

Die Taxonomie-Verordnung und Kernenergie unter Berücksichtigung der DNSH-Kriterien: eine Literaturstudie

Sigrid Stagl

Wien, September 2020

Im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Sektion VII – Klimaschutz und Umwelt
Abteilung 10 – Allgemeine Koordination von Nuklearangelegenheiten
GZ 2020-0.417.529

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Inhalt

1	Kurzfassung	3
2	Hintergrund	5
3	Kriterium 1: Wesentlicher Beitrag zur Verwirklichung mindestens eines Umweltziels nach Artikel 96	
3.1	Klimaschutz (Artikel 10 (1))	6
4	Kriterium 2: Keine wesentliche Beeinträchtigung eines der in Artikel 9 festgelegten Umweltziele ..9	
4.1	Anpassung an den Klimawandel (Artikel 11)	9
4.2	Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen (Artikel 12)	12
4.3	Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft (Artikel 13)	14
4.4	Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (Artikel 14)	16
4.5	Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme (Artikel 15)	18
5	Kriterium 3: Einhaltung der in Artikel 18 festgelegten sozialen Mindeststandards	21
6	Übergangs- und ermöglichende Tätigkeiten (Artikel 10 (2) und Artikel 16)	23
7	Querschnittsthemen	25
7.1	Beste verfügbare Technologie	25
7.2	Intergenerationelle Risiken	27
7.3	Wirtschaftlichkeit der Kernenergie	29
7.4	Zeitliche Perspektive von Klimaschutzmaßnahmen	36
8	Zusammenfassende Bewertung	37
9	Literatur	39

1 Kurzfassung

Die ‚Taxonomie-Verordnung‘ enthält drei zu erfüllende Kriterien zur Beurteilung dessen, ob eine Wirtschaftstätigkeit als ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung eingestuft werden kann: (1) einen ‚wesentlichen‘ Beitrag zu mindestens einem der sechs Umweltziele leisten (oder zumindest die Befähigung anderer), (2) die Erfüllung des Kriteriums ‚Do No Significant Harm‘ in allen Umweltzielen, und (3) die Entsprechung der in der Taxonomie angeführten internationalen Sozialstandards in der Produktion. Diese Literaturstudie untersucht, inwieweit die Kernenergie den Kriterien der Taxonomie-Verordnung entspricht.

Kriterium 1: Die Kernenergie ist im Vergleich zu fossilen Brennstoffen als Energiequelle mit geringen Treibhausgasemissionen anerkannt, und entspricht somit grundsätzlich dem Kriterium hinsichtlich einer Reduktion oder Stabilisierung von Treibhausgasen. Es wird jedoch kontrovers diskutiert, ob diese Technologie in einen zukünftigen nachhaltigen Energiemix mit erheblichen CO₂-Reduktionen einbezogen werden soll. Es wird in Frage gestellt, ob die Kernenergie dem ‚best-in-class Ansatz‘ im Energiesektor entspricht (und damit als Übergangstechnologie eingestuft werden kann). Es gibt alternative Energiequellen mit noch geringeren Treibhausgasemissionen, deren gute Leistungen beim Klimaschutz nicht durch vergleichsweise hohe Risiken infrage gestellt werden.

Kriterium 2: Die Erfüllung des Kriteriums ‚Do No Significant Harm‘ für alle Umweltziele¹ kann auf Basis der Literaturstudie folgendermaßen zusammengefasst werden:

Während die Risiken nuklearer Unfälle zwar verringert, aber niemals ausgeschlossen werden können, führt der Schutz gegen Klimawandelauswirkungen zu steigenden Kosten für den Bau und Betrieb von Kernkraftwerken und geringerer Produktivität aufgrund extremer Klimaschwankungen, wodurch die Widerstandsfähigkeit der Kernkraft eingeschränkt wird. Weiters benötigt Kernkraft überdurchschnittlich viel Grundwasser und Oberflächenwasser. Erhöhte Wassertemperaturen und reduzierte Wasserführung der Flüsse haben in den vergangenen Jahren bereits zu einer Reduktion und manchmal sogar zu Unterbrechungen der Stromerzeugung geführt. Aus diesem Grund werden neue Kühltechnologien eingesetzt, die wiederum mit höheren Kosten verbunden sind. Forzieri et al. (2018) schätzen die Dürre- und Hitzeschäden in Europa bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf 67% bzw. 27% aller Risikofolgen für den Energiesektor (derzeit 31% bzw. 9%).

Die akademische Literatur dokumentiert hinreichend die negativen Folgen hochdosierter ionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit. Ob sich niedrig dosierte Strahlung negativ auf die menschliche Gesundheit auswirkt, ist jedoch umstritten. Es ist unklar, ab welcher Expositionshöhe ursächlich zusammenhängende negative Folgen auftreten.

Beim Uranbergbau fallen erhebliche Mengen an Abfallstoffen und Prozesswasser an, die schwach radioaktive Stoffe, Metalle und Säuren enthalten. Obwohl der Zusammenhang zwischen der Bereitstellung von Atomstrom und der biologischen Vielfalt und Ökosystemen noch zu wenig erforscht

¹ Die sechs Umweltkriterien umfassen den Klimaschutz (bereits im Kriterium 1 erwähnt), Anpassung an den Klimawandel, nachhaltige Nutzung und Schutz der Wasser- und Meeresressourcen, Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung sowie Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme.

ist, deuten neuere Ergebnisse auf negative Auswirkungen des Uranabbaus hin, insbesondere für Süßwasser-Ökosysteme aber auch für marine Ökosysteme.

