

Das Atomstromsystem bremst die sozial-ökologische Transformation zur Dekarbonisierung – ein Impuls



(Version 1.0, Deutsch, 8. Juni 2024)

Autor:innen: Peter Hennicke¹ (Wuppertal Institute), Anna Röttger² (Wuppertal Institute), Fabian Präger (TU Berlin), Christian von Hirschhausen (TU Berlin und DIW Berlin)

Zitationsvorschlag / Suggested citation: Hennicke, P., Roettger, A., Präger, F., von Hirschhausen, C. (2024). Das Atomstromsystem bremst die sozial-ökologische Transformation zur Dekarbonisierung. Diskussionsbeiträge der Scientists for Future, 17, 1 - 52. doi: 10.5281/zenodo.11406367

Zusammenfassung

Ausgelöst durch den Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine hat die Energiepreiskrise 2022/2023 die Debatte über die Atomenergie als möglichen Lösungsbeitrag für Klimaschutz und Energiesicherheit intensiviert. Der hier vorgelegte Debattenbeitrag identifiziert hingegen systemische Transformationshindernisse im und durch das Atomenergiesystem. Die Studie zeigt, dass der globale Beitrag der Kernenergie zum Klimaschutz auch unter förderlichen Rahmenbedingungen sehr begrenzt bleibt und dass die anstehende beschleunigte Transformation zur Klimaneutralität durch systemische Logiken der Kernenergie behindert statt gefördert wird.

Weltweite Daten zeigen, dass bereits heute erneuerbare Energien die Kernenergie in der Stromerzeugung überholt haben. Nach Szenarien können zukünftig erneuerbare Energien und die Energieeffizienz sich in einem noch rascheren Aufwärtstrend weiterentwickeln. Die Kernenergie wirkt dagegen als Innovationshemmnis und Investitionsbarriere für klimafreundlichere und risikofreiere Technologien der Energie- und Materialeffizienz und der erneuerbaren Energien. Wir nennen dies die Transformationsresistenz des Atomenergiesystems. Sie resultiert daraus, dass das Ziel der Klimaneutralität spätestens bis zur Jahrhundertmitte durch Technologie allein nicht erreichbar ist, sondern eine beschleunigte globale sozial-ökologische Transformation voraussetzt.

¹ Korrespondierender Autor, peter.hennicke@wupperinst.org, ORCID 0009-0001-2628-1483

² Korrespondierende Autorin, a-roettger@gmx.de, ORCID orcid.org/0009-0006-3222-780X

Wirkungszusammenhänge des Atomenergiesystems wie die wachsende Unwirtschaftlichkeit, lange Kapitalbindung, Kumulierung von Risiken, unlösbare Akzeptanzprobleme und Blockierung von Alternativen hemmen diesen gesellschaftlichen Transformationsprozess. Um weitere Optionen für eine rasche Transformation zur Klimaneutralität zu erschließen, werden neben den vorwiegend technologischen Strategien Effizienz und Konsistenz (erneuerbare Energie) auch Suffizienz-Strategien (Lebensstiländerungen) und eine Kreislaufwirtschaft benötigt, die mit der großtechnischen Systemlogik der nuklearen Energieproduktion ebenfalls nicht in Einklang stehen.

In zwei Fallstudien zu Frankreich und Japan und einem Exkurs zur Ukraine werden nationale Varianten von Transformationsresistenz im Zusammenhang mit Atomenergie aufgezeigt. Der Diskussionsbeitrag plädiert für eine konsequente Umstellung auf 100% erneuerbare Energien, Förderung von Energieeffizienz, Suffizienz-Politik und Kreislaufwirtschaftsstrategien. Dies betrifft nicht nur Fragen der Risikominimierung und der Energieunabhängigkeit, sondern auch der globalen Sicherheit und politischen Stabilität.

Summary

Triggered by Russia's war of aggression against Ukraine, the 2022/2023 energy price crisis has intensified the debate about nuclear energy as a possible solution to climate protection and energy security. The debate contribution presented here, however, identifies systemic obstacles to transformation in and through the nuclear energy system. The study shows that the global contribution of nuclear energy to climate protection remains very limited even under supportive conditions and that the upcoming accelerated transformation to climate neutrality is hindered rather than promoted by the systemic logic of nuclear energy.

Global data show that renewable energy has already overtaken nuclear energy in electricity generation. According to scenarios, renewable energies and energy efficiency can continue to develop in an even faster upward trend in the future. Nuclear energy, on the other hand, acts as an obstacle to innovation and investment in more climate-friendly and risk-free renewable technologies as well as energy and material efficiency. We call these barriers the transformation resistance of a nuclear energy system. It results from the fact that the goal of climate neutrality by mid-century at the latest cannot be achieved through technology alone but requires an accelerated global social-ecological transformation.

Interactions with the nuclear energy system such as growing inefficiency, long capital commitments, accumulation of risks, insoluble acceptance problems and blocking of alternatives inhibit this social transformation process. In order to open up further options for a rapid transformation to climate neutrality, in addition to the predominantly technological strategies of efficiency and consistency (renewable energy), sufficiency strategies (lifestyle changes) and a circular economy are also needed, which are also not in harmony with the large-scale and risky system nuclear energy.

In two case studies on France and Japan and an excursus on Ukraine, national variants of transformation resistance in connection with nuclear energy are shown. The discussion contribution advocates a consistent switch to 100% renewable energies, promotion of energy efficiency, sufficiency policy and circular economy strategies. This not only affects issues of risk minimization and energy independence, but also global security and political stability.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	4
Technische Hauptstrategien zur Klimaneutralität.....	6
Empirische Evidenz für ein Verdrängen.....	9
Die projizierte Zukunft der Dekarbonisierung.....	14
Innovations- und Investitionshemmnisse durch Kernenergie	17
Hemmnis 1 – Wachsende Unwirtschaftlichkeit.....	17
Hemmnis 2 – Extreme Zeitskalen der Kapitalbindung.....	19
Hemmnis 3 – Unlösbare Akzeptanzprobleme einer Risikotechnologie	20
Fallbeispiele	22
Nukleare und erneuerbare Energie – nur eine scheinbare Koexistenz	22
Frankreichs Atomkraft-Paradox	23
Historisches Erbe und politische Ambiguität.....	23
Importabhängigkeit, Opportunitätskosten, Fehlallokationen.....	24
Finanzierungszwänge	28
Ist Energiesuffizienz mit nuklearer Staatsraison vereinbar?	31
Das französische Lehrstück: AKWs im Klimawandel	32
Sozial-ökologische Transformationsstrategien gegen den nuklearen Lock-In.....	34
Japans Insellage.....	35
Ist Japan reich oder arm an Energie?	36
Wissenschaftliche Konsensbildung steht noch aus.....	37
Der gesellschaftliche Druck ist begrenzt	38
Widersprüchliche Ausbauziele für den Stromsektor	39
Langfristige Planungsunsicherheit.....	39
Offene Richtungsentscheidungen.....	40
Widersprüchliche Anreize und politische Signale	41
Hoffnung für die Ukraine?	42
Zusammenfassung.....	44
Literatur	47

Einleitung

Inmitten der globalen Energiepreiskrise, die durch Russlands Angriffskrieg gegen die Ukraine ausgelöst wurde, findet erneut ein Diskurs über die Rolle der Atomenergie statt. Als Argumente für eine verstärkte Nutzung der Atomenergie werden häufig die notwendige Reduktion der Emission von Treibhausgasen zur Erreichung der Klimaziele und die nationale Energiesicherheit angeführt. Allerdings werden in diesem Diskurs oft bedeutende mit Atomenergie verbundene Hindernisse einer Transformation zur Klimaneutralität übersehen, ein Phänomen, das wir als Transformationsresistenz des Atomenergiesystems bezeichnen.

In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die systemische und langfristige Rolle des Atomstromsystems, insbesondere im Hinblick auf die ehrgeizigen Klimaschutzziele für Deutschland (2045) bzw. global (2050). In Erweiterung der Argumentation von Wealer et al. (2021) zeigen wir, dass der zukünftige globale Beitrag der Kernenergie zur Erreichung der Klimaziele selbst unter optimistischen Annahmen marginal bleibt. Wichtiger noch: Wir begründen, warum die systemimmanenten Eigenschaften des Atomstromsystems den sozio-ökologische Transformation zur Dekarbonisierung behindern, statt den Strukturwandel zur Klimaneutralität zu beschleunigen. Dabei wird zunächst der Zusammenhang von Kernenergie und erneuerbaren Energien im Rückblick untersucht. Sodann werden gestützt auf Szenarien die systemischen Interdependenzen eines parallelen Ausbaus von Kernenergie und Erneuerbaren Energien untersucht. Die Betrachtungsebene ist dabei global.

Die untersuchten Fallbeispiele Japan, Frankreich und Ukraine illustrieren länderspezifische Transformationsresistenzen. Auf das Fallbeispiel Frankreich, das oft wegen des hohen Atomstromstromanteil als scheinbar erfolgreicher Referenzfall für Klimaschutz dargestellt wird, soll auch vor dem Hintergrund der besonderen militärisch-zivilen Handlungszwänge ausführlicher eingegangen werden.

Auf das naheliegende Fallbeispiel Deutschland gehen wir nicht ein, da der Ausstieg aus der Atomenergie seit der Abschaltung der letzten drei Reaktoren am 15. April 2023 und trotz politischem Rückzugsgeplänkel nach unserer Einschätzung unumkehrbar ist. Gleichwohl lässt sich im Rückblick auf den Verlauf der Jahrzehnte dauernden Konflikte um die Atomenergie in Deutschland die These gut begründen, dass erst nach dem absehbaren Ausstieg aus dem Atomstromsystem das Umsteuern auf erneuerbare Stromerzeugung und mehr Energieeffizienz in Deutschland Fahrt aufgenommen hat (Hennicke et al., 2019).

Eine generelle Anmerkung ist darüber hinaus notwendig, da sich dieses Papier mit der anspruchsvollen Analyse der systemischen, dynamischen und langfristigen Effekte des globalen Atomstromsystems mit dem Ziel einer Transformation des Energiesystems zur Klimaneutralität beschäftigt. Einerseits wird damit methodisches und theoretisches Neuland betreten, da diese Thematik in der Literatur noch wenig bearbeitet ist. Insofern verstehen wir diesen Debattenbeitrag als Einladung zu einer Forschungsagenda, die der weiteren gründlichen Vertiefung bedarf. Das betrifft insbesondere auch die Fallstudien, die hier nur illustrierenden Charakter für einige länderspezifische

sche Hemmnis-Faktoren haben und für die – wie etwa für Frankreich und Japan – bereits umfangreiche Literatur vorliegt. Andererseits werden hier Themen wie die vergleichende Stromkostenanalyse, die Opportunitätskosten von Atomkraftwerken (AKWs) und die Endlagerungskosten sowie die vergleichende Resilienz von Kraftwerkssystemen bei fortschreitendem Klimawandel weitgehend ausgeklammert, die in der Literatur, etwa im WNISR (2022) und WNISR (2023), bereits intensiver behandelt werden: In der Literatur ist zumeist verharmlosend vom „Kernbrennstoffkreislauf“ die Rede, wobei Uran auf dem Weg von der Mine zum Reaktor, sowie vom Reaktor bis zur Wiederaufarbeitung oder Lagerung eine Vielzahl von anspruchsvollen und sehr ressourcen- und energieintensiven Prozessen durchläuft. Kernenergiestrom ist schon daher und bei systemischer Betrachtung des gesamten Nuklearzyklus nicht CO₂-frei, aber gegenüber der Verstromung von Kohle und Erdgas weniger klimawirksam (Wealer et al., 2021, S. 74 f.). Alle diese scheinbaren „Kreislauf“-Stationen sind jeweils mit spezifischen Hochrisiken verbunden. Zugleich ist die nukleare Stromerzeugung nur als komplexes System funktionsfähig. Daher bevorzugen wir hier die Bezeichnung Atomstromsystem. Die explizite Einbeziehung des Uranbergbaus, der offenen Fragen der Atommüllproblematik, der Langzeitzwischenlagerung und der Endlagerung zusätzliche Zeit- und Risikodimensionen verstärken den Befund der Transformationsresistenz.

Für eine adäquate Bewertung der Rolle der Kernenergie im weltweiten Transformationsprozess zur Klimaneutralität ist weder eine isolierte Betrachtung einzelner Atomkraftwerke noch eine punktuelle Status Quo-Analyse gegenwärtiger Stromsysteme mit Atomstromanteil ausreichend. Vielmehr erfordert die Beurteilung eine umfassende Diskussion, welche die historische und insbesondere die zukünftige Rolle der Kernenergie unter der dynamischen, systemischen und langfristigen Zielsetzung einer radikalen Transformation des Energie- und Stromsystems im Kontext eines langfristigen Prozesses der Dekarbonisierung berücksichtigt.

Die Abkehr der Weltgesellschaft von fossilen Energien und CO₂-Emissionen impliziert einen historisch beispiellosen sozial-ökologischen Transformationsprozess und einen staatlich forcierten, zielgerichteten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Strukturwandel. Die Expansion des kapitalistischen Weltwirtschaftssystems basierte seit der industriellen Revolution auf einer exponentiell wachsenden Basis fossiler Brennstoffe. Diese energetische Grundlage mit ihren riesigen CO₂-Emissionen ist insbesondere nach dem Zweiten Weltkrieg durch den massiven Einsatz von Kohle, Erdöl und Erdgas immer stärker gewachsen. Sie muss nun innerhalb von nur 30 Jahren in einen CO₂-freien Zustand transformiert werden: Es besteht wissenschaftlicher Konsens darüber, dass nach dem rechtsverbindlichen Pariser Klimaabkommen von 2015 und auf der Grundlage der Berichte des Weltklimarats (IPCC) die globalen CO₂-Emissionen bis 2030 halbiert werden müssen (im Vergleich zu 2019), und dass bis Mitte des Jahrhunderts weltweit Netto-Null-CO₂-Emissionen erreicht werden müssen, um das 1,5-Grad-Ziel zu halten.

Angesichts dieser gewaltigen Herausforderung scheint es auf den ersten Blick vernünftig, jedes (relativ) CO₂-arme AKW als einen Beitrag zum Klimaschutz zu betrachten, dessen positive Auswirkungen noch verstärkt werden könnten, wenn viele AKWs mit erneuerbaren Energien kombiniert würden. Systemische Analysen zeigen

jedoch, dass diese einseitige, technisch- statische Sichtweise irreführend ist. Angesichts der Dringlichkeit des Klimaschutzes und der forcierten Aufstockung von Investitionen in klimaneutrale Stromerzeugung und in Technologien der Stromvermeidung geht es darum, pro investiertem Euro so schnell wie möglich so viele Treibhausgase wie möglich zu vermeiden. Gelder, die in neue AKWs investiert werden, stehen dann aber nicht für kostengünstigere und schnellere CO₂-Vermeidungstechniken zur Verfügung. Folglich wird in der Realität der effektivere und billigere Klimaschutz verdrängt. Zu den Opportunitätskosten von Atomkraft siehe Schneider (2010; 2023).

Komplexe empirische Analysen zeigen außerdem, dass die Annahme einer nahtlosen Koexistenz von Atomkraft und erneuerbaren Energien bereits für die Vergangenheit strittig ist (vgl. weiter unten die Diskussion von Sovacool et al., 2020) und zukünftig eher von einer wechselseitigen Behinderung ausgegangen werden muss. Im Folgenden konzentrieren wir uns auf diesen im Rückblick belegbaren und für die Zukunft unvermeidlichen Verdrängungseffekt. Dass dieser Verdrängungseffekt de facto einen zentralen Einwand gegen ein AKW-Subsystem darstellt und warum die Formel

„Erneuerbare plus Effizienz plus Suffizienz minus Kernenergie“

der Schlüssel zu einer zukünftigen sozial-ökologischen Transformation hin zu effektivem Klimaschutz und Net Zero ist, wird weiter untersucht und anhand der Fallbeispiele kurz veranschaulicht.

Technische Hauptstrategien zur Klimaneutralität

Bei den folgenden Klimaschutzszenarien wird das angestrebte Ziel in der Regel synonym mit Klimaneutralität oder Net Zero und der dafür notwendige Prozess mit Dekarbonisierung bezeichnet. Gemeint ist in allen Fällen, dass ein möglichst zu 100 % erneuerbares Energiesystem angestrebt werden soll. „Möglichst“ verweist darauf, dass es schwer zu vermeidende Kohlendioxid-Emissionen in einigen Industrieprozessen (z. B. Zement, Chemie, Stahl), im Transport über lange Strecken (z. B. Flugzeuge) oder andere Treibhausgas-Emissionen, wie Methan in der Landwirtschaft (z. B. Reis-anbau) gibt. Insofern wird auch diskutiert, inwieweit CO₂-Emissionen durch natürliche (z. B. Moore, Böden, Aufforstung) oder durch technische Senken als Negative Emissionen gebunden werden können (Linow et al., 2022 und Tremmel et al., 2024).

Langfristige globale und nationale Klimaschutzszenarien (bis 2050) beruhen in der Regel auf wenigen zentralen Strategien zur Dekarbonisierung (Wealer et al., 2021 zu den globalen Szenarien der IEA und des IPCC. Zum nationalen Szenarien-Vergleich, z. B. zwischen Deutschland und Japan, vgl. German Japanese Energy Transition Council (GJETC), 2022). Zumeist werden in vorwiegend technisch basierten Szenarien vier Hauptstrategien unterschieden, wobei die Bandbreite des Einsatzes der jeweiligen Technikoptionen variiert:

1. Energieeffizienz und Energieeinsparung: Die Szenarien berücksichtigen eine breite Palette von technisch verfügbaren Energiesparoptionen.

2. Erneuerbare Energien. Die schließt synthetische Kraftstoffe wie Wasserstoff ein, die in technischer Hinsicht auf primären erneuerbaren Energien basieren. Die grundlegende Elektrifizierungsstrategie aller Sektoren einschließlich Verkehr und Gebäude, die in allen Klimaschutzszenarien unterstellt wird, reduziert sich auf die Grundsatzfrage, wie risikoarm und in welchem Umfang CO₂-freier Strom erzeugt werden kann.
3. Kernenergie.
4. CO₂-Speicherung oder Rückhaltung als negative Emissionen.

In technikbasierten Szenarien gilt: Je effektiver es langfristig gelingt, den Energieverbrauch bei gleichen Energiedienstleistungen oder durch gesellschaftlich akzeptierte Reduktion von Energiedienstleistungen zu senken, desto nachhaltiger und risikoärmer gestalten sich die Strategien zur Dekarbonisierung auf der Energieangebotsseite. Energiedienstleistungen sind die eigentlichen Nutzeffekte, die durch Umwandlung von Primärenergie in Endenergie und schließlich für den eigentlich erwünschten Zweck von Energieeinsatz (z. B. Wärme, Kälte, Kraft, Kommunikation, Mobilität) bereitgestellt werden. Vgl. hierzu Hennicke (1999). Im Net-Zero-Szenario der Internationale Energieagentur (IEA) sinkt beispielsweise der weltweite Primärenergieverbrauch bis 2050 durch die Annahme einer jährlichen Energieeffizienzsteigerung um 4 %. Mögliche Rebound-Effekte wurden in diesem Modell allerdings nicht berücksichtigt (International Energy Agency (IEA), 2021).

Technik allein führt jedoch nicht zur Klimaneutralität, wie der Sachverständigenrat für Umweltfragen aktuell darlegt (2024). Immer deutlicher wird, wie komplex, gesellschaftspolitisch herausfordernd und – beim Einsatz von Kernenergie oder Geoengineering – wie potenziell riskant eine technische Transformation zu Klimaneutralität sein kann. Vor diesem Hintergrund werden zunehmend Suffizienz-Strategien und ein Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft (vgl. Pauliuk et al., 2021) als Beiträge zu ambitioniertem Klimaschutz diskutiert. Auch die IEA (2021) erkennt an, dass durch Verhaltensänderung unterstützt durch Suffizienzpolitik große Emissionsmengen eingespart werden können.

Dazu stellt der IPCC (2022) fest, dass *„politische und finanzielle Interessengruppen Klimaschutzmaßnahmen als kosteneffektiver und sozial akzeptabler ansehen, wenn mehrere Faktoren berücksichtigt werden, die das Verhalten beeinflussen, einschließlich der Ausrichtung dieser Maßnahmen an den Grundwerten der Menschen [...]. Verhaltens- und lebensstilbezogene Maßnahmen und Demand-Side-Management haben weltweit bereits zu Emissionsminderungen geführt und können erhebliche zukünftige Reduktionen ermöglichen [...]. Soziale Innovation durch Bottom-Up-Initiativen kann zu einer stärkeren Beteiligung an der Steuerung von Systemübergängen führen und die Unterstützung für Technologien, Praktiken und Richtlinien erhöhen, die Teil der globalen Reaktion zur Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 °C sind.“* (IPCC, 2022, S. 42, 317; eigene Übersetzung).

In Bezug auf die Integration von Klimaschutzpolitik mit Strategien der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) resümieren Pauliuk et al. (2021): *„Die Anhebung der Materialeffizienz auf eine ähnliche Bedeutung wie die Energieeffizienz erhöht die Machbarkeit, das Pariser Ziel zu erreichen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, und*

kann die Abhängigkeit von negativen Emissionstechnologien verringern. [...] Materialeffizienz weist einen starken Zusatznutzen bei der Einsparung von Rohstoffen, Energie und THG-Emissionen auf, und ihre technische und skalierbare Machbarkeit ist hoch. Diese Vorteile gegenüber Negativ-Emissions-Technologien sind ein zwingender Grund, Materialeffizienz in der Klimapolitik einen höheren Stellenwert einzuräumen.“

Die Frage, die sich im Kontext der Transformationsresistenz des Atomstromsystems stellt, lautet: Warum sind die potenziell umfangreichen CO₂-Reduktionsbeiträge durch Suffizienz-Politik und *Circular Economy* wichtig für die Bewertung der transformativen Wirkung von Kernenergie und von Erneuerbaren? Die Antwort ist: Wenn die vorwiegend sozial-ökologische Suffizienz-Strategie oder auch die Kreislaufwirtschaft nachweislich ambitionierten Klimaschutz erleichtern, dann muss ihre Vereinbarkeit mit einem verstärkten Einsatz von Erneuerbaren oder mit dem Ausbau der Kernenergie geklärt werden.

Dies ist eine bedeutsame Forschungsfrage, auf die gerade in Hinblick auf die Transformationsresistenz der Kernenergie hingewiesen werden muss. Einfach formuliert:

- Ist vorstellbar, dass ein Atomstromsystem zukünftig kompatibel sein kann mit Suffizienz-Strategien?
- Ist vorstellbar, dass ein Atomstromsystem mit einer entwickelten Kreislaufwirtschaft vereinbar sein kann?

Die bisherige Praxis deutet darauf hin, dass ein großtechnisches und risikobehaftetes nukleares Gesamtsystem zur Stromerzeugung mit den konsensorientierten gesellschaftlichen Prinzipien einer Suffizienz-Politik nicht kompatibel ist. Die Ermöglichung und Förderung von klimaverträglichen Verhalten ist der Kern von staatlich geförderter Suffizienz-Politik. Eine derartige Politik braucht einen gesellschaftlichen Grundkonsens und kann nur funktionieren, wenn eine Wählermehrheit Vertrauen in die Politik und für das Ziel einer risikofreieren und positiven Zukunftsvision aufbringen kann. Soziale Kohärenz und Konsensbildung sind wesentliche Erfolgsfaktoren für eine gelingende sozial-ökologische Transformation zur Dekarbonisierung. Es ist schwer vorstellbar, dass dies mit der immanenten Risiko-behafteten und daher Dissens-trächtigen Kernenergie sowie mit den damit verbundenen andauernden massiven gesellschaftlichen Konflikten jemals gelingen kann.

Auch in technischer Hinsicht basiert Dekarbonisierung, *auf neuen Formen der Dezentralisierung* (z. B. Prosumer, virtuelle oder Hybrid-Kraftwerke), Demokratisierung und Bürgerbeteiligung (z. B. Energiegenossenschaften). Daneben entwickeln sich andererseits auch einige neue Elementen der Zentralisierung (z. B. Offshore-Windparks, Wasserstoffwirtschaft durch Großelektrolyseure sowie umfassende H₂-basierte Importstrategien). Eine zentrale Strategie auf dem Weg zur Dekarbonisierung ist die Motivation und die Befähigung zur gemeinwirtschaftlichen Re-Vergesellschaftung (als Energiebürger oder „Energy Citizen“) der Erzeugung und Nutzung von Energie auf regionaler, dezentraler und modernster technologischer Basis (z. B. gestützt und vernetzt durch Informations- und Kommunikationstechnik) zu stärken. Dies sind alles wesensfremde Elemente für das heutige großtechnische fossil-nukleare Stromsystem (vgl. Bartz & Stockmar, 2018).

Die politischen und wirtschaftlichen Prioritäten von Strategien einer *Circular Economy* (CE) sind für das Investitions- und Konsumverhalten revolutionär und nur durch vorausschauende, ambitionierte und innovative erweiterte staatliche Rahmense-tzung umsetzbar. Dafür ein breites öffentliches Verständnis und eine aktive Mitgestal-tung (z. B. beim Konsumverhalten, bei Sammelsystemen, bei Sharing Konzepten etc.) zu erreichen, setzt eine stark konsensorientierte Kommunikationsstrategie voraus, für die ein latenter oder gar offener Dissens in der Frage der Kernenergie kontrapro-duktiv ist. Darüber hinaus setzen Strategien einer *Circular Economy* eine intensivier-te Kooperation über Unternehmensgrenzen und Wertschöpfungsketten hinweg (Cir-cular Economy Initiative Deutschland, 2021) voraus, die mit dem spezifischen Hand-ling von radioaktiven Brennstoffen und dem Dissens-Potential eines nuklearen Stromsystems im Widerspruch stehen.

