukraine und Ungarn. (Sholley & Steven, 2007, 156–77).

¹¹⁰ Interview in Reuters (16.10.2006), zitiert in (Liebert, 2021).

¹¹¹ Horizontale Proliferation bezieht sich auf die Ausweitung der Staaten, die Kernwaffen besitzen, vertikale auf die Weiterentwicklung und Anhäufung von Kernwaffen in diesen Staaten.

geschaffenen sensitiven technischen Möglichkeiten, die „unkontrolliert“ zum Kernwaffenbesitz führen könnten, bleiben dann aber erhalten. So wird immer wieder betont, dass beispielsweise Safeguards ein Mitgliedsland des Nichtverbreitungsvertrages nicht davon abhalten könnten, einen Vorrat an Nuklearwaffenmaterial unter Safeguards anzulegen, um dann später – mit dreimonatiger Kündigungsfrist – den NVV - Vertrag zu verlassen und dieses Material für ein Waffenprogramm zu verwenden, wie dies Nordkorea tat.¹¹²

Solche Überlegungen führten in 1970er Jahren zur Entwicklung des Konzepts der Proliferationsresistenz, mit dem, trotz der intrinsischen zivil-militärischen Ambivalenz, Kernenergienutzung zumindest resistent (robust) gegen eine militärische Nutzung gemacht werden sollte. Diese Zielsetzung haben sich seit Beginn dieses Jahrhunderts auch internationale Kooperationsprogramme zur Weiterentwicklung der Kernenergie-technologie zu eigen gemacht (Generation IV International Forum und das International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles der IAEA).¹¹³ Bis heute ist nicht erkennbar, dass in diesem Bereich ernst zu nehmende technologische Durchbrüche erreicht worden wären. Dem steht gegenüber, dass eine inzwischen weltweit dominierende und für die Kernenergienutzung nunmehr unverzichtbare Urananreicherungstechnologie, die Gas-Ultrazentrifuge, keineswegs proliferationsresistent ist, sondern im Gegenteil als proliferationsförderlich eingeschätzt werden muss.

Ein weiterer – oft wenig beachteter – Aspekt ist das radiologische Gefahrenpotential durch Anlagen im Bereich der Kernenergienutzung in kriegerischen Auseinandersetzungen oder durch terroristische Angriffe. Während Kernwaffen durch ihre singuläre Zerstörungskraft in Folge der erzeugten Druckwelle und Hitzeentwicklung gekennzeichnet sind, ist ihre radiologische Wirkung in der Regel um Größenordnungen kleiner als beispielsweise das radiologische Katastrophenpotential von großen Leistungsreaktoren, das durch das vorhandene und freisetzbare radiologische Inventar bestimmt ist. Ein Angriff auf Nuklearanlagen könnte zu massiven Radioaktivitätsfreisetzungen führen, die radiologische Folgewirkungen eines Kernwaffeneinsatzes bei weitem übertreffen¹¹⁴. Diese Tatsache hat auch prominente jahrzehntelange Befürworter der Kernenergie zu einem Umdenken genötigt.¹¹⁵

1.5 Zwischenfazit

Kernkraftwerke sind keine konventionellen Stromerzeugungsanlagen, sondern wurden als Nebenprodukt militärischer Entwicklungsprogramme gebaut und unterliegen bis heute der zivil-militärischen Ambivalenz. Eine technische Betrachtung des Systemguts Kernkraft legt eine Vielzahl von nicht vollständig beherrschbaren Risiken und Unsicherheiten offen. Vor dem Hintergrund zahlreicher verfügbarer erneuerbarer

¹¹² OTA et al., 1993.

¹¹³ Liebert, 2005, 224 – 25.

¹¹⁴ Die bei der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl freigesetzte Radioaktivität liegt um einen Faktor 200 bis 300 höher als die der Bomben von Hiroshima und Nagasaki zusammen.

¹¹⁵ So Carl-Friedrich von Weizsäcker in seiner Einleitung zu (Meyer-Abich & Schefold, 1986).

Energiequellen ist Kernkraft zu gefährlich, um in der kommerziellen Energiewirtschaft eingesetzt zu werden und eine Rolle bei der Bekämpfung des Klimawandels zu spielen. Die Gefahren, die von Kernkraftwerken ausgehen, sind außerdem nicht zuverlässig quantitativ zu ermitteln. Mit Kernkraftwerken zu leben, bedeutet somit nicht nur, mit der Möglichkeit von katastrophalen Unfällen zu leben, die in Raum und Zeit sehr weitreichende Auswirkungen haben. Es bedeutet zwangsläufig auch, eine Gefährdung in Kauf zu nehmen, deren Ausmaß nicht belastbar bestimmt werden kann. Gefahren für Menschen und Umwelt in den Bereichen der Ver- und Entsorgung (insbes. Urangewinnung und -verarbeitung, Transport, Zwischenlagerung, Endlagerung) machen die Kernkraft zusätzlich für ein nachhaltiges Energiesystem untauglich. Die Gefahren der Proliferation von kernwaffentauglichem Spaltmaterial sind erheblich. Besonders schwerwiegend sind die ungelösten Probleme der Endlagerung, die Sicherheitsbetrachtungen über 1 Million Jahre erfordern. Weitere Probleme schafft der zivil-militärische Dual-use-Charakter vieler Bereiche der Kerntechnologie, der sich bislang technologisch nicht auflösen lässt. Die zivile Nutzung der Kernenergie trägt daher immer die Gefahr militärischer atomarer Aufrüstung in sich.

2. Wirtschaftlichkeit

Die weltweite Entwicklung der Kernkraft in den Jahren 2000 bis 2020 weist weitestgehend unveränderte Werte der Stromerzeugung auf, von 2 500 TWh im Jahr 2000 zu 2 700 TWh im Jahr 2020. Aufgrund des Anstiegs der gesamten Stromerzeugung reduzierte sich der relative Beitrag der Kernenergie in diesem Zeitraum von 16,7% auf 10,1%. Wie im vorigen Abschnitt ausgeführt, entwickelten sich die kommerziellen Nutzungen von Kernkraft, u. a. zur Stromerzeugung, erst als Nebenprodukte militärischer Anwendungen, und daher jenseits von strengen Wirtschaftlichkeitskriterien.¹¹⁶ Dies ist bis heute immer noch der Fall: Entscheidungen für bzw. gegen den Bau von Kernkraftwerken unterliegen einer Vielzahl von Einflüssen und lassen sich nicht auf eine wirtschaftliche Rationalität reduzieren.¹¹⁷ Dennoch werden ökonomische Argumente in der Diskussion um die Kernenergie immer wieder als möglicher Beweggrund genannt.¹¹⁸ Dieser Abschnitt untersucht daher die betriebswirtschaftliche Perspektive (d. h. Investitionen in die Kernenergie), die energiewirtschaftliche Perspektive (d. h. das Zusammenspiel von Kernkraft und anderen Energieträgern) sowie die gesamtwirtschaftliche Perspektive (d. h. unter Berücksichtigung gesamtgesellschaftlicher Nutzen und Kosten). Dabei werden auch unterschiedliche Zeithorizonte berücksichtigt: *i*) In der kurzen Frist (einige Jahre) stellt sich die Frage der vorzeitigen Abschaltung laufender Kernkraftwerke (z. B. wegen fehlender Wirtschaftlichkeit); *ii*) in der mittleren Frist (ca. 5 bis 20 Jahre) stellen sich Fragen von Laufzeitverlängerungen), und *iii*) in der langen Frist (ca. 30 bis 60 Jahre) stellt sich die Frage nach Neubauten von Kernkraftwerken. Darüber hinaus muss noch die sehr lange Frist, d. h. jenseits einer Million von Jahren berücksichtigt werden, in der die ewigkeitskosten der Endlagerung anfallen.

¹¹⁶ Baade, 1958.

¹¹⁷ von Hirschhausen, 2017.

¹¹⁸ IEA, 2019 sowie IAEA, 2020b.

2.1 Einzelwirtschaftliche (betriebswirtschaftliche) Sicht

2.1.1 Kurzfristig (Betrieb)

Kernkraftwerke zeichnen sich durch hohe Fixkosten, d. h. von der erbrachten Stromproduktion unabhängige, und relativ geringen variablen Kosten aus. Damit hatten Kernkraftwerke im laufenden Betrieb früher einen Vorteil gegenüber fossiler Stromerzeugung mit deren höheren variablen Kosten. Jedoch ändert sich dieser anscheinende Kostenvorteil im Verlauf der Systemtransformation grundsätzlich, da fossile Stromerzeugung zunehmend von erneuerbaren Energien ersetzt wird, vor allem von Photovoltaik und Windkraft, die im Betrieb günstiger sind als Kernkraft.¹¹⁹ Bis dahin haben bestehende Kernkraftwerke potenziell Vorteile, insbesondere bei hohen bzw. steigenden CO₂-Preisen für fossile Kraftwerke.

Jedoch gilt selbst im heutigen Stromsystem nicht mehr, dass Kernkraftwerke im laufenden Betrieb kostengünstig sind. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Betriebskosten mit steigendem Alter überproportional ansteigen, u. a. wegen der Fehleranfälligkeit, den Wartungskosten und Ausfallzeiten. Mit dem Erreichen des Endes der geplanten technischen Laufzeit von 30 bis 40 Jahren tritt immer öfter der Verlust der betrieblichen Wettbewerbsfähigkeit auf, das heißt die Unfähigkeit, unter Wettbewerbsbedingungen eine betriebliche Marge zu erwirtschaften.¹²⁰ Angesichts des hohen Alters des weltweiten Kraftwerkspark, welches durchschnittlich bei über 30 Jahren liegt (Abbildung 3), ist mit einer weiteren Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit zu rechnen.

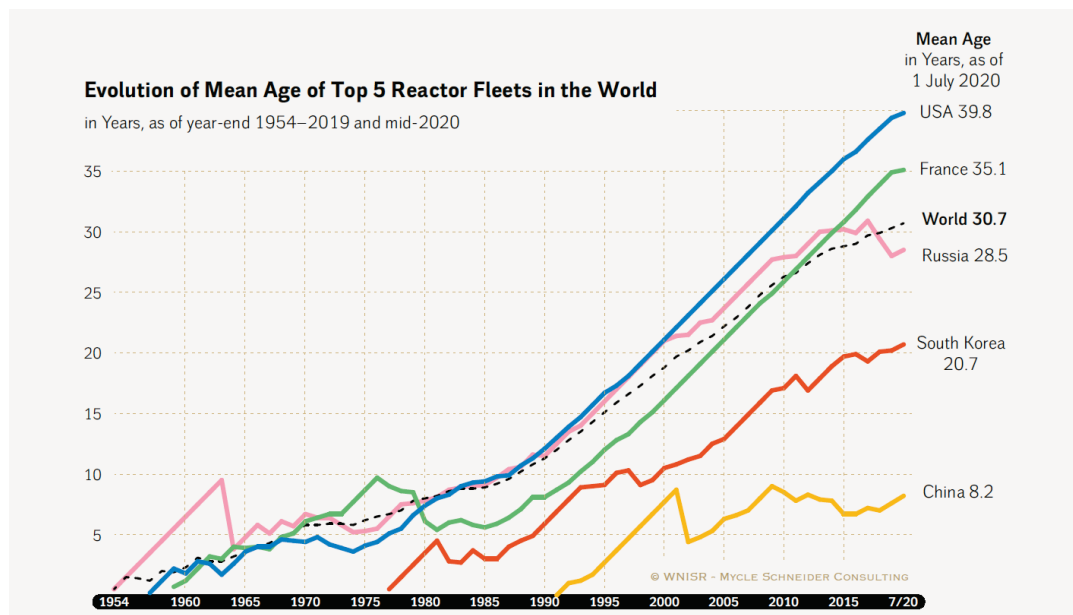


Abbildung 3: Entwicklung der Altersstruktur der Kernkraftwerke weltweit.¹²¹

¹¹⁹ Agora Energiewende, 2017.

¹²⁰ Bradford, 2013; Lovins, 2013; Wealer et al., 2017; vgl. auch Schneider et al., (2020, 2021) für Fallstudienmaterial aus Frankreich.

¹²¹ Schneider et al., 2020, S. 55.

Fehlende Wettbewerbsfähigkeit selbst im Betrieb ist in vielen wettbewerblich organisierten Strommärkten ein Problem für Kernkraftwerke. Besonders deutlich zeigt sich dies in den Vereinigten Staaten, dem Land mit dem weltweit größten Kernkraftwerkpark. Dort sind in den vergangenen Jahren auf der Nachfrageseite die Großhandelspreise u. a. aufgrund einer schwachen Nachfrage, niedriger Gaspreise und steigender Anteile erneuerbarer Energien gesunken, während auf der Angebotsseite die Kosten für den Betrieb und die Wartung alternder Kernkraftwerke gestiegen sind. Bereits 2017 waren laut einer Studie des MIT (Massachusetts Institute of Technology) in den USA 35 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 58 GW unrentabel¹²². Die Betreiber reagieren mit der Schließung ihrer Anlagen: So gingen zwischen 2009 und 2021 in den Vereinigten Staaten 12 Kernkraftwerke vom Netz, obwohl sie noch über Laufzeitberechtigungen von weiteren 10 bis 20 Jahren verfügten. Zugleich ist in den USA auch eine Welle an Forderungen nach Subventionen entstanden, die u. a. in den Staaten New York und Illinois bereits erfolgreich war. Im Mittelpunkt steht dabei das Instrument von Zero Emission Credits (ZECs).¹²³ So zog der vormalige Kernkraftwerksbetreiber Exelon, nach Einführung der ZECs in New York und Illinois, angekündigte Außerbetriebnahmen zurück (Kraftwerke Clinton, Quad Cities, Ginna). Auch in Frankreich sind die Betriebskosten in den letzten Jahren erheblich gestiegen. Neben dem Alter der Kraftwerke waren in Frankreich insbesondere die schlechte Leistung der Kraftwerke aufgrund gesteigener Ausfallzeiten, die den geplanten Zeitrahmen überschreiten, besonders kostspielig.¹²⁴

Auch der Klimawandel hat Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie. Zum Beispiel sorgt der durch den Klimawandel bedingte Anstieg der Wassertemperaturen für immer häufigere Ausfälle durch Extremereignisse (wie auch durch Niedrigwasser, Überschwemmungen, Tornados) und spezielle Ereignisse wie die unerwünschte Ansiedlung von Organismen (biofouling) oder Eisbildung in der Kühlwasserzufuhr im Winter. Diese Ereignisse senken den Wirkungsgrad und somit auch den Ertrag der Kernkraftwerke. In Frankreich, wo der Großteil der Reaktoren mit Flusswasser gekühlt wird, lässt sich das an den Ausfällen in den letzten Jahren beobachten.¹²⁵ Besonders hervorzuheben sind die Hitzesommer 2003 und 2019¹²⁶. 2003 sank in einigen Regionen der Wasserstand in den Flüssen so weit ab, dass die Kühlung nicht mehr möglich war und Kraftwerke abgeschaltet werden mussten, während in anderen Regionen die Wassertemperaturen nach dem Abkühlungsprozess die erlaubten Umweltgrenzen überschritten. Insgesamt erhielten im Hitzesommer 2003 sechs Kernkraftwerke eine solche Ausnahmeregelung von den gesetzlichen Anforderungen und wurden weiterhin betrieben, obwohl die gesetzlichen Grenzwerte überschritten wurden. Die französischen Kernkraftwerke, die (zu dem Zeitpunkt) etwa 75 % des französischen Stroms erzeugen, liefen mit stark reduzierter Kapazität.

¹²² Haratyk, 2017.

¹²³ ZECs sind Zahlungen des Staates an Kernkraftwerksbetreiber, welche von der monetären Bewertung der vermiedenen CO₂-Emissionen aus Kohle- und Erdgaskraftwerken abhängen (Luke, 2020).

¹²⁴ Schneider et al., 2020.

¹²⁵ Schneider et al., 2020.

¹²⁶ www.climateforesight.eu/energy/nuclear-power-feeling-the-heat (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

Darüber hinaus stieg die Stromnachfrage während der Hitzewelle an, da die Bevölkerung u. a. Klimaanlage stärker betrieb und aufstellte. Um Energie zu sparen, hat Frankreich seine Stromexporte um mehr als die Hälfte reduziert.¹²⁷ In Frankreich ist die Tendenz steigend und der Kapazitätsverlust kann kurzfristig über 6 GW oder 10 % der installierten Kapazität betragen.¹²⁸

2.1.2 Mittelfristig (Laufzeitverlängerungen)

2.1.2.1 Laufzeitverlängerungen

Bei einigen Kernkraftwerken stellt sich die Frage, ob Investitionen in eine Verlängerung der ursprünglich geplanten technischen Lebensdauer vorgenommen werden sollten. Dies wird u. a. von einigen aktuellen Studien als ökonomisch sinnvoll eingeschätzt, z. B. dem Joint Research Centre der Europäischen Kommission¹²⁹. Auf europäischer Ebene enthält die Fortschreibung der langfristigen EU-Klimaschutzstrategie (Clean Energy Package) sowie der European Green Deal deutliche Laufzeitverlängerungen.¹³⁰ Auf internationaler Ebene fordert die Internationale Energieagentur, die Kernenergie mit hohen Subventionen zu unterstützen, um die Laufzeiten der bestehenden Reaktoren zu verlängern.¹³¹ Die aktuell betriebenen Kernkraftwerke sind im Allgemeinen für eine Laufzeit von 30 bis 40 Jahren ausgelegt.¹³²

Laufzeitverlängerungen sind oftmals mit erheblichen technischen Nachrüstungen verbunden, die teuer sind und die das oben angesprochene Problem technischer Unsicherheiten verschärfen¹³³. Darüber hinaus führen Laufzeitverlängerungen auch zu zusätzlichen radioaktiven Abfällen, für die aus heutiger Perspektive noch keine saubere und gesellschaftlich vertretbare Lösung besteht. Zwar hängen die Kosten von Laufzeitverlängerungen von den konkreten durchzuführenden Maßnahmen ab und können stark variieren. Ein wesentlicher Aspekt ist die Einschätzung der Aufsichtsbehörden, welche Maßnahmen erforderlich sind, um auf den neuesten „Stand der Technik“ zu kommen.¹³⁴ Dabei ist davon auszugehen, dass diese wesentlichen finanziellen Hürden darstellen. So schätzte der Rechnungshof in Frankreich, in dem Land mit einer weltweit sehr hoch standardisierten Reaktorflotte, dass der Betreiber EDF bis 2030 bis zu 100 Mrd. € investieren muss, um die Lebensdauer der Reaktorflotte um 10 Jahre (von 40 auf 50 Jahre) zu verlängern. Dies entspricht mehr als dem Dreifachen des Börsenwertes von EDF und im Schnitt 1,7 Mrd. € pro Reaktor oder rund 1 500 €/kW Laufzeitverlängerungsinvestitionen, bzw. rund 55 US\$/MWh,¹³⁵ um diesen 10 weitere Jahre laufen zu lassen. Insgesamt schätzt die IEA die Stromgestehungskosten für Laufzeitverlängerungen von 10 bis 20 Jahren zwischen 40 und 55 US\$/MWh ein. Dies entspricht ungefähr den aktuellen Stromgestehungskosten

¹²⁷ UNEP, 2003.

¹²⁸ Schneider et al., 2021

¹²⁹ JRC, 2021.

¹³⁰ European Commission, 2019.

¹³¹ IEA, 2019.

¹³² INRAG et al., 2021.

¹³³ Mohr et al., 2014.

¹³⁴ INRAG et al., 2021, S. Kapitel 5.3.

¹³⁵ IEA, 2019 bzw. Cour des Comptes, 2016, S. 123.

von erneuerbaren Energien (Abbildung 4). Somit ist durch Laufzeitverlängerungen gegenüber dem Zubau erneuerbarer Energien kein wirtschaftlicher Vorteil mehr zu erzielen.

2.1.2.2 Zu unflexibel

Kernkraftwerke werden heute überwiegend in Grundlast eingesetzt und sind daher typischerweise für Einsatzzeiten von ca. 8000 Stunden je Jahr ausgelegt. Technisch können Kernkraftwerke für gewisse Zeitspannen Leistungsgradienten von mehreren Prozent ihrer Nennleistung je Minute fahren, aus wirtschaftlichen Gründen wird diese Fähigkeit derzeit meist nicht genutzt.¹³⁶ In einem System mit hohem Anteil regenerativer Erzeugung können Photovoltaik und Windkraftwerke eine ausreichende Erzeugung an sehr vielen Stunden im Jahr bereitstellen. Die arbeitsabhängigen Kosten von Photovoltaikanlagen liegen bei null, bei Windkraftanlagen nahe Null. Durch einen Stillstand trotz ausreichendem Wind können nur für Teile der Anlage Wartungskosten eingespart werden. Die Materialbelastungen durch die Änderungen der Windgeschwindigkeit bleiben. Auch Laufwasserkraftwerke und Speicherkraftwerke haben sehr niedrige arbeitsabhängige Kosten.

Kernkraftwerke stehen daher in der Merit-Order, also der Einsatzreihenfolge der Kraftwerke, aus wirtschaftlichen Gründen hinter den Erzeugungsanlagen dieser drei Kraftwerkstypen. Ihre Benutzungsdauer sinkt daher in der mittleren Frist mit steigendem erneuerbarem Ausbau. Damit steigen die Kosten je erzeugter Kilowattstunde stark an. Ein steigender Anteil an erneuerbaren Energien verschlechtert somit das Geschäftsmodell der Kernkraftwerke.¹³⁷ Kernkraftwerke werden daher aus wirtschaftlichen Gründen nicht im Lastfolgebetrieb eingesetzt, ihre Fähigkeit zur Leistungsänderung wird daher nicht genutzt. Aus wirtschaftlichen Gründen sind Kernkraftwerke daher der unflexiblen Erzeugung zuzurechnen.

2.1.2.3 Integrationskosten

In der Diskussion über die Integrationskosten erneuerbarer, variabler Stromerzeugung werden einige dieser Aspekte unter dem Begriff der sogenannten „Systemnutzungskosten“ (utilization cost) zusammengefasst.¹³⁸ Strittig ist dabei nicht, dass im Rahmen einer Stromsystemtransformation in Richtung zu Klimaneutralität die Jahresauslastung ehemaliger Kraftwerke, die für den Grundlastbetrieb ausgelegt wurden, sinkt, was dazu führt, dass bei einem steigenden Anteil variabler Einspeisung aus Wind und PV erhebliche Systemkosten anfallen. Kontrovers ist dabei die Höhe der Jahresauslastung, die Zuordnung der Akteure, welche sie verursacht haben, und

¹³⁶ Grünwald & Caviezel, 2017; OECD & Nuclear Energy Agency, 2012; darüber hinaus gibt es auch Gründe, diese Fähigkeit aus Risikobetrachtungen heraus nicht zu nutzen.

¹³⁷ Verbruggen & Yurchenko, 2017.

¹³⁸ Agora Energiewende, 2015.

wer sie daher tragen sollte.¹³⁹ Je weniger Systemnutzungskosten bei der Transformation zur Klimaneutralität anfallen, desto geringer ist der Anteil von Kernkraftwerken.¹⁴⁰

Die Kernkraftindustrie versucht diese Argumentation zu ihren Gunsten umzudeuten, indem sie einen Grundlastvorrang für Kernkraftstrom unterstellt und dann die wachsenden Netzintegrationskosten, scheinbar verursachungsgerecht, der steigenden variablen Einspeisung von Strom aus Wind und Sonne zurechnet. Nur mit einer solchen transformationsresistenten Systemperspektive, bei Ausklammerung sämtlicher Risiko- und Folgekosten der Kernenergie und bei Annahme vollständig unrealistisch günstiger Erzeugungskosten (3–3,5€Cent/kWh), gelangt das Papier von ECR/Renew Europe (2021) zur Schlussfolgerung, Kernenergie könne in Bezug auf Klimaneutralität eine „No-Regret“-Option darstellen.¹⁴¹

2.1.3 Langfristig (Neubauinvestitionen)

2.1.3.1 Historische Gesamtbaukosten

Das in großen Teilen der Bevölkerung sowie in der Kernkraftwerkswirtschaft selbst vorhandene Verständnis, Kernkraft sei eine wirtschaftliche Stromerzeugungstechnik, speist sich einerseits aus den Hoffnungen der Frühzeit der Kernenergie, die Technik könne bzw. müsse eines Tages sehr kostengünstig werden, und die auch im Folgenden regelmäßig wiederholt wurden. So prophezeite einer der ersten Vorsitzenden der US-Atomkommission, Lewis L. Strauss bereits 1954, Kernenergie würde eines Tages „zu billig sein, um Rechnungen zu verschicken“ („too cheap to meter“).¹⁴² Zum anderen beruhen bis heute Wirtschaftlichkeitsrechnungen der Kernenergie-wirtschaft auf sehr optimistischen Kostenprognosen. Die dynamischen Entwicklungen der jeweils anderen Energieträger, wie z. B. Kohle (seit den 1950er Jahren), Erdgas (in den 2000er Jahren) bzw. erneuerbaren Energien (seit den 2010er Jahren, vgl. unten Energiesystemanalyse) wurden dabei systematisch vernachlässigt.

Entgegen dem anfänglichen Optimismus bezüglich potenziell geringer Kosten der Kernenergie zeichnete sich bereits früh ab, dass die Kernenergie keine Chance auf ökonomische Wettbewerbsfähigkeit hatte.¹⁴³ Der ursprüngliche Optimismus bezog sich auf die Möglichkeit, in sogenannten schnellen Reaktoren („schneller Brüter“) aus dem knappen Rohstoff Uran große Mengen an Plutonium zu gewinnen; dies hätte

¹³⁹ Hennicke et al., 2011.

¹⁴⁰ Dieses Argument gilt auch die für grundlastkonzipierten großen Braunkohlekraftwerke.

¹⁴¹ Brouwer & Bergkamp, 2021.

¹⁴² L. Strauss, 1954; mit dieser Aussage wollte Strauss angesichts der sich abzeichnenden Kostenexplosionen der ersten Kernkraftwerke die kommerzielle Seite der im Kalten Krieg aus geostrategischen Interessen entwickelten militärischen Anwendungen, insbesondere die Entwicklung der Wasserstoffbombe, stärken; vgl. (L. Strauss, 1962, S. Chapter XVI "A New Charter for the Atom-Atoms for Power") sowie für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen (Baade, 1958, S. insbesondere Kapitel IV „Atomenergie“). Der Leiter des Manhattan Engineering District (MED) zur Entwicklung von Atombomben, General Leslie Groves, ging noch 1962 davon aus, dass die Kernkraft eines Tages doch noch wirtschaftlich werden würde (Groves, 1983, S. 387).