Nach 40-50 Jahren Entwicklung des Sektors wird die Frage der Lagerung hochaktiver langlebiger Nuklearabfälle mit ihren sehr langfristigen Folgen immer noch heftig diskutiert, vor allem wegen der Unsicherheiten aufgrund unvorhergesehener geologischer Bewegungen und radioaktiver Einträge in das Grundwasser. Die hoch-radioaktiven Abfälle sind immer noch zwischengelagert, und stellen damit eine weitere Gefahr dar, für die keine weitreichenden Lösungen existieren. Gelegentlich werden kostenintensive Optionen für die Lagerung in Betracht gezogen und in einem Fall, in Finnland, intensiv vorbereitet. Darüber hinaus ist die Sanierung von Uranminen nach wie vor ein ungelöstes Thema. In den verschiedenen Teilen der Welt existieren tausende verlassene Uranminen.

Kriterium 3: Uranbergbau und -verarbeitung hatten während ihrer gesamten Geschichte in verschiedenen Teilen der Welt mit Menschenrechts- und Sicherheitsfragen zu kämpfen. Dies betrifft sowohl die Arbeitsbedingungen der Beschäftigten in den Bergwerken als auch das Menschenrecht auf Zugang zu Ressourcen, wie zu sauberem Wasser und Land für die lokale Bevölkerung.

Querschnittsthemen: Über die konkreten Umweltziele der Taxonomie hinausgehend ist auch die Frage der Governance relevant. Der IPCC (2018) kam zu dem Schluss, dass sich die politische, wirtschaftliche, soziale und technische Durchführbarkeit von Sonnenenergie, Windenergie und Stromspeichertechnologien in den letzten Jahren dramatisch verbesserte, während bei der Kernenergie und der Kohlendioxidabscheidung und -speicherung im Stromsektor keine ähnlichen Verbesserungen zu verzeichnen waren.

Darüber hinaus hat die Kernenergie mit der sozialen Akzeptanz in weiteren Teilen der Gesellschaft und mit langen Entwicklungszeiten (in demokratischen Gesellschaften 10-19 Jahren je Kraftwerk) zu kämpfen. Ein starker Ausbau der Kernenergie würde die Stilllegung von fossil befeuerten Kraftwerken verzögern, da letztere für diese Zeit noch in Betrieb bleiben und damit die Erreichung des Klimaziels verunmöglichen.

In wirtschaftlicher Hinsicht wurde festgestellt, dass sich der Business Case der Kernenergie in den letzten Jahrzehnten verschlechtert hat. Basierend auf einer Vollkostenrechnung für Europa ist dies unter anderem auf den jüngsten Erfolg der erneuerbaren Energien zurückzuführen, wobei sich die Kosten von PV-Modulen innerhalb von 10 Jahren um 80% verringerten haben und jene von Windturbinen um 30% gesunken sind. Auf diese Weise sind Energiesysteme auf der Basis erneuerbarer Energien nicht nur machbar, sondern bereits wirtschaftlich tragfähig und werden jedes Jahr kostengünstiger.

Die Risiken nuklearer Unfälle bestehen weiterhin. Zu den weiteren Hindernissen und Risiken, die mit einer zunehmenden Nutzung der Kernenergie verbunden sind, gehören Betriebsrisiken und die damit verbundenen Sicherheitsbedenken, Risiken des Uranabbaus, finanzielle und regulatorische Risiken, ungelöste Fragen der Abfallentsorgung, Bedenken hinsichtlich der Verbreitung von Kernwaffen und eine negative öffentliche Meinung. Die komplexe Frage des langlebigen hoch-radioaktiven Abfalls wird bestehen bleiben. Wir leben bereits heute in einer Welt, in der mehr als eine Viertelmillion Tonnen hoch-radioaktiver Abfälle aus der Kernkraftproduktion zwischengelagert sind (und tlw. undicht werden könnten), die bis 2100 weltweit auf über eine Million Tonnen anwachsen könnten.

Der Literatur zufolge kann die Kernenergie auch nicht als **Übergangs- oder Überbrückungstechnologie** angesehen werden, da sie hinsichtlich dem Klimaschutzpotenzial nicht vollständig dem "best-in-class"

Ansatz im Sektor entspricht. Darüber hinaus wären CO₂-intensive Kohlekraftwerke bis zu 10-20 Jahre weiter operativ, bis Kernkraftwerke als deren Ersatz in Betrieb genommen werden könnten. Man kann sogar argumentieren, dass Nuklearenergie aufgrund ihrer hohen Kapitalintensität den Einsatz anderer CO₂-emissionsarmer Alternativen insofern behindert, als dieses Kapital für den Ausbau alternativer Energiequellen wie Sonne, Wind und Wasser eingesetzt werden könnte.

2 Hintergrund

Diese Literaturstudie untersucht, inwieweit die Kernenergie jenen Kriterien entspricht, die in der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088 zur Schaffung eines gemeinsamen (EU-)Klassifizierungssystems für ökologisch nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten, kurz "Taxonomie-Verordnung" genannt, festgelegt sind.