Unabhängig davon verbietet sich die Kreislaufführung wesentlicher Komponenten und Materialien des Atomstromsystems aufgrund ihrer Radioaktivität. Insofern lässt sich auf diesem Wege auch kein Beitrag zu einer *Circular Economy* erreichen.

Es sollte weiter untersucht werden, welche Rolle diese die Klimapolitik unterstützen-den und risikoarmen Suffizienz- und Kreislaufstrategien zukünftig für eine beschleu-nigte Dekarbonisierung spielen könnten. Hierauf kann in diesem Papier nicht näher eingegangen werden, es sei auf Arbeitsgruppe Alternative Wirtschaftspolitik (2023) verwiesen. Ansatzpunkte hierzu liefern z. B. auch die kritischen Untersuchungen und die Bewertungsraster im Rahmen der Diskussionen über die Einbeziehung der Atom-energie in die EU-Taxonomie-Verordnung (Vgl. hierzu z. B. die Literaturangaben bei BMK (2020) oder UBA (2022)). Kritisiert wird vor allem die Verletzung des *Do-No-Sig-nificant-Harm*-Prinzips (DNSH) in der Taxonomie-Verordnung durch die Kernkraft.

Empirische Evidenz für ein Verdrängen

Wir prüfen in diesem Kapitel zunächst in Bezug auf Daten der Vergangenheit, ob es eine eindeutige empirische Evidenz für die Transformationsresistenz der Kernenergie gibt. Es zeigt sich im Ergebnis, dass dies in methodischer Hinsicht herausfordernd ist und auch wegen mangelnder Daten weiter untersucht werden muss.

Wie lässt sich empirisch und rückschauend die These belegen, dass Kernenergie sys-tembedingt die sozial-ökologische Transformation zur Dekarbonisierung hemmt? Ein erster Hinweis ergibt sich aus den folgenden Abbildungen, welche die Entwicklung der Stromerzeugung aus Kernenergie und erneuerbaren Quellen auf globaler und EU-Ebene darstellen.

Ein Blick auf die globalen Daten in Abb. 1 zeigt: Die Stromerzeugung aus erneuerba-ren Energiequellen hat die Kernenergie im Jahr 2019 überholt, konnte exponentiell wachsen und verzeichnet einen steilen Aufwärtstrend. Wind- und Solarenergie errei-chen 2021 einen Anteil von 10,2 % an der Stromerzeugung und liefern zum ersten Mal mehr als 10 % des weltweiten Stroms, womit sie den Beitrag der Kernenergie übertreffen (bp, 2022). Dies untermauert die These, dass die Kernenergie trotz einer

massiv politisch forcierten Markteinführungsphase jedoch spätestens ab dem Zeitpunkt der fulminanten Kostendegression der Erneuerbaren offensichtlich nicht mehr das Markt- und Wettbewerbspotential besitzt, den notwendigen Strukturwandel zur Transformation und Klimaneutralität zu beschleunigen. Warum dies der Fall ist, wird nachfolgend näher erläutert. Ob der Aufschwung der Kernenergie ursächlich und in erste Linie wegen des Aufschwungs der Erneuerbaren gestoppt wurde, als Verdrängung durch die Erneuerbaren (im weiteren Crowding-Out), lässt sich aus diesen empirischen Daten nicht eindeutig beantworten.

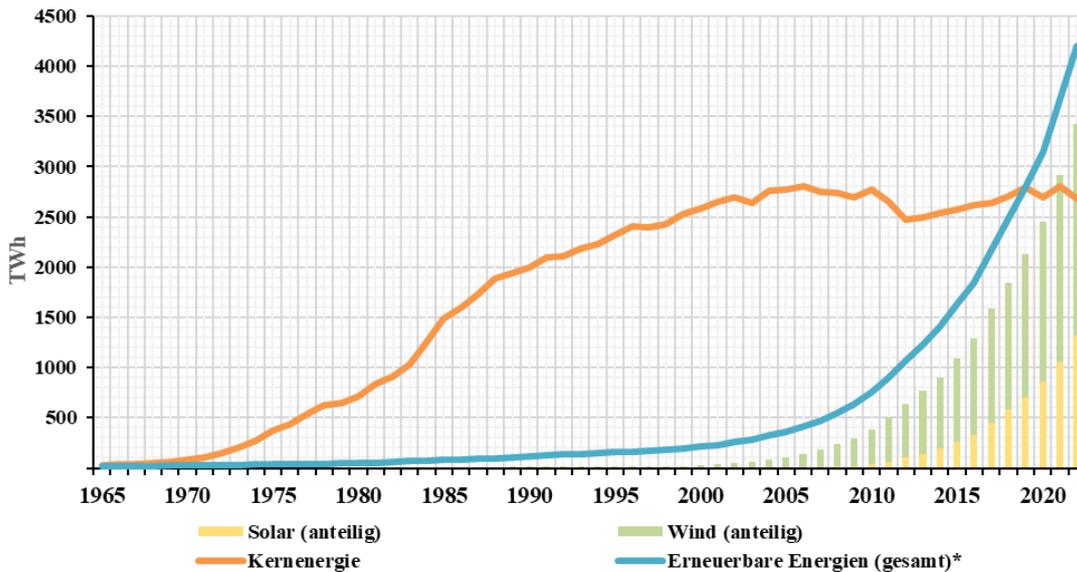


Abb. 1: Globale nukleare und erneuerbare Stromerzeugung 1965 bis 2021 in TWh. Daten nach Energy Institute (2023).

* basierend auf der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen einschließlich Wind, Geothermie, Solarenergie, Biomasse und Abfall, aber ohne Wasserkraft und ohne Berücksichtigung der grenzüberschreitenden Stromerzeugung (siehe auch bp 2022).

Die Daten zur Entwicklung der Stromerzeugung in der Europäischen Union in Abb. 2 stützen die Beobachtung aus Abb. 1: Die Kernenergie spielte zwar über Jahrzehnte hinweg eine bedeutende Rolle, jedoch stagniert bzw. fällt ihre Stromerzeugung seit ihrem Höhepunkt im Jahr 2004, während die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen rapide ansteigt.

Auf ein scheinbar einleuchtendes Argument gegen die Transformationsresistenz der Kernenergie wollen wir mit Blick auf die Vergangenheit noch eingehen. Zeigt nicht allein schon der Vergleich der CO₂-Intensitäten des Strommixes, dass Erneuerbare und Kernenergie gut zusammenwirken bzw. sich jeweils wechselseitig ersetzen können?

Beispielsweise betrug die CO₂-Intensität des Strommixes im Jahr 2020 in Frankreich 57 g CO₂/kWh und in Deutschland 366 g CO₂/kWh (Göß, 2022). Wie wir fortführend aufzeigen, sagt jedoch ein Jahreswert nichts über eine positive Dynamik oder gar über die Wirkung einer möglichen zukünftigen Blockade einer Strategie zur Dekarbonisierung aus, noch darüber, ob und gegebenenfalls inwieweit der Wert vorrangig

von der natürlichen Ressourcenausstattung oder der jeweiligen Energiepolitik abhängig ist.

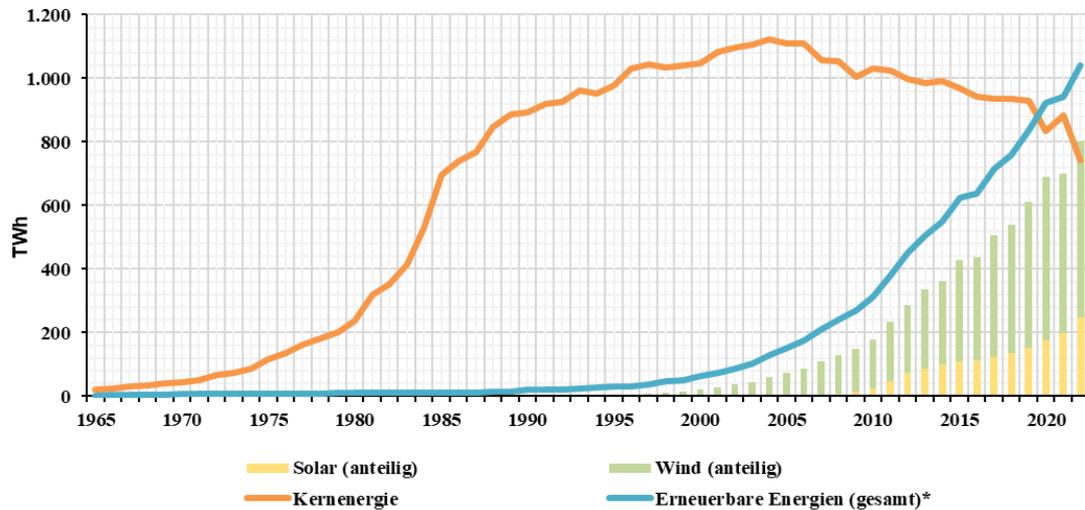


Abb. 2: Europäischen Union nukleare und erneuerbare Stromerzeugung 1965 bis 2021 in TWh. Daten nach Energy Institute (2023).

* basierend auf der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen einschließlich Wind, Geothermie, Solarenergie, Biomasse und Abfall, aber ohne Wasserkraft und ohne Berücksichtigung der grenzüberschreitenden Stromerzeugung

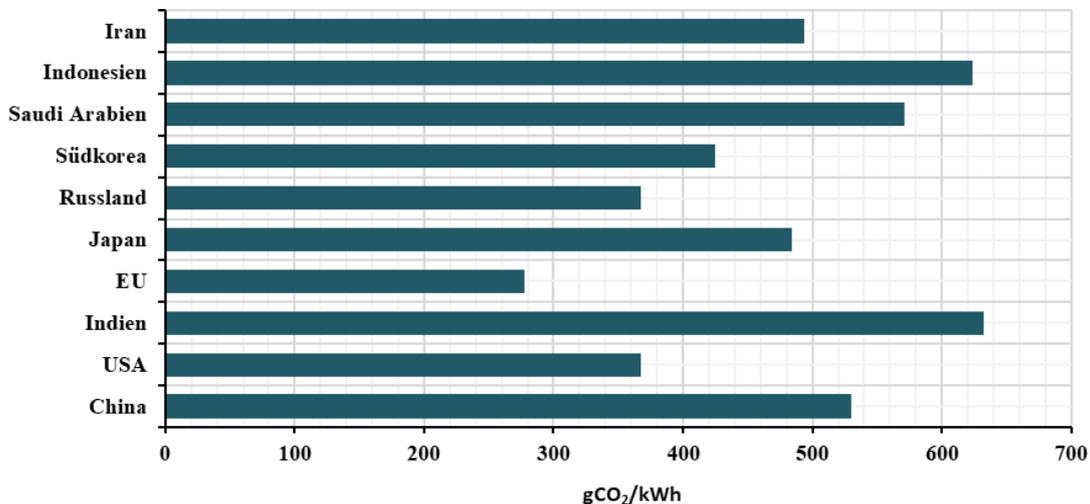


Abb. 3: CO₂-Intensität des Strommixes der 10 größten CO₂-Emittenten des Stromsektors in 2022. Daten nach Wiatros-Motyka et al. (2023).

Die zehn weltweit größten CO₂-Emittenten des Stromsektors hatten die in Abb. 3 gezeigten CO₂-Intensitäten und damit korrespondierende Anteile fossilen, nuklearen und Strom aus erneuerbaren Energiequellen – siehe Abb. 4. Es zeigt sich, dass eine hohe CO₂-Intensität mit einem hohen Anteil von Stromerzeugung aus an fossilen Energieträgern korreliert, jedoch kaum mit einem geringen Anteil von Strom aus Kernenergie.

Bemerkenswert ist auch, dass alle zehn Länder mit einem relativ hohen nuklearen Stromanteil von über 30 % in Europa liegen (in absteigender Reihenfolge: Frankreich, Slowakei, Ukraine, Belgien, Ungarn, Slowenien, Schweiz, Tschechien, Finnland und Bulgarien), diese gleichzeitig jedoch einen relativ geringen Anteil an erneuerbarer Energie aufweisen (Wiatros-Motyka et al., 2023). Russlands Energiepolitik leidet wie in keinem anderen Industrieland unter einem doppelten fossilen und nuklearen „Ressourcenfluch“. Im Strommix kommt der damit verbundene Lock-In-Effekt deutlich zum Ausdruck: Im Jahr 2022 betrug der Anteil von Strom aus Erdgas 43 %, Kohle 18 %, Kernkraft 20 % und Wasserkraft 18 %; Wind und Sonne trugen zusammen nur mit 0,7 % zur Stromerzeugung bei (Wiatros-Motyka et al., 2023). Im Folgenden werden wir uns den Fall der Ukraine als ehemaligen Teil der Sowjetunion detaillierter ansehen.

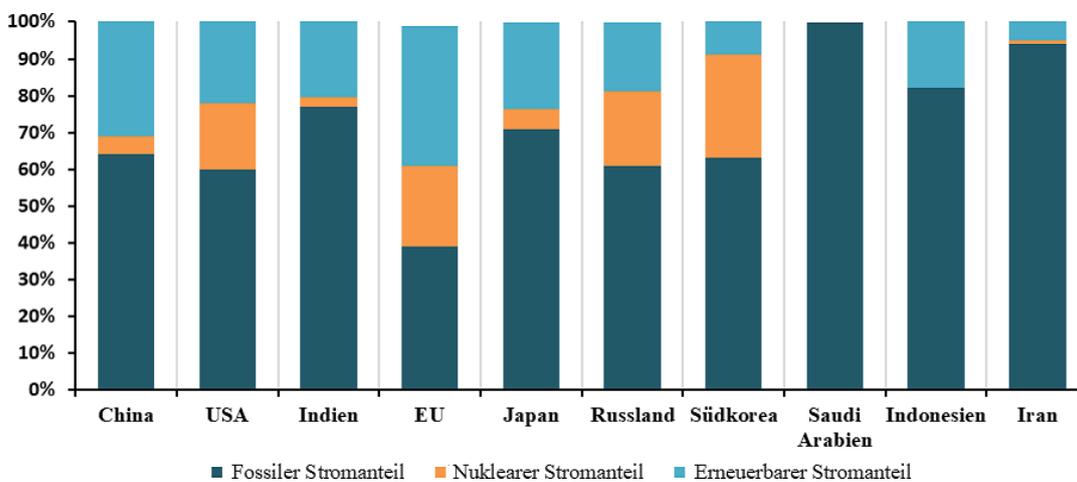


Abb. 4: Strommix-Anteile der 10 größten CO₂-Emittenten des Stromsektors in 2022. Daten nach Wiatros-Motyka et al. (2023)

Weniger bekannt ist, dass China nicht nur das umfangreichste (bisher 55 GW), sondern wohl auch das weltweit innovativste Programm für Solar-Dächer durchführt (als *whole-country rooftop solar*, Wiatros-Motyka et al., 2023). Der nukleare Stromanteil in China bleibt dagegen bisher ungeachtet massiver Ausbauplanungen mit etwa 5 % gering.

Schweden und Finnland scheinen auf den ersten Blick Beispiele für eine gelungene Koexistenz von erneuerbarer Energie und Atomenergie zu sein. Schweden weist im Jahr 2022 einen nuklearen Stromanteil von 31,1 % und einen Anteil von 43,3 % an Strom aus erneuerbaren Technologien, und Finnland einen nuklearen Stromanteil von 37,9 % und einen Anteil von 46,3 % an Strom aus erneuerbaren Technologien auf. Dies erklärt sich aus der Besonderheit der natürlichen Ressourcenausstattung beider Länder: Beide verfügen über einen hohen Anteil an grundlastfähiger, aber auch flexibler Wasserkraft (Schweden 43,3 %; Finnland 19,4 %) und erzeugen nur 17,5 % (Finnland) bzw. 20,2 % (Schweden) fluktuierenden (onshore) Windstrom (Fraunhofer ISE, 2023a, b). Dass der extrem verzögerte und teure Netzanschluss des finnischen Europäischen Druckreaktors (European Pressurized Reactor, EPR) schon jetzt Anzeichen von Systeminkompatibilität aufweist, zeigt die Tatsache, dass das AKW wegen

billigerer oder negativer Börsenpreise seine Produktion drosseln musste, vgl. yle.fi/a/74-20032375).

Diese Beispiele zeigen, dass ein stringenter Zusammenhang im Sinne von *ein hoher Atomstromanteil impliziert einen geringen Anteil an erneuerbarer Stromerzeugung* auf Basis dieser Methodik und Datengrundlage in der Rückschau nur bedingt bestätigt werden kann. Daher erfordert die Analyse der transformativen Wirkung in der Zukunft in jedem Fall eine genauere Untersuchung der Wirkzusammenhänge (siehe dazu Kapitel 5 und 6).

Eine aufschlussreiche, allerdings methodisch umstrittene erste Einschätzung liefert die Studie von Sovacool et al. (2020), die eine umfassende Erweiterung der Datenbasis und den Einsatz einer komplexeren Methodik beinhaltet. Die Autoren analysierten globale Daten zu nationalen CO₂-Emissionen mit multiplen Regressionsanalysen und verglichen diese mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren und nuklearen Energiequellen in 123 Ländern und über einen Zeitraum von 25 Jahren. Sie identifizierten Zusammenhänge, ob und ggf. wie Länder mit unterschiedlicher Nutzung von Kernenergie und erneuerbaren Energien höhere oder niedrigere CO₂-Emissionen aufweisen. Ihre Schlussfolgerung ist provozierend: *„Dies deutet darauf hin, dass sich die Bindung an Kernenergie und erneuerbare Energien tendenziell gegenseitig verdrängen. [...] Entscheidend ist, dass Strategien für erneuerbare Energien in offensichtlich bemerkenswertem Maße mit geringeren nationalen Kohlenstoffemissionen verbunden sind. [...] Es scheint, dass Länder, die groß angelegte Investitionen in neue Kernenergie planen, Risiken eingehen, größere Klimavorteile durch Investitionen in alternative erneuerbare Energien zu verdrängen. [...] Angesichts dieser Analyse ergibt sich für die Ausbauplanung des Stromsystems, dass sich verschiedene erneuerbare Energien in der realen Welt als wesentlich effektiver erweisen als die Kernenergie, wenn es darum geht, den Klimawandel zu reduzieren.“* (Sovacool et al., 2020, S. 928 & 933).

Es ist strittig, ob diese aus aggregierten Daten und einer aufwendigen Korrelationsanalyse abgeleiteten starken Thesen – erstens die wechselseitige Verdrängung und zweitens das Plädoyer für Erneuerbare als effektivere Dekarbonisierungsstrategie im Vergleich zur Kernkraft – hinreichend begründbar sind. Fell et al. (2022) sowie Bischoff (2022) kritisieren z. B. methodische Mängel in der Studie von Sovacool. Fell et al. (2022) resümieren: *„Unsere empirische Analyse bestätigt daher, dass sowohl Kernkraft als auch erneuerbare Elektrizität zur Dekarbonisierung und Erreichung von Klimaschutzziele beitragen können“* (eigene Übersetzung). Diese unbestreitbare Tatsache – dass sowohl Erneuerbare als auch Kernkraft zur CO₂-Reduktion beitragen können – steht jedoch weder unserem Beitrag noch der zentralen Aussage von Sovacool et al. (2020) entgegen. In ihrer Antwort auf Fell et al. (2022) bezüglich der effektiveren Dekarbonisierungsrolle von Kernkraft oder erneuerbaren Energien betonen Sovacool et al.: *„In dieser Hinsicht sind alle zusätzlichen Resultate (der Analyse von Fell et al.) vollständig in Übereinstimmung mit unseren und zeigen eine stärkere Wirkung durch Erneuerbare“* (eigene Übersetzung).

Rückblickend, so unser Fazit, erscheint die Crowding-Out-These – Erneuerbare verdrängen Kernenergie – zwar plausibel. Aber die zeitliche Dynamik dieses Prozesses

in den jeweiligen Ländern kann durch die zitierten Quellen und Methoden nicht ausreichend belegt werden. Insofern bedarf das Plädoyer für einen vorrangigen Ausbau erneuerbaren Energien in Zukunft und der Nachweis einer bremsenden Wirkung des Atomstromsystems weiterer Analyse (siehe weiter unten).

Die projizierte Zukunft der Dekarbonisierung

Internationale Institutionen wie die International Energy Agency (IEA), der World Energy Council (WEC), die International Atomic Energy Agency (IAEA) und einige Szenarien des IPCC, die von einem starken Ausbau der Atomenergie ausgehen, prognostizieren für das Jahr 2050 einen Anteil der Kernenergie am Strommix zwischen 8 % und 14 %. Im Net-Zero-Szenario der IEA erreicht erneuerbarer Strom aus Wind und Sonne einen Anteil von fast 90 %, während der Atomstromanteil unter 10 % bleibt (International Energy Agency (IEA) 2021, S. 115). Aufgrund der den Klimaschutzszenarien zugrundeliegenden Strategie zur möglichst CO₂-freien Elektrifizierung aller Sektoren steigt in diesen Szenarien der Strombedarf deutlich an. Im Net-Zero-Szenario der IEA bis 2050 sogar auf mehr als das Doppelte im Vergleich zu 2020 (International Energy Agency (IEA) 2021, S. 70). Deshalb geht die IEA in ihren neueren Szenarien (International Energy Agency 2020 und International Energy Agency 2021) für 2040 von einer Kernkraftkapazität zwischen 480 GW und 730 GW aus: „Dies setzt implizit einen erheblichen Neubau von Kernkraftwerken voraus, der sich nicht durch konkrete Kraftwerksprojekte [...] oder ihre Wettbewerbsfähigkeit begründen lässt“ (Wealer et al. 2021, S. 62). Weiter zeigen Wealer et al. (2021), dass die von der IEA zu Grunde gelegten Investitionskosten für Kernkraft deutlich zu gering angesetzt sind, während die für Wind und PV systematisch zu hoch sind. Auch Mycle Schneider weist darauf hin, dass diese von der IEA unterstellten Ausbauziele für die nächsten 20 Jahre auch industriepolitisch mehr als fragwürdig sind: Im Zeitraum von 2003 bis 2022 sind weltweit insgesamt 99 AKWs ans Netz gegangen (darunter 49 in China), 105 AKWs wurden geschlossen (darunter keine in China). Selbst wenn alle heute genehmigten Laufzeitverlängerungen durchgeführt würden, müsste die Baurate mindestens verdoppelt werden, um allein den jetzigen Stand von etwa 370 GW zu halten. Der von der IEA unterstellte Ausbaupfad ist also nicht nur aus Kosten-, sondern auch aus Kapazitätsgründen nicht realisierbar (vgl. Schneider, 2023)

Wir können daher festhalten: Selbst in den globalen Szenarien, die einen starken Ausbau der Kernenergie vorsehen, bleibt der Atomstromanteil in den nächsten Jahrzehnten relativ gering. Insofern wird bestätigt, dass es auch nach dem Urteil von Kernenergiebefürwortern weit effektivere Klimaschutzstrategien als Kernenergie gibt und eine problemlose Koexistenz mit einem gleichzeitigen Ausbau von Kernenergie praktisch ausgeschlossen werden kann. Es ist darüber hinaus fraglich, ob der angenommene umfangreiche Neubau an AKW-Kapazitäten trotz der bereits nachgewiesenen Unwirtschaftlichkeit überhaupt durch dauerhafte Subventionen aus öffentlichen Mitteln realisierbar ist (zu den Kostenschätzungen auch die neusten verfügbaren

Analysen von Lazard, 2023), von der offenbaren Unplanbarkeit solcher Megabaustellen wie Flamanville oder Hinkley Point C ganz zu schweigen. Hinzu kommen erhebliche Opportunitätskosten, weil heute verfügbare, kostengünstigere, bereits akzeptierte und risikofreiere Alternativen wie Energie- und Ressourceneffizienz sowie erneuerbare Energien zur Verfügung stehen, deren beschleunigte Marktdurchdringung durch das Kernenergiesystem behindert wird.

In Deutschland besteht nach Jahrzehnten intensiver gesellschaftlicher Konflikte und wissenschaftlicher Kontroversen seit einigen Jahren unter den Szenarien-Entwicklern ein faktischer Konsens, dass ein vollständiger Ausstieg aus der Kernenergie im Jahr 2022/23) und aus der Kohleverstromung (möglichst bis 2030) notwendig und möglich ist, um eine Dekarbonisierung bis 2045 zu erreichen. Abb. 5 verdeutlicht diesen de-facto-Konsens anhand von drei repräsentativen Szenarien. Diese Szenarien wurden vor dem russischen Einmarsch in die Ukraine und vor der durch den daraus resultierenden Aggressionskrieg ausgelösten Energiepreiskrise und den befürchteten Versorgungsgpässen erstellt.

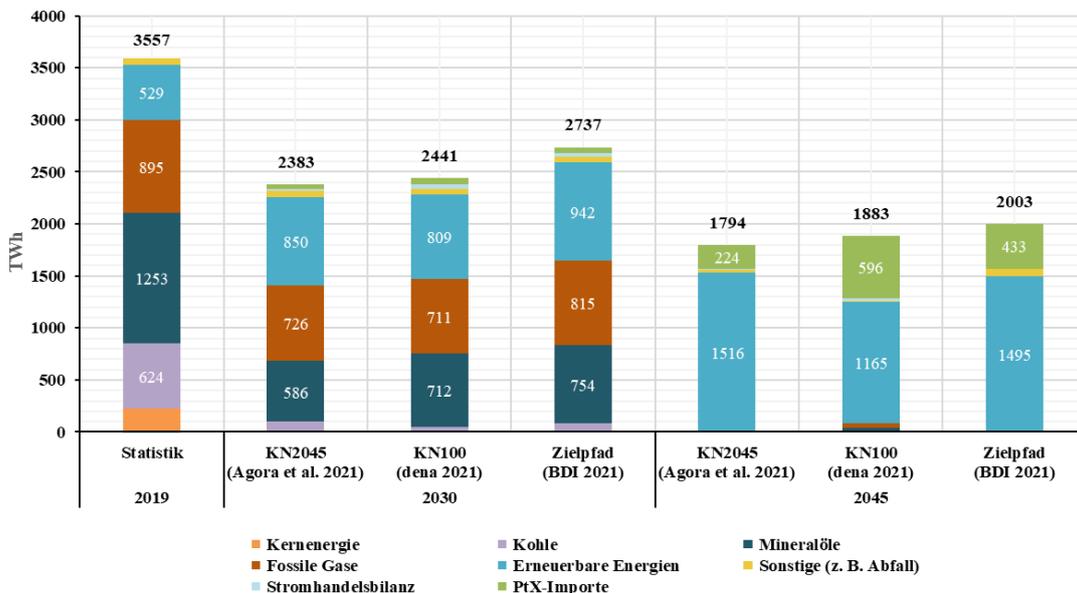


Abb. 5: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern. Zusammenfassung des Konsens unterschiedlicher Wissenschaftler:innen vor der Energiepreiskrise 2022/23: Halbierung des Primärenergieverbrauchs, Atom- und Kohleausstieg, Net Zero bis 2045. Abbildung nach Samadi (2022).