¹⁴³ Vgl. hierzu die ausführliche technik-historische Aufarbeitungen in Radkau (1983, 2017); Radkau & Hahn (2013).

eine nahezu 100-fache Ausnutzung des Urans ermöglicht.¹⁴⁴ Jedoch gelang die kommerzielle Umsetzung dieses komplexen Prozesses nicht, sodass der erwartete Sprung zur Serienproduktion ausblieb und bis heute ausgeblieben ist (siehe Abschnitt 4.4).¹⁴⁵ Somit wurde der ursprünglich nur als Zwischenlösung vorgesehene einfache Spaltprozess von Uran-235 in Leichtwasserreaktoren zum weltweiten Standard, der in den USA vor allem für U-Boot-Antriebe entwickelt worden war. Die Stromgestehungskosten des ersten kommerziellen US-Kernkraftwerks in Shippingport (Pennsylvania) waren 1957 ca. sieben Mal so hoch wie die eines Steinkohlekraftwerks.¹⁴⁶

Die fehlende Wettbewerbsfähigkeit von Kernkraft ist somit kein neues Phänomen, sondern begleitet deren kommerzielle Nutzung von der ersten Stunde an. Sowohl in den USA als auch später in anderen Ländern musste die Ausrüstungs- und Energiewirtschaft mit erheblichen Subventionen an die Kernkraft herangeführt werden. Kein einziger Bau der mehr als 600 seit 1951 errichteten Reaktoren ist mit rein privatwirtschaftlichem Kapital und in einem wettbewerblichen Marktumfeld erfolgt.¹⁴⁷

2.1.3.2 Aktuelle Gesamtbaukosten

Unterschätzt und steigend

Auch im weiteren Verlauf kam es beim Neubau von KKW's seit den 1960er Jahren nicht zu Kostendegressionen, vielmehr stiegen die Kosten (pro Kilowatt (kW) Leistung) kontinuierlich an. Fehlende Wirtschaftlichkeit und steigende Kosten dominieren die kommerzielle Kernkraftwirtschaft bis heute.¹⁴⁸ Die ökonomische Literatur verwirft die Hypothese, dass die Kernenergie unter anderem dank Diffusion, Skaleneffekten und positivem Lernen wettbewerbsfähig geworden sei. Der Trend der steigenden und unterschätzten Kapitalkosten wurde bereits früh beobachtet.¹⁴⁹ In den USA haben sich zwischen 1970 und 1989 die spezifischen Gesamtbaukosten verfünzfach, von etwa 1 200 auf mehr als 17 000 US\$₂₀₁₈/kW.¹⁵⁰ Auch das französische Atomprogramm, das unter besseren institutionellen Rahmenbedingungen und standardisierter ablief, weist eine Kostenescalation auf: nach 1990 fertiggestellte Blöcke waren 3,5-mal so teuer wie die ersten Reaktoren in den 1970er Jahren.¹⁵¹

¹⁴⁴ von Hippel et al., 2019, Kapitel 2: „The Dream“.

¹⁴⁵ Pistner & Englert, 2017; von Hippel et al., 2019.

¹⁴⁶ Mit (umgerechnet) ca. 22 Pfennig₁₉₅₇/kWh (5,19 US-cents₁₉₅₇ /kWh) war Shippingport 1957 wesentlich teurer als ein Steinkohlekraftwerk mit ca. 3 – 4 Pfennig/kWh (ca. 0,7 – 0,9 US-cents₁₉₅₇ /kWh) (Baade, 1958, S. 125); diese Kostendifferenz wäre selbst bei sinkenden Kapitalkosten und einem steigenden Wirkungsgrad der Kernkraft nicht aufzuholen gewesen.

¹⁴⁷ Bradford, 2012; Wealer et al., 2018.

¹⁴⁸ Dieser Abschnitt bezieht sich auf die Anwendung von Kernkraft in marktwirtschaftlichen Systemen, in denen die verwendeten monetären Größen zu mindestens grob abgeschätzt und auch kontrolliert werden können; bei (teilweise sehr optimistischen) Aussagen zu Kostenstrukturen z. B. in Russland oder China ist dies nicht der Fall.

¹⁴⁹ DOE/EIA, 1986; Mooz, 1978, 1979.

¹⁵⁰ Koomey & Hultman, 2007 (Gesamtbaukosten hier als Overnight Construction Cost (OCC) plus Finanzierungskosten).

¹⁵¹ Grubler, 2010.

Den Trend der Kostensteigerung kann man auch bei den aktuell verfügbaren Reaktoren der dritten Generation¹⁵² beobachten. So haben sich die Kostenschätzungen für den EPR (European Pressurized Water Reactor) des französischen Reaktorherstellers Framatome fast versechsfacht, von ursprünglichen 2 200 US \$₂₀₁₈/kW auf etwa 12 000 US \$₂₀₁₈/kW.¹⁵³ Die aktuellen Kostenschätzungen für das französische Bauprojekt Flamanville-3 belaufen sich aktuell auf rund 19,1 Mrd. €. ¹⁵⁴ Auch die geschätzten Kosten für das Kernkraft-Neubauprojekt Hinkley Point C in Großbritannien stiegen bereits von 22 Mrd. US \$₂₀₁₈ (6 750 US \$₂₀₁₈/kW) auf ca. 27 Mrd. US \$₂₀₁₈ (ca. 8 300 US \$₂₀₁₈/kW).¹⁵⁵ Die Kosten für den AP1000 von Westinghouse steigen ebenfalls weiter an, so haben sich die Baukosten am Standort Vogtle in den USA bereits mehr als verfünffacht.¹⁵⁶ Bis Ende 2021 wurde noch kein Reaktor der dritten Generation in einer westlichen Marktwirtschaft fertig gebaut.

Investitionsrechnungen für Kernkraftwerke mit großen Leistungen

Die beiden campusweiten Studien des MIT¹⁵⁷ und der University of Chicago¹⁵⁸ stimmen darin überein, dass die Kernenergie bereits um die Jahrhundertwende mit Kohle und Erdgas nicht konkurrenzfähig war – eine Einschätzung, die bis heute gültig bleibt.¹⁵⁹ Unter Berücksichtigung der aktuellen Trends bei Kernkraftwerken der dritten Generation zeigt eine Analyse von aktuellen und zukünftigen Kernkraftwerksinvestitionen, dass Investitionen in Kernkraftwerke nicht profitabel sind, d. h. die erwarteten Kapitalwerte sind stark negativ, zwischen minus fünf und minus 10 Mrd. US \$₂₀₁₈ pro Kernkraftwerksbau.¹⁶⁰ Hauptsächlich sind die hohen Baukosten, einschließlich Kapitalkosten, und unsichere und niedrige Einnahmen die Gründe. Auch eine Verlängerung der Reaktorlaufzeiten auf 60 Jahre verbessert die Ergebnisse nicht wesentlich. Zudem sind zusätzliche Kosten (Rückbau, Langzeitlagerung) und die gesellschaftlichen Kosten von Unfällen in diesen Rechnungen nicht berücksichtigt.

Aktuelle Berechnungen von durchschnittlichen Stromgestehungskosten¹⁶¹ für die USA bestätigen die strukturellen Kostennachteile der Kernkraft (Abbildung 4): Während die Kosten der erneuerbaren Energieträger stark sinken, steigen die Kosten von Strom aus Kernkraft weiter an. Zwar sind die Systemkosten der jeweiligen Technologien nicht berücksichtigt, so z. B. Rückbau, Endlagerung und Versicherungskosten

¹⁵² Die Prototypreaktoren (1950er- und 1960er-Jahre) stellen die erste Reaktorgeneration dar; als zweite Generation folgten die ersten großen Leistungsreaktoren der 1970er- und 1980er-Jahre; die derzeitig verfügbaren und weiterentwickelten Leichtwasserreaktoren sind die dritte Generation. Für mehr Details siehe Küppers & Pistner (2012).

¹⁵³ Thomas, 2010b.

¹⁵⁴ Cour des Comptes, 2020.

¹⁵⁵ Wealer, Bauer, et al., 2021.

¹⁵⁶ Schneider, Froggatt, Hazemann, Katsuta, Lovins, Ramana, Hirschhausen, & Wealer, 2019.

¹⁵⁷ MIT, 2003.

¹⁵⁸ University of Chicago, 2004.

¹⁵⁹ Davis, 2012.

¹⁶⁰ Wealer, Bauer, et al., 2021.

¹⁶¹ Die Stromgestehungskosten beinhalten die Kapitalkosten, Finanzierungskosten, fixe und variable Kosten, Brennstoffkosten und setzen diese Kosten in Relation zur Gesamtstromerzeugung.

für Kernkraftwerke und Speicher zur zeitlichen Flexibilisierung bei Erneuerbaren. Jedoch ist angesichts des beschriebenen Trends nicht damit zu rechnen, dass große Kernkraftwerke wettbewerbsfähig werden.¹⁶²

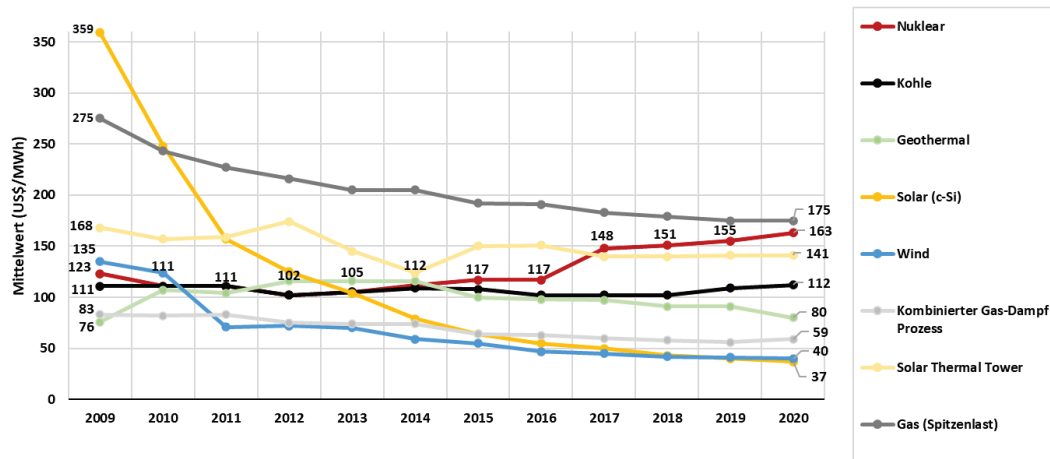


Abbildung 4: Stromgestehungskosten verschiedener Erzeugungstechnologien (2009 – 2020).¹⁶³

Investitionen in SMR-Konzepte

Auch Investitionen in die sog. SMR sind marktwirtschaftlich uninteressant, da Bau- und Betriebskosten pro Einheit der Stromerzeugungskapazität bei SMR-Anlagen höher sind als bei großen Kraftwerken und Strom aus SMR-Anlagen somit teurer ist.¹⁶⁴ Bei den aktuell am weitesten fortgeschrittenen SMR-Konzepten kann man bereits den Trend der unterschätzten Baukosten in der Kernenergieindustrie beobachten:¹⁶⁵

- So stiegen die Kosten für den chinesischen Versuchsreaktor CEFR von geplanten 1210 US\$/kWe auf 19357 US\$/kWe,
- die Baukosten für den russischen KLT-40S, der 2020 in Betrieb ging („Akademik Lomonossov“), wurden ursprünglich auf 2428 US\$/kWe geschätzt. Aktuell belaufen sich die Kostenschätzungen zwischen 10500–14000 US\$/kWe,
- beim argentinischen CAREM stiegen die Kosten von ursprünglich geplanten 1388 US\$/kWe auf 14000 US\$/kWe (der Reaktor ist noch im Bau).

Bei den SMR-Konzepten geht der Skaleneffekt der Großreaktoren verloren. Jedoch wird oft postuliert, dass dieser durch Kostenersparnisse durch Modularität überkompensiert werden soll. Modularität kann theoretisch sowohl im standardisierten Bau von Reaktoren als auch in der Massenproduktion von Komponenten bestehen. Je-

¹⁶² Diese Einschätzung wird auch in der Energiewirtschaft weitgehend geteilt. Vgl. die Einschätzung von RWE-Vorstandsvorsitzender Schmitz: [Der Neubau von Kernkraftwerken, von Autoren zugefügt] „(...) ist ganz unabhängig von der immer noch nicht geklärten Entsorgungsfrage schon wirtschaftlich völliger Unsinn. Warum soll man Milliarden Euro in eine Technologie investieren, bei der die Kilowattstunde Strom mindestens zehn Cent kostet, wenn es mit Windkraft schon für vier Cent geht? Das leuchtet mir nicht ein.“ www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/rolf-martin-schmitz-rwe-ueber-kohleausstieg-irgendwann-reicht-es-mir-jedenfalls-a-00000000-0002-0001-0000-000169122953, (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

¹⁶³ Lazard, 2020.

¹⁶⁴ Ramana, 2021.

¹⁶⁵ Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021.

doch sind signifikante Kostenersparnisse aufgrund stärkerer Modularität in den vergangenen Reaktorentwicklungen nicht zu beobachten und auch für die Zukunft nicht zu erwarten. Eine im Rahmen eines Gutachtens für das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung durchgeführte Produktionskostenrechnung „unter Berücksichtigung von Skalen-, Massen- und Lerneffekten aus der Atomindustrie legt nahe, dass im Mittel dreitausend SMR produziert werden müssten, bevor sich der Einstieg in die SMR-Produktion lohnen würde. Es ist somit nicht zu erwarten, dass der strukturelle Kostennachteil von Reaktoren mit kleiner Leistung durch Lern- bzw. Masseneffekte kompensiert werden kann.“¹⁶⁶

2.2 Kosten für Rückbau und Endlagerung

2.2.1 Rückbau

Der Rückbau von Reaktoren ist ein wichtiges Element der Produktionskette eines Kernkraftwerks, dessen technische und finanzielle Herausforderungen immer noch weitgehend unterschätzt werden. Rund 60% der abgeschalteten Reaktoren befinden sich in Europa (90 in Westeuropa und 23 in Mittel- und Osteuropa), gefolgt von Nordamerika (44 Reaktoren) und Asien (32 Reaktoren). Mitte 2020 befanden sich weltweit 169 Reaktoren in verschiedensten Phasen des Rückbaus.¹⁶⁷ Insgesamt haben jedoch nur 20 Reaktoren den Rückbau technisch abgeschlossen. Diese Reaktoren verfügen kumuliert über eine Kapazität von rund 6 GW. Somit handelt es sich um ältere Kernkraftwerke mit geringen Leistungen oder Demonstrationsreaktoren. Ein „klassisches Kernkraftwerk“, also ein Leistungsreaktor mit über 1 Gigawatt an elektrischer Kapazität und 40 Jahre Betriebsdauer, wurde bisher weltweit noch nicht vollständig rückgebaut. Von den 20 Rückbauprojekten wurden wiederum nur die Hälfte der Reaktoren vollständig bis zur grünen Wiese zurückgebaut, das heißt: der Standort sieht wieder so aus wie vor dem Kraftwerksbau.

Die einzigen Länder, die einzelne Anlagen vollständig zurückgebaut haben, sind die Vereinigten Staaten (14), Deutschland (5) und Japan (1). Die frühen Kernenergiestaaten Kanada, Frankreich, Russland und U.K. haben keinen einzigen Reaktor vollständig rückgebaut. Im Gegenteil, anstatt sich dem Rückbauprozess zu stellen überführen diese Länder größtenteils ihre Anlagen in den langfristigen Einschluss, eine Strategie, bei der der Rückbaubeginn mehrere Jahrzehnte in die Zukunft verschoben wird.

Zusätzlich zu mangelnder Vorbereitung und technischem Know-how haben Länder auch mit finanziellen Engpässen bei der Finanzierung des Rückbaus zu kämpfen. Die begrenzten Erfahrungen aus den wenigen abgeschlossenen Projekten zeigen ein breites Spektrum an Unsicherheiten bei den Kosten, und zwar bis zu einem Faktor 5. In den USA unterschieden sich die Rückbaukosten zwischen den einzelnen Reaktoren von 280 US\$/kW bis zu 1 500 US\$/kW. In Deutschland wurde ein Reaktor mit 1 700€/kW, ein weiterer mit 9 300€/kW rückgebaut.¹⁶⁸ Der Gesamtbetrag der

¹⁶⁶ Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021.

¹⁶⁷ Dieser Abschnitt beruht im Wesentlichen auf dem „Decommissioning Status Report“ als Teil des „World Nuclear Industry Status Report“; Details in Schneider, et al. (2018, 2020, 2021; 2019).

¹⁶⁸ Der Welt-Atomüll-Bericht, 2019.

Mittel, der per Gesetz von den Betreibern angesammelt werden muss, wird anhand von Schätzungen der Rückbaukosten berechnet. Viele Länder, wie Frankreich, Deutschland und die USA, stützen ihre Schätzungen für Rückbaukosten auf Studien aus den 1970er und 1980er Jahren.¹⁶⁹

2.2.2 Endlager

Wie beim Rückbau, trifft die fehlende empirische Unterlegung für Kostenschätzungen umso mehr auf die Endlagerung zu – mit bis dato keinem fertig gebauten tiefengeologischen Endlager für hochradioaktive Abfälle weltweit.¹⁷⁰ Zusätzlich basieren die hier existierenden Schätzungen ebenfalls auf veralteten Studien. So basiert die deutsche Kostenschätzung für das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle beispielsweise immer noch teilweise auf einer extrem groben Schätzung aus dem Jahre 1997 für den früher in Betracht gezogenen Standort Gorleben. Darüber hinaus ist es fast unmöglich, internationale Kostenschätzungen zu vergleichen. Zum Beispiel lagert Frankreich hauptsächlich verglaste Abfälle aus der Wiederaufbereitung ein, während die Mengen an abgebrannten Brennelementen für die Endlagerung in den USA sehr viel höher sind als in Deutschland. In Frankreich hat die staatliche Organisation ANDRA die Kosten für die Endlagerung auf 31 Mrd. € geschätzt. In den USA hat das Energieministerium 2008 die Kosten für das damals geplante Endlager Yucca Mountain auf ungefähr 96 Mrd. US\$ geschätzt. In Deutschland werden die diskontierten Kosten für eine Endlagerung für die 27 000 m³ überwiegend abgebrannter Kernbrennstoffe auf ungefähr 8,3 Mrd. € geschätzt, die nicht-diskontierten Kosten belaufen sich auf 51 Mrd. €. 2017 wurden in Deutschland 24,1 Milliarden € für die Entsorgung (von schwach- und mittlerradioaktiven sowie hochradioaktive Abfällen inkl. Zwischenlagerung) in den sogenannten Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung („Kenfo“) eingezahlt. Durch entsprechende Kapitalanlagen sollen die darin zur Verfügung gestellten Mittel bis zum Jahr 2100 auf rund 170 Milliarden Euro ansteigen. Obwohl Deutschland diesbezüglich im internationalen Vergleich relativ weitgehende Vorkehrungen dafür getroffen hat, dass die Entsorgungskosten nicht auf zukünftige Generationen abgeschoben werden, ist heute weder absehbar, ob die avisierten Renditen erreicht werden können, noch ob diese Summen letztendlich ausreichen werden.¹⁷¹ Letztlich unterliegen alle Kostenschätzungen für die Endlagerung (dies gilt auch für den Rückbau) hohen Unsicherheiten aufgrund von sehr langen Zeiträumen, möglichen und oftmals nicht berücksichtigten Kostensteigerungen und geschätzten Diskontierungsraten (Kapitalbildung der Finanzmittel) und diese führen in der Tendenz zu einer Unterschätzung der zukünftigen Kosten.

¹⁶⁹ Der Welt-Atommüll-Bericht, 2019.

¹⁷⁰ Dieser Abschnitt beruht im Wesentlichen auf: (Der Welt-Atommüll-Bericht, 2019).

¹⁷¹ Hirschhausen et al., 2015.

2.3 Energiewirtschaftliche Sicht und Energiesystemmodellierung

2.3.1 Vergleich internationaler Energieszenarien

Der Einsatz von Energiesystemmodellen erlaubt es Wissenschaftler:innen anhand von Szenarien, einen Blick in die Zukunft zu werfen. Modelle helfen dabei, z. B. die technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Transformationspfade zu untersuchen und aus den Ergebnissen Empfehlungen für Politik und Entscheidungsträger:innen abzuleiten. Aufgrund der Komplexität und der Vielzahl an Variablen geht es dabei nicht ausschließlich um die Ermittlung konkreter Zahlen, sondern insbesondere um die Ermittlung und den Vergleich unterschiedlicher Lösungswege. Die Rahmenbedingungen und Eingangsvariablen sind dabei wichtige Größen, welche die zu berechnenden Szenarien entscheidend beeinflussen, und damit auch Politikum.¹⁷²

Eine Darstellung ausgewählter internationaler Energieszenarien weist ein sehr heterogenes Bild auf (Abbildung 5): Faktisch gibt es zwei Hauptgruppen: i) Szenarien, welche die Kernkraft auslaufen lassen; ii) Szenarien, die auf einen starken Ausbau der Kernkraft setzen.

2.3.1.1 Szenarien mit auslaufender Kernkraft

Szenarien mit auslaufender Kernkraft verweisen auf die Risiken der Kernkraft sowie auf die hohen Kosten, neben schwindendem Rückhalt in der Bevölkerung. Diese Gruppe besteht aus zwei Untergruppen: Einerseits internationale Nichtregierungsorganisationen, andererseits unabhängige Forschergruppen, die nachhaltige Energiesysteme untersuchen.¹⁷³ Aktuelle Studien zeigen sehr deutlich auf, dass ein Energiesystem, das vollständig auf erneuerbaren Energien basiert, kosteneffizienter ist als das gegenwärtige Energiesystem.¹⁷⁴ Die Möglichkeit, Kernkraft bis zur Mitte des Jahrhunderts auslaufen zu lassen, hat schon der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung im Jahr 2003 aufgezeigt.¹⁷⁵ Dabei projizierte er einen 66 % Solarenergieanteil für das Ende des 21. Jahrhunderts – ein Ergebnis, das in Folge der erheblichen Kostensenkungen in einer Reihe von Schlüsseltechnologien nun für 2050 klar dargestellt werden kann.¹⁷⁶ Weitere Arbeiten, die ein weltweites Energiesystem frei von fossil-nuklearen Energien untersucht haben, wurden bereits veröffentlicht.¹⁷⁷ Diese stellen den aktuellen Stand der Erkenntnis in dieser Spezialdisziplin, die von Bent Sørensen mit der historisch ersten Arbeit zu einem globalen vollständig erneuerbaren Energiesystem in den 1990ern begründet wurde.¹⁷⁸

¹⁷² Zum Beispiel der zukünftige Strombedarf, Lastprofile oder Potential und Kosten insbesondere zum Ausbau von erneuerbaren Energien.

¹⁷³ Für internationale Nichtregierungsorganisationen siehe Greenpeace et al. (2015) und WWF (2011); für unabhängige Forschergruppen siehe Bogdanov et al. (2021) und Teske et al. (2021).

¹⁷⁴ Bogdanov et al., 2019, 2021.

¹⁷⁵ WBGU, 2003.

¹⁷⁶ Bogdanov et al., 2019, 2021.

¹⁷⁷ Breyer et al., 2021; Jacobson et al., 2019; Löffler et al., 2017; Pursiheimo et al., 2019.

¹⁷⁸ Sørensen, 1996.

Die weltweite Entwicklung der Kernkraft in den Jahren 2000 bis 2020 weist weitestgehend unveränderte Werte der Stromerzeugung auf, von 2586 TWh im Jahr 2000 zu 2698 TWh im Jahr 2020, mit einem Tiefpunkt nach Fukushima von 2461 TWh im Jahr 2012.¹⁷⁹ Da die weltweite Stromerzeugung im selben Zeitraum von 15 477 TWh auf 26 778 TWh zugenommen hat, reduzierte sich der relative Beitrag von Kernkraft von 16,7 % auf 10,1 %. Die Entwicklung der Jahre 2000 bis 2020 legt nahe, dass Kernkraft keinen nennenswerten Beitrag zur Treibhausgasemissionsminderung beitragen wird, da neben den prohibitiv hohen Kosten, inhärenten Sicherheitsrisiken auch noch die extrem langen Bauzeiten bei neuen Kernkraftwerken hinzukommen.¹⁸⁰ Grundsätzlich könnte dieser Trend durch Laufzeitverlängerungen von Kernkraftwerken abgeschwächt und um ein bis zwei Jahrzehnte verlängert werden, wobei weitere Investitionen zur Aufrechterhaltung von Sicherheitsstandards notwendig sind, die aber die inhärenten Sicherheitsrisiken kaum verändern. Diese Effekte lassen die relative Bedeutung von Kernkraft kontinuierlich schwinden. Die zentralen Stromerzeugungstechnologien sind Photovoltaik und Windkraft, welche zusammen mit den anderen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien im Jahr 2020 82 % des weltweiten Kapazitätszubaues ausmachen, nicht nur wegen der herausragenden Kosteneffizienz, sondern auch, weil eine sehr schnelle Skalierung zu sehr hohen Kapazitäten möglich ist, auch wegen sehr kurzer Projektierungs- und Bauzeiten.¹⁸¹

2.3.1.2 Szenarien mit zunehmender Kernkraft

Die Internationale Energieagentur dokumentierte zwar in ihrem World Energy Outlook 2020, dass Kernkraft inzwischen die teuerste Art der Stromerzeugung bei Neuanlagen ist. Dies hält die IEA aber nicht davon ab, in allen ihren Szenarien von einem deutlichen Zubau von neuen Kernkraftanlagen auszugehen, womit eine mangelnde Kosteneffektivität aller IEA-Szenarien indiziert wird.¹⁸² Das Net-Zero Emission 2050-Szenario (NZE2050) der IEA steht im Widerspruch zu einem unabhängigen kostenoptimierten Best Policy Szenario.¹⁸³ Eine NZE2050-Variation mit weniger Kernkraft und Kohlenstoffabscheidung von Gas- und Kohlekraftwerken wird dargestellt, jedoch wird angegeben, dass damit höhere Kosten für das Energiesystem verbunden wären infolge höherem Speicher- und Ausgleichsbedarfs, was einerseits nicht detailliert ausgeführt wird, und andererseits mit den Schlussfolgerungen im in stündlicher Auflösung gerechneten Best Policy Szenario im Widerspruch steht.

¹⁷⁹ IEA, 2002, 2014, 2021.

¹⁸⁰ Schneider et al., 2020 bzw. Kapitel 6.

¹⁸¹ IRENA, 2021b.

¹⁸² IEA, 2020, 2021.

¹⁸³ Bogdanov et al., 2019, 2021.

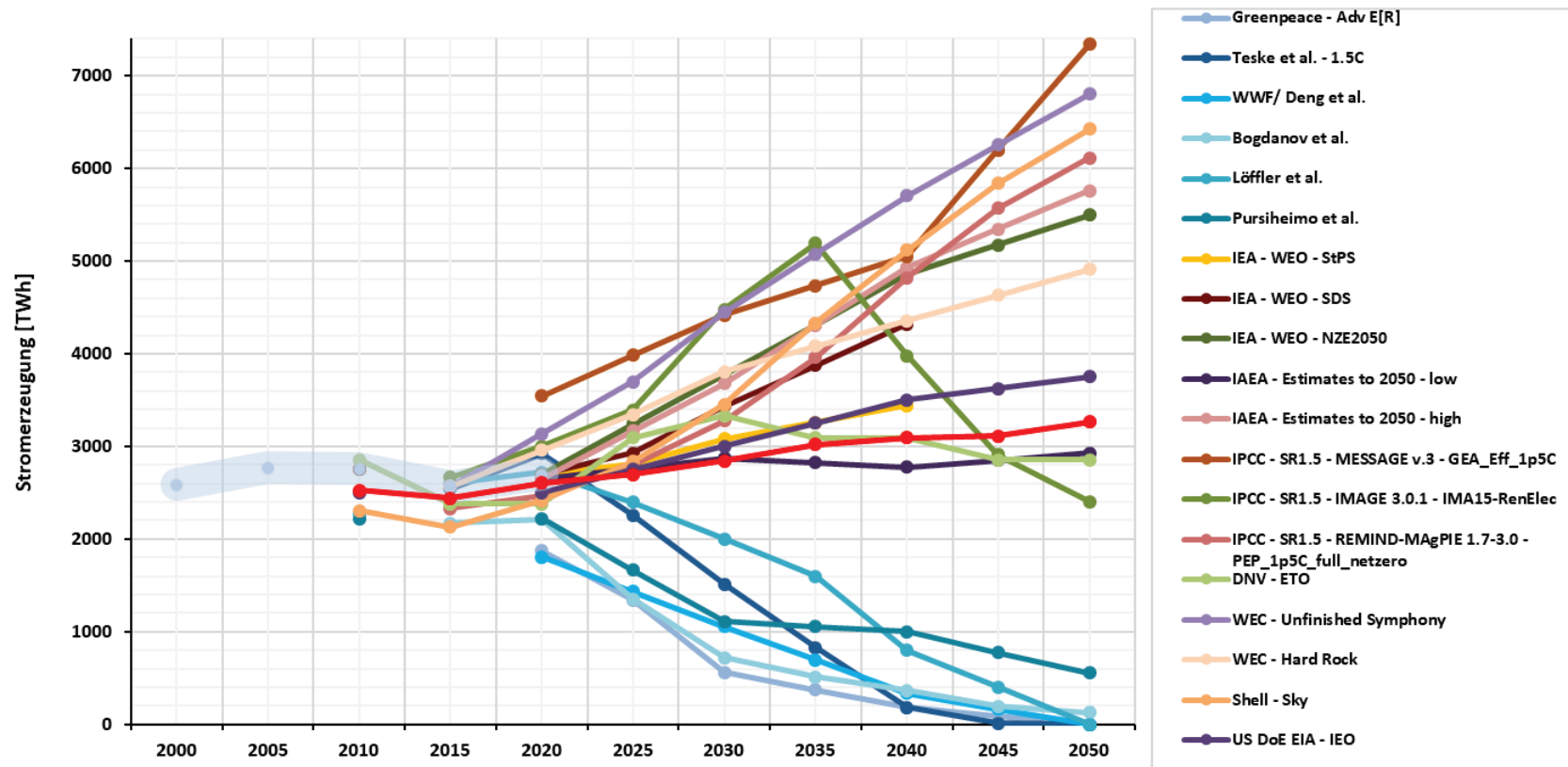


Abbildung 5: Projektierter Entwicklung der Elektrizitätserzeugung von Kernkraft in internationalen Energieszenarien.¹⁸⁴

¹⁸⁴ Quelle: Eigene Darstellung. Die starke Streuung der Stromerzeugung von Kernkraft im Jahr 2020 um die tatsächliche Erzeugung von 2 689 TWh lässt sich durch vier wesentliche Effekte erklären: Erstens durch die unterschiedlichen Zeiträume der Studiererstellung, welche zu abweichenden Projektionen führen; zweitens durch die Unsicherheit bezüglich eines möglichen Weiterbetriebs der nach Fukushima abgeschalteten japanischen Kernkraftwerke; drittens durch die zunehmenden Tendenz, höhere Risiken durch Laufzeitverlängerungen auch deutlich jenseits der ursprünglichen technischen Auslegung einzugehen; viertens durch die sich regelmäßig verzögernden Bauphasen der gegenwärtigen Kernkraftwerksprojekte.