Artikel 3 der Verordnung über die "Kriterien für ökologisch nachhaltige Wirtschaftstätigkeiten" definiert, dass eine Wirtschaftstätigkeit als umweltverträglich gilt, wenn diese a) in Übereinstimmung mit den Artikeln 10 bis 16 wesentlich zu einem oder mehreren der in Artikel 9 festgelegten Umweltziele beiträgt; b) keines der in Artikel 9 in Übereinstimmung mit Artikel 17 festgelegten Umweltziele wesentlich beeinträchtigt; c) in Übereinstimmung mit den in Artikel 18 festgelegten sozialen Mindeststandards durchgeführt wird; und d) den technischen Bewertungskriterien entspricht, die von der Kommission gemäß Artikel 10 Absatz 3, Artikel 11 Absatz 3, Artikel 12 Absatz 2, Artikel 13 Absatz 2, Artikel 14 Absatz 2 und Artikel 15 Absatz 2 festgelegt worden sind. Diese so genannten DNSH-Kriterien (Do No Significant Harm), die in Artikel 3 (a - d) definiert sind, und die in Artikel 9 festgelegten Umweltziele werden zur Strukturierung dieses Berichts herangezogen, um ihre Abdeckung zu gewährleisten; diese Struktur soll auch einen leicht zugänglichen Überblick über relevante Aspekte zur Diskussion bieten.

Einerseits untersucht dieser Bericht die Kernenergie anhand der DNSH-Kriterien der Taxonomie. Zum anderen wird in dem Literaturüberblick auch die wirtschaftliche Tragfähigkeit "im Sinne eines umfassenderen Nachhaltigkeitskonzepts" betrachtet. Dabei werden wirtschaftliche Überlegungen zur Stromerzeugung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Externalitäten aus volkswirtschaftlicher Perspektive miteinander verglichen.

Diese Studie stützt sich ausschließlich auf akademisch begutachtete Zeitschriftenartikel und Berichte von internationalen und supranationalen Organisationen, die sich bei ihrer Analyse auf Originaldaten und weitgehend akademisch begutachtete Zeitschriftenartikel stützen. Die Ergebnisse der Studie sollen Entscheidungsträgern so weit wie möglich objektive, wissenschaftlich fundierte Informationen liefern, u.a. als Input für Diskussionen in der EU-„Plattform für nachhaltiges Finanzwesen“, die gemäß der Taxonomieverordnung in der zweiten Hälfte des Jahres 2020 eingerichtet wird.

3 Kriterium 1: Wesentlicher Beitrag zur Verwirklichung mindestens eines Umweltziels nach Artikel 9

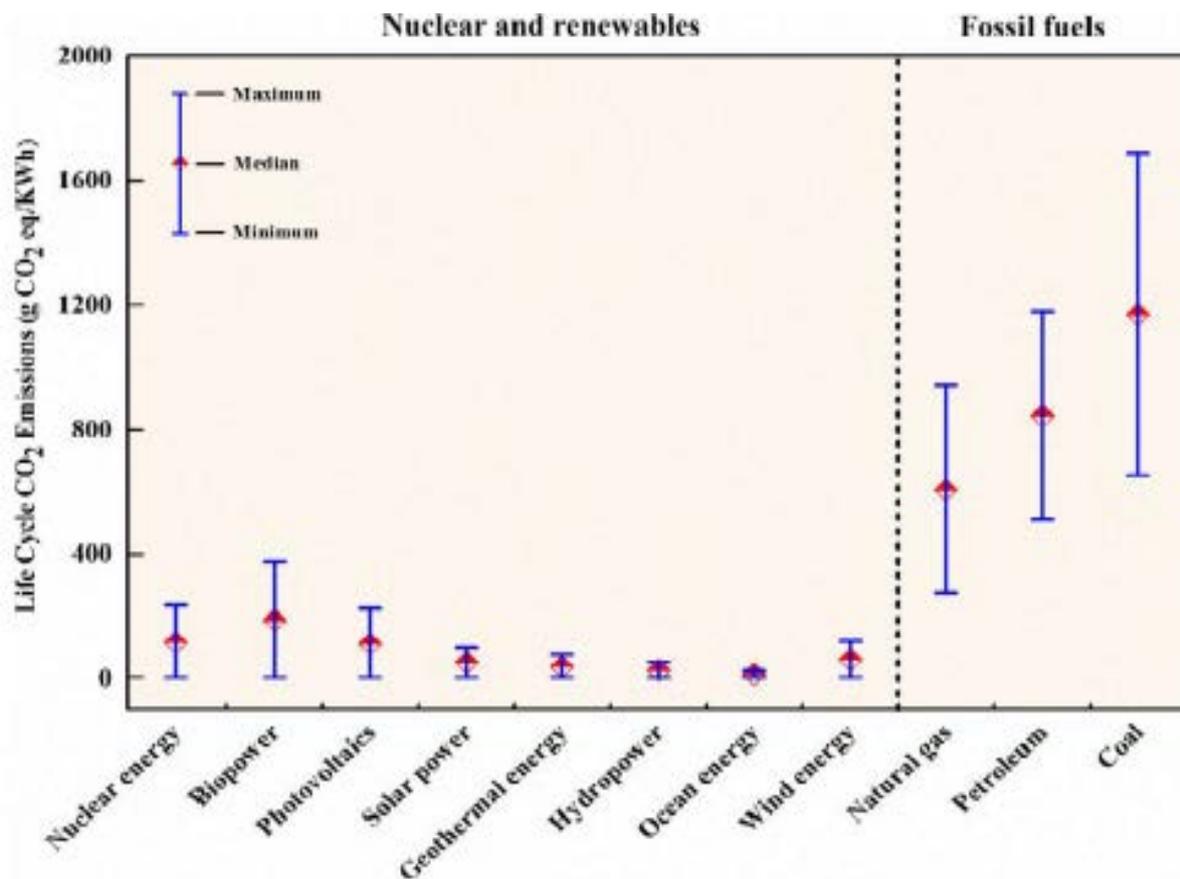
3.1 Klimaschutz (Artikel 10 (1))

Gemäß Artikel 10 ist ein wesentlicher Beitrag zur Minderung des Klimawandels eine Wirtschaftstätigkeit, die zur Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre, im Einklang mit dem langfristigen Temperaturziel des Pariser Abkommens, substantiell beiträgt.