Zwar wurde aufgrund der Energiepreiskrise und infolge der vollständigen Abkoppelung von russischen fossilen Energieimporten in der politischen und öffentlichen Diskussion der Weiterbetrieb der letzten drei Kernkraftwerke gefordert und sogar von 41 % der befragten Bürger ein Neubau befürwortet (dieses sind vor allem Anhänger der CDU/CSU, der AfD und zum Teil der FDP³). Es liegen jedoch keinerlei technisch,

³ DER SPIEGEL, Panorama (2022, 5. August) – 41 Prozent der Deutschen wollen Neubau von Atomkraftwerken. Abgerufen am 2. Juni 2023, von www.spiegel.de/panorama/atom-umfrage-41-prozent-der-deutschen-wollen-neubau-von-kernkraftwerken-a-a44d8513-89b3-4243-aeb5-609edf2be9f6.

kaufmännisch oder wissenschaftlich fundierte Aktualisierungen von Klimaschutzszenarien bis 2045 oder alternative Analysen vor (Stand: Mai 2023), die längeren Laufzeiten oder gar den Neubau von AKWs begründen könnten (vgl. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V. (DIW), 2021)

Allenfalls werden die nach Abb. 5 bis zum Jahr 2030 für möglich gehaltenen Mengen an Erdgas heute anders beurteilt.

Es ist unwahrscheinlich, dass die anstehende Aktualisierung der Klimaszenarien aufgrund der Energiepreiskrise und der Versorgungsrisiken die genannten grundsätzlichen langfristigen Eckpunkte (Halbierung des Primärenergieverbrauchs, Ausstieg aus Kohle und Kernenergie, Dekarbonisierung bis 2045) in Frage stellen wird. Besonders der im März 2023 erfolgte Ausstieg aus der Kernenergie ermöglicht eine Strategie der Forcierung erneuerbarer Energien, auch wenn immer wieder versucht werden wird, diese Strategie als „deutschen Sonderweg“ in Frage zu stellen (Wille, 2023).

Es ist jedoch anzumerken, dass die deutsche Energiewende nach einem verzögerten, aber letztlich erfolgreichen Start der Stromwende ab jetzt bis zum angestrebten Ziel der Dekarbonisierung im Jahr 2045 in die weit anspruchsvollere Phase der Wärme- und Verkehrswende eintritt. Die tägliche Lebens- und Arbeitsrealität von Millionen von Bürger:innen, Reichen und Armen, Hausbesitzer:innen, Mieter:innen, Autofahrer:innen, Selbständigen, kleinen und mittleren Unternehmen etc. wird dadurch in Zukunft viel direkter betroffen sein als durch die Stromwende. Dieser nun bevorstehende sozialökologische Transformationsprozess bis 2045 kann nur in begrenztem Maße durch die „quantifizierte Zukunft“ technikbasierter Szenarien abgebildet werden. Eher wahrscheinlich ist, dass eine Suffizienz-Politik (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2024), die Berücksichtigung von Verteilungseffekten und Strategien der Kreislaufwirtschaft für die gesellschaftliche Akzeptanz und Kohärenz von zentraler Bedeutung sein werden. Dieses erfordert eine Politik, die verstärkt die Hemmnisse für die Erschließung kosteneffektiver Einsparpotentiale abbaut sowie Erneuerbare und Elektrifizierung forciert.

Aber auch die Fortführung der rein parteipolitisch motivierten Diskussion über die Kernenergie, wie sie in den Jahren 2022 und Anfang 2023 stattfand, könnte trotz des Ausstiegs weiter eine Rolle spielen. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung (im Rheinland bis 2030 und in der Lausitz derzeit bis 2038) steht noch aus. Zudem müssen noch kontroverse Fragen geklärt werden (German-Japanese Energy Transition Council (GJETC), 2023): Wie viele LNG-Terminals werden gebraucht? Wie viele Gaskraftwerke werden benötigt? Können diese auf Wasserstoff umgerüstet werden? Sind dies verlässliche Brücken der Versorgungssicherheit auf dem Weg zu einem vollständig erneuerbaren Stromsystem? Ist die derzeitige Planung bis 2035 ausreichend? Insbesondere im europäischen und internationalen Kontext (z. B. in Frankreich, in einigen ost- und nordeuropäischen Ländern, in Japan, den USA und China) wird die Kernenergie vor dem Hintergrund dieser Fragen in absehbarer Zukunft weiter propagiert werden. Befürworter der Kernenergie könnten Auftrieb bekommen, falls die deutsche Strategie einer Dekarbonisierung bis 2045 bei gleichzeitigem Kernenergie- und Kohleausstieg ins Stocken gerät und seine ökonomische und soziale Vorteilhaftigkeit nicht zweifelsfrei demonstriert, werden kann. Eine gründliche Analyse, ob die

Kernenergie für den Klimaschutz eine notwendige oder kontraproduktive Rolle spielt, bleibt daher auf der Tagesordnung.

Innovations- und Investitionshemmnisse durch Kernenergie

Das hier vertretene Argument lautet: Kernenergie wird zukünftig in der globalen Energiewende und sozial-ökologischen Transformation zunehmend zum Innovations- und Investitionshemmnis. Im Kontext einer langfristigen, systemischen Perspektive werden diese transformativen Hemmnisse noch ausgeprägter hervortreten als sie in den bisherigen rückblickenden Analysen aufgezeigt werden konnten. Wir bezeichnen dies als die Transformationsresistenz der Kernenergie und erläutern die Gründe anhand von drei zentralen Wirkmechanismen und Fallstudien aus Frankreich und Japan sowie dem Sonderfall Ukraine.

Das Wechselverhältnis zwischen sozialen Bewegungen (Anti-AKW), wissenschaftlicher Politikberatung und staatlichen Leitzielen ist für alle der folgenden Wirkmechanismen von erheblicher Bedeutung. Einerseits kann eine langfristige klimapolitische Zielsetzung für einen Dekarbonisierungspfad ohne Kernenergie Ausdruck einer mehrheitsfähigen sozialen (Anti-AKW-) Bewegung und einer wissenschaftlich fundierten Szenarioanalyse sein. Diese Konstellation ist gesellschaftlich günstig, da sie eine vollständige Konzentration von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft auf risikoärmere Dekarbonisierungs-Alternativen zur Kernkraft ermöglicht. Andererseits muss realistischerweise davon ausgegangen werden, dass auch in Zukunft Phasen intensivierter Kontroversen über die Kernenergie auftreten werden. Wir vermuten für Deutschland einen erheblichen Einfluss der sozialen Bewegungen gegen Kernenergie und für Solarenergie sowie für Nachhaltigkeitspolitik auf die energiepolitischen Leitziele und die wissenschaftliche Klimapolitikberatung. Zutreffender sollte von einem Wechselverhältnis gesprochen werden, weil z. B. die wissenschaftliche Politikberatung zur Kernenergie noch 1980 extrem kontrovers war und sich erst nach der Jahrhundertwende der oben beschriebene Konsens herausgebildet hat (vgl. hierzu Hennicke et al., 2011).

Wenn Länder wie Frankreich, Japan oder die Ukraine langfristig (bis 2050) an ihrer energie- und klimapolitischen Ausrichtung auf die Kernenergie festhalten, bleibt das latente gesellschaftliche Konfliktpotential bestehen, das mit jedem gefährlichen Zwischenfall oder durch Negativschlagzeilen wieder offen zu Tage treten wird. Dies sendet diffuse Signale in Bezug auf Forschungs- und Investitionsalternativen aus und erschwert es Wissenschaft und Wirtschaft, ihre Mittel und Personal effektiv auf risikoärmere Alternativen zur Dekarbonisierung zu konzentrieren.

Hemmnis 1 – Wachsende Unwirtschaftlichkeit

Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Kernenergie und erneuerbaren Energien ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, die hier nicht nochmals detailliert aufge-

griffen werden sollen. In Wealer et al. (2021) finden sich die entsprechende Bandbreite der Literatur und aktuelle Wirtschaftlichkeitsvergleiche. Die Autor:innen kommen zu dem Schluss, dass die kommerzielle Kernenergieerzeugung seit ihrem Beginn in den 1950er Jahren stets teurer war als andere Technologien, und dass Kernkraftwerke selbst im laufenden Betrieb zunehmend kostenseitig anderen Energieträgern unterlegen sind (Wealer et al. (2021), S. 11). Dem liegt eine betriebswirtschaftliche Gesamtkostenanalyse (als levelized cost of energy, LCOE) ohne Berücksichtigung externer Kosten) zugrunde, wobei Strom aus Braunkohle (für die 1950er Jahre) und Strom aus variabler Photovoltaik (PV), Wind sowie Speicher- und Netzintegrationskosten (für Versorgungssicherheit) als Referenz für den Kostenvergleich herangezogen wurden.

Im Hinblick auf die Transformationsresistenz liefert dieser, auf einen konkreten Zeitpunkt bezogene Kostenvergleich jedoch nur einen Teil des Gesamtbildes. Symbiotische Energiepolitik und Lobbyarbeit der Atomindustrie könnten eine dauerhafte Subventionierung aus Gründen der angeblichen Versorgungssicherheit oder mit Verweis auf die scheinbar sichere Verfügbarkeit von Grundlaststrom fordern und möglicherweise vorübergehend durchsetzen. Dabei werden allerdings fundamentale fortschreitende Entwicklungen der wachsenden relativen Unwirtschaftlichkeit der Kernenergie ignoriert:

- (1) Die Kostendifferenz zwischen den steigenden Kosten für die Stromerzeugung aus Kernenergie und den sinkenden Kosten für Schlüsseltechnologien im Bereich der Erneuerbaren wird sich aller Voraussicht nach weiter vergrößern (vgl. Wealer et al., 2021). Die prinzipielle Dezentralität, die Vorteile einer seriellen Massenfertigung, der risikoarme Betrieb, die nahezu universelle Standorteignung und die breitere gesellschaftliche Akzeptanz ermöglichen weitere Kostensenkungen und dauerhafte Lerneffekte bei Technologiekomponenten zur Stromerzeugung mit PV und Wind, über die Kernkraftwerke nicht verfügen. Daher kann als gesichert gelten, dass die schon bisher wachsenden Kostenunterschiede zwischen teurem Atomstrom und kostengünstigerem erneuerbarem Strom zukünftig nicht durch Skaleneffekte oder modulare Massenproduktion in der Atomindustrie abgebaut werden können. Dies bezieht sich explizit auch auf neue Konzepte: Zu Fragen des geringen Entwicklungsstatus der kommerziellen Nutzung und der erwarteten mangelnden Wirtschaftlichkeit von sogenannten „Small Modular Reactors“ (SMR) vgl. auch Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) (2021). Zur Frage der Wirtschaftlichkeit vgl. auch Steigerwald et al. (2023).
- (2) Der prominenteste Zukunftstrend in allen Klimaschutzszenarien mit ambitionierter Zielsetzung ist die relativ frühe Dekarbonisierung des Stromsektors und die Elektrifizierung aller Energiesystemsektoren durch sogenannte saubere Stromquellen. In offiziellen Szenarien wird Atomstrom häufig irreführend unter „sauber“ subsummiert, obwohl er dies bei systemischer Betrachtung nicht ist (vgl. z. B. Wiatros-Motyka et al., 2023, S. 40). Die Frage, ob eine Koexistenz oder ein gegenseitiges Verdrängen von Atomstrom und Strom aus erneuerbaren Energieträgern vorherrschen wird, ist daher für die Dekarbonisierung des gesamten Energiesystems, einschließlich des Verkehr- und Gebäudesektors, von zentraler Bedeutung. Der in allen Klimaschutzszenarien unterstellte steigende Anteil erneuerbarer

fluktuierender Stromerzeugung aus PV und Wind, gepaart mit Flexibilitätsoptionen zur Sicherung der Versorgungssicherheit, macht die grundlastorientierte Energieversorgung durch AKW zunehmend obsolet. Die stark schwankende Residuallast, die derzeit noch von den konventionellen Kraftwerken gedeckt werden muss, kann durch Flexibilitätsoptionen zur Sicherung der Versorgungssicherheit abgesichert werden, sofern der Strom aus PV und Wind sinnvollerweise vorrangig in das Netz eingespeist wird. Mit steigendem Anteil der erneuerbaren Energien wird diese Residuallast immer geringer mit Tendenz zu Null. Dadurch sinkt die Stromerzeugung aus fossilen und nuklearen Kraftwerken, was sie wiederum wirtschaftlich zunehmend unattraktiv macht (Klafka et al., 2024) und schon heute zur Drosselung von AKWs bei niedrigem Strompreis an der Börse führt

- (3) Die Transformationsresistenz der Kernenergie ergibt sich demnach aus der wirtschaftlichen Logik der Betreiber von Kernkraftwerken, die vor dem Hintergrund dieser für sie negativen Entwicklungen einen starken ökonomischen Anreiz haben, mithilfe der Politik den beschriebenen Trend sinkender Notwendigkeit von Grundlasterzeugung aufzuhalten und somit die für den Klimaschutz notwendige Beschleunigung der Markteinführung von erneuerbarer Stromerzeugung oder proaktiven Stromsparprogrammen zu bremsen.

Eine technisch mögliche Alternative stellt die Abregelung von PV- und Windanlagen in Überschusssituationen dar, was jedoch ihre Wirtschaftlichkeit vermindert und zu höheren Kosten für die Allgemeinheit führt; diese indirekte Vorrangregelung und Subventionierung für Atomstrom (siehe unten das Beispiel Japan) ist dann eine direkte negative Wirkung des Weiterbetriebs oder Ausbaus der Kernkraftwerke auf den Ausbau der erneuerbaren Energien.

Hemmnis 2 – Extreme Zeitskalen der Kapitalbindung

Bei Kernenergiebefürwortern wird zumeist nicht erwähnt, dass die Entscheidung für den Neubau eines AKW der heutigen Generation eine Bindung von Kapital, öffentlichen Ressourcen, unternehmerischer und politischer Aufmerksamkeit sowie von Arbeitskraft für viele Jahrzehnte bedeutet. Das ist jedoch hoch problematisch in Hinblick auf die Erreichung der Klimaneutralität bzw. den Ausbau Erneuerbarer Energie, da beeindruckende finanzielle und personellen Ressourcen für einen langen Zeitraum gebunden und nicht anderweitig eingesetzt werden können. Hierbei müssen die Zeitspannen für den Bau (durchschnittlich 7,3 Jahre), den Betrieb (40 Jahre) und den Rückbau (10 bis 15 Jahre) addiert werden (WNIRS, 2022, WNIRS, 2023). Hinzu kommt die Abklingzeit (5 Jahre) für hochradioaktive Brennelemente in Standort-Zwischenlagern und deren jahrzehnte- oder möglicherweise jahrhundertelanger Betrieb, bis ein Endlager gefunden und errichtet ist⁴. Obwohl bislang in Deutschland davon

⁴Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Endlagerung schreibt zu Frankreich: „In Frankreich werden abgebrannte Brennelemente wiederaufbereitet, d.h. Uran und Plutonium werden abgetrennt und zu neuen sog. Mischoxid- (MOX) Brennelementen verarbeitet. Daher sind abgebrannte Brennelemente derzeit nicht zur

ausgegangen wurde, dass bis 2031 der Standort eines Endlagers feststeht und ab 2050 die Inbetriebnahme erfolgen kann, wird sich dieser Zeitpunkt nach neueren Bewertungen und Analysen wahrscheinlich erheblich weiter in die Zukunft verschieben (Präger et al., 2023; ZDF, 2022)).

Der risikoreiche und jahrzehntelange Rückbau eines Atomkraftwerks und die Depositionierung seines radioaktiven Abfalls bindet Kapital und Arbeitskraft zu einer Zeit in der das Kraftwerk keinen Ertrag mehr erwirtschaftet und schafft so ein latentes Konfliktpotential, das in der Industriegeschichte bisher keiner anderen Branche zugestanden wurde. Von den weltweit 204 stillgelegten Atomreaktoren wurden bis 2022 nur 10 „bis zur grünen Wiese“ zurückgebaut. In lediglich drei Ländern wurden 22 AKWs technisch vollständig zurückgebaut, davon 17 in den USA, 4 in Deutschland und 1 in Japan. In führenden Nuklearländern wie dem Vereinigten Königreich, Frankreich, Russland und Kanada wurde noch kein Reaktor vollständig zurückgebaut (Schneider et al., 2022, S. 25). Finnland ist weltweit das einzige Land, dessen geplantes Endlager 2023 in den Probetrieb übergehen soll und dass nach wie vor an der Atomenergie und folglich an einer weiterwachsenden radioaktiven Müllmenge festhält. Für Deutschland lässt sich jedoch feststellen, dass erst die Abschaltung aller AKWs und damit auch eine feststehende Menge an hochaktivem Abfall (27 000 m³) konsensuale Perspektiven für die Endlagersuche eröffnet hat (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V. (DIW), 2021, S. 767–774).

Mit Blick auf die transformative Resistenz des nuklearen Subsystems ist festzuhalten: Wer heute ein Kernkraftwerk neu bauen möchte, bindet privates Kapital, öffentliche Ressourcen sowie energiepolitische Aufmerksamkeit und Verantwortung für mehr als ein Jahrhundert. Gegenüber dem Bau, Betrieb und Rückbau (inkl. vollständigem Recycling) eines Windkraftwerks bedeutet dies eine Festlegung politischer und wirtschaftlicher Prioritäten über extrem lange Zeitskalen. Dass damit erhebliche Planungs- und Finanzierungsrisiken einhergehen, wird auch von der World Nuclear Association (WNA) konzediert (2023). Dadurch wird wahrscheinlicher, dass es an finanziellen und personellen Ressourcen fehlt, um gleichzeitig den Ausbau von erneuerbaren Energien und die Durchführung von Stromsparprogrammen mit größtem Nachdruck voranzubringen.

Hemmnis 3 – Unlösbare Akzeptanzprobleme einer Risikotechnologie

Kritiker und Befürworter der Kernenergie dürften in einem Punkt übereinstimmen: Keine Energietechnologie hat in der Geschichte der kommerziellen Energiewirtschaft so viele Kontroversen ausgelöst wie das Atomstromsystem. Sämtliche Systembausteine, wie die Gewinnung und Aufbereitung von Kernbrennstoffen, der Bau und

Endlagerung vorgesehen. Die bei der Wiederaufbereitung entstehenden Abfälle, z.B. wärmeentwickelnde Spaltprodukte, werden in sogenannten Kokillen verglast. Sie werden als hochradioaktive Abfälle für eine spätere Endlagerung zwischengelagert.“ (Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), 2023). Die Wiederaufbereitung zu MOX-Brennelementen verlängert daher die Zeitskala der Zwischenlagerung, statt sie zu verkürzen.

Betrieb von Anlagen des Nuklearsystems sowie die Endlagerung, insbesondere von hochaktivem Atommüll, sind mit Konfliktpotentialen verbunden, die sich gegenseitig verstärken. Obwohl es erhebliche Unterschiede in der Bewertung und Akzeptanz der Risikotechnologie Kernenergie in einzelnen Ländern gibt, ist unstrittig: Die Atomenergie war der Auslöser für die weltweite Risikoforschung (vgl. Bechmann, 1997) und für kontrovers diskutierte Innovationen, Investitionen und Debatten zur gesellschaftlichen Konsensfindung. Insofern besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass auch in Zukunft das immanente Konfliktpotential des Atomstromsystems bestehen bleibt und eine Konsensfindung für einen beschleunigten Ausbau weniger risikobehafteter Dekarbonisierungs-Alternativen erschwert wird.

Kann es jemals akzeptabel werden, dass scheinbar geringe Restrisiko eines Super-GAUs in Kauf zu nehmen, wenn im Falle eines solchen Ereignisses potenziell tausende von Menschenleben, die langfristige Zerstörung von existentiellen Lebensgrundlagen und wirtschaftliche Verluste in nicht abschätzbarer Milliardenhöhe drohen (vgl. z. B. Masuhr et al., 1992; Jakat, 2011)? Die Kontroversen über diese Grundsatzfrage haben bereits erhebliche gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Ressourcen gebunden und werden dies in einigen Ländern und auf globaler Ebene auch in Zukunft weiter tun, solange keine klare Perspektive zur Beendigung der Kernenergienutzung besteht. Solange an der Kernenergie festgehalten wird, bleibt dieses die energiepolitische Konsensfindung massiv hemmende Konfliktpotential erhalten. Auch wenn kleinere Reaktoren (*small modular reactors*, SMRs) in großer Anzahl jemals eingesetzt werden könnten, bliebe die Risikobewertung der zentrale gesellschaftliche Dissens (vgl. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), 2021)

Deutschland bietet vielfältige Beispiele für die Kontexte, die Bandbreite und die politischen Versuche zur Herstellung von Akzeptanz für Kernenergie: Im Februar 2011, also einen Monat vor dem Beginn der Katastrophe von Fukushima am 11. März 2011, waren in Deutschland bei einer TNS-Infratest-Befragung 40 % „voll und ganz“, sowie 36 % „eher“ gegen den Gebrauch von Atomenergie.⁵ Nach der Katastrophe von Fukushima war die Zustimmung zur Kernenergie bis etwa 2019 minimal und stieg erst 2019 wieder leicht an⁶. Der damalige Umweltminister einer schwarz-gelben Koalition, Norbert Röttgen (CDU), hatte bereits 2009 auf die Frage des Handelsblattes nach der Rolle der Kernenergie für den Klimaschutz geantwortet: „*Der beste Weg, sicher, sauber und unabhängig Energie zu erzeugen, ist der konsequente Ausbau der erneuerbaren Energien. Kernenergie hat daher eine Brückenfunktion. Denn Kernenergie braucht gesellschaftliche Akzeptanz, die sie in Deutschland auch nach 40 Jahren nicht erreicht hat.*“ (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2009). Entsprechend ist der Anteil des Atomstroms an der deutschen Stromerzeugung vom Höchststand im Jahr

⁵ Europäische Kommission. (1. Mai, 2011). Inwieweit sind Sie für oder gegen den Gebrauch von Atomenergie in Deutschland? [Graph]. In *Statista*. Zugriff am 06. September 2023, von de.statista.com/statistik/daten/studie/196207/umfrage/meinung-zum-gebrauch-von-atomenergie-in-deutschland/

⁶ AtomkraftwerkePlag. (2023, 24. März) – *Meinungsumfragen zur Atomkraft*. Abgerufen am 2. Juni 2023, von atomkraftwerkeplag.fandom.com/de/wiki/Meinungsumfragen_zur_Atomkraft

2004 mit 32,1 %) bis 2020 bereits auf 11,3 % und dann zum 16. April 2023 auf null gesunken.

Vor dem Hintergrund des russischen Aggressionskriegs, der daraus resultierenden Energiepreiskrise und nach einer vor allem im politischen Raum geführte Debatte, hielten jedoch im April 2023 „59 % der Befragten [...] dem Deutschland-Trend für das ARD-Morgenmagazin zufolge die Abschaltung der AKWs für falsch“ (NDR, 2023). Dieser aktuelle Vorfall zeigt auf, wie eine politisch konstruierte Kontroverse um einen von Betreibern und Wirtschaft längst akzeptierten Ausstiegsbeschluss, politische und gesellschaftliche Ressourcen für die Lösung der eigentlich anstehenden dringenden Probleme, wie die Verkehrs- und Gebäudewende, absorbiert. In Deutschland besteht nun die Chance, nach der Abschaltung der letzten AKWs und – so ist zu hoffen – nach Beendigung des ständigen Streitthemas Kernenergie, alle Kräfte von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft auf die Lösung realer und zentraler Probleme einer sozial-ökologischen Transformation als Gemeinschaftswerk zu konzentrieren.

Frankreich, Japan und die Ukraine haben diesen Richtungswechsel noch vor sich und es bleibt offen, ob, wann und wie diese energie- und klimapolitische Zeitenwende dort gelingen wird.

Fallbeispiele

Nukleare und erneuerbare Energie – nur eine scheinbare Koexistenz

Eine scheinbar differenziertere Argumentation lautet: Zwar habe sich die frühere Hoffnung auf einen fortwährenden und vorrangigen Aufschwung der Atomenergie (zu billig um sie abzurechnen, *too cheap to meter*) nicht erfüllt. Aber die Dringlichkeit der beschleunigten Dekarbonisierung mache es notwendig, technologieoffen alle Optionen – eben auch die Kernenergie – parallel zu erneuerbaren Energien forciert auszubauen. Besonders in Japan, aber auch in Frankreich wird diese Argumentation vorgebracht. Daher wählen wir diese Fallbeispiele für eine nähere Analyse.