Die drei IEA-Szenarien liegen innerhalb des niedrigen und hohen Kernkraftszenarios der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO, englisch IAEA).¹⁸⁵ Die IAEO legt allerdings kein Energieszenario vor und geht in ihrem Ausblick auch nicht auf die hohen Kosten der Kernkraft ein. Vielmehr geht die IAEO von einer negativen Wirkung von variablen erneuerbaren Energien auf die Kernkraft aus und vermutet dies aufgrund von Subventionen für erneuerbare Energien. Dabei bleibt einerseits unerwähnt, dass die erneuerbaren Energien inzwischen die kostengünstigste Form der Elektrizitätserzeugung sind, und gleichzeitig werden die umfangreichen Subventionen für die Kernkraft nicht thematisiert.

Der Weltenergieerater (WEC) projiziert in seinen Szenarien einen Anstieg der Stromerzeugung aus Kernkraft von ca. 60%-120%.¹⁸⁶ Jedoch gibt er keine Kostenannahmen für seine Szenarien an; damit sind keinerlei Aussagen zu Kostenvergleichen möglich und folglich ist auch eine Diskussion dieser Szenarien unmöglich. Vergleichbare Transparenzdefizite sind bei der Internationalen Erneuerbaren Energieagentur zu konstatieren, die keine Kostenannahmen zu ihrem World Energy Transition Outlook zugänglich macht.¹⁸⁷ Die Elektrizitätserzeugung mittels Kernkraft soll laut IRENA bis 2050 zunehmen, trotz der Risiken und hohen Kosten der Kernkraft.

Der Weltklimarat (IPCC) stellt eine Szenariodatenbank bereit, in welcher sich 1,5 °C-Szenarien finden lassen.¹⁸⁸ Die Szenarien speisen sich weitgehend aus integrierten Klima-Energiemodellen (Integrated Assessment Models, IAMs). Von den drei führenden IAMs wurden repräsentative Szenarien ausgewählt, von denen zwei eine massive Zunahme der Kernkraft um ca. 110–150% annehmen, und ein drittes Szenario, das nach einer anfänglichen Zunahme in 2050 einen 20% Rückgang der Kernkraftproduktion projiziert, da in diesem Szenario die Bedeutung von erneuerbaren Energien stärker betont wird. Die Kostenannahmen der IAMs wurden im Bereich der Photovoltaik (PV) deutlich kritisiert.¹⁸⁹ Hauptkritikpunkt ist, dass selbst für 2050 höhere PV-Kosten angenommen werden, als heute in den Märkten üblich sind, was im Vergleich zu Projektionen von PV-Experten ca. 3- bis 5-fach zu hohe PV-Kosten in IAM-Szenarien indiziert.¹⁹⁰ Umgekehrt werden Investitionskosten von Kernkraft bei IAMs oftmals niedriger angesetzt, als von der IEA mit 6 600 US\$/kW für aktuelle Neubauten angegeben wird. Die Kombination aus stark überschätzten PV-Kosten und stark unterschätzten Kosten der Kernkraft führt zu einer strukturellen Verzerrung.¹⁹¹ Die Kostenannahmen der IEA widersprechen zudem der langfristigen Erkenntnis, dass neue Kernkraftwerke konsistent höhere Kosten aufweisen als vorangegangene Neubauten: Dies wird durch tatsächlich erreichte Kosten von Kernkraftwerksneubauten in Europa und den USA bestätigt (siehe Abschnitt 3.1) und wird auch als „negative Lernkurve“ bezeichnet.¹⁹²

¹⁸⁵ IAEA, 2020c.

¹⁸⁶ WEC et al., 2019.

¹⁸⁷ IRENA, 2021a.

¹⁸⁸ IPCC, 2018.

¹⁸⁹ Victoria et al., 2021; Xiao et al., 2021.

¹⁹⁰ Vartiainen et al., 2020.

¹⁹¹ IEA, 2020; Krey et al., 2019.

¹⁹² Grubler, 2010. Zudem für Europa (Ram et al., 2018) und USA (Lazard, 2020).

Die Szenarien, die von einem deutlichen Anstieg der Stromerzeugung von Kernkraft ausgehen, weisen im Regelfall mindestens eines der folgenden Merkmale auf: unrealistisch niedrige Investitionskosten für Kernkraft, deutlich veraltete und damit zu hohe Stromkosten aus Erneuerbarer Energien, und deutlich zu hohe Systemintegrationskosten von Erneuerbaren Energien insbesondere im Bereich Speicherung und Abregelung, aber auch ein erhebliches Maß an Inkonsistenz und mangelnde Betrachtung der industriellen Machbarkeit eines massiven Kernkraftzubaues. Manche Szenarien weisen alle vier Merkmale auf, bzw. zeichnen sich durch eine hohe Intransparenz in den Kostenannahmen auf. Das Shell Sky-Szenario projiziert zum Beispiel eine Zunahme von ca. 170% in der Elektrizitätserzeugung von Kernkraftwerken bis 2050 und reiht sich damit ein in Szenarien, welche die Kosteneffektivität nur nachrangig berücksichtigen.¹⁹³

Die Szenarien, welche von einem starken Ausbau der Kernkraft ausgehen, projektieren einen Anteil der Kernkraft im Jahr 2050 zwischen 8% und 14%. Der relative Anteil von 14% wurde in der zweiten Hälfte der 2000er Jahre unterschritten und befindet sich seither im stetigen Niedergang. Aufgrund der extrem hohen Kosten von neuen Kernkraftwerken dokumentieren die Szenarien, die von einem Anteil von 8% bis 14% der Kernkraft zur Elektrizitätserzeugung ausgehen, einen Mangel an Wirtschaftlichkeit. Auch ist zu berücksichtigen, dass der Strombedarf insgesamt wegen neuer elektrizitätsbasierter Anwendungen, insbesondere Wärmepumpen, Elektromobilität und Wasserstoffelektrolyse stark ansteigen wird. Aufgrund der sehr langen Bauzeiten von Kernkraftwerken und den bisher bekannten Planungen von Bauprojekten ist ein gleichbleibender Anteil daher nicht plausibel. In den 2020er Jahren erreichen alle Staaten der G20 niedrigere Stromgestehungskosten mit Photovoltaik und Windkraft als mit Kernkraft, Erdgas oder Kohle (Abbildung 4).

Es lässt sich daher festhalten, dass internationale Institutionen konsistent von einem erheblichen Kapazitätszubaue der Kernkraft ausgehen, wobei durchwegs intransparente Kostenbetrachtungen festzustellen sind, oder – im Falle von Szenarien für den IPCC – infolge erheblich verzerrter Kostenannahmen keine realistischen Szenarien im Bereich der Kernkraft erwartet werden können. Sowohl Nichtregierungsorganisationen als auch unabhängige Studien finden jedoch Pfade im Bereich von 100% erneuerbarer Energien, in denen die Kernkraft ausläuft. Im Falle von aktuellen Studien wird eine deutliche Kostensenkung im Stromsektor als Folge einer Energiewende hin zu 100% erneuerbaren Energien aufgezeigt, die sich konsistent bei allen G20-Staaten niederschlägt.¹⁹⁴ Das Szenario von Bogdanov u. a. (2021) ist derzeit das einzig bekannte Szenario für das gesamte Energiesystem, welches die Einhaltung des 1,5 °C-Ziels in der Definition des IPCC¹⁹⁵ bei einer weiteren Zunahme der Energiedienstleistungen aufzeigt und dabei einen kostenneutralen Pfad beschreibt, welcher ohne fossile und nukleare Energien im Jahr 2050 auskommt.

¹⁹³ Shell International, 2021.

¹⁹⁴ Ram et al., 2018, Bogdanov et al., 2019, 2021.

¹⁹⁵ IPCC, 2018a.

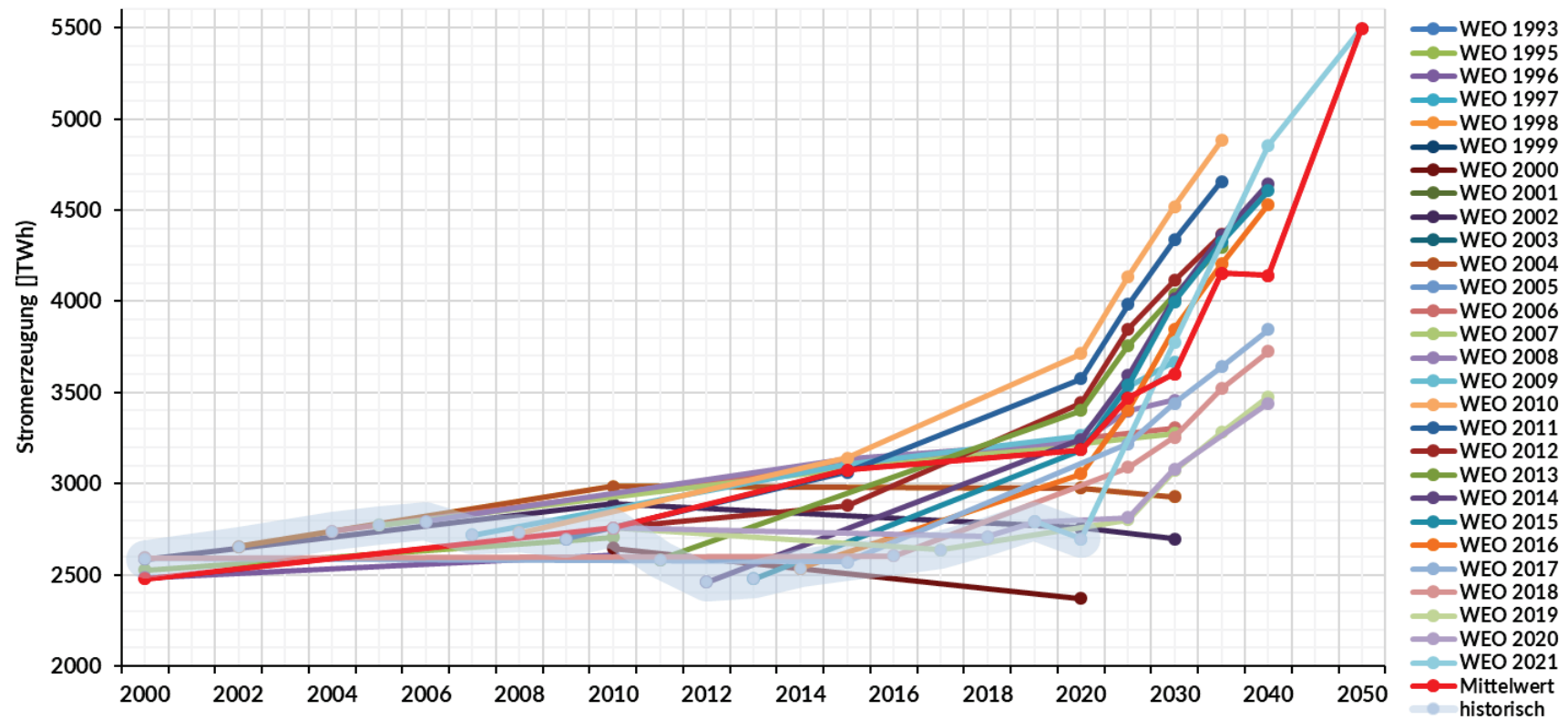


Abbildung 6: Entwicklung der Projektionen der Stromerzeugung von Kernkraft in den World Energy Outlook-Szenarien von 1993 bis 2021.¹⁹⁶

¹⁹⁶Quelle: Aufbauend auf Metayer et al. (2015), aktualisiert.

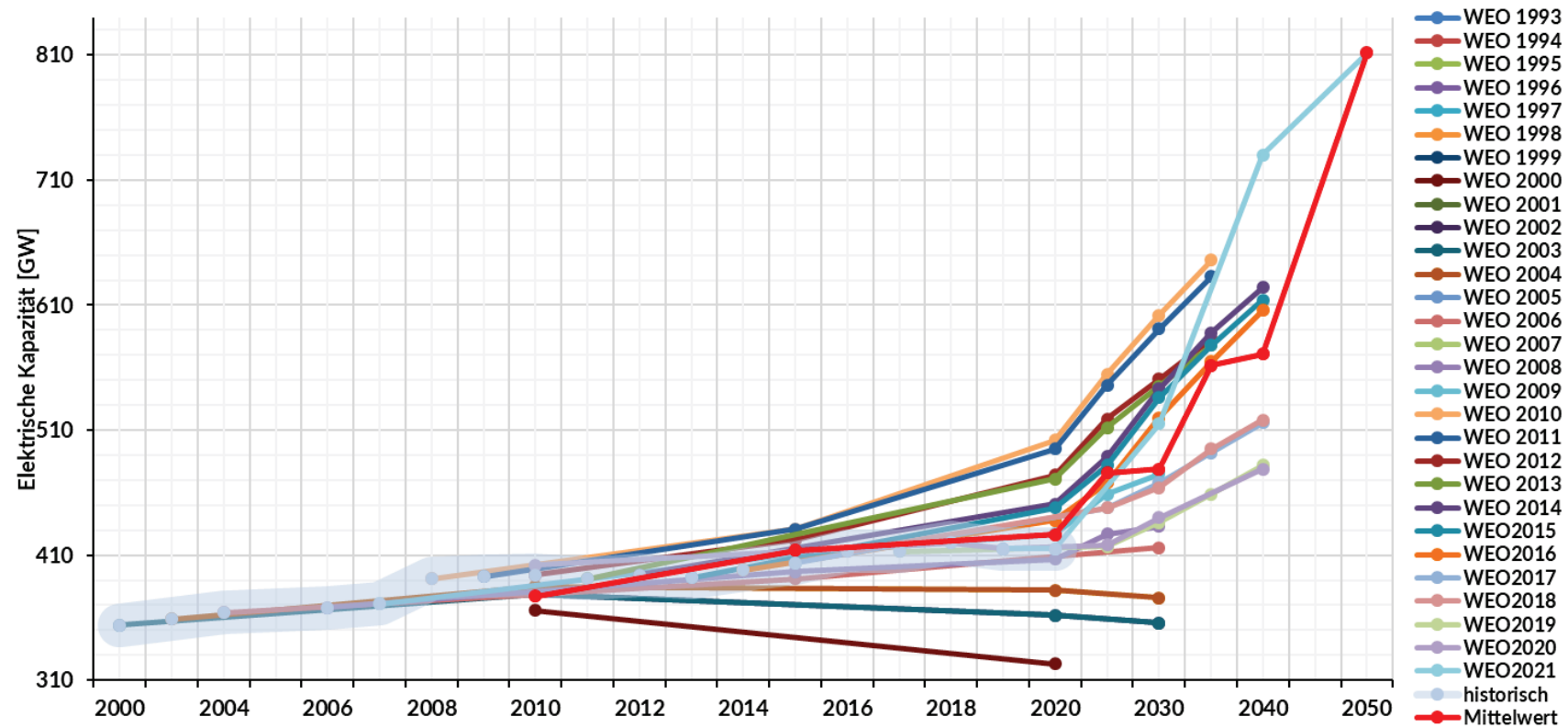


Abbildung 7: Entwicklung der Projektionen der Kapazität von Kernkraft in den World Energy Outlook-Szenarien von 1993 bis 2021.¹⁹⁷

¹⁹⁷Quelle: Aufbauend auf Metayer et al. (2015), aktualisiert.

2.3.2 Kernkraft Projektionen der IEA von 1993 bis 2021

In den World Energy Outlook-Szenarien (WEO) der IEA ist ein erheblicher Wandel der Projektionen von Mitte der 1990er bis Mitte der 2010er festzustellen, in dessen Verlauf zunehmend von einem Zuwachs an Kernkraftkapazitäten ausgegangen wird; dies läuft den tatsächlichen Entwicklungen zuwider. In den World Energy Outlooks (WEO) der Jahre 1994–1996 wurde die Entwicklung der Kernkraft bis zum Jahr 2010 sehr optimistisch projiziert, sowohl in Bezug auf die Leistung als auch die produzierte Strommenge (Abbildung 6 und Abbildung 7). In den Jahren 2000–2004 wurde aus heutiger Sicht die Entwicklung der Kernkraft weitgehend korrekt abgeschätzt, d. h. eine Stagnation bzw. ein Rückgang bis 2020 und darüber hinaus. In den Jahren 2007–2014 hat jedoch trotz Fukushima eine „Renaissance“ in den Prognosen stattgefunden, welche sich in der realen Welt bis heute nicht eingestellt hat. Sie erscheint aus heutiger Sicht auch unrealistisch. Aktuelle WEO-Reports von 2020–2021 gehen von 480–730 GW Kernkraft in 2040 aus. Dies setzt implizit einen erheblichen Kernkraftneubau voraus, welcher sich nicht mit konkreten Kernkraftprojekten (siehe Kapitel 4.1) und deren Wettbewerbsfähigkeit begründen lässt.

2.3.3 Energieeffizienz („efficiency first“)

Aus Gründen des unterschiedlichen Wirkungsgrades gehen Effizienzsteigerungen beim Übergang auf erneuerbare Energien Hand in Hand mit der Energiewende. Die Substitution von thermischen Kraftwerken führt zu einer erheblichen Zunahme der Effizienz im Stromsystem, da der durchschnittliche Wirkungsgrad von fossil-nuklearen Kraftwerken bei ca. 35 % liegt.¹⁹⁸ Da die erstmalige Entnahme von Energie aus der Natur den Begriff Primärenergie definiert, stellt die von Photovoltaik, Windkraft und Wasserkraft erzeugte Elektrizität direkt Primärenergie dar.¹⁹⁹ Kostenoptimierte Energiesysteme lassen sich mit weniger als 4 % Abregelung von variablen erneuerbaren Energien realisieren.²⁰⁰ Vergleichbare Effizienzgewinne werden sowohl mit Wärmepumpen ermöglicht als auch mit dem Übergang von Verbrennerfahrzeugen auf batterieelektrische Fahrzeuge. Dem entgegenlaufend sind synthetische Treibstoffe, die mit einem Wirkungsgrad von ca. 50 % Elektrizität, Luft und Wasser zu synthetischen Treibstoffen umwandeln. In einem integrierten Energiesystem belaufen sich beide Effekte auf insgesamt 50 % spezifische Effizienzgewinne im Primärenergiebedarf beim Übergang des gegenwärtigen fossil-nuklearen Systems hin zu sehr hohen Anteilen von erneuerbaren Energien.²⁰¹ Effizienzsteigerungen gehen auch einher mit Fortschritten bei der Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“), da wiederverwendete Materialien weniger Energie im Recycling benötigen als die primäre Materialbereitstellung. Eine quasi geschlossene Kreislaufwirtschaft wird auch notwendig sein, um ein System von 100 % erneuerbarer Energie global umzusetzen, welches erhebliche Mengen an Materialien aller Art erfordert.

¹⁹⁸ IAEA, 2020a.

¹⁹⁹ Kraan et al., 2019.

²⁰⁰ Bogdanov et al., 2021.

²⁰¹ Bogdanov et al., 2021.

Darüber hinaus existieren große unausgeschöpfte Effizienzpotentiale bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie bzw. in Energiedienstleistungen, insbesondere auch im Gebäudebereich. Zusätzliche Effizienzsteigerungen im Bereich des Endenergiebedarfs verbessern die Gesamteffizienz des Energiesystems weiter. Um den Materialeinsatz und die Flächennutzung zu begrenzen und die Akzeptanz für den notwendigen massiven Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung zu sichern, ist die Ausschöpfung der zumeist kosteneffizienten Energie- und Stromsparpotentiale wichtig. Die IEA hat folgerichtig die Formel „Energy efficiency is the first fuel“ geprägt.²⁰² Dies betrifft alle Stromsparoptionen im Bereich von Querschnittstechnologien (z. B. elektrische Motoren, Pumpen, Druckluft, Beleuchtung, ICT) aber auch stromspezifischen Produktionsprozessen. Besonders hervorzuheben sind die Energieeffizienzsteigerungen im Gebäudebereich, um sowohl den Heizbedarf als auch den Kältebedarf zu senken. Verlagerungen von Transportleistungen von der Luftfahrt und dem Straßenverkehr auf schienengebundene Verkehrsträger steigern die Gesamtsystemeffizienz weiter.²⁰³

2.4 Gesamtwirtschaftliche Betrachtung und ethische Perspektive

Sowohl die einzel- als auch energiewirtschaftliche Sicht ignorieren die negativen externen Effekte der Kernkraft, wie das Risiko von nuklearen Unfällen und daraus resultierenden Gesundheits- und andere Schäden, und auch das ungelöste Problem der Endlagerung nuklearer Abfälle. Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive sind dabei weitere Aspekte zu berücksichtigen, u. a. die fehlende Versicherbarkeit von Kernkrafttrisiken sowie ethische Fragen in Zusammenhang mit den Ewigkeitskosten.

2.4.1 Kernkrafttrisiken und Versicherbarkeit

Trotz der offensichtlichen Notwendigkeit, die Entwicklung kommerzieller Kernkraftwerke mit Sicherheitsaspekten zu koordinieren, wurden Fragen der Reaktorsicherheit zu Beginn des Kernkraft-Zeitalters getrennt von Fragen der kommerziellen Nutzung diskutiert.²⁰⁴ Auch wurden grundlegende Fragen zu den kerntechnischen Risiken durch eine schlichte Sozialisierung der Unfallrisiken verdrängt. Sowohl die Energie- als auch die Versicherungswirtschaft gingen bei der Entwicklung der kommerziellen Kernkraft davon aus, dass die wesentlichen Risiken von der Gesellschaft getragen werden mussten.²⁰⁵ Dieser Tatbestand ist bis heute gelebte Praxis: Risiken von Kernkraft werden nicht vollständig versichert, sodass die Haftpflicht der Kernkraftwerksbetreiber eher symbolischen Charakter trägt. Zwar sind Unfallrisiken während der Bauphase und Betriebsausfallrisiken versicherbar, nicht jedoch das wesentliche

²⁰² Motherway, 2019.

²⁰³ Bogdanov et al., 2021.

²⁰⁴ Dies galt auch in Deutschland, wo bis Mitte der 1960er Jahre die Reaktorsicherheit im Bundeshaushalt weniger als 1 Prozent der Gesamtausgaben für die Kerntechnik ausmachte. Vergleiche Radkau (1983); siehe insbesondere Kapitel IV: „Die Enthüllung der Sicherheitsproblematik und die verspätete Reaktion der Gesellschaft“.

²⁰⁵ Radkau, 1983, S. 389.

Risiko von Betriebsunfällen und der Schädigung von Mensch und Umwelt durch Verstrahlung.²⁰⁶ Daher ist eine objektive Bewertung der Risiken, z. B. in Form einer Versicherungsprämie, nicht möglich. Dennoch deuten die Schätzungen hypothetischer Versicherungspolicen darauf hin, dass diese so hoch sein müssten, dass Kernkraft gegenüber anderen Technologien einen derart erheblichen Kostennachteil hätte, dass Wettbewerbsfähigkeit unmöglich wäre.

Ein Gutachten der Versicherungsforen Leipzig berechnet eine hypothetische Versicherungsprämie für die deutschen Kernkraftwerke und findet, dass die Kosten einer Haftpflichtversicherung die von den KKW-Inhabern vorzuhaltenden finanziellen Mittel um mehrere Größenordnungen übersteigen. Bei einer Internalisierung des Risikos würde der Preis für Strom aus Kernenergie netto je nach Szenario um 0,139€ bis zu 67,3€ je produzierte Kilowattstunde Strom steigen.²⁰⁷ Aufgrund der potenziell riesigen Schadenssummen wäre die Versicherung nicht bezahlbar, wodurch sämtliche potenzielle Schäden, jenseits von relativ geringen Pauschalbeträgen, von der Gesellschaft getragen werden. Dies ergibt sich gleichsam logisch als Ergebnis der technisch nicht beherrschbaren Risiken (vgl. oben). Europaweit haften beispielsweise Kernkraftwerksbetreiber maximal für Schäden bis zu 1,2 Mrd.€, in den USA steht eine Haftungssumme von ca. 13 Mrd. US\$ zur Verfügung.²⁰⁸ Diese Summen sind marginal im Vergleich zu den (schwer abschätzbaren) Kosten, die mit einem nuklearen Unfall verbunden sind. So wurden die Gesamtkosten für die Sanierung nach dem Fukushima Unfall auf ca. 35–80 Trillionen Yen (ca. 270–617 Mrd. Euro) geschätzt.²⁰⁹

2.4.2 Ethik

Die Abschätzung sehr langfristiger externer Kosten der Kernenergie aus einer sozialen Wohlfahrtsperspektive wirft grundlegende Fragen auf, insbesondere in Bezug auf die angewandte Abzinsungsrate, sowie die ethische Frage, ob es einer Gesellschaft erlaubt sein sollte, überhaupt Kernenergie zu nutzen und die negativen externen Effekte in Form von radioaktiven Abfällen späteren Generationen zu überlassen.

Diese Diskussion reicht mindestens bis in die 1970er Jahre zurück, als die US-Regierung versuchte, einen Standort für die Lagerung hochradioaktiver militärischer Abfälle in Carlsbad, New Mexico, zu genehmigen. In einer Analyse des Ansatzes und der zu erwartenden externen Effekte untersuchen Schulze, et al.²¹⁰ ökonomische und ethische Argumente, die auf unterschiedlichen Prinzipien basieren. So argumentieren die Autoren, dass die Schaffung von Risiken durch Atommüll, die an zukünftige Generationen vererbt werden, aus freiheitlich-libertärer Sicht unethisch ist, da eine langfristige Kompensation zukünftiger Generationen über Hunderttausende von Jahren praktisch unmöglich ist. Aus einer utilitaristischen, also rein zweckorientier-

²⁰⁶ VFL, 2011.

²⁰⁷ Abhängig je nach Szenario hinsichtlich der Bereitstellungszeiträume von zehn bis 100 Jahren und der Anzahl versicherter KKW einzeln oder innerhalb eines Pools. Siehe hierzu VFL (2011).