Die Forschung zu grauer Energie und Treibhausgasemissionen im Konnex zu nuklear erzeugter Elektrizität ist umfangreich. Während die nukleare Stromerzeugung in der Stromerzeugungsphase historisch gesehen mit relativ geringen Treibhausgasemissionen verbunden ist (ihr direkter Beitrag zu den Klimaschutzzielen, z.B. IPCC 2014), wird der Großteil der Treibhausgasemissionen im nuklearen Brennstoffkreislauf in den der Anlage vor- und nachgelagerten Verarbeitungsstufen verursacht (indirekte Auswirkungen, z.B. Sovacool 2008, Warner und Heath 2012). Schätzungen zufolge verteilen sich die CO₂-Emissionen auf den Bau von Kernkraftwerken (12%), den Uranabbau und die Urananreicherung (38%), den Betrieb (17%), die Verarbeitung und Lagerung von Kernbrennstoff (15%) und den Stilllegungsaktivitäten des Kraftwerks (18%) (Sovacool 2008).

Der in der Literatur angegebene gemeinsame t-CO₂/GWh-Wert in der nuklearen Stromerzeugung variiert relativ stark, abhängig von den verschiedenen Modellannahmen und Systemgrenzen, die in den Lebenszyklus involviert sind, was auf Probleme mit der Zuverlässigkeit der Messungen hinweist (Warner und Heath 2012, Nian et al. 2014, Dong et al. 2018). Nichtsdestotrotz scheint sich der überwiegende Teil der Literatur der groben Einschätzung anzunähern, dass die CO₂-Emissionen eines Kernkraftwerks während seines gesamten Lebenszyklus "denen der erneuerbaren Energien ähnlich sind" (z.B. Prävälje und Bandoc 2018), obwohl auch innerhalb dieser Optionen eine gewisse Heterogenität zu identifizieren ist. Dong et al. (2018) geben in der folgenden Abbildung einen Überblick.

Abbildung 1 Die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus für verschiedene Energieträger



Quelle: Dong et al. (2018: 53), basierend auf Daten von Jaramillo et al. (2007) und Dong et al. (2017)

Auch eine frühere Literaturübersicht von Lenzen (2008: 2178) kam zu dem Schluss, dass die Treibhausgase aus der Kernenergieerzeugung erwartungsgemäß niedriger sind als die aus fossilen Technologien, aber höher als die berichteten Zahlen für Windturbinen und Wasserkraft "und in der Größenordnung von, oder etwas niedriger als die der Photovoltaik oder Solarthermie". Sovacool (2008) stuft die nukleare Energieerzeugung als etwas höher und Van der Zwaan (2013) als etwas niedriger ein. Godsey (2019) sieht die Leistung kleiner modularer Reaktoren etwas vorteilhafter als die ihrer größeren Pendanten. Zusammengefasst sehen wir in der Literatur mehrere Varianten, die auf zugrundeliegende Messprobleme hinweisen, zum Teil deshalb, weil Kernkraftwerke unterschiedlich gebaut werden können und das Rohmaterial auf unterschiedliche Weise abgebaut und verarbeitet werden kann. Warner und Heath (2012: S73) weisen darauf hin, dass "die Bedingungen und Annahmen, unter denen die Kernenergie eingesetzt wird, einen erheblichen Einfluss auf die Größenordnung der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen im Vergleich zu erneuerbaren Technologien haben können". Da z.B. in der Zukunft weniger reiches uranhaltiges Gestein verfügbar sein wird, werden Bergbau und Weiterverarbeitung in Zukunft zu einem höheren Gehalt an "grauer Energie" und höheren CO₂-Emissionen führen. Dong et al. (2018: 51) ziehen aus ihrer neueren Analyse der Literatur im Allgemeinen und der Daten aus China im Besonderen die Schlussfolgerung, dass "die Minderungswirkung des Kernenergieverbrauchs auf die CO₂-Emissionen erheblich geringer ist als die des Verbrauchs erneuerbarer Energien, was bedeutet, dass erneuerbare Energien den Hauptbeitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen in China leisten werden". Die Ergebnisse von Jin und Kim (2018: 464) weisen in dieselbe Richtung. Bei der Analyse von Daten aus 30 Ländern, die Kernenergie für den Zeitraum 1990-2014 nutzen, zeigen ihre Tests,

"dass die Kernenergie im Gegensatz zur erneuerbaren Energien um vieles weniger [im Original: unlike] zur CO₂-Reduktion beiträgt".