Eine methodische Herausforderung kritischer Analysen des Atomstromsystems ist die Tatsache, dass einerseits globale systemische Transformationshemmnisse und andererseits verstärkende oder entlastende nationale Besonderheiten berücksichtigt werden müssen. Für Letzteres wäre ein Kriterien-basierter internationaler Vergleich repräsentativer Fallbeispiele notwendig, der in diesem Papier nicht möglich ist. Um die Untersuchungsrichtung eines solchen Vergleichs ansatzweise zu illustrieren, werden nachfolgend die Fallbeispiele Frankreich und Japan jeweils auf ihre nationalen Besonderheiten hin diskutiert. Beide Fälle zeigen konkret, dass die in beiden Ländern regierungsseitig unterstellte „Koexistenz von nuklear und erneuerbar“ eine politisch propagierte Fiktion ist, die der Überprüfung nicht standhält.

Frankreichs Atomkraft-Paradox

Die nachfolgende Fokussierung auf die zivile Atomenergienutzung in Frankreich und die Analyse von energiebezogenen Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekten, die eine Dekarbonisierung des Energiesystems erschweren, ist nur bedingt möglich. Sie basiert auf der durchaus diskussionswürdigen Annahme, dass die zivile und militärische Atomstrategie Frankreichs getrennt untersucht, werden können. Präsident Macron selbst hat dies in Frage gestellt: „*Ohne zivile Atomenergie gibt es keine militärische Nutzung der Technologie – und ohne die militärische Nutzung gibt es auch keine zivile Atomenergie.*“⁷. Diese Einschätzung wirft allerdings die grundsätzliche Frage auf, ob und inwieweit eine gleichzeitige militärische und zivile Nutzung der Atomenergie ein prinzipiell unüberwindbares, gesellschaftliches Hemmnis für eine sozial-ökologische Transformation darstellt.

Da diese komplexe Fragestellung – bei jeweils unterschiedlichen Organisationsformen – alle Länder mit militärischer und ziviler Atomnutzung betrifft, übersteigt sie bei weitem die Zielsetzung dieses Papiers. Wir beschränken uns daher auf die Diskussion zentraler Gründe, warum gerade das französische Atomenergiesystem eine Dekarbonisierungs-Strategie auf der Basis von „Kernenergie plus Erneuerbare“ besonders erschwert.

Historisches Erbe und politische Ambiguität

Nicht zuletzt wegen der engen Verbindung zwischen militärischer und ziviler Nutzung war und ist die französische Atomindustrie eng mit der Regierung verflochten. Ihre führenden Akteure werden durch eine kleine technokratische Elite (dem *Corps d'E'tat*) koordiniert, insbesondere durch den Einfluss des *Corps des Mines* in der Regierung, die bereits 1945 gegründete Atomenergiekommission (CEA) (Hecht, 2009, S. 2), sowie des *Corps des Ponts* im Unternehmensapparat des heute voll verstaatlichten Energieversorgers *Electricité de France* (EDF) (Grubler, 2010, S. 5175). Diese begrenzte Anzahl institutioneller Akteure und die breite Akzeptanz der zivil-militärischen Doktrin verhalfen Frankreich zur nahezu konsensualen Umsetzung seines großangelegten und komplexen Atomprogramms und zur unangefochtenen Mobilisierung exorbitanter finanzieller Ressourcen für den Bau der heutigen Kraftwerksflotte.

Die Entwicklung der zivilen Nutzung der Atomenergie begann 1948 mit dem Reaktor ZOE (EL-1) mit einer Leistung von 150 kW. 1958 wurde in die Wiederaufbereitungsanlage UP1 in Marcoule investiert, um Plutonium zurückzugewinnen. Dennoch wurde die MOX-Technologie (Mixed Oxide) erst in den 1980er Jahren in AKWs eingeführt. Die ersten acht in Frankreich gebauten Kernreaktoren waren gasgekühlte Reaktoren (GCR), die Natururan als Brennstoff verwendeten. Außerdem gab es einen gasgekühlten Schwerwasserreaktor EL-4 (Monts D'ARREE), zwei schnelle Brutreaktoren (FBR) – PHENIX und SUPER-PHENIX – und einen Druckwasserreaktor (PWR)

⁷ Zitat aus Macrons Rede über die Zukunft der Kernenergie in Le Creusot im Dezember 2020, siehe www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-16825-fr.pdf [19.07.2023, eigene Übersetzung].

CHOOZ-A. Die heutige Atomflotte in Frankreich wurde in drei Hauptphasen errichtet: CP0, CP1 und CP2 wurden zwischen 1971 und 1982 gebaut, P4 und P4 zwischen 1977 und 1986 und die N4-Reaktorserie zwischen 1984 und 1993 (Stuart, 2017, S. 32).

Diese industriell-politische Konfiguration wurde im Laufe der Zeit gefestigt und CEA, EDF sowie Atomkonzern Areva, dessen Geschäft mit Kernreaktoren und Dienstleistungen aufgrund erheblicher finanzieller Verluste in das staatlich kontrollierte Unternehmen Framatome ausgegliedert wurde, während Areva selbst zu Orano wurde und sich auf den Bereich des Kernbrennstoffkreislaufs konzentriert, agieren quasi als Staat im Staate („*etat dans un etat*“, siehe Stuart, 2017, S. 33; Hecht, 2009, S. 3); ihr Einfluss auf die generelle Energiepolitik des Landes ist demnach enorm. Frankreichs Atomenergiesystem verbindet staatliche Behörden, private Unternehmen, Reaktoren, Labore, Uranminen, Universitätslehrpläne, Fabriken und große Teile des Stromverteilungsnetzes (Hecht, 2009). Und zweifellos erfreute sich die enge Symbiose aus militärischer und ziviler Nutzung der Atomenergie in Frankreich lange Zeit einer breiten politischen und gesellschaftlichen Unterstützung.

Heute steht die französische Energie- und Klimapolitik angesichts des anstehenden Erneuerungsbedarfs des AKW-Parks an einem fundamentalen Scheideweg und vor einer grundsätzlichen Richtungsentscheidung. Die französische Reaktorflotte ist mit durchschnittlich fast 40 Jahren am Jahresende 2023 veraltet und weist kostspielige und teilweise sicherheitsgefährdende Mängel auf.⁸

Hohe versteckte Kosten, lange AKW-Laufzeiten und eine komplexe nukleare Infrastruktur haben bereits jetzt zu gravierenden Lock-in-Effekten geführt. Dennoch hat Präsident Macron mit seiner kürzlichen Entscheidung für ein neues Atomprogramm die Chancen einer derzeit noch möglichen Strategie eines mittelfristigen Ausstiegs aus der Kernkraft nicht genutzt. Ein transformativer Richtungswechsel des französischen Energiesystems und der forcierte Einstieg in eine risikoarme und nachhaltige Strategie zur Dekarbonisierung, die auf den drei Säulen Effizienz, Suffizienz und Konsistenz aufbaut, sind daher derzeit nicht in Sicht. Wie im Folgenden gezeigt wird, sind damit massive Risiken und wirtschaftliche Probleme verbunden.

Importabhängigkeit, Opportunitätskosten, Fehlallokationen

Die wirtschaftliche Abhängigkeit Frankreichs von der Atomenergie ist ein vielschichtiges Thema, das sowohl die direkten Kosten der Atomenergieerzeugung als auch die

⁸ Die französische Behörde für nukleare Sicherheit (ASN) informierte z.B. im März 2023 über einen besonders großen Riss an einer Leitung des Sicherheitseinspritzsystems in Reaktor Penly 1, der durch das Phänomen der Spannungskorrosion (SCC) verursacht wurde, von dem ein Teil der Reaktorflotte betroffen ist. Nach Aufforderung durch ASN hatte dies für die EDF erneut eine Strategieanpassung durch ein zusätzliches Inspektionsprogramm für reparierte Schweißnähte zur Folge (siehe www.french-nuclear-safety.fr/asn-informs/news-releases/stress-corrosion-penly-nuclear-power-plant). Zusätzlich wurden Betriebsmaßnahmen an Reaktor 1 im Kraftwerk Nogent-sur-Seine und Reaktor 2 im Kraftwerk Cruas angekündigt, woraufhin EDF seine Produktionsprognosen für 2023 auf 300 TWh bis 330 TWh drosselte (siehe sfenenglish.org/scc/).

indirekten gesellschaftlichen Kosten und Risiken umfasst. Es ist dabei nicht immer leicht, zwischen regierungsoffizieller Darstellung und Realität zu unterscheiden. Die Hoffnung auf ökonomische Vorteile und nationale Versorgungssicherheit durch eine scheinbar attraktive nukleare Strombasis und Exportchancen für Atomstrom mögen – neben der militärischen Option – anfänglich zur nuklearen Dominanz und den beschleunigten Ausbau des Atomsystems beigetragen haben. Allerdings lassen sich Fragen nach Effektivität, ökonomischer Rationalität und Energieunabhängigkeit für Frankreich (auch als zeitweiligen Großexporteur von Atomstrom) weder für die Vergangenheit und noch weniger für die Zukunft positiv beantworten.

Anders als häufig vermutet wird, ist Frankreich zum Beispiel im hohen Maße von fossilen Brennstoffimporten zur Deckung des nationalen Energiebedarfs abhängig (vgl. Abb. 6). Frankreich hat in Europa nach Deutschland und vor Italien den zweithöchsten Verbrauch an Erdöl und den dritthöchsten Verbrauch an Erdgas (Eurostat, 2023). Im Jahr 2021 war Erdöl das zweitwichtigste Importprodukt in Frankreich (23,1 Mrd. US-\$₂₀₂₁), dicht gefolgt von Erdgas (22,5 Mrd. US-\$₂₀₂₁) (Simoes & Hidalgo, 2023).

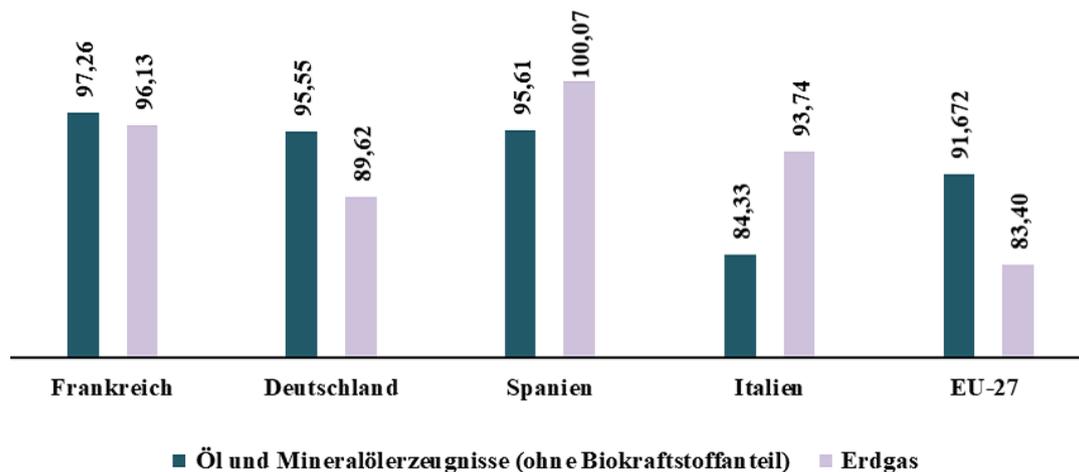


Abb. 6: Abhängigkeit von fossilen Energieimporten 2021 in % Daten nach Eurostat (2023).

Für den Export und die industrielle Wettbewerbsfähigkeit spielt Atomstrom demgegenüber eine untergeordnete Rolle. Insgesamt importierte Frankreich 2021 mineralische Erzeugnisse im Wert von 72,8 Mrd. US-\$₂₀₂₁ und exportierte Güter derselben Kategorie im Wert von 22,5 Mrd. US-\$₂₀₂₁, darunter 37,7 % Strom, was als einmaliger Aufschwung zu bewerten ist, denn in den Vorjahren nahmen fossile Exporte, v. a. Öl, mit deutlich höheren Marktanteilen eine dominantere Rolle ein. In 2022 wurde Frankreich wie dargestellt zum Nettoimporteur von Strom (Simoes & Hidalgo, 2023). Im Jahr 2022 wurde Frankreich aufgrund der zahlreichen Reaktor-Stillstände vom Strom-Nettoexporteur zum Nettoimporteur (16,4 TWh), um seinen Energiebedarf decken zu können.⁹

⁹ Für die Daten zum grenzüberschreitenden Stromhandel zwischen Deutschland und seinen Nachbarländern seit 2015 vgl. energy-charts.info/charts/import_export/chart.htm?l=de&c=DE&flow=scheduled_commercial_exchanges_de&year=2023&interval=month&month=04.

Seitdem Frankreich seinen Uranabbau im Mai 2001 eingestellt hat, werden alle primären nuklearen Ressourcen importiert (Schneider, 2010, S. 235). Im Jahr 2022 importierte Frankreich Uran- und Thorium-Erz im Wert von 282 Mio. US-\$₂₀₂₁ und wurde damit zum größten Importeur von Uran- und Thorium-Erz weltweit (Simoes & Hidalgo, 2023). Die Herkunftsländer der Importe waren 2022 vor allem Namibia (148 Mio. US-\$₂₀₂₁; 52,2 %) und der Niger (135 Mio. US-\$₂₀₂₁; 47,7 %).

Die Atomvision der französischen Energiepolitik, in der das französische Atomprogramm als Beispiel für die Skalierbarkeit einer Fortschrittstechnologie dargestellt wird, entpuppte sich weder als bedeutende noch als kosteneffiziente Option zur Deckung des erwarteten Mehrbedarfs an Energie (Münzinger, 1957, S. 206): Der erhoffte nuklearbasierte wirtschaftliche Fortschritt, z. B. durch kommerzialisierte Kernfusion, Plutoniumwirtschaft, nukleare Exportwirtschaft, zivilen Nuklearantrieb (Münzinger, 1957, S. 136f, S. 188f, S. 208; Barnert et al., 1984) oder nukleare Fernwärmeversorgung in Städten (Barnert et al., 1984, Rummich, 1978) fand nicht statt.

Wie eine aktuelle Kostenanalyse von Lazard (2023, Abb. 7) für die Energiekosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien zeigt, sind die Gestehungskosten für Atomenergie seit 2009 kontinuierlich um insgesamt 47 % gestiegen, während es einen signifikanten Kostenrückgang für erneuerbare Energieerzeugungstechnologien gab (63 % Rückgang für Onshore-Wind und 83 % für Solar-PV-Anlagen) gab, der unter anderem auf sinkende Kapitalkosten, verbesserte Technologien und verstärkten Wettbewerb zurückzuführen ist (Lazard, 2023). Nichts spricht dafür, dass sich diese Trends in Zukunft umkehren (vgl. WNISR, 2022).

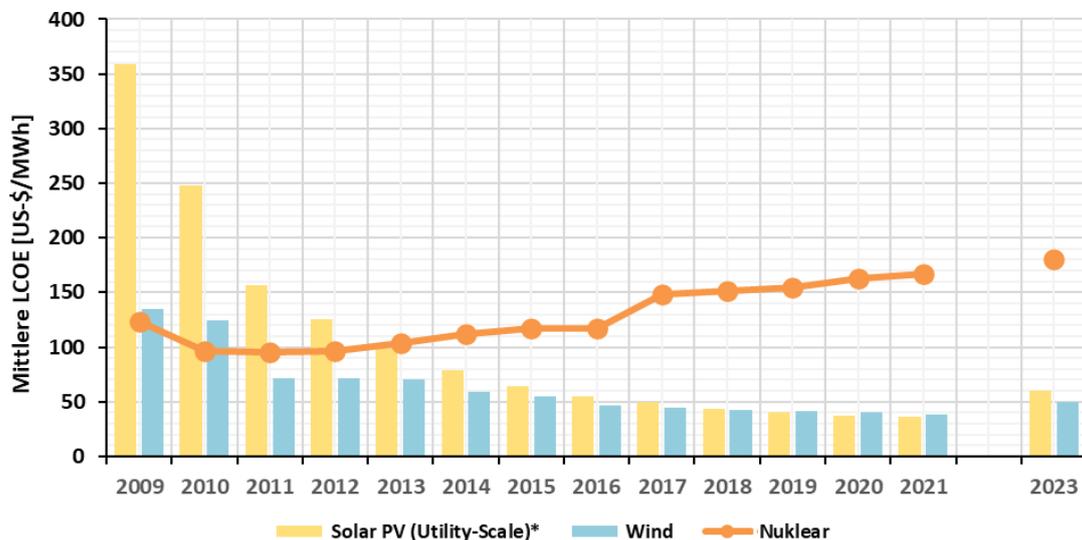


Abb. 7: Historischer Vergleich der Stromgestehungskosten im Versorgungsmaßstab anhand ausgewählter LCOE-Werte. Daten nach Lazard (2023, S. 9). Werte sind der Durchschnitt der höchsten und niedrigsten LCOE für jede Technologie in jedem Jahr seit Lazards LCOE-Version 3.0. von 2009. Stromgestehungskosten sind die Gesamtkosten für den Bau und Betrieb eines Kraftwerks über seine Lebensdauer, geteilt durch die gesamte Stromerzeugung, die in diesem Zeitraum aus dem Kraftwerk abgerufen wird.

* frühere Versionen der LCOE-Analyse unterteilten die PV-Versorgungsanlagen in Dünnschicht- und kristalline Module. Alle Werte vor 2023 beziehen sich auf kristalline Solar PV-Module (Lazard, 2023, S. 9).

Dennoch hat die französische Regierung bei ihrem mit 74 % Zustimmung¹⁰ beschlossenen Gesetz zur umfangreichen Renaissance der französischen Atomindustrie diese für die Atomenergie höchst prekäre Wettbewerbslage bisher ignoriert.¹¹ Bis 2050 sollen 6 bis 14 European Pressurized Water Reactors (EPRs) der zweiten Generation sowie einige kleine modulare Reaktoren gebaut werden. Die Kosten für den ersten Teil des Programms zum Bau der sechs ersten Blöcke werden optimistisch auf 50 bis 55 Mrd. €₂₀₂₂ geschätzt (Société française d'énergie nucléaire (Sfen), 2022, S.1). Dann sind die heute existierenden Reaktoren im Mittel 65 Jahre alt und deutlich jenseits ihrer ursprünglich vorgesehenen Lebensdauer.

Der sogenannte Charpin-Pellat-Dessus-Bericht aus dem Jahr 2000, nach eigenen Angaben die erste unabhängige Analyse der Kosten der Kernenergie in Frankreich, verwies auf Unwägbarkeiten in Bezug auf die Entwicklung der Stromnachfrage, Brennstoffpreise, Diskontierung, Kosten für die Plutoniumverwaltung und den Kohlenstoffpreis (Charpin et al., 2000, Lehtonen, 2022). Dennoch bekräftigte auch die sozialistisch-grüne Regierung von Lionel Jospin im Januar 1999 ihre Unterstützung für die Kernenergie (Lehtonen, 2022). Das als sichere und wettbewerbsfähige Lösung für den Fortbestand der Atomindustrie angepriesene EPR-Konzepte führte jedoch mit zahlreichen Bauverzögerungen, Kostenüberschreitungen und technischen Herausforderungen zu erheblichen finanziellen Verlusten (Stuart, 2017). Beispielsweise haben sich die offiziellen Kosten für den seit 2007 laufenden Bau des französischen EPR Flamanville-3 auf 12 600 US\$/kW₂₀₁₈ vervierfacht, während die Fertigstellung des Projekts um mehr als ein Jahrzehnt verzögert ist (Göke et al., 2023, weitere Informationen zu Flamanville-3 z. B. Schneider et al., 2023; Stuart, 2017).

Die Bindung erheblicher Ressourcen durch solche Fehlallokationen bei gleichzeitiger Vernachlässigung von Investitionen in den Ausbau erneuerbarer Alternativen impliziert nicht nur erhebliche nationale Opportunitätskosten: das extrem von Atomstrom abhängige Frankreich (2021: Atomstromanteil 69 %) stellt damit auch ein beträchtliches Risiko für die europäische Energiesicherheit dar (Omri & Saadaoui, 2022).

Flamanville symbolisiert exemplarisch die erheblichen Differenzen zwischen viel zu optimistisch budgetierten Bau- und Instandhaltungskosten und der Desillusionierung durch massive Kostenüberschreitungen in der Praxis. All dies spiegelt die Komplexität sowie die hohen ökonomischen Risiken wider, die mit den sogenannten fortschrittlichen Nuklearprogrammen verbunden sind.¹² Tatsache ist: Das erhoffte französische Atomenergiewunder „[...] war, ist und bleibt unrentabel und technologisch

¹⁰ Offizielle Auswertung der Abstimmung durch die Nationalversammlung: [www2.assemblee-nationale.fr/scrutins/detail/\(legislature\)/16/\(num\)/1533](http://www2.assemblee-nationale.fr/scrutins/detail/(legislature)/16/(num)/1533).

¹¹ Gesetzentwurf über die Beschleunigung der Verfahren im Zusammenhang mit dem Bau neuer Nuklearanlagen in der Nähe bestehender Nuklearstandorte und dem Betrieb bestehender Anlagen: www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/dossiers/DLR5L16N46622.

¹² Weitere aktuelle Beispiele für fehlallokierte EPR-Bauprojekte sind Hinkley Point C (GB) mit 9300 US\$/kW₂₀₁₈ und aktuell 5 Jahren Bauverzögerung; Olkiluoto Block 3 (FIN), ein EPR, der mit 14 Jahren Verzögerung und 7600 US\$/kW₂₀₁₈ seit April 2023 am Netz ist; Vogtle-3 und -4 (USA) mit 12000 US\$/kW₂₀₁₈, deren Inbetriebnahme sich um ca. 7 Jahre verzögert (vgl. Rothwell (2022) für Kostenangaben).

riskant. Daran ändern auch angeblich neuartige Reaktorkonzepte nichts, die de facto ihren Ursprung in der Frühzeit der Atomenergie in den 1950/60er Jahren haben.“ (Wimmers et al., 2023, Münzinger, 1957).

Die Strategie der Größenskalierung (Zentralisierung), die den großtechnologisch, fossil-nuklearen Pfad dominiert, ist an ihre Grenzen gestoßen und „ [...] heute das Haupthemmnis für den Umstieg auf einen Nachhaltigkeitspfad in der Energiewirtschaft [Energiewende]. [...] Hier liegen typische Phänomene der Pfadabhängigkeit vor“ (Göllinger, 2017, S. 2).

Auch der Stromverbrauch in der französischen Schwerindustrie, auf die Frankreichs nukleare Infrastruktur einst ausgerichtet wurde, ist drastisch zurückgegangen (Schneider, 2010; Yon, 2020). Für Frankreich stellt sich daher mehr denn je die dringende energie- und wirtschaftspolitische Aufgabe einer Diversifizierung seiner Infrastruktur für die Stromerzeugung, der eine ambitionierte Dezentralisierung des französischen Energiesektors einschließt.

Finanzierungszwänge

Im Rahmen eines umfangreichen Berichts über die Kosten der französischen Kernenergie identifizierte der Cour des Comptes bereits im Jahr 2012 die zukünftigen nuklearen Instandhaltungsinvestitionen als signifikant (Cour des Comptes, 2012). Die Kosten des Grand Carénage der EDF wurden damals für den Zeitraum 2010 bis 2025 auf 55 Mrd. €₂₀₁₀ geschätzt, was je nach Rechnung einen Einfluss von 10 % bis 15 % auf die nuklearen Stromkosten je MWh hätte. Im öffentlichen Jahresbericht 2016 beliefen sich die neuen Schätzungen für den Zeitraum 2014 bis 2030 bereits auf 100 Mrd. €₂₀₁₃ (Cour des Comptes, 2016) mit dem zusätzlichen Hinweis, dass die stattfindende Rekrutierung und Ausbildung des nötigen Fachpersonals nicht den Herausforderungen des umfangreichen Programms entspreche. Weiter sieht der Plan der französischen Regierung vor, die Lebensdauer der aktuellen Flotte über 50 Jahre hinaus zu verlängern.

Um den zunehmenden Strombedarf zur Dekarbonisierung verschiedener Sektoren (Mobilität, Industrie, Heizung usw.) zu decken und die bestehenden Kraftwerksflotte mit neuen Reaktoren zu erweitern (inkl. Ausbau der veralteten Stromnetze, Speicher und Abfallmanagement), sind erhebliche Investitionen erforderlich, die sich bis 2050 auf mehrere hundert Milliarden Euro belaufen, an denen der Staat sich je nach Fall durch eine Tarifgarantie, die Finanzierung von Investitionen oder Kapitalzuführungen beteiligen muss (Cour des Comptes, 2023).

Zu diesem Schluss kommt auch eine Studie aus dem Jahr 2022, die basierend auf Szenarien untersucht, ob Investitionen in neue AKWs in Frankreich durch den Markt angereizt werden oder nur mit politischer Hilfe getätigt und vor dem Hintergrund der angestrebten Ziele der Dekarbonisierung bewertet, werden können (vgl. Zimmermann & Keles, 2022). Die Ergebnisse zeigen, dass selbst unter der Annahme staatlicher Förderungen für den nuklearen Neubau eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 mit der geschätzten AKW-Kapazität nicht erreicht werden kann. Auch im Falle zukünftiger hoher CO₂-Preise würden, je nach Szenario, im günstigsten Fall nur geringfügige Investitionen in neue AKWs über den Kapitalmarkt finanziert werden können

– zu schwer wiegen die Risiken des teuren und unsicheren Atomgeschäfts mit seinen hohen Anfangsinvestitionen, Betriebskosten und Herausforderungen im globalen Wettbewerb mit erneuerbaren Energiequellen, siehe Abb. 8 und Zimmermann & Kelles (2022). Generell gilt: Die Atomindustrie geht das mit dem Bau eines neuen Kernkraftwerks verbundene Risiko nur dann ein, wenn der Staat mit Subventionen aushilft und garantiert, dass Gewinne zu erwarten sind (Brunnengräber, 2021). Ergänzend sei hierzu angemerkt, dass der ganz überwiegende Investitionsanteil bei der zukünftigen Weltenergieerzeugung ohnehin vor allem im Bereich der erneuerbaren Energien erwartet wird (IEA, 2023, Abb. 8).



Abb. 8: Weltenergieinvestitionen 2015 bis 2023 in OECD-Ländern in MRD USD. Daten nach IEA World Energy Investment (2023).