²⁰⁸ Gaßner et al., 2017.

²⁰⁹ JCER, 2019.

²¹⁰ Schulze et al., 1981.

ten Perspektive, kann zwar argumentiert werden, dass der Nutzen des Kernenergiestroms für die aktuelle Generation die Risiken zukünftiger Generationen übersteigen könnte und somit Kernkraft gesamtwirtschaftlich sinnvoll sein könnte. Allerdings hängt in dieser Argumentation die Bewertung von Nutzen und Risiken stark von der gewählten sozialen Abzinsungsrate ab. Schulze, et al. (1981) argumentieren hier jedoch für eine Abzinsungsrate von 0%, um die potenziellen Schäden zukünftiger Generationen genauso stark zu gewichten wie den gegenwärtigen Nutzen. Dies steht in Gegensatz zur aktuellen Praxis, die zukünftigen Kosten durch die Wahl positiver sozialer Abzinsungsraten (ca. 2–4%) wegzudiskontieren.²¹¹

2.5 Zwischenfazit

Die Kernkraft ist zu teuer, um in einem nachhaltigen Energiesystem einen positiven Beitrag leisten zu können. An dieser Tatsache, die anlässlich der überhöhten Kosten des ersten kommerziellen US-Reaktors in Shippingport (Pennsylvania, USA) im Jahr 1957 erstmals beobachtet wurde, hat sich bis heute nichts geändert. Im Gegenteil: Heute wie damals sind Kernkraftwerke nicht privatwirtschaftlich finanzierbar und bedürfen spezifischer Unterstützung, um gebaut und betrieben zu werden. So benötigten alle bis heute gebauten Kernkraftwerke erhebliche staatliche Finanzierung oder spezifische Rahmenbedingungen, wie z. B. Gebietsmonopole oder Abnahmegarantien, um gebaut zu werden. Rein privatwirtschaftliche Investitionen in einem wettbewerblichen Umfeld hat es nicht gegeben. Dies gilt selbst unter Vernachlässigung der Umwelt- und Ressourcenverbräuche im Front-End (Uranabbau und Brennstoffherstellung), der Kosten des Rückbaus von Kernkraftwerken sowie der Zwischen- und Endlagerung der radioaktiven Abfälle.

Die einzelwirtschaftliche Analyse zeigt, dass Kernkraftwerke in der kurzen Frist, selbst im laufenden Betrieb, zunehmend anderen Energieträgern kostenseitig unterlegen sind. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Betriebskosten mit steigendem Kraftwerksalter ansteigen. Angesichts des hohen Altersdurchschnitts der weltweiten Kernkraftwerksflotte, welcher bei über 30 Jahren liegt, ist mit einer weiteren Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit zu rechnen. Durch den Klimawandel treten Extremereignisse wie Anstieg der Flusswassertemperaturen oder Eisbildung, Niedrigwasser oder Überschwemmungen, häufiger auf²¹², ebenso die unerwünschte Ansiedlung von Organismen an Oberflächen des Kühlwassersystems (biofouling). Dadurch werden der Wirkungsgrad und somit auch der Ertrag der Kernkraftwerke gesenkt.

Laufzeitverlängerungen sind nicht nur riskant, sondern auch teuer und liefern keine Garantie, dass das Kernkraftwerk nicht doch aus wirtschaftlichen Gründen vorzeitig vom Netz geht, wie im letzten Jahrzehnt mehrfach in den USA beobachtet. Die langfristige Sicht zeigt, dass unter Berücksichtigung der vergangenen und aktuellen Trends Investitionen in neue Kernkraftwerke nicht profitabel sind. Auch eine Verlängerung der Reaktorlaufzeiten auf 60 Jahre verbessert die Ergebnisse nicht we-

²¹¹ Schulze et al., 1981.

²¹² WMO World Meteorological Organization et al., 2021.

sentlich. Zusätzliche Kosten für den Rückbau, die Endlagerung, wie auch die gesamtgesellschaftlichen Kosten von Unfällen werden in den Gesamtbaukosten noch nicht einmal berücksichtigt. Sowohl für den Rückbauprozess als auch die Endlagerung fehlen empirische Unterlegungen für die Kostenschätzungen. Wo Erfahrungen vorliegen, wurden und werden sowohl die geplanten Zeit- wie Kostendimensionen um ein Vielfaches überschritten.

Die energiewirtschaftliche Analyse zeigt, dass die Einhaltung des 1,5°-Ziels ohne fossile Energieträger und ohne Kernenergie nicht nur möglich ist, sondern auch unter Berücksichtigung von Systemkosten der erneuerbaren Energien kostengünstig ist. Im Gegensatz zum in den vergangenen Jahrzehnten tatsächlich beobachteten Realisierungsgrad gehen einige internationale Institutionen wie die IEA oder IAEO bei ihren Zukunftsprognosen nach wie vor von einem erheblichen Kapazitätszubau der Kernkraft aus. Dabei sind durchwegs intransparente Kostenbetrachtungen festzustellen. Im Falle von Szenarien für den IPCC können infolge erheblich verzerrter Kostenannahmen keine realistischen Szenarien im Bereich der Kernkraft erwartet werden.

Die globale Entwicklung der Kernkraft in den Jahren 2000 bis 2020 weist eine weitestgehend unveränderte Menge der Stromerzeugung auf, sodass sich der relative Beitrag von Kernkraft von 16,7% auf 10,1% reduzierte. Die Entwicklung in diesem Zeitrahmen legt nahe, dass Kernkraft keinen nennenswerten Beitrag zum Treibhausgas-Emissionsminderung beitragen kann, da neben den prohibitiv hohen Kosten und inhärenten Sicherheitsrisiken auch noch die extrem langen Bauzeiten hinzukommen (siehe Abschnitt 3.2).

Die gesamtwirtschaftliche Sicht zeigt, dass die Risiken der Kernkraft für Menschen und Umwelt nicht versicherbar sind und die Haftpflicht der Kernkraftwerksbetreiber einen eher symbolischen Charakter trägt. Aufgrund der potenziell riesigen Schadenssummen wäre die Versicherung nicht bezahlbar, wodurch sämtliche potenzielle Schäden, jenseits von relativ geringen Pauschalbeträgen, von der Gesellschaft getragen werden. Diese Summen sind marginal im Vergleich zu den (schwer abschätzbaren) Kosten, die mit einem nuklearen Unfall verbunden sind.

3. Zeitliche Verfügbarkeit

Bei der Bewertung der Kernkraft spielt auch die zeitliche Komponente eine wesentliche Rolle. Der Zeitdruck zur Umstellung der Lebens- und Wirtschaftsweise auf Klimaneutralität ist sehr groß. Die Geschwindigkeit der Umstellung, die notwendig ist, um die Einhaltung der globalen 1,5-Grad- bzw. selbst der 2-Grad-Grenze zu leisten, ist jedoch bis heute von Politik und Kernenergieindustrie meist unterschätzt worden. Diesen Sachverhalt bestätigte jüngst auch das Karlsruher Bundesverfassungsgericht in einem Grundsatzurteil, welches dem Klimaschutzgesetz der deutschen Bundesregierung und den darin verankerten „Klimaschutzzielen und die bis zum Jahr 2030 zulässigen Jahresemissionsmengen“ eine Unvereinbarkeit mit den Grundrechten, der „zum Teil noch sehr jungen Beschwerdeführer“ attestiert, da „hinreichende Maßga-

ben für die weitere Emissionsreduktion ab dem Jahr 2031 fehlen“ und damit die Freiheitsrechte zukünftiger Generationen eingeschränkt werden.²¹³ In diesem Abschnitt wird daher geprüft, ob ein erheblicher Ausbau der Kernenergie in diesen Zeiträumen als realistisch einzuschätzen ist.

3.1 Kraftwerksneubauten

Die ersten kommerziellen Kernkraftwerke wurden in den 1950er Jahren in der Sowjetunion (Obinsk), England (Calder Hall) und den USA (Shippingport) gebaut. Die Anzahl der Baubeginne von Reaktoren erreichte bereits 1976 ihren Höhepunkt mit 44 Anlagen. Seitdem ist die Anzahl der Neubauten rückläufig, also bereits vor den ersten weltweit bekannt gewordenen Unfällen in Three Mile Island (USA, 1979) und Tschernobyl (Ukrainische SSR, 1986) (Abbildung 8). 2020 gingen lediglich 5 Reaktoren in Bau, darunter 4 in China. Aufgrund der rückläufigen Neubauten veraltet der globale Kernkraftwerkspark zunehmend (Abbildung 9). Mitte 2021 betrug das Durchschnittsalter der weltweiten Flotte rund 32 Jahre und damit drei Viertel der üblicherweise angesetzten technischen Lebensdauer von etwa 40 Jahren. Unter der Annahme einer technischen Lebensdauer von 40 Jahren werden bis 2030 207 Reaktoren vom Netz genommen (Netzanschluss zwischen 1979 und 1990) und weitere 125 bis zum Jahr 2059.²¹⁴

Dieser großen Zahl an Rückbauten stehen lediglich 52 laufende Neubauprojekte gegenüber (Tabelle 1).²¹⁵ In westlichen Marktwirtschaften findet fast kein Bau von neuen Kernkraftwerken mehr statt, mit wenigen Ausnahmen, unter anderem in Frankreich, Großbritannien und USA, in denen ein (Frankreich) bzw. zwei (GB, USA) Reaktoren gebaut werden (Tabelle 1). Auch in Finnland befindet sich seit 2005 ein Kernkraftwerk im Bau, ein weiteres (Hanhikivi) ist in Planung. Neben China, mit 15 Neubauprojekten, gehören auch Indien (sieben) sowie Russland (drei) zu den führenden Staaten mit neuen Bauprojekten.²¹⁶

Derzeit wird lediglich in zwei „Neueinsteiger“-Ländern, in welchen bisher noch keine Kernkraftwerke in Betrieb waren, am Bau je eines Kernkraftwerk gearbeitet (Türkei, Bangladesh). Ob und, wenn ja, wann diese Reaktoren Strom ins Netz einspeisen werden, ist unklar. Bis auf die Vereinigten Arabischen Emirate (VAE), wo ein südkoreanisches Unternehmen zum ersten Mal außerhalb des eigenen Landes Reaktoren baut, werden die Bauprojekte in den Ländern, die neu in die kommerzielle Kernenergie einsteigen, überwiegend von Russland finanziert und durchgeführt.²¹⁷ Überhaupt gibt es wenige Länder, die neu in die Kernenergie einsteigen. Nach dem Einstieg der

²¹³ BVerfG – Bundesverfassungsgericht, 2021.

²¹⁴ Darunter sind auch die 85 Reaktoren, die vor 1979 in Betrieb genommen wurden, sowie weitere 28 Reaktoren im sogenannten Langzeitausfall (long-term outage). Dies sind Reaktoren, die seit über einem Jahr keinen Strom mehr produziert haben (Schneider et al., 2020).

²¹⁵ Darunter sind aber auch die Kraftwerke Mochovce-3/-4 in der Slowakei sowie das argentinische Kernkraftwerk Angra-3, deren Bau Mitte der 1970er/1980er Jahre gestartet wurde und seitdem gestoppt bzw. dessen Wiederaufnahme phasenweise immer wieder diskutiert wird. Die IAEA zählt auch die Blöcke 3 und 4 des Kernkraftwerks Khmelnytsky in der Ukraine als „im Bau“, dessen Ausgang ebenfalls unsicher ist.

²¹⁶ Neumann et al., 2020.

²¹⁷ Sorge et al., 2020.

Volksrepublik China im Jahr 1991 mit der Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerks, haben lediglich drei weitere Länder zum ersten Mal einen Reaktor in Betrieb genommen: Rumänien (1996), VAE (2020) und Belarus (2020).

Tabelle 1: Länder mit Kernkraftwerksprojekten (Stand Mitte 2020).²¹⁸

Land	Reaktoren	Davon hinter dem Zeitplan
China	15	6
Indien	7	5
Südkorea	4	4
VAE	4	4
Russland	3	1
Bangladesch	2	0
Belarus	2	2
Pakistan	2	1
Slowakei	2	2
Türkei	2	1
Großbritannien	2	0
USA	2	2
Argentinien	1	1
Finnland	1	1
Frankreich	1	1
Iran	1	1
Japan	1	1
Total	52	33

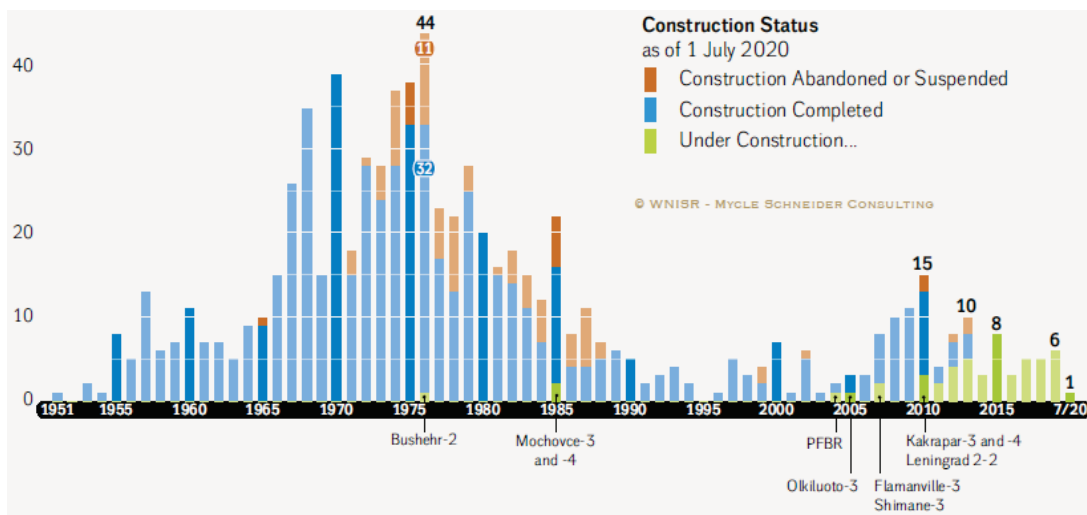


Abbildung 8: Anzahl von Baustarts von Reaktoren (Baubeginn) weltweit, 1951 bis Mitte 2020.²¹⁹

²¹⁸ Quelle: Schneider et al. (2020).

²¹⁹ Quelle: Schneider et al. (2020, S. 52). Anmerkungen: Bushehr-2 wurde in 1976 gestartet, 2019 wurde der Bau erneut aufgenommen. Shidao Bay besteht seit 2020 aus zwei Reaktoren.

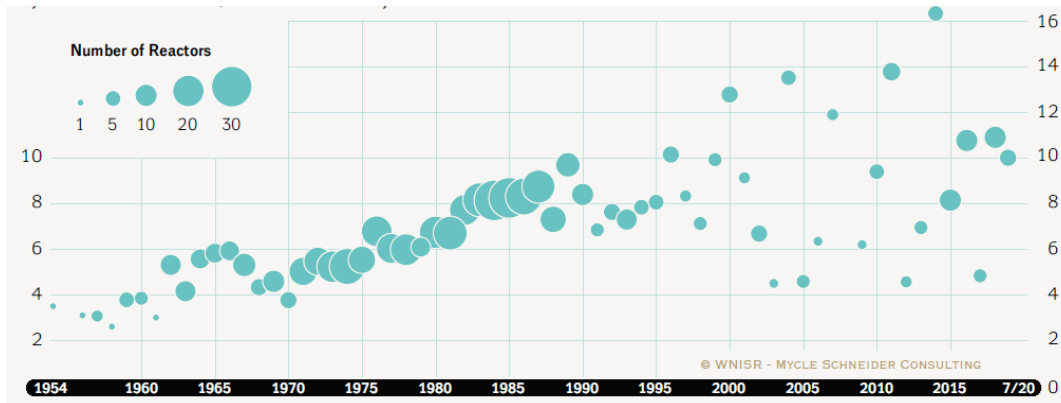


Abbildung 9: Durchschnittliche jährliche KKW-Bauzeiten in Jahren in der Welt.²²⁰

Angesichts des geringen Ausbaus in den vergangenen Jahrzehnten ist eine Vervielfachung des Kernkraftausbaus in den nächsten zehn oder selbst zwanzig Jahren unwahrscheinlich. So steigt in den Szenarien (P1 – P4) des IPCC „Special Report on Global Warming of 1.5 °C“²²¹ der Anteil der Kernenergie in allen vier Szenarien im Vergleich zu 2010 um 59 – 106 % bis 2030 bzw. um 98 – 501 % bis 2050. Das P3-Szenario beinhaltet den deutlichsten Anstieg (+ 501 %) bis 2050.

Im Vergleich zum Basisjahr 2010, in dem 370 GW in Betrieb waren²²², würde bereits das Szenario mit den geringsten Zubauraten, i.H.v. 59 % bedeuten, dass bis 2030, also in den nächsten 10 Jahren, rund 218 GW an zusätzlicher KKW-Kapazität ans Netz gehen müssten. Allein um dieses Ziel zu erreichen, müssten zusätzlich zu den (Mitte 2020) 52 Kernkraftwerksbauten noch rund 160 Kernkraftwerke geplant, gebaut und ans Netz angeschlossen werden (d. h. über 20 GW jährlich). Zum Vergleich: Im Zeitraum 2001 – 2020 (seit 2000) wurden lediglich rund 85,5 GW (95 Reaktoren) ans Netz angeschlossen (ca. 4,5 GW jährlich), während 98 Reaktoren mit 59 GW abgeschaltet wurden (Abbildung 10). Seit 1986 wurden nur rund 216 GW ans Netz angeschlossen (etwas über 6 GW jährlich).

In dem IPCC-Szenario mit der niedrigsten Ausbaurate müssten also in den nächsten 10 Jahren so viel Kernkraftwerksbauten abgeschlossen werden, wie in den letzten 30 Jahren erfolgten. Berücksichtigt man, dass bis 2030 – unter der Annahme einer technischen Lebensdauer von 40 Jahren – 207 Reaktoren vom Netz genommen werden, verdoppelt sich die zu bauende Anzahl an Reaktoren und in den nächsten 10 Jahren müssten mehr Kernkraftwerke gebaut werden, als aktuell überhaupt am Netz sind.

²²⁰ Schneider et al., 2020.

²²¹ IPCC, 2018.

²²² Schneider et al., 2011.

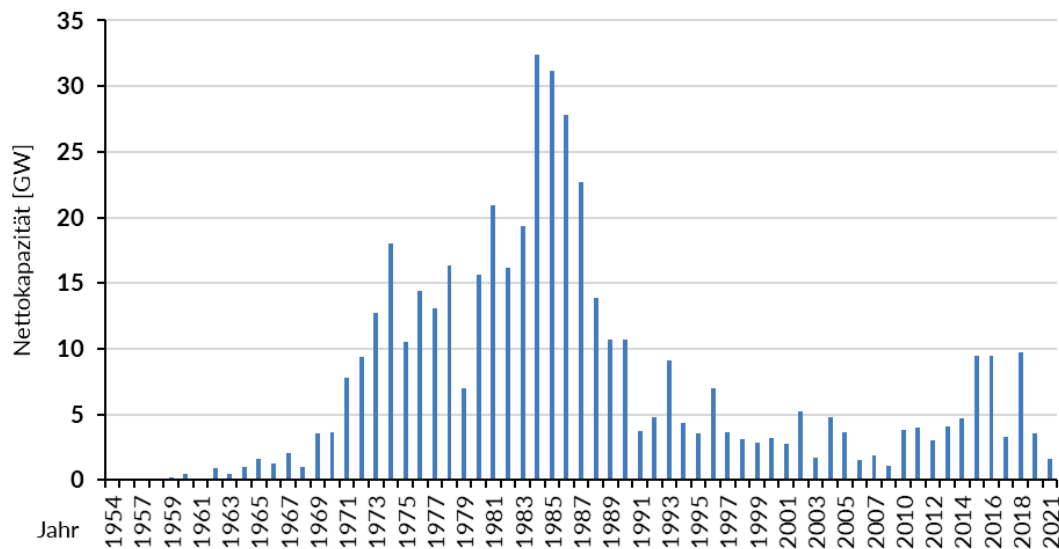


Abbildung 10: Weltweit ans Netz angeschlossene Nettokapazität an Kernkraft in Gigawatt, 1954–2020.²²³

3.2 Bauzeiten

Dazu kommt, dass die geplanten Bauzeiten für Kernkraftwerke systematisch unterschätzt werden. Mitte 2020 sind für die 52 im Bau befindlichen Reaktoren durchschnittlich 7,3 Jahre seit Baubeginn vergangen und viele sind noch weit von der Fertigstellung entfernt.²²⁴ Eine Analyse von 180 Bauprojekten fand eine durchschnittliche Bauzeitüberschreitung von 64% bei Kernkraftwerksbauprojekten.²²⁵ Weltweit ist ein klarer Trend zu immer längeren Bauzeiten zu beobachten (Abbildung 9). Die Bauzeit der Kernkraftwerke, die in den 1970er und 1980er Jahren fertiggestellt wurden, war recht homogen und lag im Bereich von fünf bis acht Jahren. Hingegen hat sie in den letzten zwei Jahrzehnten zugenommen und variiert stark. Im letzten Jahrzehnt wurden in neun Ländern 63 Reaktoren fertiggestellt (davon allein 37 in China). Hierbei betrug die durchschnittliche Bauzeit 9,8 Jahre.²²⁶

In der Europäischen Union, in Großbritannien und in den USA befinden sich derzeit sechs Reaktoren bzw. 8,7 GW im Bau (Tabelle 1). Alle sechs Reaktoren sind Kernkraftwerke der dritten Generation (Gen III+). Bereits 2005 erfolgte der erste Baubeginn eines EPR (European Pressurized Reactor) am Standort Olkiluoto in Finnland, gefolgt von Flamanville-3 in Frankreich im Jahr 2007. Für beide Reaktoren wurde ursprünglich eine Bauzeit von vier bis fünf Jahren veranschlagt. Ende 2021 waren die Bauarbeiten an den beiden Standorten immer noch nicht abgeschlossen. Aktuelle Schätzungen zufolge sollen beide Reaktoren Mitte der 2020er Jahren den kommerziellen Betrieb aufnehmen, über 12 Jahre hinter dem Zeitplan und mit einer Bauzeit

²²³ Quelle: Eigene Darstellung basierend auf dem „Power Reactor Information System“ (PRIS) Datenbank der IAEA, Stand (Stand 27.05.2021).

²²⁴ Schneider et al., 2020.

²²⁵ Im Vergleich: Hydroelektrische Staudämme 63,7%, Thermische Kraftwerke 10,4%, Windkraftwerke 9,5% und PV-Anlagen -0,2%. (Sovacool et al., 2014).

²²⁶ Schneider et al., 2020.

von mehr als 15 Jahren. Auch die zwei Westinghouse-Reaktoren am Standort Vogtle in den USA zeichnen sich durch deutliche Verzögerungen aus. Ursprünglich wurde mit einem Bauende im Jahr 2016 bzw. 2018 gerechnet. Die letzte Schätzung zur Fertigstellung der Reaktoren ist 2022 für Block 3 und 2023 für Block 4.²²⁷

3.3 Konzentration von Reaktoranbietern

Die Reaktoren der ersten und zweiten Generation wurden hauptsächlich von vertikal integrierten und einheimischen Anbietern gebaut. So bauten beispielsweise Westinghouse oder General Electric (GE) in den USA, die französische Framatome in Frankreich, oder Siemens und AEG in Deutschland Reaktoren für den jeweils heimischen Markt.²²⁸ Die große Anzahl von Reaktorherstellern in der Anfangszeit der Kernenergie wurde zunächst durch eine industrielle Umstrukturierung in den 1970er Jahren reduziert, da der Markt für den Bau von Kernkraftwerken nicht groß genug war. Der Rückgang der Bautätigkeit in den 1980er Jahren förderte eine weitere Konsolidierung.

Der nach den obigen Szenarien skizzierte, nur hypothetisch notwendige, massive Ausbau von Kernenergie ist mit den aktuell verfügbaren Reaktorherstellern nicht durchführbar. Die traditionellen Hersteller Westinghouse und Framatome sind finanziell angeschlagen und kämpfen ums Überleben: Westinghouse²²⁹ beantragte 2017 Insolvenz und AREVA musste vom französischen Staat mit 4–5 Milliarden Euro gerettet werden. AREVA wurde aufgespalten in Framatome (vorher AREVA NP) und zu 75 % von EDF übernommen, und Orano (vorher AREVA NC, Ex-COGEMA).²³⁰ Diese Konzerne sind nicht in der Lage, im nächsten Jahrzehnt eine große Anzahl an Neubauprojekten in Angriff zu nehmen. Zwar ist Russland seit 2000 international zu einem aufstrebenden Anbieter geworden und dominiert den Reaktormarkt, mit mehr Verträgen als die vier nächstgrößeren Anbieter (Frankreich, USA, China, Korea) zusammen.²³¹ Daneben ist China das mit Abstand aktivste Land, hat bis dato jedoch nur in Pakistan Kernkraftwerksbauprojekte mit dem Ausland abgeschlossen. Jedoch ist zu bezweifeln, dass Russland oder China in der Lage sind, den globalen Markt mit Kernkraftwerken zu versorgen.²³² Darüber hinaus wäre diese Entwicklung auch aus geopolitischen Überlegungen bzgl. der Abhängigkeit des Energiesystems von diesen Ländern nicht anstrebenswert.

3.4 SMRs und nicht-Leichtwasser-basierte Reaktorkonzepte sind auf absehbare Zeit nicht verfügbar

Vor dem Hintergrund der Bekämpfung der Klimakrise werden vermehrt SMR-Konzepte („Small Modular Reactors“) und Kernkraftwerke der sogenannten vierten Generation als mögliche Lösungen angebracht. Beide Konzeptgruppen sind nicht neu;

²²⁷ www.reuters.com/business/energy/southern-delays-georgia-vogtle-reactors-startup-boosts-costs-2021-07-29/, (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

²²⁸ Thomas, 2010a.

²²⁹ 2018 wurde Westinghouse u. a. von Brookfield Business Partners L. P. übernommen.

²³⁰ AREVA SA wurde als Faktotum zur Abwicklung der Verpflichtungen bei Olkiluoto-3 vom Staat erhalten.

²³¹ Jewell et al., 2019 bzw. Drupady, 2019 und Nakano, 2020.

²³² Thomas, 2019.

im Gegenteil beide gehen auf die Frühzeit der Kernkraft in den 1950er Jahre zurück.²³³

Reaktoren der vierten Generation befinden sich bereits seit vielen Jahrzehnten in Forschung und Entwicklung.²³⁴ Es handelt sich überwiegend um sogenannte Schnelle Brüter, welche zwar eine stärkere Ausnutzung des Kernbrennstoffs ermöglichen, sich jedoch bis heute als technisch schwer kontrollierbar und ökonomisch unrentabel erwiesen haben. So wurden nach rund 60 Jahren Forschung und 100 Milliarden US\$₂₀₀₇ an Forschungsausgaben²³⁵ die nationalen Schnellen Brüter Programme in Großbritannien, Deutschland,²³⁶ Japan, den USA und Frankreich eingestellt. Indien versucht seit mehreren Jahren einen nicht erfolgreichen Prototypreaktor hochzuskalieren. Selbst in Russland, welches besonders ambitioniert an schnellen Brutreaktoren geforscht hat, ist die Entwicklung über viele Jahrzehnte mit dem BN-600 und dem BN-800 nicht über den Status von Demonstrationsanlagen hinausgegangen. Das russische Energieministerium geht aktuell nicht davon aus, dass der BN-1200 noch vor 2035 gebaut wird und hat 2019 dessen Finanzierung erheblich reduziert.²³⁷ China plant bereits seit den 1980er Jahren den Einsatz von Schnellen Brüttern.²³⁸ Dort ist der China Experimental Fast Reactor (CEFR) als Forschungsreaktor Bestandteil der Entwicklung von großen schnellen Reaktoren. Die Erstkritikalität des Reaktors fand 2010 statt, seitdem stand der Reaktor weitgehend still.²³⁹ Ein Nachfolgeprojekt des CEFR ist die 600-MW-Demonstrationsanlage CDFR (Chinese Demonstration Fast Reactor). Die Anlage ist seit 2017 im Bau und soll 2023 fertig gestellt werden. Beide Anlagen wurden in Kooperation mit Russland gebaut.²⁴⁰ Insgesamt ist ein kommerziell nutzbarer Reaktor der vierten Generation nicht in den kommenden Jahrzehnten zu erwarten.²⁴¹

SMRs sind Kernkraftwerke mit geringer elektrischer Leistung, d.h. unter 300 MW_{elektrisch} (siehe auch Abschnitt 1.2.9).²⁴² Aktuell befinden sich lediglich zwei SMR-Pilotanlagen, die beiden russischen KLT-40S Reaktoren, in Betrieb, die auf klassische Eisbrecher eingesetzt werden. Start der Entwicklungsarbeiten des KLT-40 war bereits 1998, die kommerzielle Inbetriebnahme erfolgte 2020, 13 Jahre nach Baustart. Weitere Anlagen befinden sich schon seit längerer Zeit in Bau, so beispielsweise der argentinische CAREM, dessen Entwicklung in die 1970er Jahre zurückgeht. Auch die Entwicklungsgeschichte des chinesischen Hochtemperaturreaktors (HTR-PM) reicht bis in die 1980er Jahre zurück. Der Reaktor befindet sich seit 2012 im Bau. Eine

²³³ Pistner & Englert, 2017.