In einer neueren Studie haben Akram, Majeed et al. (2020: 18264) auch die Energieeffizienz in ihre empirische Analyse einbezogen. Sie erfuhren über die Beziehung zwischen Energieeffizienz, erneuerbaren Energien und CO₂-Emissionen in den BRICS-Ländern (steht für Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika, die einen großen Teil der weltweiten CO₂-Emissionen verursachen), dass sowohl Energieeffizienz als auch erneuerbare Energien stark zur Senkung der CO₂-emissionen beitragen. "Bemerkenswert ist, dass die langfristigen Koeffizienten von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien deutlich höher sind als die der Kernenergie, was die Bedeutung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien in den BRICS-Ländern verdeutlicht. Dieses Ergebnis impliziert, dass Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Kernenergie zwar die Emissionen reduzieren können, dass Energieeffizienz und erneuerbare Energien jedoch den Hauptbeitrag zur Reduzierung von CO₂-Schadstoffen in den BRICS-Ländern leisten werden. Obwohl die Autoren ihre Ergebnisse dahingehend relativieren, dass sie nicht automatisch auf andere Länder übertragen werden können, wird die Energieeffizienz immer auf der Gewinnerseite der Gleichung stehen, da sie als der kosteneffizienteste Weg zur Erhöhung der Versorgungssicherheit (Importsubstitutionen) und zur Verringerung der Treibhausgasemissionen angesehen wird (Kannelakis et al. 2013). Der direkte Vergleich von erneuerbarer Energie und nuklearer Stromerzeugung hängt von den unterschiedlichen Faktorkosten und Effizienzgewinnen ab, mit denen sich bereits mehrere Studien befasst haben (z.B. Gökgöz und Güvercin 2018).

Die Berücksichtigung direkter und indirekter Emissionen könnte die Nutzung von Kernenergie neben den erneuerbaren Energien rechtfertigen, um kurz- und mittelfristig eine tragfähige Lösung für den globalen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen zu bieten (Schiermeier et al. 2008, Chu und Majumdar 2012, Hong et al. 2015), also als "Brückentechnologie" zu fungieren. Aus diesem Grund wurde in der Literatur zum Teil diskutiert, wie der geeignete Energiemix für eine CO₂-emissionsarme Wirtschaft aussehen sollte, wenn die Kapazität der verschiedenen Energiequellen berücksichtigt und Energiesicherheit als Eckpfeiler einbezogen werden. Die Hauptfrage ist hier, ob eine CO₂-emissionsarme Zukunft überwiegend oder vollständig auf einer Kombination aus erneuerbaren Energien und Energieeffizienz beruhen kann oder ob der Mix (zumindest für eine gewisse Zeit) signifikante Beiträge der Kernkraft (und/oder fossiler Brennstoffe mit CO₂-abscheidung und -speicherung) enthalten sollte (Diesendorf und Elliston, 2018). Der IPCC (2018 Kap.2: 131) kommt in seinem jüngsten Bericht zu dem Schluss, dass es bei der Berücksichtigung der Kernenergie zwischen den Modellen und über 1,5°C-Pfade hinweg erhebliche Unterschiede gibt (Kim et al. 2014, Rogelj et al. 2018). Ein Grund dafür ist, dass Modelle, die die Beschränkungen der Uranressourcen und die Technologieentwicklungen bei Nuklear und bei erneuerbaren Energien berücksichtigen, dazu neigen, der Kernenergie in Zukunft eine geringere Rolle zuzuweisen. Auf der Grundlage dieser Beobachtung kommen Kim et al. (2014: 443) zu dem Schluss, dass "eine größere Klärung der Fragen des Kernbrennstoffkreislaufs und der mit der Kernenergienutzung verbundenen Risikofaktoren notwendig ist, um die in den Modellen auferlegten Beschränkungen des Einsatzes von Kernenergie zu verstehen und die Bewertung des Potenzials der Kernenergie im Hinblick auf den Klimawandel zu verbessern". Ein weiterer Grund für diese Variation ist, dass der zukünftige Einsatz der Kernenergie durch verschiedene angenommene gesellschaftliche Präferenzen eingeschränkt werden kann (der IPCC zitierte bei dieser Gelegenheit O'Neill et al. 2017, van Vuuren et al. 2017). Das IPCC kommentiert weiter (2018 Kap.2: 132): "Zusätzlich zu den 1,5°C-Pfaden, die in der Szenariodatenbank ... enthalten sind, gibt es in der Literatur weitere Analysen, z.B. sektorbezogene Analysen der Energienachfrage und der Versorgungsoptionen. Auch wenn sie nicht unbedingt im Zusammenhang mit dem 1,5°C-Ziel entwickelt

wurden, untersuchen sie einige Optionen für eine tiefgreifende Reduzierung der Treibhausgasemissionen genauer. So gibt es z.B. Analysen von Übergängen zu bis zu 100% erneuerbarer Energie bis 2050 (Creutzig et al. 2017, Jacobson et al. 2017).“ Diese Analysen beschreiben den Übergang der Elektrizitätsgewinnung aus erneuerbaren Energieträgern. Die zugrundeliegenden Annahmen wurden jedoch von Clack et al. (2017) in Frage gestellt. Die Diskussion darüber ist derzeit im Gange.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kernenergie im Vergleich zu fossilen Brennstoffen als Energiequelle mit geringen Treibhausgasemissionen anerkannt ist. Es wird jedoch kontrovers diskutiert, ob sie in einen zukünftigen nachhaltigen Energiemix mit erheblichen CO₂-Reduktionen einbezogen werden sollte. Ein Grund dafür ist, dass es alternative Energiequellen mit noch geringeren Treibhausgasemissionen gibt, welche die guten Leistungen beim Klimaschutz nicht durch vergleichsweise hohe Risiken infrage stellen, wie in den folgenden Kapiteln dieses Berichts diskutiert wird.