* inkl. Bulgarien, Kroatien, Zypern, Malta und Rumänien.

Die Finanzierung der französische Atomindustrie ist daher nur mit umfangreichen staatlichen Beihilfen und nur mit massiver politischer Rückendeckung denkbar: Im Oktober 2022 stimmte der Verwaltungsrat von EDF dem Angebot des französischen Staates zu, das Unternehmen durch eine Erhöhung seiner Anteile von 84 % auf 100 % zu (re)nationalisieren¹³. Diese Entscheidung wurde aufgrund der wirtschaftlichen Schwäche von EDF getroffen, die im Zusammenhang mit der aktuellen Krise der Kernenergie steht (Renewable Energy Institute, 2022). Das Verfahren wurde im Mai 2023 abgeschlossen und soll dazu beitragen, die energiepolitische Unabhängigkeit

¹³ Die Nettofinanzschulden von EDF stiegen 2019 um 8 Mrd. €₂₀₁₉, im Jahr 2020 um weitere 1,2 Mrd. €₂₀₂₀, 2021 um weitere 0,7 Mrd. €₂₀₂₁ auf insgesamt 43 Mrd. €₂₀₂₁ und im Jahr 2022 schließlich um weitere 21,5 Mrd. €₂₀₂₂ auf insgesamt 64,5 Mrd. €₂₀₂₂ an (EDF 2022b, EDF 2023).

Laut WNSR 2022 verliert EDF seit mehreren Jahren 100.000 bis 200.000 Kunden pro Monat an andere Anbieter (Schneider & Froggatt et al. 2023), wodurch die Allianz zwischen Staat und Versorger bröckelt, nicht nur aus rein wirtschaftlichen Gründen, sondern auch, weil der alte Klientelismus, der den "Nuklearkomplex" kennzeichnete, die Zugehörigkeit zur Staatselite nicht mehr garantiert (Brunnengräber 2021).

Frankreichs zu stärken und die Kontrolle über die nationale Stromerzeugung zurückzugewinnen. Dass dies durch die Verstaatlichung gelingen wird, ist zweifelhaft: „Die AKW-Flotte wird dadurch nicht jünger, Inspektionszeiten werden nicht kürzer, Korrosion wird nicht gestoppt und der Reparaturbedarf nicht verringert.“ (Mycle Schneider zitiert in Wille, 2023). Zudem zeigt die Entwicklung der F&E Ausgaben für Energie, dass Frankreich weit davon entfernt ist, einen Richtungswechsel zugunsten erneuerbarer Energien zu vollziehen (Omri & Saadaoui, 2022, Abb. 9).



Abb. 9: Historische Verteilung der öffentlichen F+E Ausgaben für Energietechnologie in Frankreich. Daten nach EA RD&D Budgets (2023)

Im Juli 2023 wandte sich der Cour des Comptes mit einer Informationskampagne über den Beitrag der öffentlichen Ausgaben zum ökologischen Wandel an die Öffentlichkeit. Laut dieser Berechnungen stiegen die umweltfreundlichen Ausgaben zwischen 2021 und 2023 zwar um 1 Mrd. €₂₀₂₃, der Investitionsbedarf allein für den Klimawandel wird jedoch auf mindestens 10 Mrd. €₂₀₂₃ geschätzt. Zusätzlich seien die als umweltschädlich bewerteten Ausgaben im Jahr 2022 wieder drastisch angestiegen (von 17 % auf 39 %), was als Auswirkung klimaschädlicher politischer Entscheidungen (z. B. ein Rabatt auf Kraftstoffe und der viel kritisierte Energiegutschein) gesehen wird.

Um die Gesamtkosten der ökologischen Wende in Frankreich stemmen zu können, benötige das Land aktuellen Berechnungen zufolge zusätzliche Nettoinvestitionen von schätzungsweise 66 Mrd. €₂₀₂₃/Jahr. Außerdem wurde versäumt, in zukunftsweisende Technologien zu investieren, um eine vielfältige Energiematrix zu erreichen. Angesichts der dramatischen Lage kritisiert der Rechnungshof, dass alternative Optionen CO₂-freier Stromsysteme nicht ausreichend berücksichtigt würden. Die vergleichende Berechnung der Stromerzeugungskosten sei jedoch für die Öffentlichkeit unerlässlich, um auf der Basis einer fundierten Faktengrundlage Entscheidung über die französische Energiezukunft der nächsten 30 Jahre abwägen und treffen zu können (Cour des Comptes, 2023).

Ist Energiesuffizienz mit nuklearer Staatsraison vereinbar?

Einer Meldung von EURACTIV zufolge hat sich Frankreich seit der Energiekrise 2022 in Europa für Suffizienz als „*einzigartige Methode ohne Äquivalent in der EU*“ eingesetzt (EURACTIV, 2023). Widerspricht dies der hier vertretenen These über die Unvereinbarkeit von Atomstromsystem und Suffizienz-Politik? Das ist keineswegs der Fall, denn sowohl der Anlass für die scheinbare Hinwendung zur Suffizienz-Politik als auch nachfolgende kontraproduktive Beschlüsse der französischen Nationalversammlung bekräftigen ganz im Gegenteil unsere These.

Der Plan de Sobriété Énergétique, der im Oktober 2022 als Reaktion auf zunehmende Reaktorausfälle und die europäische Energiekrise verabschiedet wurde und auf den sich der zitierte Artikel bezieht (EURACTIV, 2023), ist im Kern ein Notfallplan, der darauf abzielt, freiwillige Energieeinsparungen in allen Sektoren in einer akuten Krisensituation zu erzielen (insgesamt 10 % bis 2024). Dieser Plan umfasst zwar eine Reihe von Maßnahmen in den Bereichen Energie, Verkehr, Wohnen, Wirtschaft, öffentliche Dienstleistungen, Sport und Tourismus, ist jedoch weit davon entfernt, Suffizienz-Politik strategisch und langfristig zu etablieren. Der Plan de Sobriété Énergétique bezieht sich zudem vorwiegend auf die Energieversorgungssicherheit und lässt andere wesentliche Dimensionen von Suffizienz-Politik außer Acht. Diese werden z. B. in der Definition von Suffizienz der Working Group III des IPCC als „[...] *alltägliche Handlungen und Praktiken, die die Nachfrage nach Energie, Materialien, Land und Wasser reduzieren und gleichzeitig das Wohlergehen aller Menschen innerhalb globaler Grenzen sicherstellen* [...]“ beschrieben; darauf wird in Frankreich im öffentlichen kritischen Diskurs auch explizit Bezug genommen (Saheb, Y, 2022).

In der Suffizienz-Politik geht es daher nicht nur um die ökologische Dimension wie Naturschutz und Energiesparen, sondern auch um die Sicherstellung eines gerechten Zugangs zu grundlegenden Dienstleistungen für alle. Insofern spielen auch Verteilungsfragen und z. B. der übermäßige Konsum besonders vermögender Haushalte eine Rolle. Der derzeitige französische Ansatz erfasst diese Aspekte nicht, wie ein kurzer Einblick in jüngste Gesetzesbeschlüsse unterstreicht (vgl. hierzu Röttger, 2023; unveröffentlichtes Manuskript):

- Die Ablehnung des Gesetzesvorschlags zum Verbot von Flügen mit Privatjets trotz der Privilegierung der Reichen-Mobilität und den damit verbundenen Umweltauswirkungen.
- Ablehnung der Aufstockung der Ressourcen des neuen französischen Amtes für Biodiversität (OFB), das für die Überwachung, Erhaltung, Verwaltung und Wiederherstellung der terrestrischen und marinen Umwelt von zentraler Bedeutung ist.
- Die Weigerung, den Mehrwertsteuersatz für öffentliche Verkehrsmittel zu senken, was diese attraktiver machen und die Nutzung des Autos reduzieren würde.
- Die Ablehnung des Gesetzesvorschlags, wonach bis 2030 10 % des verwendeten Wassers aus aufbereitetem Abwasser stammen soll.
- Der Verzicht auf die Einführung einer zeitlich begrenzten Sondersteuer auf die extrem hohen Gewinne der Ölgesellschaften.

Solche und weitere aktuelle Maßnahmen entsprechen weder dem Konzept einer gerechten, inklusiven Suffizienz-Politik, noch beinhalten sie zukunftsorientierte und klimafreundliche Strategien. Im Gegenteil, sie sind das Ergebnis der französischen Staatsraison und einer engen nuklearen zivil-militärischen Symbiose, die als Grundlage für die Handlungs- und Entscheidungsfreiheit des Landes gesehen wird. (Schneider, 2010, Hecht, 2009). Wie tief die Wirkhebel dieses politischen Lock-Ins in die Möglichkeiten transformativer sozial-ökologischer Entwicklungen eingreifen können, hatte Robert Jungk bereits 1977 in seinem Buch zum Atom-Staat diskutiert (Jungk, 2016).

Das französische Lehrstück: AKWs im Klimawandel

Ein zu wenig beachteter Aspekt der Atomenergie ist ihre Risikoanfälligkeit bei weiter voranschreitendem Klimawandel. In einem aktuellen Bericht über Atomkraft und Klimawandel warnt der französische Rechnungshof vor der mangelnden Ausrichtung der bestehenden und zukünftigen Reaktortechnologie an den globalen Temperaturanstieg (Cour des Comptes, 2023). Der Klimawandel wirkt sich bereits seit etwa 20 Jahren auf die französischen Wasserressourcen aus. Diese haben sich um 14 % verringert zwischen dem Zeitraum 1990 bis 2001 und dem Zeitraum 2002 bis 2018 (Cour des Comptes, 2023). Niedrige Pegelstände und steigende Flusstemperaturen verursachen erhebliche Unsicherheiten bezüglich der langfristigen Zuverlässigkeit und der Kosten der französischen AKW-Flotte, da dem Land für die kommenden 10 bis 15 Jahre keine Prognosen zur Verfügbarkeit über die Verfügbarkeit von Süßwasser und die Flusströmung vorliegen. Die Baupläne für die neuen EPRs verfügen aktuell über keine technische Lösung in Bezug auf wassersparende Kühlsysteme, geschweige denn über Lösungsansätze für Szenarien eines möglicherweise extremen Anstiegs des Meeresspiegels. Der Rechnungshof fordert demnach die „rasche Erstellung“ von Machbarkeitsstudien für die geplanten Standorte der künftigen EPRs und einen territorialen und gemeinsamen Ansatz aller betroffenen Akteure.

Schon jetzt erlebt Frankreich einschneidende soziale und ökologische Auswirkungen von Hitzewellen und Dürreperioden. In vielen Teilen des Landes hat die Wasserknappheit katastrophale Ausmaße erreicht, was die ASN im August 2022 dazu veranlasste, die Grenzwerte für die Einleitung von erwärmtem Wasser in angrenzende Flüsse vorübergehend zu erhöhen, um den Weiterbetrieb von fünf Reaktoren sicherzustellen (ASN, 2022). Im zuvor verfassten Antragsbericht der EDF zur vorübergehenden Änderung der Vorschriften für thermische Emissionen wurden die Auswirkungen von Hitzewellen auf die Umwelt rund um die AKWs auf Basis der Erfahrungen aus den letzten Hitzewellen sowie einigen Forschungsergebnissen zum Zusammenhang zwischen Temperatur und Hydrobiologie analysiert. Der Bericht weist auf mögliche negative Auswirkungen hin, insbesondere in Bezug auf die Fischpopulationen, und betont die Notwendigkeit, die Studienlage zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosysteme zu verbessern und zu erweitern (Electricité de France (EDF), 2022).

Ein Vergleich der verfügbaren Daten zur Wasserentnahme in verschiedenen EU-Ländern für das Jahr 2019 in Abb. 10 zeigt die bedeutende Rolle der Verwendung als Kühlwasser für die nukleare Energieerzeugung in Frankreich. Laut Analyse der

Société française d'énergie nucléaire (Sfen) wurden bis 2021 etwa 97 % des Frischwassers, das von den AKWs aus Flüssen entnommen wird, am Ende des Kühlzyklus zurückgeleitet. Die restlichen 3 % entsprechen ca. 410 Mio. m³ Wasser, was nach heutigem Stand 12 % des gesamten französischen Süßwasserverbrauchs entspricht. Der durchschnittliche Verbrauch eines französischen Kernkraftwerks lässt sich mit rund 1 % der Wassermenge der Flüsse beziffern, in denen es angesiedelt ist (Stand 2021). Der Verbrauch der AKWs mit offenem Kreislauf am Ufer der Rhône ist im Vergleich zu den zwei Reaktoren in Bugey und den vier Reaktoren in Cruas, die mit geschlossenem Kreislauf arbeiten, anteilmäßig sehr gering: Die Entnahme dieser Reaktoren belief sich im Jahr 2021 auf 11 Mrd. m³ Wasser, von denen mehr als 99 % in die Rhône zurückgeflossen sind. Ein offener Kreislauf verbraucht zwar weniger Wasser, entzieht der Umwelt jedoch zu Beginn des Kühlzyklus mehr Wasser und führt zu einem stärkeren Temperaturanstieg zwischen Ober- und Unterlauf (Société française d'énergie nucléaire (Sfen), 2023). Die Sfen konstatiert in ihrem jüngsten Bericht zu den Wechselwirkungen öffentlicher Gewässer mit der Atomindustrie, dass der Wasserverbrauch von AKWs erhebliche Auswirkungen auf lokale Wasserressourcen haben kann, insbesondere in Gebieten, in denen Wasser knapp ist. Dies könne zu Konflikten mit anderen Wassernutzern führen, wie z. B. der Landwirtschaft und der öffentlichen Wasserversorgung oder dem Tourismus. In den Pyrénées Orientales wurden aufgrund von Trinkwassermangel bereits drastische Regularien zur Wassereinsparung implementiert, was zu Konflikten zwischen Landwirtschaft und Tourismus führt, weil sie als die zwei wichtigsten Wirtschaftszweige der Region um die knappen Ressourcen konkurrieren (ARD, 2023).

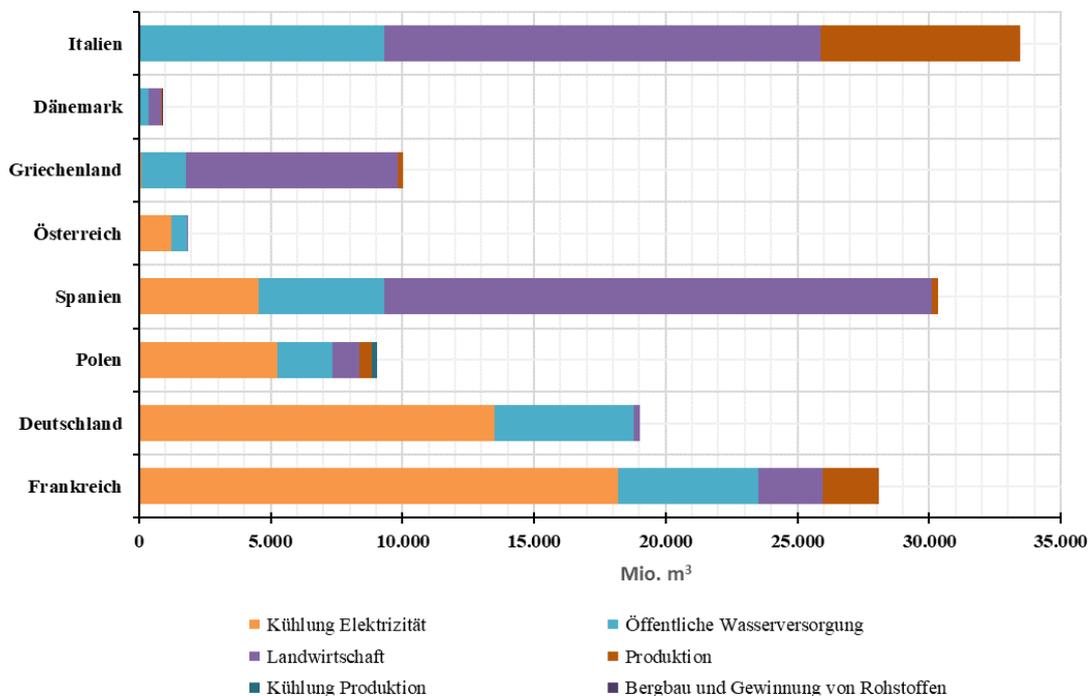


Abb. 10: Wasserentnahme nach Wirtschaftssektor in ausgewählten EU-Ländern in Millionen Kubikmetern. Daten nach EEA (2023)

Einmal mehr wird deutlich, dass eine nachhaltige nationale Transformation des Energiesystems eine umfassendere Perspektive benötigt, die sowohl die direkten ökologischen Auswirkungen von Energieerzeugungsmaßnahmen als auch ihre indirekten sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen berücksichtigt. Die Forcierung der Kernenergie bringt auch mit sich, dass die Versorgungssicherheit durch extreme Wetterereignisse beeinträchtigt und zugleich die ökologische Integrität von Flüssen und Grundwasserleitern gefährdet wird. Daher ist es unerlässlich, die Bewirtschaftung der öffentlichen Wasserressourcen mehr in den Fokus der Energiepolitik zu rücken und die Ressourcennutzung auf die wachsenden Herausforderungen des Klimawandels auszurichten (Weltwasserbericht der Vereinten Nationen 2020). Dies gilt umso mehr, wenn Studien zu suffizienten risikofreieren Dekarbonisierungs-Strategien für Frankreich aufgrund der nuklearen Pfadabhängigkeiten ignoriert und nicht im Rahmen eines öffentlichen Diskurses evaluiert werden.

Sozial-ökologische Transformationsstrategien gegen den nuklearen Lock-In

Selbst der nationale Stromnetzbetreiber RTE, eine Tochtergesellschaft der EDF, weist auf Unsicherheiten bei der Verfügbarkeit von Kernenergie unter Zeitdruck und erhöhten Ambitionen in Bezug auf Elektrifizierung und Reindustrialisierung hin (Réseau de Transport d'Electricité (RTE), 2023). Allerdings geht RTE auch von der Koexistenz-These aus, also der Vermutung, dass die Erhöhung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien und die Fortsetzung des Betriebs bestehender Kernreaktoren eine tragfähige Transformationsstrategie sei, weil ein AKW-Neubau auf Sicht nicht in Frage kommt: *„Der Zeitraum 2023–2035 ist der Zeitraum, in dem der heutige Mix angepasst wird. In diesem Zeitraum besteht der Weg, das Potenzial für die Erzeugung kohlenstofffreier Elektrizität zu erhöhen, darin, neue Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie in Betrieb zu nehmen, und der Weg, das Potenzial nicht zu verringern, darin, den Betrieb der bestehenden Kernreaktoren fortzusetzen. In einem so kurzen Zeitraum können nämlich keine neuen Atomreaktoren in Betrieb genommen werden.“* (RTE, 2023, eigene Übersetzung). Darüber hinaus werden auch Defizite bei der Infrastruktur und der Konfiguration der Netze angesprochen, die einseitig auf das Atomstromsystem ausgerichtet sind: Transformationsresistenz ergibt sich zum Beispiel durch die Priorisierung der Atomindustrie bei der Konfiguration der Stromnetze. Dies zeigt sich u. a. durch die mangelhafte Entwicklung von Offshore-Windenergie trotz herausragender Bedingungen, welche die verfügbaren Netzkapazitäten an Land reduzieren und den nuklearen Ausbau behindern würde. Für weitere Infos und Belege, siehe RTE (2019).

Grundlage für umfassendere Analysen bieten Energiestudien und -szenarien der Agence de la transition écologique (ADEME), die bereits im Jahr 2015 zu dem Schluss kam, dass Frankreich bis 2050 auch unter ungünstigen Wetterbedingungen mit 100 % Marktdurchdringung vollständig und stabil auf erneuerbare Elektrizität umsteigen könnte (ADEME, 2015). ADEME kritisierte die verpassten Chancen, von den sinkenden Kosten und dem technologischen Fortschritt der erneuerbaren Energien zu profitieren und forderte weitere Untersuchungen zu Parametern der gesellschaftlichen Akzeptanz, technologischen Fortschritte, Landnutzungsbeschränkungen und Verbrauchsmuster.

Deutlich weiterführende Ergebnisse liefert das Szenario der négaWatt Association mit einem Fahrplan für eine transformative Energiewende in Frankreich zur Verringerung der CO₂-Emissionen bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz und Suffizienz und dem Ziel von Net Zero bis 2050 (négaWatt Association 2017). Dieses Szenario bietet eine nachhaltigere und flexiblere Strategie der zukünftigen Energieversorgung, welche die Frage der Energieunabhängigkeit in den umfassenderen Kontext einer sozial-ökologischen Transformation einbindet. Die Methodik zielt auf eine integrierte Sichtweise, die eine Reduktion finanzieller Belastungen auf der Nachfrageseite des Energiemarktes einbezieht und systematisch mit den Vorteilen eines diversifizierten, auf erneuerbare Energien ausgerichteten Energiesystems verbindet. Im methodischen Ansatz noch deutlich weiter geht die neue Szenarienanalyse CLEVER. In dieser Studie wurde – ebenfalls unter maßgeblicher Federführung von négaWatt Association – ein risikominimierender Energiepfad zu Net Zero (2050) für Europa mit maßgeblicher Unterstützung durch eine ambitionierte Suffizienz-Politik untersucht (CLEVER, 2023).

Die Notwendigkeit, die alte AKW-Flotte zu erneuern, bietet Frankreich einen derzeit noch möglichen Ausgangspunkt, zukunftsfähigere Alternativen zu planen und eine erneuerbare Energiewende zu fördern, Innovationen zu beschleunigen, lokale und nationale grüne Industrien zu unterstützen und vorausschauende, attraktive Optionen für einen gezielten und zügigen sozial-ökologischen Strukturwandel zur Dekarbonisierung zu schaffen. Diese Richtungsänderung der Energiepolitik würde aber nicht nur den politischen Willen voraussetzen, die Symbiose zwischen militärischer und ziviler Nutzung der Atomenergie ernsthaft auf den Prüfstand zu stellen. Darüber hinaus müssten forciert und regierungsoffiziell alternative Szenarien angefertigt werden, welche die Chancen und Risiken einer atomenergiefreien und dekarbonisierten Energiezukunft für Frankreich unvoreingenommen untersuchen. Ansätze dafür gibt es (siehe oben), aber die derzeitigen energiepolitischen Prioritäten müssten sich grundlegend ändern.

Japans Insellage

Das folgende Fallbeispiel konzentriert sich auf ausgewählte Aspekte der Wechselwirkungen von Atomstromsystem und Ausbau erneuerbarer Energie in Japan wie z. B. die Potentialanalyse für erneuerbare Energien und den impliziten Vorrang der nuklearen Netzeinspeisung. Eine genauere Analyse transformativ resistenter Einflussfaktoren wie z. B. das Strommarktdesign, bestehende Pfadabhängigkeiten, institutionelle Hemmnisse und Fragen der energie- und klimapolitischen Governance können hier nicht behandelt werden. Zur Entwicklung des japanischen Energiesystems und zur vergleichenden Analyse mit Deutschland liegen umfangreiche Studien und Analysen der deutsch-japanischen Energiepartnerschaft (www.energypartnership.jp/home/) und des German-Japanese Energy Transition Councils (GJETC, gjetc.org/) vor, auf die wir hier ausdrücklich verweisen.

Die kommerzielle Atomstromnutzung in Japan begann im Jahr 1966. Die Kapazität stieg, besonders getrieben durch die Ölpreiskrisen der 1970er und 1980er Jahre, bis 2006 auf 47,6 GW und damit auf einen nuklearen Stromanteil von etwa 30 % an

(World Nuclear Association, 2023). Als Folge der Katastrophe von Fukushima im Jahr 2011 waren im Jahr 2014 alle Atomkraftwerke vorübergehend stillgelegt. Heute im März 2023 sind erst 10 der insgesamt 33 noch für einen Neustart vorgesehenen AKWs wieder am Netz (Renewable Energy Institute, 2023). Zum genauen Status vgl. auch WNISR, 2021; WNISR, 2022). Kein Land der Welt hat vergleichbare Schwankungen und Risiken der Versorgung und reale Katastrophen durch Atomenergie erlebt wie Japan. Welche aktuellen, extrem bedrohlichen Risiken die Atomenergie unter Kriegsbedingungen verursacht, wird in tragischer Weise am Beispiel der Ukraine und dem größten europäischen Kraftwerk Saporischschja deutlich (s. u.). Warum gibt es dennoch eine politische Festlegung der Regierung auf den Ausbau?

Ist Japan reich oder arm an Energie?

Für das hochindustrialisierte Inselland Japan – ohne Einbindung in einen internationalen Strommarkt wie Deutschland und alle EU-Mitgliedsländer – führten die traumatischen historischen Erfahrungen in der Konsequenz dazu, der Versorgungssicherheit mit Energie und Elektrizität höchste Priorität einzuräumen. In Bezug auf die Wechselbeziehung zwischen Kernenergie und Erneuerbaren sowie hinsichtlich der Transformationsresistenz des Atomstromsystems ist das Inselland Japan daher ein besonders eindrucksvolles Beispiel. Vor Japans historischem Hintergrund kreist der strompolitische Diskurs im Kern um die Frage, ob Japan unter Einbeziehung aller realisierbaren, nationalen Potentiale an erneuerbaren Energien und unter Berücksichtigung aller konsensfähigen Energiesparoptionen, ein energiereiches oder ein energiearmes Land ist (Wuppertal Institut & Institute of Energy Economics, Japan (IEE), 2018).