²³⁴ Frieß et al., 2021, S. 140 ff.

²³⁵ Cochran et al., 2010.

²³⁶ Der Bau des Schnellen Brütters am Standort Kalkar erwies sich als eine große Investitionsruine und wurde aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt (Radkau & Hahn, 2013).

²³⁷ www.neimagazine.com/news/newsrussia-defers-bn-1200-until-after-2035-7581968 (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

²³⁸ Hibbs, 2018.

²³⁹ Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021.

²⁴⁰ Frieß et al., 2021.

²⁴¹ Pistner, 2019.

²⁴² Der nachfolgende Abschnitt beruht weitestgehend auf dem Gutachten „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)“, in Auftrag gegeben vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021).

wesentliche Begründung für die Entwicklung von SMR-Konzepten ist unter anderem die Erwartung von kürzeren Bauzeiten sowie Kostenersparnis aufgrund modularer Bauweise. Jedoch zeigen aktuelle Beobachtungen, dass Planungs-, Entwicklungs- und Bauzeiten die ursprünglich geplanten Zeithorizonte in der Regel um ein Vielfaches übersteigen. Die aktuell diskutierten Konzepte sind noch weit von einem möglichen kommerziellen Einsatz entfernt (siehe Abschnitt 1.2.9). Auch sind die mit dem Transport der Brennstoffe sowie den abgebrannten Brennelementen verbundenen Risiken erheblich. Zudem würde ein weltweiter Einsatz auch eine internationale Standardisierung der regulatorischen Anforderungen erforderlich machen. Jedoch liegen bislang keine spezifischen nationalen oder internationalen Sicherheitsstandards vor.²⁴³

3.5 Zwischenfazit

Bei der Bekämpfung der Klimakrise stehen für die Umstellung der Lebens- und Wirtschaftsweise maximal zwei bis drei Jahrzehnte zur Verfügung. Eine Betrachtung der historischen Entwicklung und des aktuellen Stands der Kernkraftwirtschaft legt nahe, dass diese in dem Zeitraum keinen wesentlichen Beitrag zur Emissionsminderung leisten kann. Die Anzahl der Neubauten ist bereits seit 1976 stark rückläufig, d. h. es handelt sich um einen langfristig anhaltenden Trend. Aktuell werden weltweit lediglich 52 Kernkraftwerke gebaut, davon befinden sich alleine 15 in China sowie sieben in Indien und drei in Russland. In westlichen Marktwirtschaften findet mit wenigen Ausnahmen kein Bau von neuen Kernkraftwerken mehr statt. Aktuell werden in Frankreich (1 Reaktor), Großbritannien (2), den USA (2) und in Finnland (1) Reaktoren gebaut.

Angesichts des geringen Ausbaus in den vergangenen Jahrzehnten ist eine Vervielfachung des Kernkraftausbaus in den nächsten zehn oder selbst zwanzig Jahren unwahrscheinlich. Internationale Institutionen gehen jedoch konsistent von einem erheblichen Kapazitätszubau der Kernkraft aus, dabei unterschätzen sie nicht nur die Systemkosten der Kernkraft, sondern sie überschätzen auch die Ausbaurate. Auch die geplanten Bauzeiten für Kernkraftwerke werden systematisch unterschätzt. Mitte 2020 sind für die 52 im Bau befindlichen Reaktoren durchschnittlich 7,3 Jahre seit Baubeginn vergangen und viele sind noch weit von der Fertigstellung entfernt. Im letzten Jahrzehnt wurden in neun Ländern nur 63 Reaktoren fertiggestellt (davon 37 in China) mit einer durchschnittlichen Bauzeit von fast 10 Jahren. Sollten die aktuell gebauten Kernkraftwerke in den USA, Frankreich und Finnland Anfang der 2020er Jahre ihren Betrieb aufnehmen, waren diese mehr als 15 Jahre im Bau. Nicht enthalten sind hier Planungs-, Entwicklungs- und Lizenzierungszeiten, die noch vor einem etwaigen Baustart einzuplanen sind.

Ein massiver Ausbau der Kernkraft scheitert aber auch an der industriellen Durchführbarkeit und ist mit den aktuell verfügbaren Reaktorherstellern nicht möglich bzw. im Fall von Russland und China geopolitisch nicht wünschenswert (selbst wenn er möglich wäre). Gleiches gilt auch für SMR-Konzepte („Small Modular Reactors“)

²⁴³ Pistner, Englert, Küppers, et al., 2021.

oder Reaktoren der sogenannten vierten Generation. Beide Konzepte sind noch Jahrzehnte von einer möglichen Kommerzialisierung entfernt.

Aus der Dringlichkeitsperspektive des Klimawandels kann die Kernenergie somit keinen wesentlichen Beitrag zur Emissionsminderung leisten. Wenn, wie z. B. in Deutschland das ambitionierte Zieljahr 2035 (1,5-Grad-Ziel) für Klimaneutralität vorausgesetzt wird, können der Neubau oder gar die Entwicklung neuer Reaktorlinien, wegen der langen Entwicklungs- bzw. Bauzeiten von Kernkraftwerken keine Rolle spielen. Laufzeitverlängerungen könnten zwar in einigen Ländern kurzfristig zu leicht rückläufigen Treibhausgasemissionen beitragen, sind jedoch mit erheblichen technischen und wirtschaftlichen Risiken verbunden. Die Zeiträume für Kraftwerksneubauten bzw. zur Entwicklung ganzer neuer Reaktorlinien (SMR-Konzepte) liegen bei mehreren Jahrzehnten.

4. Kernkraft in der sozial-ökologischen Transformation

Die Weiterführung der Kernkraft bzw. sogar evtl. der Bau neuer Kernkraftwerke gefährden den Prozess der „großen Transformation“ (WBGU, 2011), d. h. der sozial-ökologischen Reform in Richtung zu einem gesellschaftlich gestützten zukunftsfähigen, klimaneutralen Energiesystem. Die sozialökologische Transformation, die zur Einhaltung ambitionierter Klimaschutzziele notwendig ist, beschränkt sich nicht auf die Festlegung eines Energieträgermix' und entsprechender Ausbau- bzw. Ausstiegs-szenarien. Die größte Herausforderung liegt vielmehr in der realen Gestaltung des Transformationsprozesses, der Überwindung von Lock-in-Effekten²⁴⁴ sowie der Auflösung von Innovations- und Investitionsblockaden des alten Systems. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob strukturprägende Systemelemente, wie z. B. Kernkraftwerke, die notwendig radikale und beschleunigte sozial-ökologische Transformation zur Dekarbonisierung erschweren. „Transformationsresistenz“ bedeutet in diesem Kontext die Verursachung und Verfestigung von Pfadabhängigkeiten bzw. von Lock-in-Effekten, die es erschweren, die notwendige klimaneutrale Transformation des Stromsystems spätestens bis 2050, möglichst aber bereits bis 2035 zu erreichen.²⁴⁵

Diese zugrundeliegenden komplexen Wechselwirkungen werden bei der Systemtransformation oft übersehen und sollen hier abschließend genauer thematisiert werden. Zwar erzeugen einzelne Kernkraftwerke im laufenden Betrieb kaum stationäre CO₂-Emissionen aus der Stromherstellung. Jedoch führt genau diese isolierte Betrachtung häufig zu der (Fehl-)Einschätzung, dass Kernenergie eine Option im

²⁴⁴ Seto et al., 2016; Unruh, 2000: Der Begriff Lock-In-Effekte ist hier auf die Infrastruktur des derzeitigen Energiesystems bezogen (z. B. zentrale Großkraftwerke, Heizungen mit fossiler Brenntechnik, Mobilität ausgelegt auf Individualverkehr etc.) und beschreibt die Abhängigkeit von dieser Infrastruktur, welche eine große Barriere für einen Umstieg auf ein 100% erneuerbares Energiesystem darstellt.

²⁴⁵ 2050 steht hier als Zieljahr für einen gerechten Beitrag zum 2-Grad-Ziel und 2035 für ein 1,5-Grad-Ziel.

Kampf gegen die Klimakrise sei.²⁴⁶ Neben den in den vorigen Kapiteln dargestellten risiko-, technologie- und kostenspezifischen Argumenten soll daher abschließend das atomare Subsystem im Zusammenhang mit der Transformation des gesamten Stromsystems betrachtet werden.

4.1 Innovationsblockaden und Investitionsblockaden

4.1.1 Innovationsblockaden

Innovationsblockaden für risikominimale Klimaschutztechnologien (z. B. erneuerbare Energien, Energieeffizienz) durch den Mittelabfluss für die Kernenergieforschung und die technisch-ökonomischen Systemzwänge großer Kernkraftwerke sind bereits als ein Argument gegen Kernenergie als Option gegen den Klimawandel in der Literatur dargestellt worden.²⁴⁷ In Deutschland hat z. B. erst der durch das EEG und den Einspeisevorrang erzwungene Marktzutritt für erneuerbare Stromerzeugung die Investitions- und Innovationsblockaden auf dem Strommarkt reduziert. Dies hat in Folge zu einem erheblichen Aufschwung der Erneuerbare-Energien-Stromerzeugung und -Innovationen (z. B. Patente) geführt und damit einen späteren, weitgehend planmäßigen Ausstieg aus der Kernenergie ermöglicht. Vor diesem Hintergrund ist ein Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergie eine entscheidende Determinante zur Begrenzung von unsicheren Rahmenbedingungen für die Systemtransformation.²⁴⁸

Die mit Kernkraft zusammenhängenden Innovationsblockaden können anhand der langfristigen F&E-Politik verdeutlicht werden: Zwischen 1974 und 2019 gaben die IEA-Mitgliedstaaten rund 673 Mrd. US \$₂₀₁₉ für die Forschung und Entwicklung (F&E) im Energiesektor aus. Fast die Hälfte (44 %) davon ging an die Kernenergieforschung. Betrug der Anteil der F&E-Ausgaben für die Kernenergie 1974 noch 74 % (Abbildung 11), nahmen diese, parallel zur Abnahme der Anzahl an Neubauten, kontinuierlich ab. Jedoch betragen diese 2019 immer noch 21 % und somit immer noch 6 Prozentpunkte mehr, als für die Forschung für erneuerbare Energie ausgegeben wurde und dies, obwohl der Ausbau der Kernkraft in den IEA-Staaten fast zum Erliegen gekommen ist. Insgesamt stehen den 297 Mrd. US \$₂₀₁₉ an F&E-Ausgaben für Kernenergie lediglich rund 80 Mrd. für erneuerbare Energien gegenüber. Dies entspricht 12 % der Gesamtausgaben, immer noch ein Prozentpunkt weniger, als für die Forschung an fossilen Brennstoffen ausgegeben wurde.²⁴⁹

Die Fehlallokation von F&E-Ausgaben verdeutlicht sich am besten, wenn man die installierte Leistung von Kraftwerken bezogen auf Energieträger in dem Zeitraum

²⁴⁶ Unter Berücksichtigung des aktuellen Gesamtenergiesystems ist Kernenergie keineswegs CO₂-neutral. In der Literatur finden sich Werte für die Gesamtemission Lebenszyklus-Emission der Kernkraft von 3,7 – 110 gCO₂/kWh (Vgl. Umweltbundesamt www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/ist-atomstrom-wirklich-co2-frei (zuletzt geprüft am 29.09.2021) und ein Mittelwert von 66 gCO₂/kWh (Sovacool, 2008).

²⁴⁷ Hennicke et al., 2011; Hennicke & Welfens, 2012, S. 21 ff.

²⁴⁸ GWS et al. 2014; Zentrum für Europäische Wirtschaftspolitik (ZEW), 2014 und Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung, 2011.

²⁴⁹ Im Zeitraum Mitte der 1970er Jahre bis 2008 betrug die Förderung von Forschung und Entwicklung für Photovoltaik 1,7 % der öffentlichen Förderung der Kernenergie (9 zu 534 Mrd. €.). Die Photovoltaik wurde im Wesentlichen aus privaten Mitteln finanziert, da zusätzlich zu den 9 Mrd. € öffentlicher Förderung weitere rund 40 Mrd. € private F&E-Investitionen getätigt wurden. (Breyer et al., 2010).

betrachtet: So wurden zwischen 1974 und 2019 in den IEA-Staaten 214 GW (Baustart nach 1974) an Kernkraftwerken ans Netz angeschlossen, im Mittel also 4,7 GW pro Jahr, während allein im Jahr 2019 rund 184 GW an Erneuerbare-Energie-Kapazität ans Netz ging.²⁵⁰ Diese Rekordhoch wurde erzielt, obwohl die F&E-Förderung der erneuerbaren Energien (EE) nur einen Bruchteil der staatlichen KKW-Finanzierung ausmachte. Erneuerbare Energietechnologien und Speichertechnologien sowie Energieeffizienztechnologien könnten deutlich weiterentwickelt sein, wenn frühzeitig F&E-Budgets von Kernkraft zu diesen wesentlich innovativeren Technologien umgeschichtet oder frühzeitig deutlich aufgestockt worden wären. Trotz verhältnismäßig geringer öffentlicher F&E-Investitionen, wie am Beispiel der Photovoltaik aufgezeigt, lassen sich außergewöhnliche Technologiedurchbrüche bei erneuerbaren Energien erreichen, ganz im Gegensatz zu Kernkraft, wie die aktuelle Marktentwicklung dokumentiert.

4.1.2 Investitionsblockaden

Nicht nur die über Jahrzehnte gesetzten Forschungsprioritäten zugunsten der Kernenergie, sondern auch die marktbeherrschende Stellung von großen KKW-Betreibern und deren ökonomisches Interesse an der Abwehr eines alternativen Stromangebots durch erneuerbare Energien und durch Stromsparstrategien und Innovationen bremsen transformative Investitionen sowie die Markteinführung von erneuerbaren Energien und Effizienztechniken. Die Kernenergie behindert den Aufbau und Betrieb eines zukunftsfähigen und klimaneutralen Energiesystems.

Unterschiedliche Energiesystemszenarien zeigen übereinstimmend, dass (1) Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und auch des Stromsparens besonders vorteilhaft sind, sowie dass (2) die möglichst rasche Markteinführung erneuerbarer Stromerzeugung und (3) generell eine CO₂-freie Elektrifizierung auch des Verkehrs- und Gebäudesektors sowie einiger Industriebranchen entscheidende Strategieelemente einer Transformation zur Dekarbonisierung darstellen. Der Kern der Fehleinschätzung „Kernenergie als Klimaoption“ liegt darin, dass die Schnelligkeit und Wirksamkeit der Strategieelemente (1) und (2) gebremst werden, je dominanter der Kernenergieanteil in der Elektrifizierungsstrategie ist. Beide Strategieelemente stehen dem Betreiberinteresse an maximaler Auslastung von Kernkraftwerken in der Grundlast entgegen. Energiepolitische Maßnahmen zugunsten der Strategieelemente (1) und (2) wie z. B. der massive Ausbau der EE und Stromsparprogramme, die die Rentabilität von nuklearer Grundlast in Frage stellen könnten, sind daher aus KKW-Betreiberperspektive unerwünscht.

²⁵⁰ Schneider u. a. 2020b.

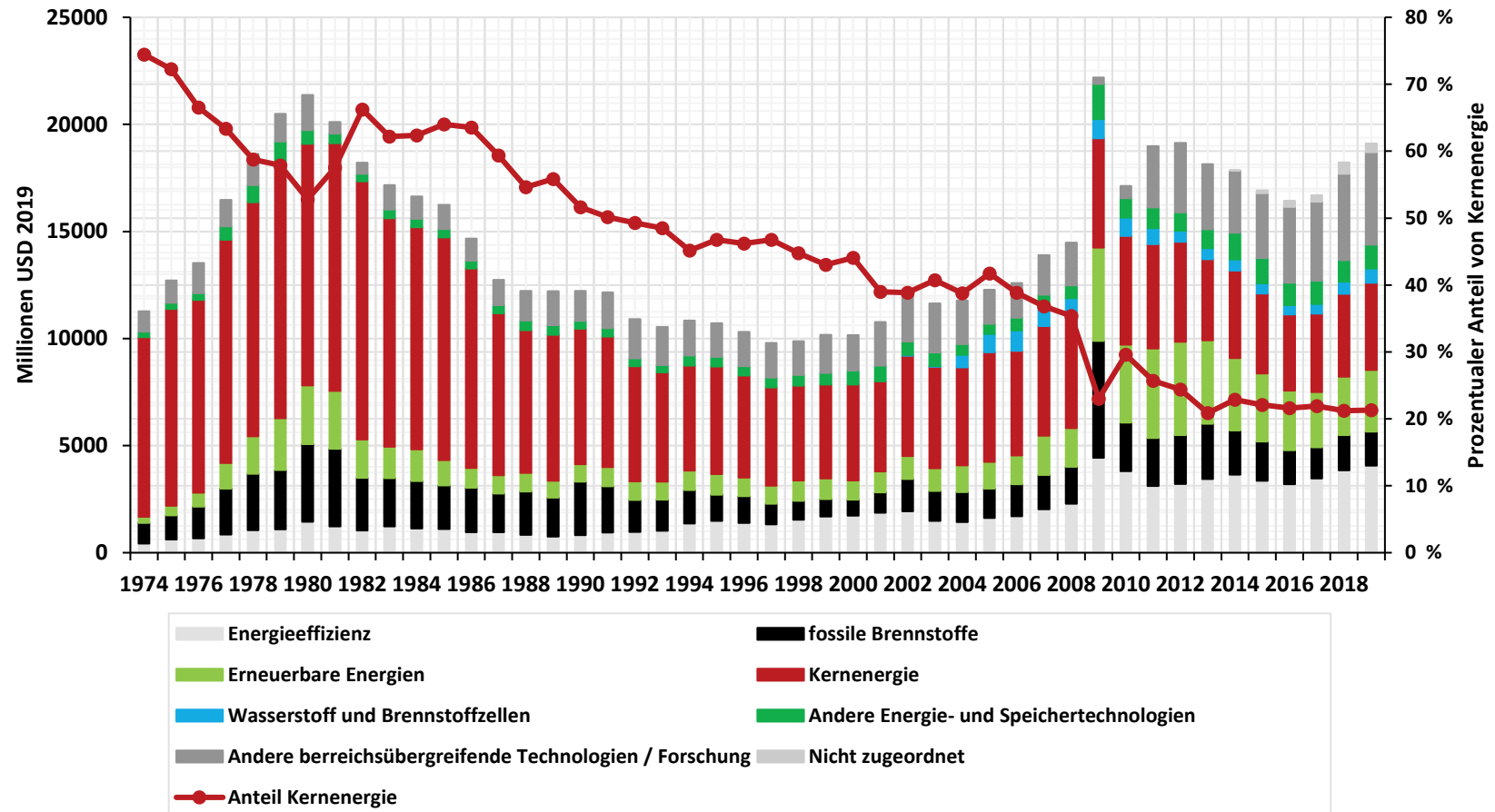


Abbildung 11: Forschung und Entwicklungsausgaben in IEA-Mitgliedsstaaten.²⁵¹

²⁵¹Quelle: IEA, 2021, Energy RDD for estimated IEA Total [2019 Millionen USD].

Hinzu kommt, dass Kernkraftwerke in technischer und ökonomischer Hinsicht als Kraftwerke für den Grundlastbetrieb konzipiert sind, dessen Rolle mit wachsenden Anteilen variabler Einspeisung aus Wind- und PV-Anlagen obsolet geworden ist. Je höher der Anteil variabler Einspeisung von Strom aus Erneuerbaren, desto mehr Flexibilitätsoptionen sind zum Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage notwendig (aber auch möglich) und desto geringer wird die Residuallast²⁵² und damit der Auslastungsgrad von Kernkraftwerken. Auch weil KKW in Bezug auf Leistungsgradienten und Anfahrtdauer²⁵³ z.B. im Vergleich zur Gasturbinen-Kraftwerken, eine begrenzte Flexibilität aufweisen, wird ein KKW aufgrund der Kostenstruktur (hohe Fixkosten, relative geringe variable Kosten) bei wachsender und vorrangiger Einspeisung von variablem erneuerbarem Strom daher immer unwirtschaftlicher.²⁵⁴ Denn die hohen Fixkosten müssen bei wachsendem Ausbau der erneuerbaren Energien auf immer weniger Betriebsstunden umgelegt werden. Daher entstehen Anreize für Energieversorger mit Kernkraftwerken, den Durchbruch von erneuerbaren Energien zu bremsen, sowohl im eigenen Unternehmen als auch systemweit.

4.2 Grad der Transformationsresistenz

Ein Kriterium für die Bewertung der Pfadabhängigkeit (Grad der Transformationsresistenz) ist der Kernenergiestromanteil (2019)²⁵⁵, nach dem hier drei Ländergruppen unterschieden werden können:

- a. Länder mit relativ hohem Anteil wie z. B. Frankreich (71 %), Slowakei (54 %), Ukraine (54 %), Ungarn (49 %), Belgien (48), Tschechien (35 %), Finnland (35 %), Slowenien (37 %), Schweden (34 %)
- b. Länder mit mittlerem Anteil wie z. B. Armenien (28 %), Südkorea (26 %), Spanien (21 %), USA (20 %), Russland (20 %), Rumänien (19 %), Großbritannien (16 %), Kanada (11 %), Taiwan (13 %), Deutschland (12 %)
- c. Länder mit geringem Anteil wie z. B. Iran (2 %), Brasilien (3 %), Indien (3 %), Mexiko (5 %), China (5 %), Südafrika (7 %), Pakistan (7 %), Argentinien (6 %)

In der Gruppe c) mit geringen Anteilen stehen vor allem Indien, aber auch Iran, Brasilien, Mexiko, Argentinien und Südafrika als Schwellenländer noch auf einer relativ niedrigen Ebene der zivilen Kernenergienutzung, sodass hier eine Kernenergievermeidungsstrategie noch relativ leicht möglich ist, bevor es zu schwerwiegenden Pfadabhängigkeiten kommt. Eine Ausnahme davon bildet China, das Frankreich im Jahr 2020 als zweitgrößter Atomstromproduzent hinter den USA abgelöst hat und heute als einziges Land der Welt alle qualifizierten Fabrikationsanlagen für alle Anlagenteile für Gen-III-Reaktoren im eigenen Land verfügbar hat.

²⁵² Residuallast beschreibt die nachgefragte Stromleistung abzüglich des Anteils variabler Einspeisung.

²⁵³ Für eine differenzierte Darstellung der „Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke“ und der Markteinführung erneuerbarer Stromerzeugung vergl. (Grünwald & Caviezel, 2017). Auch diese Studie verdeutlicht „... das Konfliktpotenzial zwischen hoher EE-Durchdringung und einem Weiterbetrieb von KKW“ (Ebenda, S.11).

²⁵⁴ Hennicke et al., 2011.

²⁵⁵ Vergleiche world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

Darüber hinaus wird die Pfadabhängigkeit der zivilen Kernkraftnutzung verstärkt, wenn offen (z. B. in Frankreich und Großbritannien) oder verdeckt (eventuell in Japan) an einer militärischen Option festgehalten wird. Für die gesamte Ländergruppe gilt trotz ihrer Unterschiedlichkeit, dass ausreichend alternative Potentiale, Technologien und Strategien (basierend auf Energie- und Materialeffizienz und erneuerbaren Energien) für Pfade hin zur Klimaneutralität existieren.²⁵⁶

Auffallend ist, dass vor allem europäische Länder, allen voran Frankreich, hohe Kernkraftanteile aufweisen. Im Jahr 2019 waren die 11 Länder mit dem höchsten Atomstromanteil alle europäisch.²⁵⁷ Insofern ist in hohem Maße relevant, ob die europäische Klima-, Energie-, Wasserstoff- und Industriepolitik ("Green Deal") die bereits bestehenden Pfadabhängigkeiten und den daraus resultierenden energiepolitischen Strukturkonservatismus in diesen Ländern verstärkt oder strategisch mit abzubauen hilft. In diesem Zusammenhang ist der vom Joint Research Center (JRC) der Europäischen Kommission vorgelegte Vorschlag, Kernkraft im Rahmen der Taxonomie für die finanzielle Regulierung als „saubere“ Energie aufzunehmen, besonders kritisch.²⁵⁸ Sowohl im Hinblick auf die Gefahren der Kernkraft (s. Kapitel 2) als auch auf unge löste Fragen von Endlagerung ist dieser Vorschlag im Sinne der sozialökologischen Transformation abzulehnen.²⁵⁹ Vor diesem Hintergrund ist es daher bedeutsam, dass Deutschland als ein führendes europäisches Industrieland den Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie (2022), gefolgt vom Kohleausstieg (2030) sowie den anderen fossilen Energieträgern (Erdgas und Öl) zügig vollzieht und die sozioökonomische Vorteilhaftigkeit in der Praxis demonstriert. Dabei wird besonders zu berücksichtigen sein, welche Auswirkungen das Urteil des Bundesverfassungsgerichts zum Klimaschutz auf die Diskussion über „Kernkraft als Klimaschutzoption“ haben wird.²⁶⁰ Es ist zu erwarten, dass interessierte Kreise die jetzt rechtlich einklagbare Dringlichkeit von Klimakrisenmaßnahmen dazu nutzen werden, die Kernenergie – zumindest die Laufzeitverlängerung – wieder als Nothelfer für die zu zögerliche Klimapolitik der Vergangenheit ins Gespräch zu bringen. Vor diesem Hintergrund werden Deutschland (heutiger Atomstromanteil: 12 %) und Japan (8 %) nachfolgend als besondere Referenzfälle behandelt.

4.2.1 Das Beispiel Deutschland

Die Kritik an der Kernkraft und das gesellschaftliche Engagement gegen diese hat in Deutschland bereits in den 1970er Jahren ihren Anfang²⁶¹. Ausgehend aus der anfänglichen Kritik hat sich die Anti-Atombewegung entwickelt, die mit der Gründung der Partei Bündnis 90/Die Grünen im Jahre 1980 auch Einzug in die Parlamente gefunden hat. Im Verlauf eines jahrzehntelangen Großkonflikts wurde im Jahre 2000 der Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie von der damaligen rot-

²⁵⁶ Hansen et al., 2019.

²⁵⁷ Schneider et al., 2021.

²⁵⁸ JRC, 2021

²⁵⁹ Siehe hierzu auch Gegenstellungnahmen von BASE (2021) und Pistner, Englert, Küppers, et al. (2021).

²⁶⁰ Bundesverfassungsgericht, 2021.