4 Kriterium 2: Keine wesentliche Beeinträchtigung eines der in Artikel 9 festgelegten Umweltziele

Kriterium 2 verlangt, dass keine wesentliche Beeinträchtigung eines der in Artikel 9 festgelegten Umweltziele in Übereinstimmung mit Artikel 17 erfolgen darf (DNSH Kriterium). Artikel 17 definiert, was unter einer ‚wesentlichen Beeinträchtigung‘ entlang der einzelnen Umweltziele zu verstehen ist.

4.1 Anpassung an den Klimawandel (Artikel 11)

Die Anpassung an den Klimawandel befasst sich in diesem Zusammenhang in erster Linie mit der Verringerung von Störungen und Schäden, die durch akute oder dauerhafte Auswirkungen des Klimawandels auf die Kernenergieproduktion entstehen, was auch als die Widerstandsfähigkeit des Kernenergieproduktionssystems gegenüber Auswirkungen des Klimawandels ausgedrückt werden kann.

Perera et al. (2020) betonen, dass extreme Wetterereignisse und damit die Auswirkungen von Klimawandel auf den Spitzenstrombedarf weit über einfache Änderungen der jährlichen Netto-Nachfrage hinausgehen und aufgrund ihres Einflusses auf Systemauslegung und Stromversorgung kritischer werden. Diese klimabedingten extremen Wetterereignisse und Wetterschwankungen werden sich sowohl auf die Energienachfrage als auch auf die **Belastbarkeit/Resilienz des Energieversorgungssystems** auswirken und die Anpassung an den Klimawandel erschweren. Bei der Beurteilung der Rolle der Kernenergie in verschiedenen Klimawandel-Szenarien ist sich die wissenschaftliche Literatur in ihrer Analyse ziemlich einig: Beispielsweise weisen Panteli und Mancarella (2015) darauf hin, dass Veränderungen in den Niederschlagsmustern sowie eine höhere Häufigkeit und Intensität von Dürreperioden die Verfügbarkeit von Wasser für Kühlzwecke in thermischen und nuklearen Kraftwerken sowie die Wasserkrafterzeugung negativ beeinflussen werden. Forzieri et al. (2018: 101) untersuchen mögliche eskalierende Auswirkungen von Klimaextremen auf kritische Infrastrukturen in Europa und kommen zu dem Schluss: "Da die tatsächlichen Schäden und der Grad der Veränderung von der sektorspezifischen Anfälligkeit für die verschiedenen Gefahren sowie von der Geschwindigkeit und dem Ausmaß der Veränderung der letzteren infolge der Klimaerwärmung abhängen, ... betrifft der größte Anstieg der Schäden für den Energiesektor die Energieerzeugung - fossile Brennstoffe, Kernenergie und erneuerbare Energien - aufgrund ihrer Vulnerabilität gegenüber Dürren und Hitzewellen (z.B. Abnahme des Wirkungsgrades der Kühlsysteme von Kraftwerken aufgrund der höheren Wasser- und Lufttemperatur). Bis zum Ende dieses Jahrhunderts

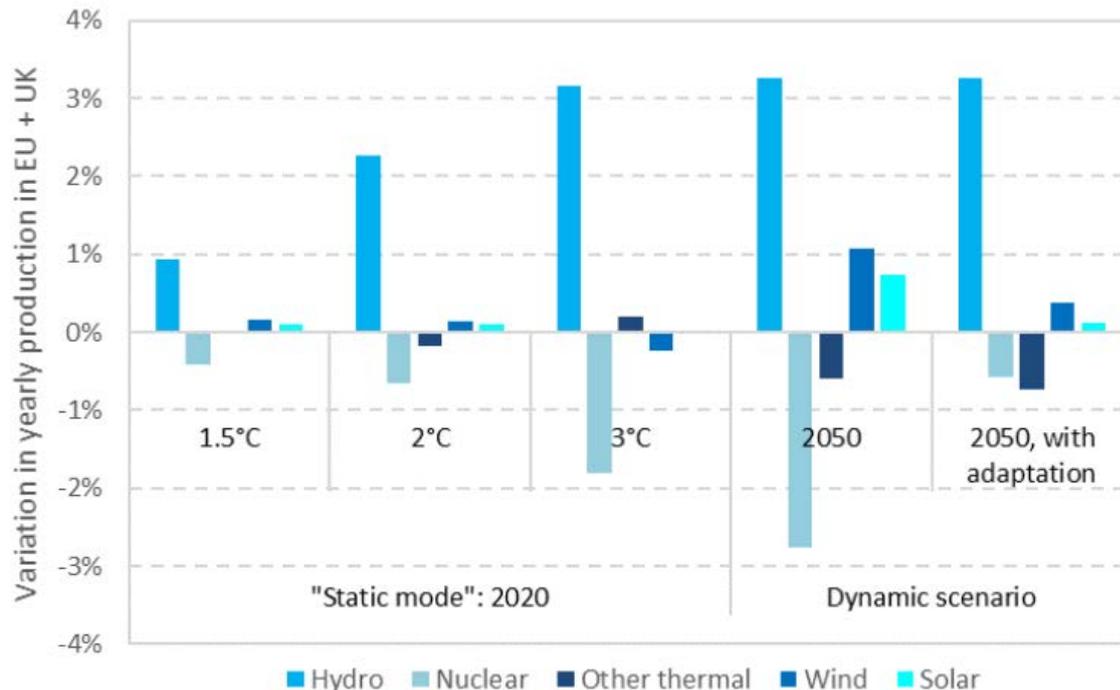
werden die Dürre- und Hitzeschäden in Europa 67% bzw. 27% aller Risikofolgen für den Energiesektor ausmachen (jetzt 31% bzw. 9%)".