In der systemtheoretischen Analyse ist die Frage inzwischen beantwortet: Die Potentiale für Windenergie schätzt das japanische Umweltministerium auf insgesamt 656 GW (264 GW Onshore und 392 Offshore. Renewable Energy Institute (REI), 2023). Unter Berücksichtigung von Umwelt- und Standortrestriktionen nimmt das REI an, dass davon etwa 60 GW Nennleistung und damit ein jährlicher Ertrag von 174 TWh bis 2035 realisiert werden könnten. Vor allem auf Dächern – und begrenzt auch weiter auf Freiflächen (besonders bei gleichzeitiger Nutzung für Landwirtschaft, d. h. Agriphotovoltaik) – könnten zudem nach Einschätzung des REI bis zum Jahr 2035 ca. 280 GW PV-Anlagen mit einer Gesamtproduktion von etwa 344 TWh installiert werden. Hinzu kommt ein Potential für Stromerzeugung aus Biomasse von ca. 86 TWh, 100 TWh aus Wasserkraft und ca. 12 TWh aus Geothermie, jeweils unter Berücksichtigung der Belange von Umweltschutz, lokaler Interessen und Tourismus. Alles in allem hält es das REI für das Jahr 2035 für möglich, dass gut 715 TWh und damit etwa 80 % der Stromnachfrage im Jahr 2035 durch erneuerbare Stromerzeugung bereitgestellt werden könnte (Renewable Energy Institute (REI), 2023).

Eine kooperative Studie von der LUT University, der Agora Energiewende und REI (2021) hat ermittelt, dass bis zum Jahr 2050 ein vollständig erneuerbares Energiesystem ohne Atomenergie möglich ist (LUT University et al., 2021).

Die Regierungen, seit Ende 2012 unter Ministerpräsident Abe und seit 2022 unter Ministerpräsident Kishida, haben jedoch die Frage ob Japan reich oder arm an Energie ist weitaus skeptischer beantwortet als das REI, in zentralen Punkten sogar gegensätzlich dazu. Mit dem Beschluss über die Green Transformation (GX) Basis Policy im Februar 2023 hält die Regierung unter Ministerpräsident Kishida zwar am schon früher beschlossenen Ausbauziel von 36 % bis 38 % (bis 2030) für erneuerbare Stromerzeugung fest, votiert aber gleichzeitig, auch vor dem Hintergrund der Energiepreiskrise 2022/23, vehement für eine verstärkte Nutzung der Atomenergie und für eine Dekarbonisierung von fossilen Kraftwerken durch Befeuerung mit Ammoniak und Nutzung von CCTS. „The GX Basic Policy clearly describes nuclear power as a ,highly effective energy source for decarbonization’ that should be ‘utilized to the maximum extent possible’” (zitiert nach REI, 2023, S. 8). Abb. 11 zur öffentlichen F&E-Politik zeigt, dass von einem Vorrang der Förderung erneuerbarer Energien noch nicht die Rede sein kann, wenn auch die Annäherung an die AKW-Förderung deutlich wird.

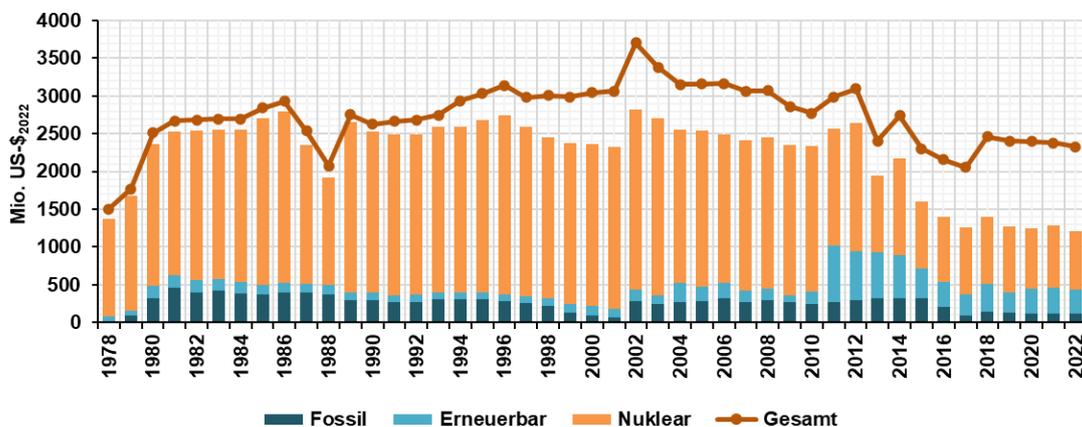


Abb. 11: Japans öffentliche Ausgaben für Forschung und Entwicklung (Energietechnologie) im Bereich erneuerbare Energien und Kernenergie. Daten nach IEA RD&D Budgets (2023)

Auf die offenen Fragen und Widersprüche der derzeitigen japanischen Energie- und Klimaschutzpolitik kann hier nicht eingegangen werden. Die zitierte Untersuchung des REI (2023) und Studien des German-Japanese Energy Transition Council enthalten hierzu Analysen aus japanischer und deutscher Sicht. Eine Auflistung aktueller Studien findet sich unter gjetc.org/studies/. Hinsichtlich der hier zur Diskussion stehenden Transformationsresistenz der Kernenergie ergeben sich jedoch aus den widersprüchlichen Projektionen des REI und der offiziellen Regierungspolitik interessante Einsichten.

Wissenschaftliche Konsensbildung steht noch aus

Ein Vergleich von Szenarien zwischen repräsentativen deutschen und japanischen Klimaschutzszenarien (vgl. German Japanese Energy Transition Council (GJETC) 2022) bis 2045/2050 zeigt für Deutschland eine relativ geringe prognostizierte Bandbreite des Primärenergieverbrauchs und der erneuerbaren Stromerzeugung für 2045. In den japanischen Szenarien differieren dagegen die Projektionen für 2050

enorm, z. B. beim Primärenergieverbrauch um mehr als den Faktor 2 und hinsichtlich des Anteils von erneuerbarem Strom in 2050 zwischen 100 % und 40 % (vgl. Abb. 12).

Von einem weitgehenden Konsens der „Szenarien-Community“ über den Weg zur Dekarbonisierung bis 2050 und die zukünftige Rolle der Kernenergie kann daher in Japan keine Rede sein. Die große Bandbreite der Zielwerte des Primärenergieverbrauchs und der jeweiligen Strategien zur Dekarbonisierung ist einerseits Ausdruck großer prognostischer wissenschaftlicher Unsicherheiten, die die Festlegung politischer Zielwerte für langfristigen Klimaschutz erschweren. Andererseits hat die Politik sich erst im Oktober 2020 auf ein Net-Zero-Ziel bis 2050 festgelegt, so dass die Szenarien-Methodik des Backcasting und eine darauf aufbauende Klimapolitik in Japan noch nicht lange praktiziert wird. Bei der Methode des Backcasting wird nicht nach vorne projiziert, sondern die heute notwendigen Strategien für die Erreichbarkeit eines Zukunftsbildes werden von dort aus zurückgerechnet.

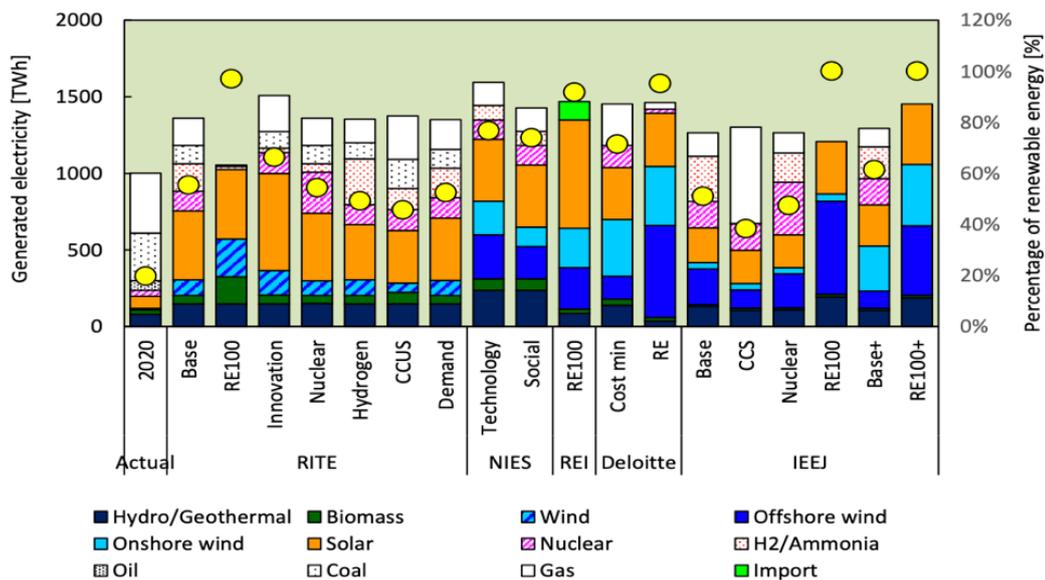


Abb. 12: Stromerzeugung (links) und Anteil erneuerbarer Strom an der Stromerzeugung (rechts) nach repräsentativen japanischen Szenarien in 2050 (TWh).

Die gelben Punkte markieren den Anteil erneuerbarer Stromerzeugung.

Daten nach GJETC (2022).

Der gesellschaftliche Druck ist begrenzt

In Japan fehlt die lange Tradition und Breite einer starken Anti-Nuklear- und Pro-Solarenergie-Bewegung, ebenso wie die korrespondierende Bandbreite und weitgehende öffentliche Transparenz der wissenschaftlichen Energiepolitikberatung, die sich in Deutschland in jahrzehntelangen Konflikten über die Kernenergie entwickelt haben. Auch die öffentlichen Auseinandersetzungen und die massiven Proteste gegen die Endlagerung, wie sie in Deutschland auftraten, sind in Japan eine Seltenheit. Die Vermutung liegt nahe, dass einerseits der Umfang, die Intensität und eine gewisse Konsensbildung der sozialen Bewegungen gegen Kernenergie und für Erneuerbare sich auch in der relativ großen Bandbreite der deutschen wissenschaftlichen Energie- und Klimapolitikberatung wiederfindet. Andererseits spiegelt die starke regierungs-offizielle Parteinahme für die Kernenergie in Japan nicht nur den relativ schwachen

Status sozialer Bewegungen und eine begrenzte Diversität der wissenschaftlichen Energiepolitikberatung wider. Auch das zivilgesellschaftliche Engagement für dezentrale erneuerbare Energieprojekte (z. B. durch Energiegenossenschaften, Bürgerenergie oder den Aufbau von Stadtwerken) hat es in Japan deutlich schwerer als in Deutschland (Kloppenburger, 2021 zur Rolle des „Nuclear Village“).

Widersprüchliche Ausbauziele für den Stromsektor

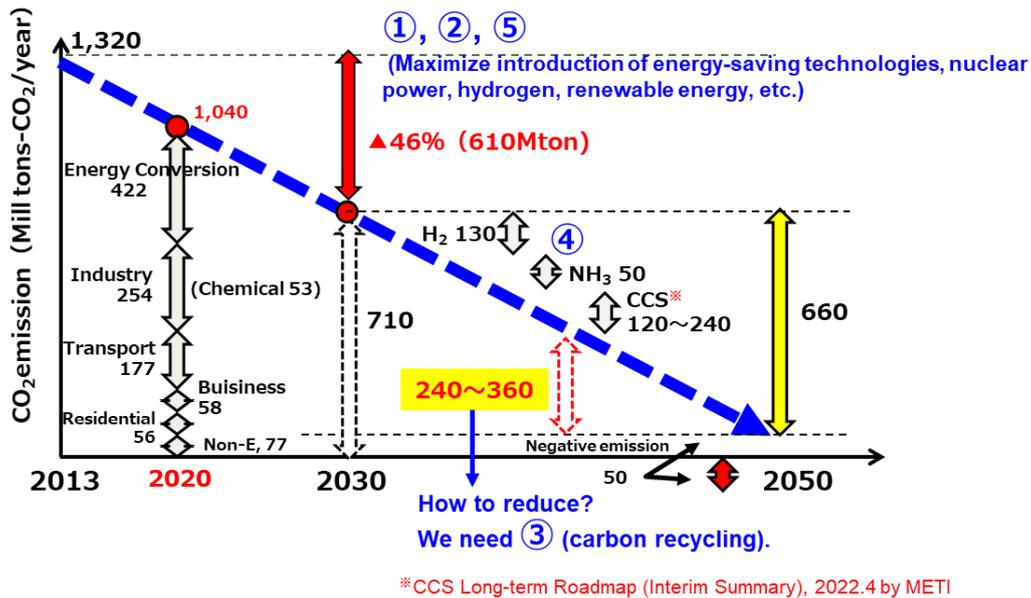
Atomenergie wird von der derzeitigen japanischen Regierungspolitik trotz Fukushima in der Öffentlichkeit als versorgungssicherere und quasi nationale Strombasis dargestellt. Die grundlastfähige Atom- und Kohlestromversorgung (mit CCTS) gilt dabei – im Vergleich zu fluktuierendem Solar- und Windkraftstrom – als verlässlichere Stromversorgung (auch unter Berücksichtigung von Flexibilisierungsoptionen, wie z. B. Speicher). Daraus begründen sich die relativ schwachen Ausbauziele für erneuerbaren Strom bis 2030 oder 2035. Das REI verweist jedoch darauf, dass Japan – wie auch Frankreich – sich im Rahmen von G7 auf einen ambitionierten CO₂-freien Stromausbau verpflichtet hat. Im Gegensatz zu den anderen fünf G7-Ländern umfasst diese Verpflichtung allerdings kein ambitioniertes Ausbauziel von mindestens 70 % bis 80 % für erneuerbaren Strom in 2035.¹⁴ Für die japanische Wirtschaft, die Regionen und die Gesellschaft fehlen somit verlässliche und ambitionierte regierungsoffizielle Ausbauziele für PV und Wind sowie eine langfristige Roadmap für eine risikoarme Dekarbonisierung auf der Grundlage von Energieeffizienz, Energiesparen und Erneuerbaren. Japan riskiert damit, den Anschluss an den globalen Trend der Weiterentwicklung, Kostensenkung und forcierten Markteinführung erneuerbarer Stromerzeugung und darauf basierender risikoarmer Elektrifizierung zu verlieren.

Langfristige Planungsunsicherheit

Das Ausmaß der Planungsunsicherheit wird in Abb. 13 über die derzeit bestehenden CO₂-Reduktionslücken für 2030 und für Treibhausneutralität im Jahr 2050 deutlich. Die Abbildung veranschaulicht die CO₂-Reduktionspotentiale auf der Grundlage offizieller Strategiestudien von METI und Keidanren. Das für 2030 offiziell angekündigte Reduktionsziel einer Reduktion um 46 % verglichen mit 2013 ist vergleichsweise zuverlässig erreichbar. Extrem unsicher ist aber, wie die verbleibende Reduktionslücke von 240 bis 350 Mio. Tonnen CO₂ bis zum Jahr 2050 geschlossen werden kann. In diesem Umfang auf so genanntes „Carbon Recycling“ zu setzen ist nicht überzeugend und unrealistisch. Das Erreichen des Klimaschutzziels für 2050 unter der japanischen Strategie von AKW plus behutsamer Erneuerbare-Ausbau ist daher bei der heutigen Beschlusslage sehr unsicher. Das Problem ist dabei nicht nur die fehlenden Potentiale und hohen Kosten für „Carbon Recycling“, sondern auch die

¹⁴ Im *G7 Leaders Communiqué* (Elmau, 28.6.2022) heißt es: *“We acknowledge that a greenhouse gas neutral energy supply with strong reliance on energy efficiency and renewable energy is economically sensible, technically feasible, reliable and safe. To this end, we commit to achieving a fully or predominantly decarbonised power sector by 2035.”*. Mit „decarbonised“ hat sich Japan und auch Frankreich die Tür für Nuklearenergie und für CCS offengehalten, obwohl der Zusatz *„to this end“* offenbar eindeutig auf Effizienz und Erneuerbare zielte.

bei der derzeitigen Politik sehr begrenzte Option einer grünen Elektrifizierung für die Sektoren Verkehr und Gebäude.



- ① METI&NEDO, Energy Saving Technology Strategy, 2019.
 - ② METI, The Sixth Basic Energy Plan and Long-Term Energy Supply and Demand Outlook, 2021.
 - ③ METI, Roadmap for Carbon Recycling Technologies, 2021.
 - ④ METI, Green Growth Strategies Associated with 2050 Carbon Neutrality, 2021.
 - ⑤ Keidanren, Keidanren Carbon Neutrality Action Plan, 2022.
- METI: Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan
NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization, Japan

Abb. 13: CO₂-Reduktionspotentiale auf der Grundlage offizieller Strategiestudien von METI und Keidanren. Die Abbildung ist einer Präsentation von Susumu Sakai (The Institute of Applied Energy, Tokyo (IAE)) auf der Ratssitzung des GJETC am 2.2.2023 in Tokyo entnommen.

Offene Richtungsentscheidungen

Zweifelloos verlangt ein mittelfristiger Ausstiegsfahrplan aus der Kernenergie weitreichende Richtungsentscheidungen und teilweise eine Neuausrichtung der japanischen Energiepolitik. Dies betrifft z. B. den überregionalen und regionalen Netzausbau, eine klare Vorrangregelung für erneuerbare Stromerzeugung, die Förderung von dezentralen Wind- und PV-Anlagen, verbindliche ambitionierte Ausbauziele für andere Erneuerbare, Speicher und sektorübergreifendes Energie- und Stromsparen. Als massives Hemmnis gegen diese Richtungsentscheidungen wirken aber die Verwertungszwänge des in AKW investierten Kapitals und der politische Einfluss der mächtigen Betreiber der derzeit ungenutzten, prinzipiell jedoch betriebsbereiten 33 Atomkraftwerke. In der von der Regierung unterstützten Hoffnung auf einen Neustart mussten die neun regionalen Betreiber von AKWs und drei weitere an der Atomstromproduktion beteiligte Unternehmen in zusätzliche Schutzmaßnahmen in-

vestieren (Schneider & Froggatt et al. 2023). Diese Unternehmen sind verständlicherweise jetzt vorrangig an der Wiederinbetriebnahme der AKWs und weniger an der Markteinführung von konkurrierenden Erneuerbaren oder an Stromsparprogrammen interessiert.

Widersprüchliche Anreize und politische Signale

Die Interessen der Betreiber nuklearer Anlagen werden z. B. durch die Output Power Control geschützt. De facto geht es dabei in Zeiten von regionalem erneuerbarem Stromüberschuss um eine Vorrangspeisung für Atomkraftwerke und eine Abregelung von erneuerbarem Strom, damit AKWs weiterlaufen können: „*The other power generation methods targeted for output power control are biomass, solar and wind power. Nuclear power is not covered because output cannot be easily adjusted*“ (Naito, H. & Iwasawa, S., 2023). AKWs sind, falls z.B. eine Vorrangspeisung für Erneuerbare dies notwendig macht, begrenzt regelbar; die technischen und wirtschaftlichen Implikationen werden übersichtlich zusammengefasst von Grünwald (2016).

Ein anderes Beispiel ist die Genehmigung von AKWs auf theoretisch unbegrenzte Zeit. Die Tagesschau berichtete hierzu, das japanische Parlament habe ein Gesetz in Kraft gesetzt, „*mit dem die Betriebsdauer nicht mehr auf 60 Jahre beschränkt wird – sondern potenziell unbegrenzte Laufzeiten möglich werden*“¹⁵. Dies ist nach unserer Kenntnis weltweit der riskanteste Regierungsbeschluss, Atomenergie-Betreiber zu höchst unsicheren Laufzeitverlängerungen von AKWs zu ermuntern. Eine mögliche Erklärung dafür ist das weitere Festhalten am ambitionierten Regierungsziel von 20 % bis 22 % Atomstrom bis 2030: Die Erreichbarkeit dieses Ziels ist zwar ohnehin fraglich, denn das Durchschnittsalter japanischer AKWs liegt heute bei 35 Jahren, es wäre jedoch auch ohne Laufzeitverlängerung nur mit teuren und höchst umstrittenen Neubauten realisierbar (Arai, 2022), die eine noch problematischere Allokation von Kapital und Ressourcen bedeuten.

Den aus heutiger Sicht ambitionierten Atomstromanteil von 22 % im Jahr 2030 durch Laufzeitverlängerung erreichbar zu machen, erscheint auch deshalb wenig aussichtsreich, weil 16 von den 22 in Japan seit Fukushima stillgelegten AKWs eine Laufzeit von unter 40 Jahren hatten (Schneider et al., 2023). Auch sind die Widersprüche in der Atompolitik nicht ausgeräumt: Obwohl Ministerpräsident Kishida als „*neue Phase*“ der Kernenergienutzung auch den Bau einer neuen Generation von Atomreaktoren angekündigt hatte, bestätigte er auf seiner Pressekonferenz am 22. August 2022 gleichzeitig „*that the policy of ,reducing dependence on nuclear as much as possible‘ remained unchanged*“ (Schneider et al., 2023).

Als jahrzehntelange Erblast bleibt in jedem Fall der Rückbau der Fukushima-Reaktoren und das vollständig ungelöste, aber öffentlich mehr oder weniger tabuisierte Endlagerproblem: „*Furthermore, spent fuel and waste disposal issues remain unsolved. A*

¹⁵ ARD-aktuell / tagesschau.de (2023, 31. Mai) – *Japan beschließt Laufzeitverlängerung von Atomreaktoren*. www.tagesschau.de/ausland/asien/japan-atomreaktoren-100.html; siehe hierzu auch japannews.yomiuri.co.jp/politics/politics-government/20230531-113149/.

brighter future for nuclear power in Japan is not on the horizon". Angesichts dieser Unsicherheit und Widersprüche lässt sich als These feststellen: Regierungsoffiziell die Hoffnung auf eine atomare Zukunft offen zu halten, bedeutet ein für Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft fatales Signal für die Innovations- und Investitionsbereitschaft, sowie für die notwendige forcierte Entwicklung von risikoärmeren und weltweit akzeptieren Alternativen. Weitere empirische und vergleichende Analysen (zum Beispiel Deutschland vs. Japan) sind notwendig, um dies These weiter zu erhärten.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass der wirtschaftliche Lock-in-Effekt und der Umfang des perspektivisch überflüssigen AKW-Bestandes in Japan als Innovations- und Investitionsbremse für risikoarme Alternativen wie Strom aus PV und Wind wirkt. Zwar gibt es Anzeichen dafür, dass der traditionell starke Einfluss der Nuklearindustrie auf die Politik nach dem Beginn der Katastrophe von Fukushima schwächer geworden ist (Koppenborg, 2021), verschwunden ist er jedoch keinesfalls. In ökonomischer Hinsicht erscheint die Wiederinbetriebnahme bestehender Nuklearkapazitäten offenbar im gesamtgesellschaftlichen Narrativ als plausibel. Es erfordert eine mutige und industriepolitisch vorausschauende Richtungsänderung der energiepolitischen Leitziele, die Transformationsresistenz des Nuklearsystems schrittweise zu beenden und den Weg für risikoarme Zukunftsenergien freizumachen. Falls die derzeit noch vergleichsweise hohen PV- und Windstrompreise in Japan sich dem internationalen Niveau annähern, könnten die Chancen für eine solche Richtungsänderung wachsen.

Hoffnung für die Ukraine?

Der Ausgangspunkt für diese Studie war Russlands Angriffskrieg gegen die Ukraine, auf den wir abschließend nochmal eingehen. Es bedeutet zweifellos eine enorme Herausforderung, während eines Krieges über alternative Energiepfade nachzudenken. Im Kontext unserer Analyse der Transformationsresistenz des Atomstromsystems ist es jedoch unerlässlich, diese Thematik zu diskutieren – insbesondere angesichts des tragischen Beispiels der Ukraine.

Namhafte Experten sehen in Terror und Krieg das Hauptargument gegen die Nutzung der Kernenergie (Heinrich-Böll-Stiftung, 2006). Die Zerstörung eines Kernkraftwerks, ob durch einen gezielten Angriff oder durch einen unbeabsichtigten militärischen Kollateralschaden, kann zu einer Freisetzung von Radioaktivität führen, die ein Vielfaches derjenigen des Tschernobyl-Unfalls erreicht, was zu großflächigen Evakuierungen, einem dramatischen Anstieg der Krebstodesfälle und einer langfristigen Verseuchung großer Gebiete führen würde.

Die Ukraine hat eine hochentwickelte Kernenergieinfrastruktur mit fünf AKWs und 15 Kraftwerksblöcke russischer Bauart, mit einer im Jahr 2023 installierten Nettoleistung von 13,1 GW (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2023; Duliba, 2023). Die meisten Reaktoren werden aktuell über ihre ursprünglich geplante Lebensdauer hinaus betrieben (Duliba, 2023). Obwohl die Ukraine 1986 den Reaktorunfall von Tschernobyl erlebte, sind ihre AKWs die größten Produzenten unter den

verschiedenen Stromerzeugungsquellen des Landes: Im Jahr 2022 machte Atomstrom etwa 60,8 % der Nettostromerzeugung aus. Erneuerbare Energien (Wasser, Wind, Solar) trugen nur 9,6 % bei (Fraunhofer ISE, 2023c).

Das AKW Saporischschja (ZNPP), das mit 5,7 GW das größte AKW Europas ist, wurde bereits im März 2022 von russischen Truppen besetzt – ein Kriegsszenario, das bisher noch nie vorgekommen ist (Smith, 2022). Auf dem Gelände befanden sich zu dem Zeitpunkt auch zahlreiche Zwischenlager für nukleare Brennstäbe, die sowohl in Kühlbecken als auch in Trockenbehältern aufbewahrt wurden (Hook & Marcantonio, 2022). Diese müssen zusätzlich zu den sechs Reaktoren und unzähligen anderen potenziell gefährlichen Materialien auf dem Gelände aktiv verwaltet und geschützt werden: *„Um die Anlage sicher betreiben zu können, müssen Management und Personal die Möglichkeit haben, ihre wichtigen Aufgaben unter stabilen Bedingungen und ohne unangemessene Einmischung oder Druck von außen zu erfüllen“*, wurde Rafael Grossi, der Direktor der International Atomic Energy Agency (IAEA) in einem Update zur Situation in der Ukraine zitiert (IAEA, 2022a). Der IAEA-Gouverneursrat äußerte ferner *„[...] große Besorgnis darüber, dass die Aggression der Russischen Föderation die Organisation daran hindert, [Aktivitäten zur Überprüfung der Sicherheit] in Übereinstimmung mit dem Nichtverbreitungsvertrag, dem ukrainischen Sicherheitsabkommen und der Satzung innerhalb ihrer international anerkannten Grenzen vollständig und sicher durchzuführen“* (eigene Übersetzung, IAEA, 2022b).