²⁶¹ Eine ausführliche Dokumentation der Geschichte der Kernkraft in Deutschland findet sich unter (Radkau, 1983) bzw. (Radkau & Hahn, 2013).

grünen Bundesregierung unter Gerhard Schröder begonnen, 2002 durch die Novellierung des Atomgesetzes rechtlich verbindlich gemacht, um dann im Jahre 2010 unter der Regierung Merkels eine faktische Umkehr der Atompolitik durch Laufzeitverlängerungen von 8 und 14 Jahren zu erfahren. Es war die Reaktorkatastrophe von Fukushima im Jahre 2011 und der daraufhin ansteigende Druck der Gesellschaft, der letztendlich zum „Atomausstiegsgesetz“ in der 13. Novellierung des Atomgesetzes geführt hat.

In Deutschland wird etwa ein Jahrzehnt vergangen sein, bis nach dem erneuten Ausstiegsbeschluss von 2011 im Jahr 2022 der komplette Ausstieg aus der nuklearen Stromerzeugung erfolgt ist. Es war dieser Ausstiegsbeschluss von 2011, der de facto die Transformationsresistenz reduziert und einen – unter damaligen Bedingungen – vergleichsweise zügigen Umbauprozess des Stromsystems unterstützt hat. Es kann davon ausgegangen werden, dass technische (z.B. Kostenreduktion bei erneuerbarem Strom) und energiepolitische (z.B. ein für raschere Markteinführung optimiertes EEG) Lerneffekte dazu beitragen, dass dieser Ausstieg bei vergleichbaren klimatischen, stromspezifischen und förderlichen industriepolitischen Systembedingungen in anderen Ländern zukünftig schneller möglich ist. Das gilt auch für Schwellenländer wie z.B. China, Indien, Brasilien, Südafrika, Iran oder Argentinien, deren Kernenergieanteil noch deutlich unter 10% der Bruttostromerzeugung liegt.

Bei den europäischen Ländern mit hohem Kernenergiestromanteil (allen voran Frankreich²⁶²) kommt es darauf an, die geschaffene Pfadabhängigkeit durch einen konsequenten energiepolitischen Paradigmenwechsel und durch die Festlegung eines Endzeitpunktes für die Atomwende schrittweise abzubauen und gleichzeitig einen klaren industrie- und klimapolitischen Kurs zur schnellen Einführung von Effizienztechnologien und erneuerbaren Energien einzuschlagen. Geschieht dies nicht, dann ist Japan ein warnendes Beispiel dafür, wie ein durch eine KKW-Katastrophe erzwungener, ungeplanter Ausstieg enorme gesellschaftliche Anstrengungen sowie deutlich höhere Kosten für eine Richtungsänderung mit sich bringt.

4.2.2 Das Beispiel Japan

Nicht nur in Hinblick auf die unmittelbaren menschlichen und volkswirtschaftlichen Folgen einer Nuklearkatastrophe, sondern auch wegen der Transformationsresistenz des nuklearen Subsystems gegen eine Richtungsänderung hin zur Dekarbonisierung ist Japan ein lehrreiches Fallbeispiel. Japan hat den Kernkraftanteil (maximal 35% in 2002) nach der Reaktorkatastrophe in Fukushima auf null (2014) gesenkt und konnte ihn bisher nur auf 8% (2019) wieder anheben.²⁶³ Dies zeigt zwar, dass die japanische Wirtschaft auch ohne Kernenergie auskommen kann, jedoch sind die Nebenwirkungen dieses Schocks erheblich gewesen, u.a. ein Anstieg von CO₂-Emissionen, steigende Energieimportabhängigkeit, höhere Strompreise und Notfall-Regulierung von Stromerzeugung und -verbrauch. Es stellt sich also die Frage, warum in Japan als

²⁶² Zu den Ausstiegs- und Umstiegs Optionen im Stromsystem von Frankreich vergl. z. B. Agora Energiewende & IDDRI (2018).

²⁶³ de.statista.com/statistik/daten/studie/29417/umfrage/anteil-der-atomenergie-an-der-stromerzeugung-in-japan/ (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

logische Konsequenz und als Antwort auf die Reaktorkatastrophe keine ambitionierte nachhaltige Transformation stattgefunden hat. Mittel- und langfristig besitzt Japan nämlich hinsichtlich Technologie- und Erzeugungspotentialen (PV, Wind, Geothermie, Biomasse) alle Voraussetzungen, um den Kernenergieanteil planmäßig und wirtschafts- und sozialverträglich zu reduzieren und so seine Stromerzeugung bis 2030 auf mindestens 40% und langfristig, spätestens bis 2050, vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen, wie eine jüngere modellgestützte Studie zu Japan zeigt.²⁶⁴

Aus Gründen der Risikominimierung, der vorausschauenden Industrie- und Wettbewerbspolitik, der Reduktion der Importabhängigkeit und der gesellschaftlichen Akzeptanz wäre eine kombinierte Strategie aus Maximierung der Energie- und Materialeffizienz und rasche, systematische Einführung erneuerbarer Energien eine für Japan zweifellos auch wirtschaftlich attraktive Option der Risikovermeidung und schrittweisen Dekarbonisierung. Warum wird diese Option dennoch bisher – trotz des Traumas der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki, trotz der Katastrophe von Fukushima und trotz der besonderen Erdbebenrisiken in Japan – (noch) nicht aktiv umgesetzt?

Begründen lässt sich dies mit der Transformationsresistenz des nuklearen Subsystems, die Japan bislang daran hindert, auf diesen langfristig und volkswirtschaftlich vorteilhafteren Pfad mit einer mutigen, aber technisch, ökonomisch und sozial machbaren Richtungsentscheidung einzuschwenken. Die Gründe liegen sowohl bei der ehemals sehr mächtigen und bis heute einflussreichen Symbiose von Nuklearindustrie und Politik („nuclear village“), als auch in den ökonomischen Verwertungszwängen des derzeit ungenutzten nuklearen Kraftwerksparks (ursprünglich 55 Kernkraftwerke), der Konzentration von Marktmacht und Netzbeherrschung durch die zehn großen KKW-Betreiber sowie in den geschaffenen generellen Systemabhängigkeiten des Nuklearsystems.²⁶⁵ Die zehn großen KKW-Betreiber wurden auch nach Fukushima nur zaghafte und ohne Einspeisevorrang dem direkten Wettbewerb erneuerbarer Stromerzeugung (vorwiegend PV) ausgesetzt, beherrschen aber noch immer die Netze und erwarten entgegen der ablehnenden Haltung der Bevölkerungsmehrheit, dass ihr in das Nuklearsystem eingesetzte Kapital durch möglichst baldige Wiederinbetriebnahme weiterhin verwertet werden kann.²⁶⁶ All dies hat die Pfadabhängigkeit von der Kernkraftindustrie verlängert, statt sie durch eine klare Richtungsentscheidung für eine schrittweise Atomwende und einen forcierten Einstieg in Effizienz und Erneuerbare zu beenden. Die Studie von REI/Agora/LUT²⁶⁷ belegt durch Modellrechnungen, dass diese „klare Richtungsentscheidung“ für Japan als ein führendes Industrieland eine gewaltige energiepolitische Kraftanstrengung, einen enormen wirtschaftlichen Strukturwandel und eine wirklich „große Transformation“ des Strom- und Energiesystems bedeuten würde. Japan hat sich als Inselland u. a. aus

²⁶⁴ LUT University, Agora Energiewende, Renewable Energy Institute et al., 2021.

²⁶⁵ Koppenborg, 2021.

²⁶⁶ Nach World Nuclear Association sind in Japan prinzipiell 33 Kernreaktoren als betriebsfähig klassifiziert; davon haben allerdings nur 9 eine Erlaubnis zum Restart erhalten; vergl. [world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx](https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx) (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

²⁶⁷ LUT University, Agora Energiewende, Renewable Energy Institute et al., 2021

Gründen der Versorgungssicherheit nach den Ölkrisen der 1970er Jahre in die scheinbar versorgungssichere Abhängigkeit von Kernenergie begeben – in einer von Erdbeben besonders gefährdeten Region eine fatale Fehleinschätzung, wie Fukushima²⁶⁸ gezeigt hat.

Die Befreiung von der geschaffenen Pfadabhängigkeit der nuklearen (aber auch von der kohlebasierten) Stromerzeugung erfordert einen radikalen Richtungswechsel der Energiepolitik. Hierzu gehören (1) ein erheblicher Zuwachs erneuerbarer Stromkapazität; (2) Investitionen in erneuerbare Strom- und Wärmeerzeugung, Energiespeicher, Übertragungsnetz und PtX-Technologie; (3) der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft; sowie (4) der Ausstieg aus der Kohle- und Kernkraftverstromung bis 2030.

Der theoretisch vorstellbare simultane Ausbau von nuklearer und erneuerbarer Stromerzeugung ist angesichts der realen Transformationserfordernisse eine unrealistische Fiktion: Die Ausstiegsstrategie (4) ist im Sinne der Überwindung der Transformationsresistenz eine Voraussetzung dafür, dass die genannten Basisstrategien (1), (2) und (3) tatsächlich im erforderlichen Umfang umgesetzt werden können. Der Grund: Solange ein endgültiges Ausstiegsdatum für die bestehende nukleare Kraftwerkskapazität nicht festgelegt ist, wird die Hoffnung der Betreiber auf Verwertung des investierten Kapitals in die Kernkraftwerke aufrechterhalten und die Innovations- und Investitionsneigung für Alternativen gebremst. Insofern erscheint es höchst unwahrscheinlich, dass sich die zehn großen regionalen Kernkraftwerksbetreiber beim erforderlichen Investitionsbedarf, dem forcierten Kapazitätsausbau erneuerbarer Stromerzeugung und dem Aufbau einer mittelfristigen Importinfrastruktur für Wasserstoff aus Erneuerbaren und PtX in ausreichendem Maße betätigen – von der Förderung von Stromsparmaßnahmen bei ihren Kunden ganz zu schweigen. Ob sich diese Perspektive dann ändert, wenn – wie in Japan und auch anderswo denkbar – auf nuklearen Wasserstoff gesetzt wird, wird anschließend diskutiert.

4.3 Nuklearer Wasserstoff

Dieser Abschnitt beschäftigt sich nicht mit der allgemeinen Notwendigkeit und der Rolle von Wasserstoff im Transformationsprozess. Vielmehr wird spezifisch die Wasserstoffherzeugung aus Kernkraft genauer beleuchtet. Warum muss die Frage des nuklearen Wasserstoffs trotzdem unter der Überschrift „transformationsresistent“ behandelt werden?²⁶⁹ Bereits in wenigen Jahren spielen größere Mengen klimaneutral erzeugten Wasserstoffs in vielen Dekarbonisierungsszenarien (bis 2050) eine zunehmend bedeutende Rolle für die nicht oder nur schwer per erneuerbarer Elektrizität dekarbonisierbaren Sektoren (z.B. energieintensive Industrien wie Stahl, Che-

²⁶⁸ Und zuvor schon die Freisetzung von radioaktivem Material nach einem Transformatorbrand im Jahre 2007 im KKW Kashiwazaki-Kariwa.

²⁶⁹ Die komplizierte Frage für alle Länder ist, welche Mengen erneuerbaren Wasserstoffs jeweils national herstellbar sind und welche Mengen zu welchen Preisen auf einem noch sehr fernen Weltmarkt beschaffbar sein werden.

mie, Zement und Teile des Verkehrs).²⁷⁰ Wenn gleichzeitig unterstellt wird, dass weder national noch durch Importe²⁷¹ hinreichend viel erneuerbarer Wasserstoff verfügbar gemacht werden kann²⁷², dann könnte aus Gründen der langfristigen Versorgungssicherheit ein nuklearer Wasserstoffsockel dauerhaft aufrechterhalten bzw. rasch geschaffen werden, wenn der Pfad des breiten Wasserstoffeinsatzes beschritten wird. Bei steigendem Anteil variabler Einspeisung könnten KKW-Betreiber daraufsetzen, in Zeiten vollständiger regenerativer Lastdeckung speicherbaren Wasserstoff per Elektrolyse herzustellen, um bestehende KKW möglichst weiter im Volllastbetrieb zu betreiben. Wird dies zum Credo der herrschenden Energie-, Industrie- und Förderpolitik, wäre eine langfristige nukleare Pfadabhängigkeit vorprogrammiert.²⁷³

Interessant ist, dass weder in der europäischen noch in der deutschen Wasserstoffstrategie die Wasserstoffproduktion mithilfe von Kernenergie explizit erwähnt wird.²⁷⁴ Allerdings hat die Nuklearindustrie diese Option stets in ihren Analysen mitverfolgt, die britische Nuclear Industry Association (NIAUK) aktuell sogar mit besonderem Nachdruck.²⁷⁵ Auch die EU-Kommission und Frankreich stellen klar, dass sie sogenannten „CO₂-armen“ Wasserstoff auch aus Kernenergie durchaus mit ins Kalkül miteinbeziehen, weil er gegenüber der bisher allgemein üblichen Reformierung aus Erdgas (mit oder ohne Carbon Capture and Storage, CCS) weniger CO₂ freisetzen und so zumindest für eine Übergangsphase benötigt würde.²⁷⁶

Die NIAUK diskutiert vier technisch mögliche Verfahren, nämlich

1. die Kaltwasser-Elektrolyse („cold water electrolysis“),
2. die Hochtemperaturdampf-Elektrolyse („high temperature steam electrolysis“),
3. die thermochemische Wasseraufspaltung („thermochemical water splitting“) und schließlich
4. die konventionelle Gasreformierung („reforming from fossil fuels“) mithilfe von Hochtemperaturwärme aus Kernkraftwerken und Endlagerung des entstehenden CO₂ (CCS).

In Variante 1 wird Kernenergiestrom statt Strom aus Wind und Sonne bei der Elektrolyse eingesetzt und damit auch quasi über Wasserstoff speicherbar gemacht. Hin-

²⁷⁰ Eine umfangreiche Studie zum nachhaltigen Einsatz von Wasserstoff findet sich unter (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2021).

²⁷¹ Nicht nur in Japan, sondern auch in Deutschland und anderen Industrieländern wird die weltweite Nachfrage nach (erneuerbarem) Wasserstoff erheblich zunehmen.

²⁷² Das BMBF geht z. B. im Juni 2020 davon aus, dass Deutschland langfristig 50 Mio. Tonnen Wasserstoff aus Erneuerbaren benötigt, www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html (zuletzt geprüft am 29.09.2021); zum Vergleich: Im Jahr 2018 importierte Deutschland 84,8 Mio. Tonnen Rohöl.

²⁷³ Dies ist insbesondere der Fall, wenn nicht ausreichend Überschussstrom aus EE zur Verfügung stehen würde, der billiger ist als Strom aus Kernenergie.

²⁷⁴ Europäische Wasserstoffstrategie siehe Europäische Kommission (2020) bzw. für die deutsche Wasserstoffstrategie Bundesregierung (2020).

²⁷⁵ NIAUK, 2021.

²⁷⁶ www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/eu-kommission-aus-atomkraft-produzierter-wasserstoff-ist-co2-arm/ (zuletzt geprüft am 29.09.2021). Wasserstoff aus Erneuerbaren, Erdgas und Kernenergie wird manchmal auch unter dem Begriff „clean hydrogen“ subsumiert.

sichtlich der Wettbewerbsfähigkeit von nuklearem Wasserstoff (ohne Berücksichtigung externer Kosten) gegenüber Wasserstoff aus Erneuerbaren konkurriert also bei sonst vergleichbarer technischer Gesamtkonfiguration in dieser Variante Kernkraft gegen erneuerbaren Strom. Wie gezeigt wurde, ist als entscheidende Grundlage für die Gesamtkosten der Strom aus Erneuerbaren vorteilhafter.²⁷⁷ Variante 2 hält die NIAUK prinzipiell für effizienter und technisch auch für machbar, dieses Verfahren ist jedoch noch nicht Stand der Technik.²⁷⁸ Variante 3 verlangt Temperaturen zwischen 600 und 900 °C, die nur mit der neuen Generation von Kernkraftwerken mit geringer Leistung (SMRs) erreicht werden können. Diese Variante kann daher frühestens in den 2030er Jahren in Prototypen getestet werden und kommt damit zu spät für eine ausreichend schnelle Transformation des Energiesystems. Variante 4 könnte prinzipiell fossile Energien bei der Gasreformierung ersetzen, verlangt aber sicheres und kostengünstiges CCS und ist somit gegen erneuerbaren Wasserstoff mittel- und langfristig voraussichtlich wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig sowie, aufgrund erheblicher Unsicherheiten bei CCS, ebenfalls zudem nicht marktreif.

Unterm Strich bleibt daher die Bilanz, dass nuklearer Wasserstoff bei keinem der Verfahren gegenüber Wasserstoff aus EE wettbewerbsfähig ist oder rechtzeitig werden könnte. NIAUK propagiert daher einerseits eine ambitionierte Kohlenstoffbe-
preisung zur Berücksichtigung der vollständigen Externalitäten.²⁷⁹ Dabei wird entgegen jeder Evidenz unterstellt, dass Kernenergie keine höheren externen Kosten (z. B. für Entsorgung, Stilllegung, Endlagerung, von Unfällen ganz zu schweigen) aufweist als erneuerbarer Strom. Andererseits werden öffentliche Subventionen eingefordert, wie es auch ein neues Finanzierungsmodell zur Reduktion der Kapitalkosten von Kernkraftwerken offen vorschlägt.²⁸⁰

Dies alles kann als Beleg für die mangelnde Wirtschaftlichkeit des nuklearen Wasserstoffpfades gewertet werden. Ein wesentlicher Grund für den in jüngster Zeit entstandenen weltweiten „Rush for Hydrogen“, liegt darin, dass die schwer zu dekarbonisierbaren Sektoren (z. B. Stahl, Chemie, Teile des Verkehrssystems) in Analysen weltweit ins Visier genommen wurden. Es ist zu erwarten, dass bei einer Umsetzung der Wasserstoffstrategien der Wasserstoffbedarf in allen hochentwickelten Industriegesellschaften auf dem Weg zur vollständigen Dekarbonisierung derart anwachsen könnte, dass in der Regel – zum Beispiel in Deutschland und in Europa – eine Bereitstellung ausreichender Mengen Wasserstoffs aus EE nur durch enorme Importmengen von EE-Wasserstoff oder Derivaten gesichert werden können²⁸¹. Soll hieraus kein Sachzwang für nuklearen Wasserstoff entstehen, ist es notwendig, wesentlich transparenter als bisher über die Quellen zu berichten, die Versorgungssicherheit und die Kosten erneuerbaren Wasserstoffs (Inland/Ausland) differenzierter

²⁷⁷ Das gilt insbesondere beim Vergleich von neuen Kraftwerken. Die Studie REI, Agora, LUT University (2021) geht jedoch darüber hinaus davon aus, dass auch eine kostenrelevante Ertüchtigung von Atomkraftwerken zur Ausdehnung der Laufzeit auf 60 Jahren Atomstrom ab 2025 teurer macht als Strom aus Erneuerbaren (Ebenda, S.10).

²⁷⁸ NIAUK, 2021.

²⁷⁹ Ebenda.

²⁸⁰ Ebenda.

²⁸¹ Eine detailliertere Analyse zum Wasserstoffbedarf und Importmengen findet sich unter (Gerhards et al., 2021).

zu erforschen sowie über Prioritäten zu entscheiden, in welchen Bereichen Wasserstoff unabdingbar Verwendung finden soll.²⁸² Vor allem müssen die Kapazitäten für Wind- und Solarkraftwerke forciert, eine maximal effiziente Stromnutzung in allen Sektoren vorangetrieben und faire internationale Allianzen für die Produktion und den Handel von Wasserstoff aus Erneuerbaren rechtzeitig vorbereitet werden.

4.4 Atomwende als Bedingung für erfolgreiche Endlagerung atomarer Abfälle

Die Beendigung der kommerziellen Nutzung von Kernkraft, und damit die Beendigung der Erzeugung zusätzlicher radioaktiver Abfälle, ist auch notwendig, um den wichtigen und komplexen Prozess der Endlagerung erfolgreich zu bewältigen. Dies bezieht sich zum einen konkret auf den Prozess der Endlagersuche, der bis heute für Abfälle aus Kernkraftwerken nirgendwo auf der Welt erfolgreich umgesetzt werden konnte. Darüber hinaus müssen aber auch weitere Herausforderungen der Atomwende erfolgreich abgearbeitet sein, um das „letzte Kapitel“ der Kernenergie auszurufen.²⁸³ Der Endlagersuchprozess kann nicht als alleinstehendes Phänomen, losgelöst von weiteren technisch und gesellschaftlichen Aufgaben betrachtet werden. Vielmehr muss das „vertrackte Problem“ der Endlagersuche im Kontext der Energiewende angegangen werden, die ihrerseits ein Element der großen Transformation ist.²⁸⁴ In Deutschland fällt die atompolitische Wende gleichsam originär mit der Energiewende zusammen, entstand letztere doch vor allem aus der Anti-Atombewegung der 1960er/70er Jahre.²⁸⁵ Nach jahrelangen Auseinandersetzung bedeutet die Entscheidung von 2011 das Ende der kommerziellen Nutzung der Kernkraft, wodurch der Weg freigemacht wird für die zur Akzeptabilität notwendigen Diskurse zur Atomwende, insbesondere den Einstieg in den großindustriellen Rückbau von Kernkraftwerken sowie die Endlagerung der radioaktiven Abfälle.²⁸⁶

Der allseits verwendete Begriff des „Atomausstiegs“ ist irreführend und ist nicht als Narrativ zur Unterstützung der Endlagersuche geeignet. Anders als beim Kohle- oder Gasausstieg kann man aus technisch-physikalischen Gründen nicht einfach aus der Kernkraft „aussteigen“, da die Wärmebildung durch Zerfallsprozesse über sehr lange Zeit anhält. Somit muss neben dem viele Jahrzehnte dauernden Rückbau die Endlagersuche für über eine Millionen Jahre ausgelegt werden, wie z. B. in Deutschland im Standortauswahlgesetz (StandAG) festgelegt. Die Atomwende reicht weit über die bevorstehende Schließung von Kernkraftwerken und der Endlagersuche hinaus. Auch andere atomwirtschaftliche Aktivitäten in Deutschland bzw. von Deutschland mitfinanzierte Aktivitäten müssen beendet werden, um den Zuwachs an Abfällen zu

²⁸² Zum Beispiel stellt sich die Frage der Priorisierung bei der Umnutzung von Erdgasnetzen für Wasserstoff (bzw. H₂-Beimischungen), bei der Verwendung von Wasserstoff in Gebäuden (mit Brennstoffzellen), bei der Rückverstromung oder bei direkt elektrifizierbaren Segmenten des Verkehrs, z. B. Schwerlastverkehr, Züge, PKWs.

²⁸³ BASE, 2020.

²⁸⁴ Brunnengräber, 2019b.

²⁸⁵ Krause, 1980; Müschen und Romberg, 1986; Brunnengräber, 2016a, 13–32; Morris und Pehnt, 2016; Hirschhausen, 2018.

²⁸⁶ Für eine detaillierte Übersicht über die atomaren Abfälle siehe: (Der Welt-Atommüll-Bericht, 2019).

stoppen und die bestehenden Abfälle einer möglichst sicheren Entsorgung zuführen zu können. Die vom BMU veröffentlichte Liste von Maßnahmen in Richtung Atomwende enthält u. a. folgende Maßnahmen: Schließung der Atomfabriken in Lingen und Gronau, Schulterchluss der atomkritischen Staaten, Eintreten gegen Laufzeitverlängerungen international sowie kein öffentliches Geld für Kernkraftwerke in der EU und darüber hinaus.²⁸⁷

Um in Zukunft gesellschaftliche Konflikte zu vermeiden und einen Endlagerstandort mit größtmöglicher Akzeptanz zu bestimmen, hat der Deutsche Bundestag im Jahre 2013 das Standortauswahlgesetz (StandAG) verabschiedet. Die Endlagerkommission legte 2016 zentrale Empfehlungen für den Suchprozess vor.²⁸⁸ Nach einer Novellierung des StandAG im Jahre 2017 soll das Gesetz für einen ergebnisoffenen, transparenten, lernenden Prozess nach gesetzlich festgelegten fachlichen Kriterien unter Beteiligung der Öffentlichkeit sorgen.²⁸⁹ Für die Beteiligung der Öffentlichkeit wurde eine eigene Behörde (BASE) geschaffen, welche sowohl den Vollzug des Standortauswahlverfahrens überwachen als auch Trägerin der Öffentlichkeitsbeteiligung sein soll. Bis Ende 2021 wurden die „Fachkonferenzen Teilgebieten“ vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) umgesetzt,²⁹⁰ worauf weitere Verfahrensschritte folgen sollen, bis – nach aktueller Gesetzeslage 2031 – die Festlegung des Endlagerstandortes durch den Bundestag erfolgen soll. Auch das BASE hat sich auch zu Fragen der Kernkraft klar positioniert: „Der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie ist zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche Suche nach einem Endlager.“²⁹¹

4.5 Zwischenfazit

„Ein Kernkraftwerk emittiert im laufenden Betrieb keine direkten CO₂-Emissionen und andere Treibhausgasgase.“ Eng betrachtet und bezogen auf eine Kilowattstunde Kernenergiestrom sind die entstehenden Treibhausgasgase tatsächlich relativ gering. Dieser statischen und verkürzten Perspektive verdankt die Kernenergie die Einschätzung, sie sei eine Option im Kampf gegen die Klimakrise. Aber die Realität des Energiesystems ist nicht statisch fixiert, sondern bei beschleunigter Transformation zur vollständigen Dekarbonisierung über Jahrzehnte so dynamisch wie noch nie. Für die weltweiten Dekarbonisierungsszenarien bis 2050 sind aber ein stark forcier-

²⁸⁷ Neben der Beendigung der kommerziellen Nutzung von Kernkraft hat das Bundesumweltministerium anlässlich des 10-Jahrestags des Unfalls in Fukushima 12 „Punkte für die Vollendung des Atomausstiegs“ definiert: siehe dazu BMU (2021).

²⁸⁸ Siehe Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016).

²⁸⁹ www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Endlagersuche/Gesetzliche-Grundlagen/gesetzliche-grundlagen_node.html (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

²⁹⁰ Für eine Übersicht der Ergebnisse der Fachkonferenzen siehe Fachkonferenz Teilgebiete (2021) und für eine wissenschaftliche Begleitung des Prozesses Themann et al. (2021).

²⁹¹ „Die von der Bundesregierung eingesetzte Ethikkommission schrieb zum Beispiel dazu in ihrem Abschlussbericht: „Die Schaffung eines gesellschaftlichen Konsenses über die Endlagerung hängt entscheidend mit der Nennung eines definitiven Ausstiegsdatums für die Atomkraftwerke zusammen. Die Aussicht, mehrere Jahrtausende lang hochstrahlenden Müll sichern zu müssen, ist eine schwere Hypothek für die nachfolgenden Generationen.“ www.base.bund.de/DE/themen/kt/ausstieg-atomkraft/ausstieg_node.html (zuletzt geprüft am 29.09.2021).

ter Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung und eine massive Steigerung der Energieeffizienz als Hauptstrategien gesetzt. Für diesen fundamentalen Strukturwandel ist das Nuklearsystem und die Kernkraftproduktion in zeitlicher, ökonomischer und systemorientierter Hinsicht ein massives Innovations- und Investitionshemmnis. Für einen rasch ansteigenden Anteil variabler Stromeinspeisung aus Wind und Sonne ist die Grundlastcharakteristik von Kernkraftwerken einerseits zu starr und systemfremd. Andererseits werden KKW-Betreiber aus betriebswirtschaftlichem Interesse alles daransetzen, Alternativen der genannten Kernstrategien zu verhindern, um die Wirtschaftlichkeit ihres investierten Kapitals möglichst durch Vollauslastung zu sichern. Beide Effekte bezeichnen wir hier als Transformationsresistenz. Japan ist für diesen strukturellen Lock-in-Effekt bisher ein besonders tragisches Negativbeispiel, Deutschland nach dem endgültigen Ausstiegsbeschluss 2011 insofern ein Positivbeispiel, weil dadurch – u.a. gestützt auf das EEG (siehe oben) – Dynamiken für einen erneuerbaren Stromausbau möglich wurden. Doch auch nach der Beendigung der kommerziellen Nutzung der Kernkraft in Deutschland stellt die Schaffung eines Endlagers für die hochradioaktiven Hinterlassenschaften eine gewaltige gesamtgesellschaftliche Aufgabe dar. Um dafür die benötigte Akzeptanz der Bevölkerung zu erlangen, Misstrauen gegenüber den staatlichen Behörden abzubauen und die Generationengerechtigkeit zu forcieren, ist die Atomwende eine zwingende Bedingung für eine erfolgreiche Endlagersuche.