Kopytko und Perkins (2011: 318) diskutieren (1) die Fähigkeit der Kernenergie, sich an den Klimawandel anzupassen und (2) das Potenzial dafür, dass der Betrieb der Kernenergie die Anpassung an den Klimawandel behindern könnte. Die Anpassung der Kernenergie an den Klimawandel würde zwar bedeuten, dass vor allem Hitzewellen, Hurrikane, Überschwemmungen und der Anstieg des Meeresspiegels berücksichtigt werden müssten, aber die Autoren kommen zu dem Schluss, dass sie "entweder erhöhte Ausgaben für Bau und Betrieb mit sich bringt oder erhebliche Kosten für die Umwelt und die öffentliche Gesundheit und Wohlfahrt verursacht". Die Autoren nennen auch einige Gründe aus denen der Betrieb von Kernkraftwerken die Anpassung an den Klimawandel behindert: Sei es, dass die hohen finanziellen Kosten, die für die Inbetriebnahme der Anlage erforderlich sind, für andere Vorkehrungen genutzt werden könnten, sei es, dass die thermische Verschmutzung durch Binnenreaktoren bereits Ökosysteme verändert, wie dies in Küstengebieten der Fall sei. Kopytko und Perkins (2011: 332) kommen zu dem Schluss: "Das Erreichen des gewünschten Sicherheitsniveaus und die Minimierung der Auswirkungen auf die Anpassung an den Klimawandel wird an vielen Standorten wahrscheinlich zu teuer sein". Schaeffer et al. (2012) analysieren die Literatur zum Thema und kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen.

Azzuni und Breyer (2018) definieren in ihrem Literaturüberblick 15 Dimensionen und damit zusammenhängende Parameter der **Energiesicherheit** (Verfügbarkeit, Diversität, Kosten, Technologie und Effizienz, Standort, Zeitrahmen, Belastbarkeit, Umwelt, Gesundheit, Kultur, Bildung, Beschäftigung, Politik, militärische und Cybersicherheit) und argumentieren, dass all dies die Energiesicherheit und damit die Belastbarkeit von Energiesystemen positiv oder negativ beeinflussen kann. Ein unausgewogenes Energiesystem ist in verschiedener Hinsicht verwundbar, was sich in der Geschichte der Entwicklung unserer Energiesysteme in vielen Fällen gezeigt hat. Als nur ein Beispiel von vielen beschreiben sie die Sicherheitsmängel französischer Kernkraftwerke im Winter 2017, die mehrere kurzfristige Abschaltungen erlebten, die zu Stromversorgungsengpässen und Importen aus Nachbarländern führten, um das Energiesystem stabil zu halten; in diesem Fall sehen sie den Grund in einer mangelnden Ausgewogenheit der Technologievielfalt in Frankreich.

Feyen et al. (2020) betonen in ihrem Bericht über die Auswirkungen der Klimaänderung und **Anpassung** in Europa, dass die globale Erwärmung zu einem allgemeinen Anstieg der Wasserkraftproduktion in der EU und in Großbritannien führt, insbesondere in den nördlichen Regionen, die stark auf Wasserkraft angewiesen sind. Die Kernkraft geht hingegen deutlich zurück, während andere Energiequellen nur mäßig betroffen sind (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Stromerzeugung in Europa



Quelle: Feyen et al. (2020: 53). Medianwerte. Auswirkungen einer globalen Erwärmung um 1,5°C, 2°C und 3°C auf das heutige Stromsystem (statisches Szenario) und Auswirkungen einer Erwärmung um 2°C auf das Stromsystem im Jahr 2050 in Übereinstimmung mit einem 2°C-Minderungsszenario (dynamisches Szenario), ohne und mit Anpassung der Wasserkühlung. Anmerkung: "andere thermische" bezeichnet Biomasse-, Kohle-, Gas- und Ölpflanzen.

Geht man von einem statischen Stromversorgungssystem für 2020 aus, "wird erwartet, dass die Stromproduktion aus Wasserkraft in der EU bei einer globalen Erwärmung von 1,5°C (Medianwert) um 0,9% und bei einer Erwärmung von 2°C bzw. 3°C um 2,3% bzw. 3,2% steigen wird. Stromproduktion aus Atomenergie würde bei einer Erwärmung um 1,5°C um 0,5% und bei einer Erwärmung um 3°C um 1,8% zurückgehen. Andere thermische, Wind- und Solaranlagen sind in der statischen Studie 2020 und auf EU-Ebene kaum betroffen" (Feyen et al. 2020: 53).

Das dynamische Szenario berücksichtigt Änderungen im Energiemix im Einklang mit einem 2°C-Klimaschutzszenario. "Wenn man die Ergebnisse für 2050 vergleicht, steigt die Stromerzeugung aus Wasserkraft um 3,3% und verdrängt damit die nukleare (-2,8%) und sonstige thermische Erzeugung (-0,6%), ohne dass die Technologien zur Wasserkühlung wesentlich angepasst werden. Wind- und Solarenergie würden sich stärker entwickeln (+1,1% für Windkraft und +0,7% für Solarenergie zusammengenommen gegenüber EU + Großbritannien), hauptsächlich als Reaktion auf die geringere Wasserkraft- und Kernkraftproduktion in Südeuropa. Die Entwicklung des Energie-Mixes ist an sich schon eine Anpassung des Energiesystems an den Klimawandel". Je stärker also die globale Erwärmung in dem Szenario ausfällt, desto weniger Atomstrom wird infolgedessen produziert, da die bestehenden Kernkraftwerke große Mengen Wasser benötigen, um das Kühlmittel zu kühlen oder zu kondensieren.