Durch militärische Operationen in der Nähe von nuklearen Anlagen kam es immer wieder zu besorgniserregenden Vorfällen, wie z. B. erhöhte Strahlungswerte in der Tschernobyl-Zone durch das Aufwühlen kontaminierter Erde durch schwere Panzerfahrzeuge. Ferner kam es zu kritischen Schäden durch Beschuss und Landminenexplosionen, wobei laut jüngstem Statusupdate eine Pufferzone zwischen der inneren und äußeren Umzäunung sowie Gebiete außerhalb der ZNPP-Anlage vermint sind (IAEA, 2023a). Die Zerstörung des Kachowka-Staudamms gefährdet die zukünftige Versorgung mit Kühlwasser aus dem Stausee. Grossi bewertet die Situation nach wie vor als *„[...] extrem fragil und gefährlich [da] die militärischen Aktivitäten in der Region weitergehen und in naher Zukunft noch erheblich zunehmen könnten“*¹⁶ und verweist im IAEA Bericht des Generaldirektors im Mai 2023 insbesondere auf die Zunahme militärischer Aktivitäten mit Marschflugkörpern und Luftfahrzeugen in unmittelbarer Nähe einiger betriebener AKWs (IAEA, 2023b). Saporischschja verlor dem Bericht zufolge an zwei Anlässen, am 9. März und am 22. Mai 2023, die gesamte externe Stromversorgung und war über 12 Wochen lang auf eine einzige externe Stromleitung für den benötigten Strom angewiesen. Die sieben Säulen der nuklearen Sicherheit und Sicherheit sind ständig gefährdet.

Ein Krieg in der Nähe von zivilen Kernreaktoren stellt eine neue hochriskante und beispiellose Situation dar: *„Diese Anlagen befinden sich jetzt in einer Situation, an die bei*

¹⁶ Videoprotokoll des Briefings zur Ukraine durch Rafael Grossi beim UN-Sicherheitsrat am 30. Mai 2023: media.un.org/en/asset/k16/k167pan4lu.

ihrem Bau kaum jemand ernsthaft gedacht hat, nämlich dass sie sich mitten in einem Kriegsgebiet befinden könnten. Kein Kernkraftwerk ist auf die Absicherung gegen einen umfassenden militärischen Angriff ausgelegt.“ (Edwin Lyman, zitiert nach Birnbaum, 2022).

Trotz dieser akuten Risiken einer Nuklearkatastrophe hält die offizielle Regierungspolitik der Ukraine langfristig an einem Atomstromanteil von 50 % fest. Dies schließt die Laufzeitverlängerung bestehender AKWs und den Bau neuer Reaktoren ein. Die ukrainische NGO Razom We Stand erklärt im Rahmen eines Berichts für die Frankfurter Rundschau wie folgt: „Politische und wirtschaftliche Eliten versuchten auch in der Ukraine, die Lebensdauer der Atomindustrie zu verlängern, ihr öffentliche Investitionen zuzuführen und einen Übergang zu sauberen Energien zu verzögern“ (Wille, 2023b). Die Aussage des ukrainischen Energieministers Herman Haluschtschenko gegenüber dem deutschen Bundeswirtschaftsminister Robert Habeck während dessen Besuch in Kiew am 30. April 2023, dass sein Land ein Gleichgewicht von jeweils 50 % Atomstrom und erneuerbaren Strom anstrebe, unterstreicht die Notwendigkeit einer kritischen Transformationsanalyse. Eine Studie über mögliche Szenarien der LUT University hatte bereits 2017 ermittelt, dass bis 2035 rund 90 % des ukrainischen Strombedarfs durch erneuerbare Stromerzeugung gedeckt werden könnte (Child et al., 2017). Eine neuere Studie von Chepeliev et al. (2023) zeigt, dass die Ukraine langfristig über ein ausreichendes Potential an erneuerbaren Energiequellen verfügt, um den eigenen Bedarf zu decken. Ein Verzicht auf neue große AKWs hätte keinen negativen Einfluss auf das Wirtschaftswachstum.

Zusammenfassend lässt sich beim derzeitigen Stand (Anfang Mai 2024)¹⁷ sagen: Die Ukraine hat die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl erfahren müssen, lebt aufgrund des Aggressionskrieges am Rande des potentiell größten SuperGAUs der zivilen Nukleargeschichte, verfügt über ausreichende Potentiale an Wind-, Sonnen-, Wasser-, Biomasse- und Geothermie-Energie, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit nach Beendigung des Krieges auf umfangreiche internationale Finanzhilfen für einen Strategiewechsel hin zu 100 % erneuerbaren Energien zählen, und hält dennoch an der Atomenergie fest.

Ein deutlicherer Nachweis für die potenziell tragischen Folgen der nuklearen Transformationsresistenz ist kaum vorstellbar.

Zusammenfassung

Ausgelöst durch die Energiepreiskrise in den Jahren 2022 und 2023 haben Stellungnahmen zugenommen, die die Kernenergie in Verbindung mit erneuerbaren Energien als wesentlichen Lösungsbeitrag für Klimaschutz und Energiesicherheit darstellen.

¹⁷ Der Tagesspiegel (06.Juni 2023) berichtete über diverse Planungen zur Erschließung von umfangreichen Potentialen für erneuerbare Energien (insbesondere Windkraft) in derzeit von der russischen Armee besetzten Gebieten im Süden der Ukraine; deren Erschließung hängt vom weiteren Kriegsverlauf ab, der derzeit nicht absehbar ist, siehe [background.tagesspiegel.de/energie-klima/windkraft-eldorado-der-ukraine-vor-der-offensive](https://www.tagesspiegel.de/energie-klima/windkraft-eldorado-der-ukraine-vor-der-offensive).

Empirische Evidenz zeigt jedoch rückblickend, dass eine gemeinsame, rasche Entwicklung von Kernenergie und erneuerbaren Energien selten ist und dass eher ein gegenseitiges Verdrängen oder Crowding-Out erfolgt. Bei einer näheren Untersuchung der Wirkungszusammenhänge ergeben sich für die Zukunft klare Indizien dafür, dass eine langfristige sozial-ökologische Transformation zur Klimaneutralität durch ein Festhalten an Atomstromerzeugung behindert und keinesfalls beschleunigt wird. Dieser Artikel nennt dies die Transformationsresistenz der Kernenergie.

Die Analyse der sozio-technischen Wirkungszusammenhänge von Kernenergie und sozial-ökologischer Transformation zur Klimaneutralität wird in diesem Debattenbeitrag erstmalig vorgenommen; sie sollte wegen der Komplexität der systemischen Fragestellung (konkret: hemmt oder fördert die Atomenergie den Klimaschutz?) weiter vertieft werden. Dabei kann an den Hemmnis-Analysen und Erfolgsfaktoren unter Berücksichtigung länderspezifischer Besonderheiten angeknüpft werden, für die diese Untersuchung erste Ergebnisse erbracht hat.

Das scheinbar plausibelste Argument zur Frage, ob Atomenergie den Klimaschutz fördert, ist die Tatsache, dass Atomkraftwerke selbst im Vergleich zu fossilen Kraftwerken kein CO₂ emittieren. Systemische Analysen zeigen jedoch, dass das technische CO₂-Reduktionspotential eines einzelnen Atomkraftwerks keine Aussage darüber zulässt, wieviel ein reales Atomstromsystem zum Klimaschutz beiträgt oder ob es eher ambitionierten Klimaschutz durch forcierte Nutzung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz behindert.

Ein Indikator des vollständig erlahmten globalen Ausbaus der Atomstromerzeugung ist, dass seit der Jahrtausendwende die Atomstromerzeugung stagniert, während erneuerbare Stromerzeugung (aus Wind und Sonne) schnell exponentiell ansteigt und bereits 2019 die globale Atomstromerzeugung überholt hat. Von einer parallelen Ausbaudynamik kann daher keine Rede sein. Selbst in globalen Klimaschutz-Szenarien, die den Ausbau der Atomstromproduktion stark favorisieren, liegt der maximal erreichbare Anteil am Strommix 2050 nur zwischen 8 % bis 14 %. Die Frage stellt sich daher: Warum nicht alle Kraft auf den weit größeren Lösungsbeitrag (86 % bis 92 %) eines konsensualen Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung und auf die Vermeidung von Energieverbrauch durch Effizienz- und Suffizienz-Strategien zu konzentrieren, statt sich mit dem immanenten Dissens und den Risiken des Atomstromsystems weiter zu befassen?

Es hat sich gezeigt, dass die von interessierter Seite immer wieder angefeuerten gesellschaftlichen Kontroversen über eine scheinbare „Zukunft der Atomenergie“ bei Unternehmen und Politik lediglich als verunsichernde Innovations- und Investitionsblockaden wirken. Unternehmen, die heute ein Kernkraftwerk bauen, binden privates Kapital, öffentliche Ressourcen sowie energiepolitische Aufmerksamkeit und Verantwortung für mehr als ein Jahrhundert. Die damit ebenfalls über extrem lange Zeiträume verbundenen gesellschaftlichen Risiken machen Atomkraft zu einer Hochrisikotechnologie mit – im Vergleich zu grünem Strom und Energiesparen – unlösbaren Akzeptanzprobleme.

Die behauptete problemlose Koexistenz von Atomkraftsystem und erneuerbaren Energien ist bereits für die Vergangenheit strittig und behindert aktuell und zukünftig ambitionierte Reduktionsziele zur Klimaneutralität.

Ein entscheidender ökonomischer Grund hierfür ist, dass es heute im Vergleich zu neuen Atomkraftwerken weit kostengünstigere und in Bezug auf den Klimaschutz weit schneller wirksame grüne Stromangebots- und kosteneffektivere Stromspar-technologien gibt. Die Kostendifferenz zwischen steigenden Kosten der Atomstromerzeugung und sinkenden Kosten für Schlüsseltechnologien im erneuerbaren Bereich (Wind, Sonne, Batterien) wird sich absehbar weiter vergrößern. Das gilt insbesondere dann, wenn die heute externalisierten Kosten des Atomstromsystems, wie z. B. die exorbitanten Schäden eines großen Reaktorunfalls oder der Betrieb von Endlagern, berücksichtigt werden.

Ein steigender Anteil erneuerbarer Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV) und Wind, macht zudem zusammen mit Flexibilitätsoptionen zur Sicherung der Versorgungssicherheit grundlastorientierte Kraftwerke zunehmend obsolet, sofern der Strom aus PV und Wind sinnvollerweise vorrangig in das Netz eingespeist wird. Die stark schwankende und beim Ausbau grüner Stromerzeugung weiter abnehmende Residuallast (notwendiges restliche Stromangebot nach Abzug der erneuerbaren Stromerzeugung) macht insbesondere grundlastorientierte Atomkraftwerke zunehmend unwirtschaftlich. Betreiber von Atomkraftwerken haben daher ein starkes Motiv, die Markteinführung der erneuerbaren Konkurrenztechnologien zu verhindern.

Für Deutschland besteht heute in wissenschaftlicher Hinsicht und ausweislich einer Vielfalt vorliegender Szenarien kein Zweifel mehr daran, dass technisch bis 2045 ein fossil- und nuklear-freies Energiesystem möglich ist. Starkes Energie- und Stromsparen bei Eindämmung von Rebound Effekten und Strategien gerechter Suffizienz-Politik, sowie der systematischen Kreislaufführung von Ressourcen im Rahmen einer *Circular Economy* eröffnen zusätzliche risikoarme und gesellschaftlich attraktive Freiheitsräume.

Zur weiteren Untermauerung der These der Transformationsresistenz sollten relevante Länderbeispiele systematischer auf hemmende Faktoren untersucht werden, als es in diesem Papier möglich war. Für die hier behandelten Fallbeispiele Japan und Frankreich mit ihrer extremen Atomstromabhängigkeit liegen Klimaschutzszenarien mit 100 % erneuerbarem Strom bis 2050 vor. In Japan ist es die Insellage und in Frankreich die unauflösbare Verkettung von militärischen und zivilen Atominteressen, die als besondere landesspezifische Transformationshemmnisse wirken. Da der hohe Atomstromanteil Frankreichs immer wieder als scheinbar erfolgreicher Referenzfall dargestellt wird, soll der Kritik dieser Legende in diesem Papier ein besonderer Schwerpunkt eingeräumt werden.

Insgesamt wird im vorliegenden Beitrag deutlich, dass die aufgezeigte Transformationsresistenz der Atomenergie weit über den technischen und wirtschaftlichen Rahmen des Stromsystems hinausgeht. Sie berührt zentrale gesellschaftliche, politische und ökologische Bereiche. Aktuell zeigt das Beispiel der Ukraine drastisch für den Kriegsfall die potenziell katastrophalen Konsequenzen des Beharrens auf atomarer Energieproduktion trotz nachgewiesener Risiken und klarer Alternativen auf.

Diese Erkenntnisse sollten als Weckruf für Entscheidungsträger:innen auf allen Ebenen dienen. Die drängende Notwendigkeit einer Energieumstellung auf erneuerbare Quellen, die Forcierung der Energieeffizienz, unterstützende Maßnahmen durch Sufizienz-Politik und von Strategien der Kreislaufwirtschaft tangieren nicht nur Fragen der Umweltverträglichkeit und der Energieunabhängigkeit. Es handelt sich um Fragen der nationalen und globalen Sicherheit und politischen Stabilität, die nicht nur Länder mit bestehenden oder geplanten Kernenergiekapazitäten betreffen.

Insofern ist die dargestellte hemmende Wirkung des Nuklearsystems und dessen systemische, langfristige Transformationsresistenz hinsichtlich der Erreichbarkeit von Klimaneutralität keineswegs ein Signal für Pessimismus oder Resignation, sondern für eine entschiedene Richtungsänderung der energiepolitischen Leitziele. Die für die drei Länderbeispiele dargestellte Strategieoption einer 100 % erneuerbaren Energiezukunft ist nachgewiesen.

Der oft negativ konnotierte deutsche Sonderweg eines Kernenergieausstiegs kann sich unter innovativen und beschleunigenden Rahmenbedingungen als Turbo für die sozial-ökologische Transformation erweisen. Ob und gegebenenfalls wie derzeit auf Kernenergie fokussierte Länder wie Frankreich, Japan oder gerade auch die Ukraine ihre geschaffene Abhängigkeit von Kernenergie abbauen und den Weg für ein risikoarmes, dekarbonisiertes Zukunftsenergiesystem ebnen können, ist ein aufwendigeres, aber lösbares Problem. Die Lösung wird jedoch teurer und schwieriger, je länger an der Kernenergieoption festgehalten wird.

Literatur

- Agence de la transition écologique (ADEME). (2015). Un mix électrique 100% renouvelable? Analyses et optimisations: Un travail d'exploration des limites du développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain à un horizon 2050. ADEME. expertises.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport_final.pdf
- Arai, J. (2022). Japan reverts to wider nuclear power use in net-zero emissions push. asia.nikkei.com/Business/Energy/Japan-reverts-to-wider-nuclear-power-use-in-net-zero-emissions-push.
- Arbeitsgruppe Alternative Wirtschaftspolitik. (2023). *Memorandum 2023: Globalisierung am Ende – Zeit für Alternativen*. PapyRossa Verlag.
- ARD. (2023, Mai 11). Alarmstufe Rot in Südf frankreich. www.tagesschau.de/ausland/europa/trockenheit-suedfrankreich-100.html
- Autorité de Sureté Nucléaire, ASN. (2022). L'ASN modifie temporairement ses prescriptions encadrant les rejets thermiques des centrales nucléaires de Blayais, Bugey, Golfech, Saint-Alban et Tricastin. www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/modification-temporaire-des-prescriptions-encadrant-les-rejets-thermiques-de-5-centrales-nucleaires
- Barnert, H., Freier, W., Borsch, P., Fuchs, G., Hüper, R., Meliß, M., Kleemann, M., Eidens, J., Münch, E., Schulten, R., Wagner, H., Geiß, H., Heusener, G. & Paschke, M. (1984). *Perspektiven der Kernenergie*. Vorträge eines Seminars. Jülich, 1979. Berichte der Kernforschungsanlage Jülich GmbH. [juser.fz-juelich.de/record/884713/files/Jül_Conf_0032.pdf](https://www.juelich.de/record/884713/files/Jül_Conf_0032.pdf)
- Bartz, D. & Stockmar, E. (2018). *Energy Atlas 2018. Facts and figures about renewables in Europe*. www.boell.de/sites/default/files/energyatlas2018_facts-and-figures-renewables-europe.pdf
- Bechmann, G. (1997). *Risiko und Gesellschaft: Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Birnbaum, M. (2022, March 4). The Ukraine power plant fire was contained. But nuclear experts fear what's to come in Russia's war. *Washington Post*. www.washingtonpost.com/world/2022/03/04/nuclear-power-plants-ukraine/
- Bischoff, J. (2022). *Statistische Modellierung der CO₂-Reduktion durch den Einsatz von nicht fossilen Energiequellen*. Bachelorarbeit. Mannheim.

- BMK (2020). www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nuklearpolitik/aikk/warum.html
- bp. (2022). *Statistical Review of World Energy*. www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf
- Energy Institute (2023). [Datensatz]. In *Statistical Review of World Energy*. www.energyinst.org/_data/assets/excel_doc/0007/1055545/EI-stats-review-all-data.xlsx
- Brunnengräber, A. (2021). *Vom starken zum weichen Atomstaat*. Transcript Verlag. S. 61–78. doi: 10.1515/9783839456682-005
- Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). (2021). Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors) (BASE-001/21). www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/gutachten-small-modular-reactors.pdf
- Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). (2023). *Endlagersuche in Frankreich*. www.base.bund.de/DE/themen/soa/endlager-weltweit/frankreich/frankreich_node.html
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). (2020). *Rechtsgutachten bestätigt: Kernenergie ist keine „grüne“ Investition*. www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nuklearpolitik/aikk/warum.html#zum-rechtsgutachten
- Charpin, J.-M., Dessus, B. & Pellat, R. (2000). *Economic forecast study of the nuclear power option: Report to the Prime Minister*. fissilematerials.org/library/cha00.pdf
- Chepeliev, M., Diachuk, O., Podolets, R. & Semeniuk, A. (2023). What is the future of nuclear power in Ukraine? The role of war, techno-economic drivers, and safety considerations. *Energy Policy*, 178, 113612. doi: 10.1016/j.enpol.2023.113612
- Child, M., Breyer, C., Bogdanov, D. & Fell, H. (2017). The role of storage technologies for the transition to a 100% renewable energy system in Ukraine. *Energy Procedia*, 135, 410–423. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.513
- Circular Economy Initiative Deutschland. (2021). *Circular Economy Roadmap für Deutschland*. Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften & SYSTEMIQ Ltd. www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/
- CLEVER (2023). *Climate neutrality, energy security and sustainability: A pathway to bridge the gap through sufficiency, efficiency and renewables*. clever-energy-scenario.eu
- Cour des Comptes. (2012). *Die Kosten der Kernenergie*. www.ccomptes.fr/sites/default/files/Ez_Publish/Die_Kosten_der_Kernenergie_thematischer_Bericht_012012.pdf
- Cour des Comptes. (2016). *Le rapport public annuel 2016 – les observations*. www.ccomptes.fr/fr/publications/le-rapport-public-annuel-2016
- Cour des Comptes. (2023). *Apprécier la Contribution de la Dépense Publique à la Transition Écologique*. www.ccomptes.fr/system/files/2023-07/20230707-note-thematique-Apprecier-contribution-depense-publique-a-transition-ecologique.pdf
- Cour des Comptes (2023). *L'adaptation au changement climatique du parc des réacteurs nucléaires*. www.ccomptes.fr/system/files/2023-03/20230321-Adaptation-du-parc-de-reacteurs-nucleaires-au-changement-climatique_0.pdf
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW). (2021). *Wochenbericht 47 / 2021*. DIW Berlin. www.diw.de/de/diw_01.c.830217.de/publikationen/wochenberichte/2021_47/heft.html
- Duliba, Y. (2023). Nuclear safety: a global challenge in the context of the war in Ukraine. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 41, 321–333. doi: 10.1080/02646811.2022.2145018
- Electricité de France (EDF). (2021). *Consolidated financial statements*. www.edf.fr/sites/groupe/files/2022-02/annual-results-2021-consolidated-financial-statements-20220218.pdf
- Electricité de France (EDF). (2022). *Bilan des réponses écosystémiques observées sur le parc en situation de canicule*. www.asn.fr/content/download/190654/file/Bilan%20des%20réponses%20écosystémiques%20observées%20sur%20le%20parc%20en%20situation%20de%20canicule%20-%20EDF.pdf
- Electricité de France (EDF). (2022b). *Facts and Figures 2022*. www.edf.fr/sites/groupe/files/2023-05/annual-results-2022-facts-and-figures-en-2023-05-16.pdf
- EURACTIV. (2023). *Paris will Suffizienz-Konsumverhalten in der Energiewende verankern*. www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/paris-will-suffizienz-konsumverhalten-in-der-energie-wende-verankern/
- European Environment Agency (EEA). (2023). *Water abstraction by economic sector, 2000–2019 (ID 1387627) [Datensatz]*. www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/water-abstraction-by-economic-sector-1/#tab-chart_6
- Eurostat. (2023). *Abhängigkeit von Energieimporten nach Produkten (SDG_07_50) [Datensatz]*. ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IDND_ID_custom_7043811/default/table?lang=de
- Fell, H., Gilbert, A. Q., Jenkins, J. J. & Mildenerger, M. (2022). Nuclear power and renewable energy are both associated with national decarbonization. *Nature Energy*, 7, 25–29. doi: 10.1038/s41560-021-00964-w
- Fraunhofer ISE. (2023a). *Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Finnland in den Jahren von 2021 bis 2022*. de.statista.com/statistik/

- [daten/studie/182182/umfrage/struktur-der-bruttostromerzeugung-in-finnland/](#)
Fraunhofer ISE. (2023b). *Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Schweden in den Jahren von 2021 bis 2022*. [de.statista.com/statistik/daten/studie/182181/umfrage/struktur-der-bruttostromerzeugung-in-schweden/](#)
- Fraunhofer ISE. (2023c). *Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in der Ukraine in den Jahren von 2021 bis 2022*. [de.statista.com/statistik/daten/studie/1292323/umfrage/struktur-der-stromerzeugung-in-der-ukraine/](#)
- German Japanese Energy Transition Council (GJETC). (2022). *Key strategies towards decarbonization of energy use and supply in Japan and Germany: Insights from a comparison study on long-term scenario analyses up to 2050*. [gjetc.org/wp-content/uploads/2022/06/GJETC_Scenario-study.pdf](#)
- German Japanese Energy Transition Council (GJETC). (2023). *Comparing the basic strategies of Japan and Germany against the energy crisis while aiming to achieve their climate mitigation goals*. [gjetc.org/wp-content/uploads/2023/05/Topical-Paper-Crisis-Reaction_Final.pdf](#)
- Göke, L., Wimmers, A. & von Hirschhausen, C. (2023). Economics of nuclear power in decarbonized energy systems. arXiv (Cornell University). doi: 10.48550/arxiv.2302.14515
- Göllinger, T. (2017). Übersicht und Systematik zu Skaleneffekten von Energietechnologien – Theoretisch-konzeptionelle Grundlagen. In *Arbeitspapiere des Instituts für ökologische Betriebswirtschaft*, 64. doi: 10.13140/RG.2.2.33276.44160
- Göß, S. (2022). Zwei ungleiche Energiesysteme: Frankreich und Deutschland im Vergleich. Energy BrainBlog – Blog by Energy Brainpool GmbH & Co. KG. [blog.energybrainpool.com/energiesysteme-vergleich-frankreich-deutschland/](#)
- Grubler, A. (2010). The costs of the French nuclear scale-up: a case of negative learning by doing. *Energy Policy*, 38, 5174–5188. doi: 10.1016/j.enpol.2010.05.003
- Grünwald, R. (2016). Wie flexibel können Kernkraftwerke betrieben werden? *TAB-Brief*, 47, 52. [www.itas.kit.edu/downloads/tab-brief/tb047_grue16a.pdf](#)
- Hecht, G. (2009). The radiance of France: Nuclear power and national identity after World War II. doi: 10.7551/mitpress/7822.001.0001
- Heinrich-Böll-Stiftung (Hrsg.) (2006). *Mythos Atomkraft. Ein Wegweiser*. Berlin
- Hennicke, P. (1999). *Wa(h)re Energiedienstleistung: Ein Wettbewerbskonzept für die Energieeffizienz- und Solarenergiewirtschaft*. Birkhäuser Basel.
- Hennicke, P., Samadi, S. & Schleicher, T. (2011). Ambitionierte Ziele – untaugliche Mittel: deutsche Energiepolitik am Scheideweg: Hintergrundpapier der Vereinigung Deutscher Wissenschaftler (VDW) zur Energie- und Klimapolitik in Deutschland 2010. Vereinigung deutscher Wissenschaftler e.V.
- Hennicke, P., Rasch, J., Schröder, J. & Lorberg, D. (2019). *Die Energiewende in Europa*, Oekom München
- Hook, K. & Marcantonio, R. (2022). Grappling with environmental risks in the fog of war. *Bulletin of the Atomic Scientists*. [thebulletin.org/2022/03/grappling-with-environmental-risks-in-the-fog-of-war/](#)
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023). [pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=UA](#)
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2022a). *Update 13 – General statement on situation in Ukraine*. [www.iaea.org/newscenter/press-releases/update-13-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine](#)
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2022b). *Beschluss der 1613. Sitzung am 3. März 2022*.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023a). *Update 175 – Director General Statement on Situation in Ukraine*. [www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-175-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine](#)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157940.001
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the global energy sector*. [iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-AroadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf](#)
- International Energy Agency (IEA). (2022). *World energy balances* [Datensatz]. [www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights](#)
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Public RD&D spending in million* [Datensatz]. In *Energy Technology RD&D Budgets: Tracking trends in spending by energy technology in IEA countries back to 1974 (2023 edition)*. [www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-technology-rd-and-d-budget-database-2](#)
- Jakat, L. (2011, März 18). Katastrophe mit beschränkter Haftung: Versicherungsrisiko AKW. *Süddeutsche Zeitung*. [www.sueddeutsche.de/](#)