5. Fazit

Kernenergie spielt im gegenwärtigen Energiesystem mit 10% weltweit (Deutschland 2018: 12%) eine gewisse Rolle und trägt in einigen Ländern signifikant zur Stromversorgung bei. Angesichts der sich verschärfenden Klimakrise wird aktuell die zukünftige Bedeutung dieser Technologie diskutiert, die bei der Stromproduktion keine Klimagase emittiert. Einige wenige, aber geopolitisch mächtige Staaten halten aus verschiedenen Gründen an der Kernkraft fest, vor allem die fünf dauerhaften Mitglieder des UN-Sicherheitsrats (USA, Vereinigtes Königreich, Frankreich, Russland, China). Auch internationale Organisationen sowie einige private Unternehmen sprechen sich regelmäßig für eine zunehmende Bedeutung von Kernkraft aus.

Im vorliegenden Diskussionsbeitrag wird eine Vielzahl von Argumenten geprüft und mit dem aktuellen Stand der Forschung abgeglichen. Dabei bestätigt sich die Einschätzung der Scientists for Future aus dem Diskussionsbeitrag „Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland“, dass Kernenergie nicht in der Lage ist, in der verbleibenden Zeit einen sinnvollen Beitrag zum Umbau hin zu einer klimaverträglichen Energieversorgung zu leisten. Kernkraft ist zu gefährlich (Abschnitt 1), zu teuer (Abschnitt 2) und zu langsam verfügbar (Abschnitt 3); darüber hinaus blockiert die Nutzung der Kernenergie den notwendigen sozial-ökologischen Transformationsprozess, ohne die ambitionierten Klimaschutzziele nicht erreichbar sind (Abschnitt 4). Dies gilt auch für aktuelle diskutierte Laufzeitverlängerungen und Forschungsbemühungen um noch nicht etablierte Reaktorkonzepte. Angesichts der Perspektive einer technisch und ökonomisch darstellbaren Vollversorgung mit erneuerbaren Energien ist Kernkraft nicht nur keine sinnvolle Option zur Bekämpfung der Klima-

krise, sondern es sollte proaktiv auf die Blockade der sozial-ökologischen Transformation durch Kernkraft hinzuweisen werden, um diesen Transformationsprozess nicht zu gefährden.

© Ben Wealer, Christian Breyer, Peter Hennicke, Helmut Hirsch, Christian von Hirschhausen, Peter Klafka, Helga Kromp-Kolb, Fabian Präger, Björn Steigerwald, Thure Traber, Franz Baumann, Anke Herold, Claudia Kemfert, Wolfgang Kromp, Wolfgang Liebert & Klaus Müschen, CC BY-SA 4.0

Literatur

- Acheson-Lilienthal. (1946). *A Report on the International Control of Atomic Energy* (S. 60). fissilematerials.org/library/ach46.pdf
- Agora Energiewende. (2015). *The Integration Costs of Wind and Solar Power* (085/07-H-2015/EN; S.92). static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/integrationskosten-wind-pv/Agora_Integration_Cost_Wind_PV_web.pdf
- Agora Energiewende. (2017). Erneuerbare vs. Fossile Stromsysteme: Ein Kostenvergleich. Stromwelten 2050 – Analyse von Erneuerbaren, kohle- und gasbasierten Elektrizitätssystemen (105/02-A-2017/DE). www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Stromwelten_2050/Gesamtkosten_Stromwelten_2050_WEB.pdf
- Agora Energiewende & IDDRI. (2018). Die Energiewende und die französische Transition énergétique bis 2030 – Fokus auf den Stromsektor. Deutsch-französische Wechselwirkungen bei den Entscheidungen zu Kernenergie und Kohleverstromung vor dem Hintergrund des Ausbaus der Erneuerbaren Energien. (138/07-S-2018/DE; S. 140). static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/EW_Deutschland_Frankreich/Agora_IDDRI_French_German_Energy_Transition_2030_Study_DE_WEB.pdf
- Alley, W. M., & Alley, R. (2013). *Too hot to touch: The problem of high-level nuclear waste*. Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-03011-4
- Appel, D., Kreusch, J., & Neumann, W. (2015). *Darstellung von Entsorgungsoptionen* (K-MAT 40; S. 158). Bundestag. www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/388756/3fbc46f64ea85d532d2612a780fbb90f/kmat_40-data.pdf
- Baade, F. (1958). *Welt-Energiewirtschaft: Atomenergie-Sofortprogramm oder Zukunftsplanung*. Rowohlt.
- BASE. (2020). *Kompaktwissen zur Endlagersuche – Das letzte Kapitel* (S. 12). Bundesamt für die Sicherheit der kerntechnischen Entsorgung. www.endlagersuche-infoplattform.de
- BASE. (2021). Fachstellungnahme zum Bericht des Joint Research Centre „Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 'Taxonomy Regulation'“ unter besonderer Berücksichtigung der Kriterienreignung für die Aufnahme der Kernenergie in die EU-Taxonomie. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/2021-06-30_base-fachstellungnahme-jrc-bericht.pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BGE. (2020a). *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß §13 StandAG*. Bundesgesellschaft für Endlagerung. www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrrierefrei.pdf
- BGE. (2020b). *Gesamtkonzept der BGE zur Vorstellung des Zwischenberichts Teilgebiete und Vorschlag zur Information auf der Fachkonferenz Teilgebiete* (Nr. 817980). www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/05_-_Meilensteine/20200820_Gesamtkonzept_Kommunikation_des_Zwischenberichts_Teilgebiete_und_Vorschlag_zur_Information_auf_der_Fachkonferenz_Teilgebiete.pdf
- BMU. (2021). *12 Punkte für die Vollendung des Atomausstiegs – die Position des Bundesumweltministeriums* (S. 9) [Positionspapier]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/12_punkte_atomausstieg_bf.pdf
- Bogdanov, D., Farfan, J., Sadovskaia, K., Aghahosseini, A., Child, M., Gulagi, A., Oyewo, A.S., de Souza Noel Simas Barbosa, L., & Breyer, C. (2019). Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps. *Nature Communications*, 10, 1077. doi.org/10.1038/s41467-019-08855-1

- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467. doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467
- BP. (2020). *Statistical Review of World Energy* (69th edition; Statistical Review of World Energy, S. 6). BP p.l.c. www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-primary-energy.pdf
- Bracken, P. (2012). The second nuclear age – strategy, danger, and the new power politics. Times Books – Henry Holt and Company, LLC. ISBN 9781250037350
- Bradford, P. (2012). The nuclear landscape. *Nature*, 483 (7388), 151–152. doi.org/10.1038/483151a
- Bradford, P. (2013). How to close the US nuclear industry: Do nothing. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 69, 12–21. doi.org/10.1177/0096340213477996
- Braut-Hegghammer, M. (2008). Libya's nuclear turnaround: perspectives from Tripoli. *Middle East Journal*, 62, 1–19. doi.org/10.3751/62.1.13
- Breyer, C., Bogdanov, D., Khalili, S., & Keiner, D. (2021). Solar photovoltaics in 100% renewable energy systems. In: R. A. Meyers (Hrsg.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (S. 1–30). Springer New York. doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_1071-1
- Breyer, Ch., Birkner, Ch., Kersten, F., Gerlach, A., Goldschmidt, J. Ch., Stryi-Hipp, G., Montoro, D. F., & Riede, M. (2010). *Research and development investments in PV – A limiting factor for a fast pv diffusion?* 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain. www.q-cells.eu/uploads/tx_abdownloads/files/27thEUPVSEC_2012_Goerig_and_Breyer_SolarEnergyBreeder_01.pdf
- Brouwer, K., & Bergkamp, L. (2021). *Road to EU Climate Neutrality by 2050* (S. 456). Renew Europe. roadtoclimateneutrality.eu/Energy_Study_Full.pdf
- Brunnengräber, A. (2016a). Die atompolitische Wende – Paradigmenwechsel, alte und neue Narrative und Kräfteverschiebungen im Umgang mit radioaktiven Abfällen. In *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll* (S. 13–32). Nomos, Edition Sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft. ISBN 978-3-8487-3510-5
- Brunnengräber, A. (Hrsg.). (2016b). *Problemfälle Endlager: Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll* (1. Auflage). Nomos, Edition Sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft. ISBN 978-3-8487-3510-5
- Brunnengräber, A. (2019a). Ewigkeitslasten: Die „Endlagerung“ radioaktiver Abfälle als soziales, politisches und wissenschaftliches Projekt: eine Einführung (2., aktualisierte und überarbeitete Auflage). Nomos, Edition Sigma. ISBN 978-3-8487-5150-1
- Brunnengräber, A. (2019b). The wicked problem of long term radioactive waste governance: ten characteristics of a complex technical and societal challenge. In: A. Brunnengräber & M. R. Di Nucci (Hrsg.), *Conflicts, Participation and Acceptability in Nuclear Waste Governance* (S. 335–355). Springer Fachmedien Wiesbaden. doi.org/10.1007/978-3-658-27107-7_17
- Brunnengräber, A., & Di Nucci, M. R. (2019). *Conflicts, participation and acceptability in nuclear waste governance: An international comparison. Volume III*. Springer VS. public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5825084
- BUND. (2019). *URANAtlas – Daten und Fakten über den Rohstoff des Atomzeitalters* (S. 52). www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/atomkraft/uranatlas_2019.pdf
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS). (2020). *Bericht zur nationalen Risikoanalyse. Katastrophen und Notlagen*. www.babs.admin.ch/content/babs-internet/de/aufgabenbabs/gefahrdrisiken/natgefahrdanalyse/_jcr_content/contentPar/tabs/items/fachunterlagen/tabPar/downloadlist/downloadItems/109_1604480153059.download/KNSRisikobericht2020-de.pdf
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). (2005). *Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke* (BfS-SCHR-37/05; S. 321). Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss. doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201011243824/1/BfS_2005_SCHR-37_05.pdf
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, & Cloosters, D. (2015). *Änderung und Neufassung der Bekanntmachung zu den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“* (RS I 5-13303/01; Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, S. 102). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_0_1.pdf?__blob=publicationFile&v=%201
- Bundesregierung. (2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. www.bundesregierung.de/breg-de/suche/bericht-der-bundesregierung-zur-umsetzung-der-nationalen-wasserstoffstrategie-1963338
- BVerfG – Bundesverfassungsgericht. (2021). Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021, 1 BvR 2656/18, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20, 1 BvR

- 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20 (Klimaschutz). www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Entscheidungen/DE/2021/03/rs20210324_1bvr265618.html
- Cochran, T.B., Feiveson, H.A., Mian, Z., Ramana, M.V., Schneider, M., & von Hippel, F.N. (2010). It's time to give up on breeder reactors. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 66, 50–56. doi.org/10.2968/066003007
- Cour des Comptes. (2016). La maintenance des centrales nucléaires: Une politique remise à niveau, des incertitudes à lever. Cour des Comptes. www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/04-maintenance-centrales-nucleaires-RPA2016-Tome-1.pdf
- Cour des Comptes. (2020). Entités et politiques publiques – La filière EPR [Rapport public thématique Synthèse]. www.ccomptes.fr/system/files/2020-07/20200709-synthese-filiere-EPR.pdf
- Davis, L.W. (2012). Prospects for Nuclear Power. *Journal of Economic Perspectives*, 26, 49–66. doi.org/10.1257/jep.26.1.49
- Decker, K., Hintersberger, E., & Hirsch, H. (2021). NPP PAKS II - Paleoseismical assessment of the Siting Report and the Site License with respect to fault capability (REP-0759; S.91). Umweltbundesamt (Österreich). www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0759.pdf
- Der Welt-Atomüll-Bericht. (2019). *Fokus Europa*. WNRW. www.worldnuclearwastereport.org
- Di Nucci, M.R., Brunnengräber, A., Mez, L., & Schreurs, M. (2015). Comparative perspectives on nuclear waste governance. In: A. Brunnengräber, M.R. Di Nucci, A.M. Isidoro Losada, L. Mez, & M.A. Schreurs (Hrsg.), *Nuclear Waste Governance* (S. 25–43). Springer Fachmedien Wiesbaden. doi.org/10.1007/978-3-658-08962-7_1
- Di Nucci, M.R., Isidoro Losada, A.M., Schreurs, M.A., Brunnengräber, A., & Mez, L. (2018). The technical, political and socio-economic challenges of governing nuclear waste. In: A. Brunnengräber, M.R. Di Nucci, A.M. Isidoro Losada, L. Mez, & M.A. Schreurs (Hrsg.), *Challenges of Nuclear Waste Governance* (S. 3–22). Springer Fachmedien Wiesbaden. doi.org/10.1007/978-3-658-21441-8_1
- Diehl, P. (2016). *Nukleare Katastrophen und ihre Folgen: 30 Jahre nach Tschernobyl, 5 Jahre nach Fukushima* (W. Liebert, C. Gepp, & D. Reinberger, Hrsg.). BWV, Berliner Wissenschafts-Verlag. ISBN 978-3-8305-2120-4
- DOE/EIA. (1986). *An analysis of nuclear power plant construction costs* (DOE/EIA-0485). U.S. Department of Energy/Energy Information Administration. www.osti.gov/servlets/purl/6071600
- Drupady, I.M. (2019). Emerging nuclear vendors in the newcomer export market: Strategic considerations. *The Journal of World Energy Law & Business*, 12, 4–20. doi.org/10.1093/jwelb/jwy033
- Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen. (2007). *Zum Zwischenfall vom 25. Juli 2006 im Kernkraftwerk Forsmark 1 (Schweden) Betrachtungen und Empfehlungen der KSA* (KSA-AN-2325; S.38). Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen. pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/3420
- ENSI. (2014a). *Leibstadt: Bohrlöcher weniger ein technisches als ein organisatorisches Problem*» ENSI. www.ensi.ch/de/2014/11/05/leibstadt-bohrloecher-weniger-ein-technisches-als-ein-organisatorisches-problem/
- ENSI. (2014b). *Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI – Vorkommnisbearbeitungsbericht* (Vorkommnisbearbeitungsbericht ENSI 12/2048; S.24). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI. www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/11/vorkommnis-bearbeitungsbericht_kkw-leibstadt-2014-05-05_stand-2014-10-08.pdf
- ENSREG. (2018). *1st topical peer review report „ageing management“* (S. 77). European Nuclear Safety Regulator's Group. www.ensreg.eu/sites/default/files/attachments/hlg_p2018-37_160_1st_topical_peer_review_report_2.pdf
- Entler, S., Horacek, J., Dlouhy, T., & Dostal, V. (2018). Approximation of the economy of fusion energy. *Energy*, 152, 489–497. doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.130
- Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung. (2011). *Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft* (S. 115) [Abschlussbericht]. Deutscher Bundestag. archiv.bundesregierung.de/resource/blob/656922/394384/962ba09452793c8a87402c9ee347379/2011-07-28-abschlussbericht-ethikkommission-data.pdf
- EUROfusion, Donné, T., Morris, W., Litaudon, X., Hildalgo, C., McDonald, D., Zohm, H., Diegele, E., Möslang, A., Nordlund, K., Federici, G., Sonato, P., Waldon, C., Borba, D., & Helander, P. (2018). *European Research roadmap to the realisation of fusion energy*. EUROfusion. www.eurofusion.org/fileadmin/user_upload/EUROfusion/Documents/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf
- Europäische Kommission. (2020). *Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa* (Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen COM (2020) 301 final). eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1594897267722&uri=C ELEX:52020DC0301
- European Commission. (2019). *Communication from the Commission: The European Green Deal* (Nr. 640). eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN

- European Commission. (2020). *European Green Deal Investment Plan*. ec.europa.eu/regional_policy/en/newsroom/news/2020/01/14-01-2020-financing-the-green-transition-the-european-green-deal-investment-plan-and-just-transition-mechanism
- Fachkonferenz Teilgebiete, 2021. Bericht der Fachkonferenz Teilgebiete. No. FKT_Bt3_037_Rev01. www.endlagersuche-info.plattform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/Fachkonferenz/Dok_FKT_3.Beratungstermin/FKT_Bt3_037_Bericht_der_FachkonferenzTeilgebiete.pdf?__blob=publicationFile&v=13
- Faw, U. (2021, Mai 8). Texas nuclear plant came within three minutes of going offline, compounding catastrophe. *PolitiZoom*. politzoom.com/texas-nuclear-plant-came-within-three-minutes-of-going-offline-compounding-catastrophe/
- Ford Foundation (Hrsg.). (1979). *Das Veto: Der Atombericht der Ford-Foundation; ein kritisches Handbuch zu den Problemen der Kernenergie*. Rowohlt. ISBN: 9783499172670
- Francis, D., & Hengeveld, H.G. (1998). *Extreme weather and climate change*. Minister of Supply and Services Canada. ISBN 978-0-662-26849-9
- Frieß, F., Arnold, N., Liebert, W., & Müllner, N. (2021). Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle (Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) urn:nbn:de:0221-2021030826033). Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU). doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2021030826033/5/gutachten-partitionierung-und-transmutation.pdf
- Gaßner, Groth, Siedler, & und Kollegen. (2017). *Haftung für einen Atomunfall im europäischen Ausland* (S. 6). GGSC. green-planet-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/Hinkley_Point/170425_Gutachten_Gaßner_Atomhaftung.pdf
- Gates, B. (2021). *How to avoid a climate disaster – The solutions we have and the breakthroughs we need*. Alfred A. Knopf. ISBN 0241448301
- Gerhards, C., Weber, U., Klafka, P., Golla, S., Hagedorn, Baumann, F., Brendel, H., Breyer, C., Clausen, J., Creutzig, F., Daub, C.-H., Helgenberger, S., Hentschel, K.-M., Hirschhausen, C. von, Jordan, U., Kemfert, C., Krause, H., Linow, S., Oei, P.-Y.,... Weinsziehr, T. (2021). *Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte / Climate-friendly energy supply for Germany – 16 points of orientation* (1.0). Zenodo. doi.org/10.5281/ZENODO.4409334
- Government of Japan. (2010). *Convention on Nuclear Safety National Report of Japan for the Fifth Review Meeting* (S. 194). www.nsr.go.jp/data/000110059.pdf
- Greenpeace, Teske, S., Sawyer, S., Schäfer, O., Pregger, T., Simon, S., Naegler, T., Schmid, S., Özdemir, D., Pagenkopf, J., Kleiner, F., Rutovitz, J., Dominish, E., Downes, J., Ackermann, T., Brown, T., Boxer, S., Baitelo, R., Rodrigues, L.A., & Morris, C. (2015). *energy-[R]evolution A sustainable world energy outlook 2015 100% renewable energy for all* (5th Edition; World Energy Scenario, S.364). Greenpeace Germany, Global Wind Energy Council, Solar Power Europe. www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/greenpeace_energy-revolution_erneuerbare_2050_20150921.pdf
- Groves, L.R. (1983). *Now it can be told: The story of the Manhattan Project*. Da Capo Press.
- Grubler, A. (2010). The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing. *Energy Policy*, 38, 5174–5188. doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003
- Grunwald, A., Grünwald, R., Oertel, D., & Paschen, H. (2002). *Kernfusion Sachstandsbericht* (Arbeitsbericht NR. 75). Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. www.ipp.mpg.de/ippcms/de/presse/archiv/03_02_pi
- Grünwald, R., & Caviezel, C. (2017). *Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke* (Hintergrundpapier Nr. 21; TAB-Hintergrundpapier, S.120). Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Hintergrundpapier-hp021.pdf
- GWS, Prognos, & EWI. (2014). *Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende* [Für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie]. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/gesamtwirtschaftliche-effekte-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Hansen, J., Sato, M., Hearty, P., Ruedy, R., Kelley, M., Masson-Delmotte, V., Russell, G., Tselioudis, G., Cao, J., Rignot, E., Velicogna, I., Tormey, B., Donovan, B., Kandiano, E., von Schuckmann, K., Kharecha, P., Legrande, A. N., Bauer, M., & Lo, K.-W. (2016). Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3761–3812. doi.org/10.5194/acp-16-3761-2016
- Hansen, K., Breyer, C., & Lund, H. (2019). Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*, 175, 471–480. doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092
- Haratyk, G. (2017). *Early nuclear retirements in deregulated U.S. markets: causes, implications and policy options*. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research. ceep.mit.edu/files/papers/2017-009.pdf

- Hennicke, P., Samadi, S., & Schleicher, T. (2011). *Ambitionierte Ziele – Untaugliche Mittel: Deutsche Energiepolitik am Scheideweg* (VDW-Materialien, Bd. 1, S. 95). Vereinigung Dt. Wissenschaftler.
- Hennicke, P., & Welfens, P. J. J. (2012). *Energiewende nach Fukushima: Deutscher Sonderweg oder weltweites Vorbild?* oekom-Verlag, ISBN 978-3-86581-318-3
- Hibbs, M. (2018). *The future of nuclear power in China* (S. 147). Carnegie Endowment for International Peace. carneгиеendowment.org/2018/05/14/future-of-nuclear-power-in-china-pub-76311
- Hirsch, H. (2009, März 28). *Review of Generation III Reactors*. Hnutí Duha Conference, Prague, CZ. cz.boell.org/sites/default/files/uploads/2014/03/1_hirsch_generationiii_reactors.pdf
- Hirsch, H. (2016). *Nukleare Katastrophen und ihre Folgen: 30 Jahre nach Tschernobyl, 5 Jahre nach Fukushima* (W. Liebert, C. Gepp, & D. Reinberger, Hrsg.). BWV, Berliner Wissenschafts-Verlag. ISBN 978-3-8305-2120-4
- Hirsch, H., Becker, B., & Nünighoff, K. (2018). *WENRA approach with respect to design extension of existing reactors*. IAEA. www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/S_TIPUB1829_volTwoWeb.pdf
- Hirsch, H., & Indradiningrat, A. Y. (2012). *Schwere Reaktorunfälle – Wahrscheinlicher als bisher angenommen* (S. 66). Greenpeace Germany e.V. www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/20120229-Studie-Wahrscheinlichkeit-Reaktorunfaelle.pdf
- Hirsch, H., & Indradiningrat, A. Y. (2015). *Safety of VVER-1200/V491: Application of WENRA Safety Objectives*. NURIS – 1st INRAG Conference on Nuclear Risk, Vienna, Austria.
- Hirschhausen, C. von. (2018). *German energy and climate policies: A historical overview*. In: C. von Hirschhausen, C. Gerbaulet, C. Kemfert, C. Lorenz, & P.-Y. Oei (Hrsg.), *Energiewende „Made in Germany“: Low Carbon Electricity Sector Reform in the European Context* (S. 17–44). Springer Nature Switzerland AG. doi.org/10.1007/978-3-319-95126-3_2
- Hirschhausen, C. von, Gerbaulet, C., Kemfert, C., Reitz, F., Schäfer, D., & Ziehm, C. (2015). *Rückbau und Entsorgung in der deutschen Atomwirtschaft: Öffentlich-rechtlicher Atomfonds erforderlich*. 45, 1072–1082. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.518250.de/15-45-3.pdf
- IAEA. (2019). *IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition* (IAEA Safety Glossary, S. 278). IAEA. www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830_web.pdf
- IAEA. (2020a). *Advances in Small Modular Reactor Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)* (S. 354). International Atomic Energy Agency. aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
- IAEA. (2020b). *Climate Change and the Role of Nuclear Power*. www.iaea.org/publications/14763/climate-change-and-the-role-of-nuclear-power
- IAEA. (2020c). *Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050*. www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-1-40_web.pdf
- IEA. (2002). *World Energy Outlook 2002* (S. 533). IEA. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2002
- IEA. (2014). *World Energy Outlook 2014*. OECD. www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2014_weo-2014-en
- IEA. (2019). *Nuclear power in a clean energy system*. International Energy Agency. iea.blob.core.windows.net/assets/ad5a93ce-3a7f-461d-a441-8a05b7601887/Nuclear_Power_in_a_Clean_Energy_System.pdf
- IEA. (2020). *World Energy Outlook 2020*. IEA. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020
- IEA. (2021). *Net Zero by 2050*. www.iea.org/reports/net-zero-by-2050
- INRAG, I. Tweer, & W. Renneberg. (2018). *Excerpt: Material problems in reactor pressure vessels: Doel 3/ Tihange 2* (Nuclear Risk Reports, S. 20). INRAG. www.inrag.org/wp-content/uploads/2018/04/NRR_Excerpt_Tweer_final.pdf
- INRAG, Arnold, N., Becker, O., Dorfman, P., Englert, M., Frieß, F., Gufler, K., Jaczko, G., Kastchiew, G., Kromp, W., Kromp-Kolb, H., Kurth, S., Majer, D., Marnac, Y., Mertins, M., Mraz, G., Müllner, N., Pistner, C., Renneberg, W.,... Tweer, I. (2021). *Risiken von Laufzeitverlängerungen alter Atomkraftwerke* (Revision 4; S. 224). INRAG. www.nuclearfree.eu/wp-content/uploads/2021/04/INRAG_Risiken_von_Laufzeitverlaeng erungen_alter_Atomkraftwerke_Langfassung.pdf
- INTAC. (2012). *Fachliche Bewertung der Transportstudie Konrad 2010 von der GRS* (S. 75). INTAC. www.grs.de/sites/default/files/pdf/grs-a-3715_analyse_der_intac-studie_zur_tsk_2009_2013.pdf
- Internationale Atomenergie-Organisation (Hrsg.). (2015). *The Fukushima Daiichi accident*. International Atomic Energy Agency. www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf
- IPCC. (2014a). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/
- IPCC. (2014b). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S.