- wirtschaft/versicherung-der-kernkraft-mal-die-betreiber-zahlen-lassen-1.1074008
- Jungk, R. (2016). *Der Atom-Staat: Vom Fortschritt in die Unmenschlichkeit*. Rowohlt Verlag.
- Klafka, P., Hennicke, P., Hirschhausen C. (2024). Keypoint Kernkraft: Energiewirtschaft. (In Vorbereitung.)
- Koppenborg, F. (2021). Nuclear restart politics: How the 'Nuclear Village' lost policy implementation power. *Social Science Japan Journal*, 24, 115–135. doi: 10.1093/ssjj/jyaa046
- Lazard. (2023). *Lazard's levelized cost of energy analysis – Version 16.0*. www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/
- Lehtonen, M. (2022). Brand new or more of the same nuclear? (De)Constructing the economic promise of the European Pressurised Reactor in France and the UK. *Science as Culture*, 32, 29–57. doi: 10.1080/09505431.2022.2087505
- LUT University, Agora Energiewende & Renewable Energy Institute. (2021). Renewable pathways to climate-neutral Japan: Reaching zero emissions by 2050 in the Japanese energy system (RRSN 121). static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_03_JP_2050_study/2021_LUT-Agora-REI_Renewable_pathways_Study.pdf
- Masuhr, K. P., Wolff, H. & Keppler, J. (1992). *Die externen Kosten der Energieversorgung*. Schäffer-Poeschel.
- Münzinger, F. (1957). *Atomkraft*. Springer. doi: 10.1007/978-3-642-53054-8
- Naito, H. & Iwasawa, S. (2023, Mai 10). Power companies increasingly seek to limit outside energy output. *Asahi Shimbun*. www.asahi.com/ajw/articles/14904595
- NDR. (2023, April 15). *Atomkraft: Abstieg und Ende einer als „sauber“ gefeierten Energie*. www.ndr.de/geschichte/chronologie/Atomkraft-Abstieg-und-Ende-einer-als-sauber-gefeierten-Energie,antiakw2.html
- négaWatt Association. (2017). *The 2017–2050 négaWatt Scenario: Executive Summary*. negawatt.org/IMG/pdf/negawatt-scenario-2017-2050_english-summary.pdf
- Omri, E. & Saadaoui, H. (2022). An empirical investigation of the relationships between nuclear energy, economic growth, trade openness, fossil fuels, and carbon emissions in France: Fresh evidence using asymmetric cointegration. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 13224–13245. doi: 10.1007/s11356-022-22958-1
- Pauliuk, S., Heeren, N., Berrill, P., Fishman, T., Nistad, A., Tu, Q., Wolfram, P. & Hertwich, E. G. (2021). Global scenarios of resource and emission savings from material efficiency in residential buildings and cars. *Nature Communications*, 12. doi: 10.1038/s41467-021-25300-4
- Präger, F., Brunnengräber, A., von Hirschhausen, & C., (2023). Atomwende? Ja bitte. *GAIA*, 32, 86–90
- Renewable Energy Institute (REI). (2022). *France's nuclear power. Current difficulties, new policies, and 100 % renationalization*. www.renewable-ei.org/en/activities/column/REUpdate/20220823.php
- Renewable Energy Institute (REI). (2023). *Proposal for the 2035 energy mix (First Edition): Toward decarbonizing electricity with renewable energy*. www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_2035_study_EN.pdf
- Rothwell, G. (2022). Projected electricity costs in international nuclear power markets. *Energy Policy*, 164, 112905. doi: 10.1016/j.enpol.2022.112905
- Réseau de Transport d'Electricité (RTE). (2023). *Bilan prévisionnel – édition 2023*. assets.rte-france.com/prod/public/2023-03/2023-03-01-bilan-previsionnel-2023-consultation-publique-synthse.pdf
- Rummich, E. (1978). *Nichtkonventionelle Wärmeübertragung (nukleare Fernwärme)*. In *Nichtkonventionelle Energienutzung*. Springer. doi: 10.1007/978-3-7091-8519-3_31
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). (2024). *Suffizienz als „Strategie des Genug“: Eine Einladung zur Diskussion*. www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2024_03_Suffizienz.html
- Saheb, Y. (2022, Juli 30). Reducing energy sufficiency to individual behaviors would be a grave error. *Le Monde*. www.lemonde.fr/en/opinion/article/2022/07/30/limiting-energy-sufficiency-to-changing-individual-behaviors-would-be-a-grave-error_5991978_23.html
- Samadi, S. (2022). *Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland*. SCI4climate.NRW. www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2022/SCI4climate.NRW-Samadi-2022-Vergleich-aktueller-Klimaschutzszenarien-fu_r-Deutschland.pdf
- Schneider, M. (2010). Nuclear power made in France: A model? In *Nuclear power's global expansion: Weighing its costs and risks*. Strategic Studies Institute, US Army War College. npolicy.org/wp-content/uploads/2021/09/Nuclear-Power-Made-in-France-A-Model.pdf
- Schneider M. (2023). Persönliche Kommunikation.
- Schneider, M. & Froggatt, A., Hazemann, J., Ramana, M.V., Sailer, M., Suzuki, T., von Hirschhausen, C., Wimmers, A.J, Stienne, A. & Meinass, F. (2023). *The World Nuclear Industry Status Report 2022*. In *World Nuclear Industry Status Report (WNISR)* (Nr. V3–02/2023). www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-v3-lr.pdf
- Simoes A. & Hidalgo, C.A. (2023). *Economic Complexity Observatory* (OEC). oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/fra/all/show/2021/

- Smith, D. C. (2022). Playing with fire: Military attacks against a civilian nuclear power station. *Journal of energy and natural resources law*, 40, 159–164. doi: 10.1080/02646811.2022.2057727
- Société française d'énergie nucléaire (Sfen). (2022). Financing France's new nuclear build: Designing a financing model that guarantees competitive electricity in France.
- Société française d'énergie nucléaire (Sfen). (2023). *Combien d'eau consomment les centrales nucléaires?: www.sfen.org/wp-content/uploads/2023/06/Combien_deau_consomment_les_centrales_nucleaires_Sfen_2023V2.pdf*
- Sovacool, B. K., Schmid, P., Stirling, A., Walter, G. & MacKerron, G. (2020). Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power. *Nature Energy*, 5, 928–935. doi: 10.1038/s41560-020-00696-3
- Sovacool, B. K., Schmid, P., Stirling, A., Walter, G., & MacKerron, G. (2022). Reply to: Nuclear power and renewable energy are both associated with national decarbonization. *Nature Energy*, 7, 30–31. doi: 10.1038/s41560-021-00965-9
- Steigerwald, B., Weibezahn, J., Slowik, M. & von Hirschhausen, C. (2023). Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors. *Energy*, 281, 128204. doi: 10.1016/j.energy.2023.128204
- Stuart, C. (2017). *The French exception: The French nuclear power industry and its influence on political plans to transition to a new energy system*. van Ness, P. & Gurtov, M. (eds.). *Learning from Fukushima. Nuclear power in East Asia*.
- Umweltbundesamt (UBA). (2022). EU-Taxonomie: Atomkraft und Erdgas sind nicht nachhaltig. www.umweltbundesamt.de/themen/eu-taxonomie-atomkraft-erdgas-sind-nicht-nachhaltig
- Wealer, B., Breyer, C., Hennicke, P., Hirsch, H., von Hirschhausen, C., Klafka, P., Kromp-Kolb, H., Präger, F., Steigerwald, B., Traber, T., Baumann, F., Herold, A., Kemfert, C., Kromp, W., Liebert, W. & Müschen, K. (2021). Kernenergie und Klima. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 9, 1–98. doi: 10.5281/zenodo.5573719
- Vereinte Nationen. (2020). *Weltwasserbericht 2020*. www.unesco.de/kultur-und-natur/wasser-und-ozeane/un-weltwasserbericht-2020-wasser-und-klimawandel
- Wiatros-Motyka, M., Fulghum, N., & Jones, D. (2023). *EMBER global electricity review 2023*. ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/#supporting-material
- Wille, J. (2023, Juni 13). Atomkraft in Frankreich: Macrons nukleare Hoffnungen, *Frankfurter Rundschau*. www.fr.de/wirtschaft/atomkraft-in-frankreich-macrons-nukleare-hoffnungen-92339025.html
- Wille, J. (2023, April 13). Warum der Atomausstieg kein deutscher Sonderweg ist. *Frankfurter Rundschau*. www.fr.de/politik/warum-der-atomausstieg-kein-deutscher-sonderweg-ist-92206583.html
- Wille, J. (2023, Juni 1). Sorge nicht nur um Saporischschja: Ukraine setzt auf Atomkraft - und erntet nun Widerstand. *Frankfurter Rundschau*. www.fr.de/politik/klima-ukraine-saporischschja-atomkraft-akw-ngo-regierung-widerstand-co2-92309671.html
- Wimmers, A., Böse, F., Kemfert, C., Steigerwald, B., von Hirschhausen, C., & Weibezahn, J. (2023). Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen. *DIW Wochenbericht*, 10, 111–121. doi: 10.18723/diw_wb:2023-10-1
- World Nuclear Association (WNA). (2023). *Financing nuclear energy*. world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/financing-nuclear-energy.aspx
- WNIRS. (2022). *World nuclear industry status report 2022*. www.worldnuclearreport.org/-/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2022-.html
- WNIRS. (2023). *World nuclear industry status report 2023*. www.worldnuclearreport.org/-/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2023-.html
- World Nuclear Association. (2023). *Nuclear power in Japan*. world-nuclear.org/focus/fukushima-daiichi-accident/japan-nuclear-power.aspx
- Wuppertal Institut & Institute of Energy Economics, Japan (IEE). (2018). *GJETC Report 2018: Intensified German-Japanese cooperation in energy research: Key results and policy recommendations*. epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7916/file/7916_GJETC.pdf
- Yon, G. (2020). Building a national machine. *History of political economy*, 52, 245–269. doi: 10.1215/00182702-8718035
- ZDF (2022, November 10). Atommüll-Endlager: Ziel 2031 nicht haltbar. *Zweites Deutsches Fernsehen*. www.zdf.de/nachrichten/politik/atommuell-endlager-ziel-2031-verfehlt-100.html
- Zimmermann, F. & Keles, D. (2022). State or market: Investments in new nuclear power plants in France and their domestic and cross-border effects. *Energy Policy*, 173, 113403. doi: 10.1016/j.enpol.2022.113403

Hennicke et al. (2024). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future 17*, doi:10.5281/zenodo.11406367

Rolle der Autor:innen: Peter Hennicke (korrespondierender Autor) und Anna Röttger haben den Text konzipiert und wesentliche Teile geschrieben; Fabian Präger und Christian von Hirschhausen haben zu den Diskussionen beigetragen, Literatursichtung durchgeführt und Diskussionen in der Fachgruppe „Kernenergie“ der S4F koordiniert.

Danksagungen: Wir danken Gregor Hagedorn, Achim Brunnengräber, Franz Ossing, Mycle Schneider und Stefan Thomas für inhaltliche und sprachliche Verbesserungsvorschläge.

Schlagwörter: Kernenergie, erneuerbare Energie, Klimaschutz, Dekarbonisierung, Verdrängung, Investitionsbarriere, globale Sicherheit, Transformationsresistenz

Key words: Nuclear Energy, Renewable Energy, Climate Change Mitigation, Decarbonisation, Crowding-out, Barriers to Investment, Global Security, Drag to Transformation

Dieser Text wurde von Wissenschaftler:innen verfasst, die sich im Rahmen der „Scientists for Future engagieren und stellt die Sichtweise der Autor:innen, nicht aber aller bei Scientists for Future aktiven Wissenschaftler:innen dar. Er wurde von unabhängigen Fachexpert:innen (sowohl aus S4F als extern) hinsichtlich seiner wissenschaftlichen Qualität und Belegbarkeit seiner Argumente positiv begutachtet. Verantwortliche Herausgeber:innen der »Diskussionsbeiträge der Scientists for Future« sind: Claus-Heinrich Daub, Kirsten von Elverfeldt, Gregor Hagedorn, Clara Herdeanu, Sven Linow, Bernhard Steinberger und Christina West. Wenn einzelne Personen gleichzeitig Autor:innen sind, nehmen sie an Entscheidungen über die Veröffentlichung nicht teil.

*Scientists for Future (S4F) ist ein überparteilicher und überinstitutioneller Zusammenschluss von Wissenschaftler*innen, die sich für eine nachhaltige Zukunft engagieren. Scientists for Future bringt 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.*

Redaktion: Sven Linow.

© Peter Hennicke, Anna Röttger, Fabian Präger, Christian von Hirschhausen, CC BY-SA 4.0

Einige Veröffentlichungen im Rahmen von Scientists for Future

Diskussionsbeiträge der Scientists for Future

- 1: (Die erste Stellungnahme 2019 wurde als Nummer 1 der Diskussionsbeiträge gewertet: doi: [10.14512/gaia.28.2.3](https://doi.org/10.14512/gaia.28.2.3))
- 2: (Version 1.1 der folgenden Publikation aus dem Jahr 2019, siehe doi: [10.5281/zenodo.3371150](https://doi.org/10.5281/zenodo.3371150))
- 3: Mattauch, L., Creutzig, F., Moore, N. aus dem, Franks, M., Funke, F., Jakob, M., Sager, L., Schwarz, M., Voß, A., Beck, M.-L., Daub, C.-H., Drupp, M., Ekaradt, F., Hagedorn, G., Kirchner, M., Kruse, T., Loew, T., Neuhoﬀ, K., Neuweg, I., ... Wallacher, J. (2020). Antworten auf zentrale Fragen zur Einführung von CO₂-Preisen (Version 2.0) – Gestaltungsoptionen und ihre Auswirkungen für den schnellen Übergang in die klimafreundliche Gesellschaft. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 3, 1–41. doi: [10.5281/zenodo.3644498](https://doi.org/10.5281/zenodo.3644498)
- 4: (Version 1.0 der folgenden Publikation, siehe doi: [10.5281/zenodo.4311486](https://doi.org/10.5281/zenodo.4311486))
- 5: Hagedorn, G., Baasch, S., Blöbaum, A., Brendel, H., Hardt, J. N., Heiland, S., Klinsmann, M., Matthies, E., Pfennig, A., West, C., Wipfler, B., Altermatt, P. P., Baumgarten, S., Bergmann, M., Brendel, E., van Bronswijk, K., Creutzig, F., Daub, C.-H., Dohm, L., ... Weber, U. (2021). Scientists for Future empfiehlt eine repräsentative Klima-Bürger:innenversammlung im Jahr 2021 / Scientists for Future recommends a representative Climate Citizens' Assembly in 2021 (Version 1.1). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 5, 1–23. doi: [10.5281/zenodo.4417265](https://doi.org/10.5281/zenodo.4417265)
- 6: Brauers, H., Braunger, I., Hoffart, F., Kemfert, C., Pao-Yu, O., Präger, F., Schmalz, S., & Troschke, M. (2021). Expansion of natural gas infrastructure: A bridge technology or a liability for the energy transition? (Version 1.1, English). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 6 (2). doi: [10.5281/zenodo.4536573](https://doi.org/10.5281/zenodo.4536573)
- 7: Gerhards, C., Weber, U., Klafka, P., Golla, S., Hagedorn, G., Baumann, F., Brendel, H., Azar, C., Burchardt, J., Creutzig, F., Daub, C.-H., Helmling, S., Hentschel, K.-M., von Hirschhausen, C., 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. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 7, 1–55. doi: [10.5281/zenodo.4409334](https://doi.org/10.5281/zenodo.4409334)
- 8: Gründinger, W., Bendlin, L., Creutzig, F., Hagedorn, G., Kemfert, C., Neumärker, B., Praetorius, B., & Tvrtković, M. (2021). CO₂-Bepreisung und soziale Ungleichheit in Deutschland (Carbon Pricing and Social Equity in Germany) (PREPRINT). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 8, 1–18. doi: [10.5281/zenodo.5446167](https://doi.org/10.5281/zenodo.5446167) (Publiziert in *Momentum Quarterly*, 10 (1), 176–187, momentum-quarterly-journal.uibk.ac.at/momentum/article/view/3888/2915)
- 9: Wealer, B., Breyer, C., Hennicke, P., Hirsch, H., von Hirschhausen, C., Klafka, P., Kromp-Kolb, H., Präger, F., Steigerwald, B., Traber, T., Baumann, F., Herold, A., Kemfert, C., Kromp, W., Liebert, W., & Müschen, K. (2021). Kernenergie und Klima. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 9, 1–98. doi: [10.5281/zenodo.5573719](https://doi.org/10.5281/zenodo.5573719)
- 10: Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Ehmler, H., Gerhards, C., Golla, S., Hentschel, K.-M., Hoffmann, R., Hagedorn, G., Jordan, U., Kemfert, C., Linow, S., Oei, P.-Y., Stöhr, M., Valdivia, L., & Weber, U. (2022). Wärmewende beschleunigen, Gasverbrauch reduzieren. Ein Kurzpuls. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 10, 1–17. doi: [10.5281/zenodo.6363715](https://doi.org/10.5281/zenodo.6363715)
- 11: Wealer, B., Breyer, C., Hennicke, P., Hirsch, H., von Hirschhausen, C., Klafka, P., Kromp-Kolb, H., ... Müschen, K. (2022). La energía nuclear y el clima. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 11, 1–27. doi: [10.5281/zenodo.7265012](https://doi.org/10.5281/zenodo.7265012)
- 12: Linow, S., Bijma, J., Gerhards, C., Hickler, T., Kammann, C., Reichelt, F., Scheffran, J. (2022). Kurzpuls – Perspektiven auf negative CO₂-Emissionen. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 12, 1–19. doi: [10.5281/zenodo.7392348](https://doi.org/10.5281/zenodo.7392348)
- 13: Vollmer, D., Bednarz, R. J. R., Seiffert, S., Bednarz, B. (2022). Nobelpreise vor dem Hintergrund der Klimakrise. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 13, 1–4. doi: [10.5281/zenodo.7419796](https://doi.org/10.5281/zenodo.7419796)
- 14: Brendel, H., Bohn, F. J., Crombach, A., Lukas, S., Scheffran, J., Baumann, F., Elverfeldt, K. von, Finckh-Krämer, U., Hagedorn, G., Hardt, J., Kroll, S., Linow, S., Stelzer, V. (2023). Die Energiewende als Beitrag zur Resilienzstärkung und Friedenssicherung in Europa. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 14, 1–14. doi: [10.5281/zenodo.7657957](https://doi.org/10.5281/zenodo.7657957)
- 15: Tremmel, J., Steinberger, B., Linow, S., Breyer, C., Gerhards, C., Vollmer, D., Zens, J., Fichter, C., Masurenko, C. (2024). Negative Emissionen: Eine neue Phase der Klimapolitik zur Reduktion der globalen Erwärmung auf 1 °C über vorindustriellem Niveau. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 15, 1–43. doi: [10.5281/zenodo.10828229](https://doi.org/10.5281/zenodo.10828229)
- 16: Tremmel, J., Steinberger, B., Linow, S., Breyer, C., Gerhards, C., Vollmer, D., Zens, J., Fichter, C., Masurenko, C. (2024). Negative Emissions: A new phase of climate policy to reduce global warming to 1 °C above pre-industrial levels. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 16, 1–39. doi: [10.5281/zenodo.11493905](https://doi.org/10.5281/zenodo.11493905)
- 17: Hennicke, P., Roettger, A., Präger, F., von Hirschhausen, C. (2024). Das Atomstromsystem bremst die sozial-ökologische Transformation zur Dekarbonisierung – ein Impuls. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 17, 1–52. doi: [10.5281/zenodo.11406367](https://doi.org/10.5281/zenodo.11406367)

Buch: „Die Wärmewende“ / Policy-Paper Wärmewende

Clausen, J., Seifert, T., & Huber, M., (Hrsg.). (2024). *Die Wärmewende. Zentrale Aufgabe einer klimaverantwortlichen Kommunalpolitik*. Scientists for Future, Berlin, 160 Seiten.

Das Buch basiert auf acht zwischen 2022 und 2023 publizierten „Policy-Paper Wärmewende“, welche – inhaltlich aktualisiert und unter teilweise aufgrund der Überarbeitung geänderter Autorenschaft – hier zusammengefasst wurden. Nach Möglichkeit sollte diese aktualisierte Fassung von 2024 verwendet werden. Die im Buch aktualisierten Originalpublikationen sind:

- 1: Clausen, J., Ehrhardt, H., Huber, M., Linow, S., Seifert, T., Beisheim, M. (2022). Heizen mit Holz: knapp, teuer und unerwartet klimaschädlich. *Policy-Paper Wärmewende*, 01-2022. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2022/07/Policy_Paper_01_HeizenmitHolz.pdf

(Einige Veröffentlichungen im Rahmen von Scientists for Future)

- 2: Clausen, J., Johannsen, L., Böhler, H., Kranich, K., Huber, M., Seifert, T. (2022). Kommunale Wärmeplanung. Grundlage einer klimaverantwortlichen Stadtplanung. *Policy-Paper Wärmewende, 02-2022*. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_02_Waermewende.pdf
 - 3: Clausen, J., Huber, M., Linow, S., Gerhards, C., Ehrhardt, H., Seifert, T. (2022). Wasserstoff in der Energiewende – unverzichtbar, aber keine Universallösung. *Policy-Paper Wärmewende, 03-2022*. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_03_Wasserstoff.pdf
 - 4: Clausen, J., Miara, M., Weber, U., Seckmeyer, G., Linow, S., Hoffmann, R., Huber, M. (2022). Wärmepumpen. Die klimaneutrale Wärmeversorgung im Neubau und für Bestandsgebäude. *Policy-Paper Wärmewende, 04-2022*. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_04_Waermepumpe.pdf
 - 5: Clausen, J., Graf, C., Huber, M., Lottis, D., Seifert, T., Weber, U. (2022). Wärmenetze. Die klimaneutrale Wärmeversorgung für verdichtete Stadtgebiete. *Policy-Paper Wärmewende, 05-2022*. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_05_Fernwaerme.pdf
 - 6: Huber, M., Clausen, J., Ehrhardt, H., Gerhards, C., Hoffmann, R., Klafka, P., Köhne, A., Linow, S., Seifert, T. (2022). Kraft-Wärme-Kopplung. Von der fossilen Effizienztechnologie zu einer neuen Rolle in der Wärmewende. *Policy-Paper Wärmewende, 06-2023*. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/02/Policy_Paper_06_KWK.pdf
 - 7: Golla, S., Huber, M., Clausen, J., & Seifert, T. (2023). Ein energieeffizienter Gebäudebestand. Eine kommunalpolitische Herausforderung. *Policy-Paper Wärmewende, 07-2023*. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/04/Policy_Paper_07-Gebaeudebestand.pdf
 - 8: Klafka, P., Clausen, J., Ehrhardt, H., Huber, M., & Seifert, T. (2023). Haben Gasnetze eine Zukunft? Kommunale Wärmeversorger stehen vor großen Umstellungen. *Policy-Paper Wärmewende, 08-2023*. info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/04/Policy_Paper_08-Gasversorgung.pdf
- Weitere Arbeiten zur Wärmewende**
- 1: Altermatt, P.P., Clausen, J., Brendel, H., Gerhards, C., Kemfert, C., Urban, W.; Wright, M. (2023). Replacing gas boilers with heat pumps is the fastest way to cut German gas consumption. *Communications Earth & Environment*, 4, 56. doi: [10.1038/s43247-023-00715-7](https://doi.org/10.1038/s43247-023-00715-7)
 - 2: Clausen, J., Altermatt, P., Ehrhardt, H., Gerhards, C., Golla, S., Guthke, R., Huber, M., Jordan, U., Kemfert, C., Kopeck, J., Kranich, K., Linow, S., Miara, M., Quaschnig, V., Sanders, A., Seifert, T., Stelzer, V., Tvrtković, M., Vogt, T., Windmüller, P. & Zosseder, K. (2023). Die schnelle Verbreitung der Wärmepumpe ist zentral für eine schnelle Wärmewende. Online-Publikation, Berlin. Scientists for Future. 7 Seiten. doi: [10.5281/zenodo.8003360](https://doi.org/10.5281/zenodo.8003360) (AUCH: info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/06/S4F-Schnelle_Verbreitung_Waermepumpe_-_Clausen_et_al.,_2023.pdf)
- Keypoint-Papiere Kernkraft**
- 1: Engelbrecht, H., Priester, M., Rechlin, A. (2023). Nachhaltigkeitsaspekte der Urangewinnung. Anmerkungen zur Taxonomie-Entscheidung der EU. Keypoint Papier Kernkraft 01 (de). info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/03/Keypoint_Paper_KKW.pdf
 - 2: Engelbrecht, H., Priester, M., Rechlin, A. (2024). Sustainability of uranium extraction. Remarks on the taxonomy decision of the EU. Keypoint Paper Nuclear Power 01 (en). info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/12/Keypoint_Paper_KKW_ENG.pdf
- Facetten des Zukunftsbilder-Projekts**
- (Mit Stand 2024-05-30 wurden 29 Facetten der Zukunftsbilder publiziert. Diese sind hier aufgeführt: zenodo.org/communities/zukunftsbilder/records. Das Zukunftsbilderprojekt betreibt zudem die Website zukunftsbilder.net.)