- 151). IPCC. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- IPCC. (2018a). *Special Report: Global Warming of 1.5 °C*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). www.ipcc.ch/report/sr15/
- IRENA. (2021a). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway* (S. 54). IRENA. irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf
- IRENA. (2021b). *Renewable capacity highlights*. IRENA. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2021.pdf?la=en&hash=1E133689564BC40C2392E85026F71A0D7A9C0B91
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A., Coughlin, S. J., Hay, C. A., Manogaran, I. P., Shu, Y., & von Krauland, A.-K. (2019). Impacts of Green New Deal energy plans on grid stability, costs, jobs, health, and climate in 143 countries. *One Earth*, 1, 449–463. doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.003
- JCER. (2019). Accident cleanup costs rising to 35 80 trillion Yen in 40 years. Japan Center for Economic Research. www.jcer.or.jp/jcer_download_log.php?f=eyJwb3NOX2lkjjoOOTY2MSwiZmlsZV9wb3NOX2lkjjoOOTY2Mn0=&post_id=49661&file_post_id=49662
- Jewell, J., Vetier, M., & Garcia-Cabrera, D. (2019). The international technological nuclear cooperation landscape: A new dataset and network analysis. *Energy Policy*, 128, 838–852. doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.024
- Jonter, T. (2010). The Swedish plans to acquire nuclear weapons, 1945–1968: An analysis of the technical preparations. *Science & Global Security*, 18, 61–86. doi.org/10.1080/08929882.2010.486722
- JRC. (2021). Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 (‘Taxonomy Regulation’). Joint Research Centre, European Commission. publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125953
- Kastchiew, G., Lahodyski, R., Müllner, N., Kromp, W., & Kromp-Kolb, H. (2007). *Nuclear power, climate policy and sustainability – an assessment by the Austrian Nuclear Advisory Board*. Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management. www.bmk.gv.at/dam/jcr:8f743a36-4f0f-4e1c-a3c0-eb6501f3b239/Atom_Argumentarium_2007_en.pdf
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. (2016). *Abschlussbericht der Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle* [Drucksache 18/9100]. dserver.bundestag.de/btd/18/091/1809100.pdf
- Koomey, J., & Hultman, N. E. (2007). A reactor-level analysis of busbar costs for US nuclear plants, 1970–2005. *Energy Policy*, 35, 5630–5642. doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.005
- Koppenborg, F. (2021). Nuclear Restart Politics: How the ‘Nuclear Village’ Lost Policy Implementation Power. *Social Science Japan Journal*, 24, 115–135. doi.org/10.1093/ssjj/jyaa046
- Kraan, O., Dalderop, S., Kramer, G. J., & Nikolic, I. (2019). Jumping to a better world: An agent-based exploration of criticality in low-carbon energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 47, 156–165. doi.org/10.1016/j.erss.2018.08.024
- Kreusch, J., Neumann, W., & Eckhardt, A. (2019). *Entsorgungspfade Für hoch radioaktive Abfälle: Analyse der Chancen, Risiken und Ungewissheiten*. Springer. doi.org/10.1007/978-3-658-26710-0
- Krey, V., Guo, F., Kolp, P., Zhou, W., Schaeffer, R., Awasthy, A., Bertram, C., de Boer, H.-S., Fragkos, P., Fujimori, S., He, C., Iyer, G., Keramidas, K., Köberle, A. C., Oshiro, K., Reis, L. A., Shoai-Tehrani, B., Vishwanathan, S., Capros, P., ... van Vuuren, D. P. (2019). Looking under the hood: A comparison of techno-economic assumptions across national and global integrated assessment models. *Energy*, 172, 1254–1267. doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.131
- Kromp, W., & Kromp-Kolb, H. (2016). *Nukleare Katastrophen und ihre Folgen: 30 Jahre nach Tschernobyl, 5 Jahre nach Fukushima* (S. 93–106). BWV, Berliner Wissenschafts-Verlag. ISBN 978-3-8305-2120-4
- Krause, F., Bossel, H., Müller-Reissmann, K.-F. (1980). *Energie-Wende: Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*. S. Fischer, Frankfurt am Main, Germany. ISBN 978-3-10-007705-9.
- Küppers, C., & Pistner, C. (2012). Funktionsweise von Kernreaktoren und Reaktorkonzepten. In J. M. Neles & C. Pistner (Hrsg.), *Kernenergie: Eine Technik für die Zukunft?* (S. 63–89). Springer Vieweg. doi.org/10.1007/978-3-642-24329-5
- Lazard. (2020). *Lazard’s leveled cost of energy analysis – Version 14.0* (14.0). www.lazard.com/media/451419/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf
- Lehtonen, M. (2021). *Das Wunder von Onkalo? Zur unerträglichen Leichtigkeit der finnischen Suche nach einem Endlager* (APUZ 21-23/2021, 71. Jahrgang; AusPolitik und Zeitgeschichte, S. 32–37). Bundeszentrale für politische Bildung. www.bpb.de/system/files/dokument_pdf/APUZ_2021-21-23_online.pdf
- Liebert, W. (1991). *Rüstungsmodernisierung und Rüstungskontrolle: Neue Technologien, Rüstungsdynamik und Stabilität* (E. Müller & G. Neuneck, Hrsg.; 1. Aufl.). Nomos. ISBN 3789023329
- Liebert, W. (2002). *Energiehandbuch: Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie* (E. Rebhan, Hrsg.). link.springer.com/openurl?genre=book&isbn=978-3-642-62518-3

- Liebert, W. (2005). *Die Zukunft der Rüstungskontrolle* (G. Neuneck & C. Mölling, Hrsg.; 1. Aufl). Nomos. ISBN 3832912541
- Liebert, W. (2021, März). *Sorgen angesichts der zivil-militärischen Ambivalenz*. Zukunft der Kernenergienutzung 10 Jahre nach Fukushima!, ISR Tagung, Wien. www.risk.boku.ac.at/WP/wp-content/uploads/2021/03/Liebert_Ziv-mil-Ambivalenz_ISR_10J-Fukuskima_12M%C3%A4rz_2021.pdf
- Liebert, W., Gepp, C., & Reinberger, D. (Hrsg.). (2016). *Nukleare Katastrophen und ihre Folgen: 30 Jahre nach Tschernobyl, 5 Jahre nach Fukushima*. BWV, Berliner Wissenschafts-Verlag. ISBN 978-3-8305-2120-4
- Löffler, K., Hainsch, K., Burandt, T., Oei, P.-Y., Kemfert, C., & von Hirschhausen, C. (2017). Designing a model for the global energy system – GENeSYS-MOD: An application of the Open-Source Energy Modeling System (OSeMOSYS). *Energies*, 10, 1468. doi.org/10.3390/en10101468
- Lovins, A.B. (2013). The economics of a US civilian nuclear phase-out. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 69, 44–65. doi.org/10.1177/0096340213478000
- Lovins, A.B., & Lovins, L.H. (1981). *Energy/war: Breaking the nuclear link*. Harper Colophon Books. ISBN 978-0-06-090852-2
- Luke, D. (2020). Zero emission credits: Does supporting nuclear power help us to achieve our environmental and economic goals? *Tulane Environmental Law Journal*, 33, 161–178. journals.tulane.edu/elj/article/view/2946/2759
- LUT University, Agora Energiewende, Renewable Energy Institute, Bogdanov, D., Oyewo, A., Solomon, Mensah, T., Nii Odai, Shimoyama, T., Sadovskaia, K., Satymov, R., Breyer, C., Nishida, Y., Gagnebin, M., & Pescia, D. (2021). *Renewable pathways to climate-neutral Japan* (S. 125). Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Renewable Energy Institute (REI). static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_03_JP_2050_study/2021_LUT-Agora-REI_Renewable_pathways_Study.pdf
- Meyer-Abich, K.M., & Schefold, B. (1986). *Die Grenzen der Atomwirtschaft: Die Zukunft von Energie, Wirtschaft und Gesellschaft*. C.H. Beck. ISBN 3406313175
- MIT. (2003). *The Future of Nuclear Power*. Massachusetts Institute of Technology. web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-full.pdf
- Mohr, S., Kurth, S., Pistner, C., Breuer, J., Thomas, S., Vanden Borre, T., Faure, M.G., & Haverkamp, J. (2014). *Lifetime extension of ageing nuclear power plants: Entering a new era of risk*. Greenpeace Switzerland. www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/lifetime_extension_of_ageing_nuclear_power_plants.pdf
- Mooz, W.E. (1978). *Cost analysis of light water reactor power plants (R-2304-DOE)*. The Rand Corporation. www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2008/R2304.pdf
- Mooz, W.E. (1979). *As second cost analysis of light water reactor power plants (R-2504-RC)*. The Rand Corporation. www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2006/R2504.pdf
- Morris, C., & Pehnt, M. (2016). *Energy Transition – The German Energiewende*. Heinrich Böll Stiftung. pl.boell.org/sites/default/files/german-energy-transition.pdf
- Motherway, B. (2019). *Energy efficiency is the first fuel, and demand for it needs to grow* (S. 4). IEA. www.iea.org/commentaries/energy-efficiency-is-the-first-fuel-and-demand-for-it-needs-to-grow
- Müllner, N. (2016). *Die Unfallursachen von Tschernobyl – menschliches Fehlverhalten und unzulängliches Reaktorkonzept?* (W. Liebert, C. Gepp, & D. Reinberger, Hrsg.). BWV, Berliner Wissenschafts-Verlag. ISBN 978-3-8305-3642-0
- Müschen, K., Romberg, E. (1986). *Strom ohne Atom: Ausstieg und Energiewende*. Ein Report des Öko-Instituts Freiburg-Breisgau. Fischer, Frankfurt a.M. ISBN 3100507045
- NAIIC, National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, T. (Japan), Zieli Dutra Thomé, Rogério dos Santos Gomes, Fernando Carvalho da Silva, & Sergio de Oliveira Vellozo. (2012). *The official report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission* (S. 502). warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naaic.go.jp/en/report/
- Nakano, J. (2020). *The changing geopolitics of nuclear energy*. Center for Strategic & International Studies. csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/200416_Nakano_NuclearEnergy_UPDATED%20FINAL.pdf?heOTjmYgA_5HxCuBVIZ2PGedzzQNg24v
- National Research Council. 1996. *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation*. Washington, DC: The National Academies Press. doi.org/10.17226/4912.
- NEA & IAEA. (2020). *Uranium 2020: Resources, Production and Demand*. Nuclear Energy Agency/Organisation for Economic Co-operation and Development. www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/7555_uranium_-_resources_production_and_demand_2020__web.pdf
- Neles, J.M., & Pistner, C. (Hrsg.). (2012). *Kernenergie: Eine Technik für die Zukunft?* Springer Vieweg. doi.org/10.1007/978-3-642-24329-5
- Neumann, A., Sorge, L., von Hirschhausen, C., & Wealer, B. (2020). Democratic quality and nuclear power: Reviewing the global determinants for the introduction of nuclear energy in 166

- countries. *Energy Research & Social Science*, 63, 101389. doi.org/10.1016/j.erss.2019.101389
- Neumann, W. (2011). *Transporte radioaktiver Stoffe in der Bundesrepublik Deutschland* (S. 126). intac. docplayer.org/18834842-Studie-transporten-radioaktiver-stoffe-in-der-bundesrepublik-deutschland.html
- Neumann, W. (2019, August). "Was ist Atommüll?" *Deutschlands Atommüll – Ein Überblick – Atomares Erbe Herausforderung für die nächste Generation* [Sommerakademie]. www.atommuellreport.de/fileadmin/Dateien/Tagungen/Sommerakademie2019/WN-Sommerakademie_Abfaelle.pdf
- NIAUK. (2021). *Nuclear-Sector-Hydrogen-Roadmap* (Hydrogen Roadmap, S.12). Nuclear Industry Association. www.niauk.org/wp-content/uploads/2021/02/Nuclear-Sector-Hydrogen-Roadmap-February-2021.pdf
- Nucleonics Week. (1991). Excerpts from a letter of Anatolij Dyatlov to the IAEA.
- OECD & Nuclear Energy Agency. (2012). *The Economics of Long-term Operation of Nuclear Power Plants*. OECD. doi.org/10.1787/9789264992054-en
- OECD/NEA. (2020). *Optimising Management of Low-level Radioactive Materials and Waste from Decommissioning*. Nuclear Energy Agency / Organisation for Economic Co-operation and Development. www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-11/optimising_management_of_low-level_radioactive_materials_and_waste_from_decommissioning.pdf
- Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2014). *2002 Davis-Besse reactor pressure vessel head degradation knowledge management digest* (NUREG/KM-0005; S.24). Office of Nuclear Reactor Regulation/U.S. Nuclear Regulatory Commission. www.nrc.gov/docs/ML1403/ML14038A119.pdf
- Okamura, Y. (2012). Reconstruction of the 869 Jogan tsunami and lessons of the 2011 Tohoku earthquake. *Synthesiology*, 5, 234–242. doi.org/10.5571/synth.5.234
- OTA, Security, I., Program, C., & Epstein, G. (1993). *Technologies underlying weapons of mass destruction* (OTA-BP-ISC-115; S.265). U.S. Congress, Office of Technology Assessment. fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/ota-bp-isc-115.pdf
- Perrow, C. (1992). *Die ganz normalen Katastrophen. Die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*. Campus Verlag. ISBN: 3593341255
- Petryna, A. (2011). Chernobyl's survivors: Paralyzed by fatalism or overlooked by science? *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67, 30–37. doi.org/10.1177/0096340211400177
- Pistner, C. (2019). *Propaganda versus reality of „New Generation of Reactors“ (Gen IV)- an (updated) assessment*. www.oeko.de/publikationen/p-details/propaganda-versus-reality-of-new-generation-of-reactors-gen-iv
- Pistner, C., Baehr, R., Glaser, A., Liebert, W., & Hahn, L. (1999). *Advanced nuclear systems Review study* (S. 166). inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/033/31033229.pdf?r=1
- Pistner, C., & Englert, M. (2017). *Neue Reaktorkonzepte. Eine Analyse des aktuellen Forschungsstands*. Öko-Institut e.V. www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Neue-Reaktorkonzepte.pdf
- Pistner, C., Englert, M., Küppers, C., Wealer, B., Steigerwald, B., Hirschhausen, C. von, & Donderer, R. (2021). *Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)* (Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) urn:nbn:de:0221-2021030826028). Öko-Institut e.V. www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BA SE/DE/berichte/kt/gutachten-small-modular-reactors.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Pistner, C., Englert, M., & Wealer, B. (2021). *Sustainability at risk. Heinrich Böll Stiftung. Brussels office, European Union* (Ecology, S.49) [E-Paper]. Heinrich Boell Stiftung. eu.boell.org/en/2021/09/01/nuclear-energy-eu-taxonomy
- Pursiheimo, E., Holttinen, H., & Koljonen, T. (2019). Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system. *Renewable Energy*, 136, 1119–1129. doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.082
- Radkau, J. (1983). *Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945-1975: Verdrängte Alternativen in der Kerntechnik und der Ursprung der nuklearen Kontroverse* (Originalausgabe). Rowohlt. ISBN 3-499-17756-0
- Radkau, J. (2017). *Geschichte der Zukunft: Prognosen, Visionen, Irrungen in Deutschland von 1945 bis heute*. Carl Hanser Verlag. ISBN 3446254633
- Radkau, J., & Hahn, L. (2013). *Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft*. Oekom. ISBN: 978-3-86581-315-2
- Ram, M., Child, M., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Lohrmann, A., & Breyer, C. (2018). A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030. *Journal of Cleaner Production*, 199, 687–704. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.159
- Ramana, M.V. (2021). Small modular and advanced nuclear reactors: A reality check. *IEEE Access*, 9, 42090–42099. doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064948
- Rat der Europäischen Union. (2014). *Richtlinie des*

- Rates 2014/87/Euratom zur Änderung der Richtlinie 2009/71/Euratom über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen (Amtsblatt L 219/42; Amtsblatt der Europäischen Union, S.11). Rat der Europäischen Union. data.europa.eu/eli/dir/2014/87/oj
- Reinders, L. J. (2021). *The fairy tale of nuclear fusion*. Springer International Publishing. doi.org/10.1007/978-3-030-64344-7
- Renneberg, W. (2015). *Limits of the International Feedback System*. 1st INRAG Conference on Nuclear Risk, Vienna. www.inrag.org/wp-content/uploads/2018/04/INRAG_Renneberg.pdf
- RHWG. (2019). Practical elimination applied to new NPP Designs – key elements and expectations. Western European Nuclear Regulators' Association. www.wenra.eu/sites/default/files/publications/practical_elimination_applied_to_new_npp_designs_-_key_elements_and_expectations_-_for_issue.pdf
- Rose, T., & Sweeting, T. (2016). How safe is nuclear power? A statistical study suggests less than expected. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 72, 112–115. doi.org/10.1080/00963402.2016.1145910
- RSK/ESK-Geschäftsstelle. (2019). *Bewertung der Sicherheitsnachweise für die Reaktordruckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 / Tihange-2* (Nr. 503; RSK-Stellungnahme, S.19). Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit. www.rskonline.de/sites/default/files/reports/ep_anlagersk503hp_kor.pdf
- Sachverständigenrat für Umweltfragen. (2021). *Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse* [Stellungnahme]. www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2021_06_stellungnahme_wasserstoff_im_klimaschutz.pdf;jsessionid=09346CF40CBDB77B06CF9D19E5ADA349.2_cid292?__blob=publicationFile&v=4
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Ahmad, A., Budjeryn, M., Kaido, Y., Laconde, T., Le Moal, M., Ramana, M.V., Sakiyama, H., Suzuki, T., & Wealer, B. (2021). *World nuclear industry status report 2021*. www.worldnuclearreport.org/-/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2021-.html
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Katsuta, T., Lovins, A. B., Ramana, M.V., Hirschhausen, C. von, & Wealer, B. (2019). *World nuclear industry status report 2019*. Mycle Schneider Consulting. www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2019-HTML.html
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Wealer, B., Ahmad, A., Stienne, A., Katsuta, T., Meinass, F., & Ramana, M.V. (2020). *World nuclear industry status report 2020*. www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020_lr.pdf
- Schneider, M., Froggatt, A., Johnstone, P., Stirling, A., Katsuta, T., Ramana, M.V., von Hirschhausen, C., Wealer, B., Stienne, A., Hazemann, J., Schneider, M., & Froggatt, A. (2018). *World nuclear industry status report 2018*. Mycle Schneider Consulting. www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2018-HTML
- Schneider, M., Froggatt, A., & Thomas, S. (2011). *World nuclear industry status report 2010-2011: Nuclear power in a post-Fukushima world – 25 years after the Chernobyl accident*. Worldwatch Institute, Washington, D.C., U.S.A. www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/2011MSC-WorldNuclearReport-V3.pdf
- Schulze, W.D., Brookshire, D.S., & Sandler, T. (1981). The social rate of discount for nuclear waste storage: Economics or ethics? *Natural Resources Journal*, 21, 811–832. digitalrepository.unm.edu/nrj/vol21/iss4/10
- Seibert, P., Arnold, D., Arnold, Nikolaus, Gufler, K., Kromp-Kolb, H., Mraz, G., Sholly, S., Sutter, P., & Wenisch, A. (2013). *FlexRISK – Flexible tools for assessment of nuclear risk in Europe* (BOKU-Met Report 23; NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, S.737–740). BOKU. doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_121
- Seto, K. C., Davis, S. J., Mitchell, R. B., Stokes, E. C., Unruh, G., & Ürge-Vorsatz, D. (2016). Carbon lock-in: Types, causes, and policy implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 425–452. doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934
- Shell International. (2021). *SKY scenarios – Meeting the goals of the Paris Agreement*. www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html
- Sholley, Steven. (2007). Möglichkeiten nuklearer Proliferation durch die Nutzung kommerzieller Kernkraftwerke / Nuclear proliferation issues associated with the commercial nuclear fuel cycle (Ein Argumentarium des Forum für Atomfragen, S.320). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. www.bmk.gv.at/dam/jcr:e55b4f24-1364-4a6e-9448-e6bcb28d0961/Atom_Argumentarium_2007_de.pdf
- SIPRI. (1979). Stockholm International Peace Research Institute – Nuclear energy and nuclear weapon proliferation. Taylor [and] Francis. www.sipri.org/publications/1979/nuclear-energy-and-nuclear-weapon-proliferation
- Sørensen, B. (1996). Scenarios for greenhouse warming mitigation. *Energy Conversion and Management*, 37, 693–698. doi.org/10.1016/0196-8904(95)00241-3

- Sorge, L., Kemfert, C., Hirschhausen, C. von, Wealer, B., & Kemfert, C. (2020). Atomkraft international: Ausbaupläne von Newcomer-Ländern vernachlässigbar. *DIW Wochenbericht*, 11/2020, 137–145. doi.org/10.18723/diw_wb:2020-11-1
- Sovacool, B.K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 36, 2950–2963. doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017
- Sovacool, B.K., Gilbert, A., & Nugent, D. (2014). An international comparative assessment of construction cost overruns for electricity infrastructure. *Energy Research & Social Science*, 3, 152–160. doi.org/10.1016/j.erss.2014.07.016
- Steigerwald, B. (2021, Juni 8). *Production costs uncertainties of SMR-concepts – A model-based Monte Carlo analysis*. IAAE 2021 1st online conference: „Nuclear cost economics“, Paris (online). iaee2021online.org/download/contribution/presentation/1323/1323_presentation_20210601_215825.pdf
- Strauss, L. (1954). Remarks Prepared by Lewis. L. Strauss, Chairman, United States Atomic Energy Commission, For delivery at the founders' day dinner, National Association of Science Writers, on Thursday, September 16, 1954, New York, NY. Atomic Energy Commission. www.nrc.gov/docs/ML1613/ML16131A120.pdf
- Strauss, L. L. (1962). *Men and Decisions*. Doubleday. ISBN 1-299-12171-3.
- Sugawara, D., Goto, K., Imamura, F., Matsumoto, H., & Minoura, K. (2012). Assessing the magnitude of the 869 Jogan tsunami using sedimentary deposits: Prediction and consequence of the 2011 Tohoku-oki tsunami. *Sedimentary Geology*, 282, 14–26. doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.08.001
- Teske, S., Pregger, T., Simon, S., Naegler, T., Pagenkopf, J., Deniz, Ö., van den Adel, B., Dooley, K., & Meinshausen, M. (2021). It is still possible to achieve the Paris Climate Agreement: Regional, sectoral, and land-use pathways. *Energies*, 14, 2103. doi.org/10.3390/en14082103
- The Council of the European Union. (2014). *2009/71/Euratom establishing a community framework for the nuclear safety of nuclear installations* (Official Journal of the European Union L 219/42; Council Directive, S.9). The Council of the European Union. eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014L0087&from=EN
- Themann, D., Di Nucci, M.R., & Brunnengräber, A. (2021). Alles falsch gemacht? Machtasymmetrien in der Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Standortsuche für ein Endlager. *Forschungsjournal soziale Bewegungen*, 34. forschungsjournal.de/sites/default/files/fjsbplus/fjsb-plus_2021-1_brunnengraeber_nucci_themann.pdf
- Thomas, S. (2010a). *The Economics of nuclear power: An update*. Heinrich-Böll-Stiftung. www.boell.de/sites/default/files/assets/boell.de/images/download_de/ecology/Thomas_economics.pdf
- Thomas, S. (2010b). *The EPR in Crisis*. PSIRU, Business School, Univ. of Greenwich. gala.gre.ac.uk/id/eprint/4699
- Thomas, S. (2019). Is it the end of the line for light water reactor technology or can China and Russia save the day? *Energy Policy*, 125, 216–226. doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.062
- UNEP. (2003). *Impacts of summer 2003 heat wave in Europe* (Environment Alert Bulletin). United Nations Environment Programme. www.unisdr.org/files/1145_ewheatwave.en.pdf
- University of Chicago. (2004). *The economic future of nuclear power*. Univ. of Chicago. www.nrc.gov/docs/ML1219/ML12192A420.pdf
- Unruh, G. C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, 28, 817–830. doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7
- Vartiainen, E., Masson, G., Breyer, C., Moser, D., & Román Medina, E. (2020). Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28, 439–453. doi.org/10.1002/pip.3189
- Verbruggen, A., & Yurchenko, Y. (2017). Positioning nuclear power in the low-carbon electricity transition. *Sustainability*, 9, 163. doi.org/10.3390/su9010163
- VFL. (2011). Berechnung einer risikoadäquaten Versicherungsprämie zur Deckung der Haftpflichtrisiken, die aus dem Betrieb von Kernkraftwerken resultieren [Eine Studie im Auftrag des Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE)]. Versicherungsforen Leipzig. www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/110511_BEE-Studie_Versicherungsforen_KKW.pdf
- Victoria, M., Haegel, N., Peters, I.M., Sinton, R., Jäger-Waldau, A., del Cañizo, C., Breyer, C., Stocks, M., Blakers, A., Kaizuka, I., Komoto, K., & Smets, A. (2021). Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*, 5, 1041–1056. doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005
- von Hippel, F., Takubo, M., & Kang, J. (2019). *Plutonium: How nuclear power's dream fuel became a nightmare*. Springer. doi.org/10.1007/978-981-13-9901-5
- von Hirschhausen, C. von. (2017). *Nuclear power in the twenty-first century – an assessment (Part I)*. DIW Berlin. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.575798.de/dp1700.pdf
- Walker, J. S. (2005). *Three Mile Island: A nuclear crisis in historical perspective* (1. paperback ed.). Univ. of California Press. ISBN: 9780520246836
- WBGU. (2003). *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit* (S. 260). Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen. www.wbgu.de/

- [fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2003/pdf/wbgu_jg2003.pdf](#)
- WBGU. (2011). Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation [Hauptgutachten] (2. veränderte Auflage). WBGU. www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2011/pdf/wbgu_jg2011.pdf
- Wealer, B., Bauer, S., Hirschhausen, C. von, Kemfert, C., & Göke, L. (2021). Investing into third generation nuclear power plants – Review of recent trends and analysis of future investments using Monte Carlo Simulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110836. doi.org/10.1016/j.rser.2021.110836
- Wealer, B., Bauer, S., Landry, N., Seiß, H., & von Hirschhausen, C. (2018). Nuclear power reactors worldwide – technology developments, diffusion patterns, and country-by-country analysis of implementation (1951–2017) (Data Documentation Nr. 93). DIW Berlin, TU Berlin. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.583365.de/diw_datadoc_2018-093.pdf
- Wealer, B., Czempinski, V., von Hirschhausen, C., & Wegel, S. (2017). Nuclear Energy Policy in the United States: Between Rocks and Hard Places. *IAEE Energy Forum, Second Quarter 2017*, 25–29. www.iaee.org/en/publications/newsletterdl.aspx?id=403
- Wealer, B., Seidel, J.P., & von Hirschhausen, C. (2019). Decommissioning of Nuclear Power Plants and Storage of Nuclear Waste: Experiences from Germany, France, and the U.K. In R. Haas, L. Mez, & A. Ajanovic (Hrsg.), *The Technological and Economic Future of Nuclear Power* (S. 261–286). Springer VS. doi.org/10.1007/978-3-658-25987-7_12
- Wealer, B., von Hirschhausen C., Kemfert, C., Präger, F., & Steigerwald, B. (2021). *Zehn Jahre nach Fukushima – Kernkraft bleibt gefährlich und unzuverlässig* (Nr. 8; S.107–115). DIW Berlin. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.811435.de/21-8-1.pdf
- WEC, Accenture Strategy as Project Partner, & Paul Scherrer Institute. (2019). *World Energy Scenarios 2019* (World Energy Scenario, S.152). World Energy Council. www.worldenergy.org/assets/downloads/2019_Scenarios_Full_Report.pdf
- WENRA. (2013). Safety of new NPP designs; study by Reactor Harmonization Working Group RHWG. www.wenra.eu/sites/default/files/publications/rhwg_safety_of_new_npp_designs.pdf
- WENRA. 2017. Article 8a of the EU Nuclear Safety Directive: “Timely implementation of reasonably practicable safety improvements to existing nuclear power plants” (Report of the Ad-hoc group to WENRA), WENRA Guidance. WENRA. www.wenra.eu/sites/default/files/publications/wenra_guidance_on_article_8a_of_nsd_to_ensreg.pdf
- WENRA. (2018). *Regulatory aspects of passive systems, A RHWG report for the attention of WENRA*. Western European Nuclear Regulators’ Association. www.wenra.eu/sites/default/files/publications/rhwg_passive_systems_2018-06-01_final.pdf
- Wheatley, S., Sovacool, B., & Sornette, D. (2017). Of disasters and dragon kings: A statistical analysis of nuclear power incidents and accidents. *Risk Analysis*, 37, 99–115. doi.org/10.1111/risa.12587
- WMO World Meteorological Organization, Douris, J., Geunhye, K., Baddour, O., Abrahams, J., Moreno Lapitan, J., Shumake-Gulliemont, J., Green, H., Murray, V., Bhattacharjee, S., Palm, E., Sengupta, R., Stevens, D., & Zommers, Z. (2021). *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*. library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10769
- WWF. (2011). *The energy report: 100% renewables by 2050* (S. 256). World Wildlife Fund. c402277.ssl.cf1.rackcdn.com/publications/384/files/original/The_Energy_Report.pdf?1345748859
- Xiao, M., Junne, T., Haas, J., & Klein, M. (2021). Plummeting costs of renewables – Are energy scenarios lagging? *Energy Strategy Reviews*, 35, 12. doi.org/10.1016/j.esr.2021.100636
- Zentrum für Europäische Wirtschaftspolitik (ZEW). (2014). *Potenziale und Hemmnisse von Unternehmensgründungen im Vollzug der Energiewende* [Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie]. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/potenziale-und-hemmnisse-von-unternehmensgruendungen-im-vollzug-der-energiewende.html