Wenn Klimawandel die Temperatur, die Qualität oder die Quantität des Wassers beeinflusst, wird es riskanter, Kernkraftwerke in Betrieb zu halten (Kopytko und Perkins 2011). Effizientere Kühltechnologien (Luftkühlung) könnten einen Ausweg bieten, aber dies erhöht wiederum die Kosten. Dieses Problem stellt ein Hindernis für die Klimawandel-Anpassung/Versorgungssicherheit dar und/oder hält ein System verwundbar, weil der Stromerzeugungsprozess weniger effizient wird, mit potenziellen Stromausfällen unter einem Klimawandel-Szenario.

4.2 Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen (Artikel 12)

Die Taxonomie definiert die nachhaltige Nutzung und den Schutz der Wasser- und Meeresressourcen als Tätigkeiten, die entweder wesentlich zur Erreichung eines guten Zustands der Wasserkörper oder zur Verhinderung ihrer Verschlechterung beitragen.

Die thermoelektrische Produktion trug zu etwa 80% der globalen Elektrizitätsproduktion bei (Byers et al. 2014), welche direkt von der Verfügbarkeit und Temperatur der nutzbaren Wasserressourcen zur Kühlung abhängen. Ihre Verwundbarkeit gegenüber dem Klimawandel in Binnengewässern ist auf die kombinierten Auswirkungen niedriger sommerlicher Flusspegel und höherer Flusswassertemperaturen (Van Vliet et al. 2012) sowie auf Extremereignisse zurückzuführen; Küstenpflanzen sind durch Meeresspiegelanstieg, Zyklone und Wirbelstürme bedroht (IPCC 2018). Verglichen mit anderen Sektoren ist die thermoelektrische Energie einer der größten Wassernutzer in den Industrieländern (z.B. USA: 40% und Europa: 43% der gesamten Oberflächenwasserentnahme), wobei andere Länder im Zuge der Entwicklung ihrer Industrien und ihres Lebensstandards aufholen.

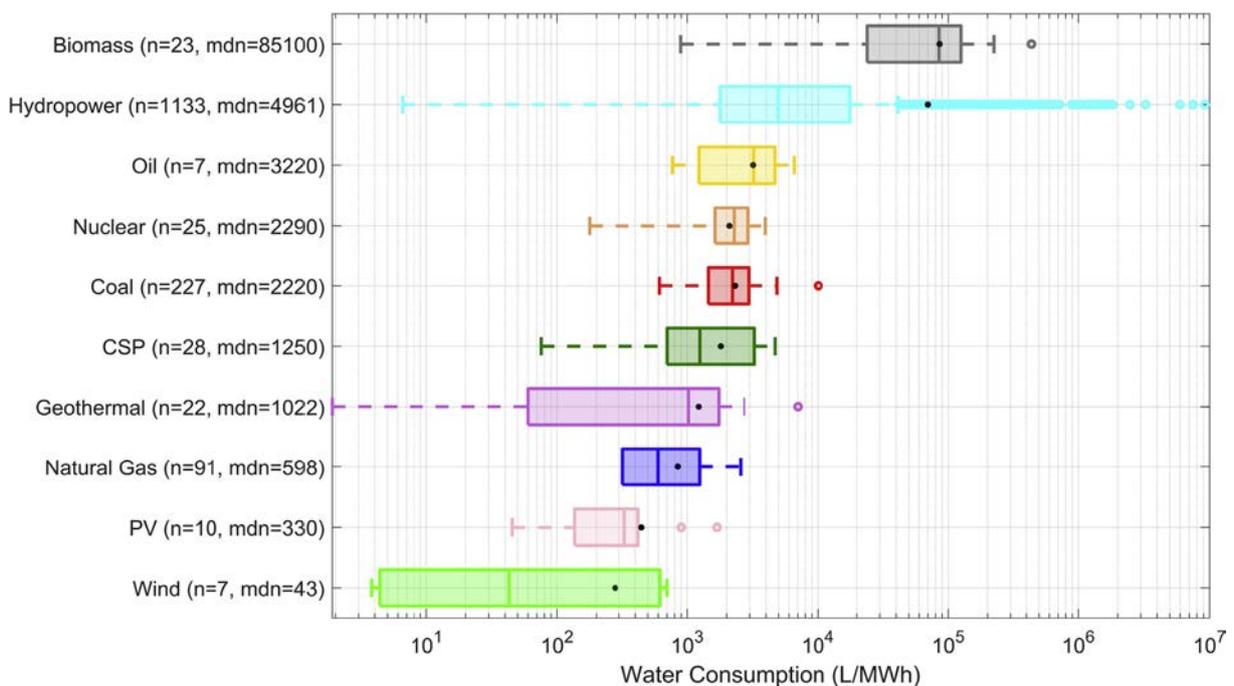
Erhöhte Wassertemperaturen und verringerte Flussabflüsse haben in den letzten Jahren weltweit zu erzwungenen Reduktionen oder sogar Unterbrechungen in der Stromerzeugung geführt (Azzuni und Breyer 2018, Lohrmann et al. 2019, Naumann et al. 2020, Roehrkasten et al. 2015). Diese Beschränkung der Stromversorgung kann zusammen mit steigenden Produktionskosten auch zu einer höheren Volatilität des Strommarktes mit stark steigenden Strompreisen während Trockenperioden und gefährdeter Energiesicherheit führen (van Vliet et al. 2012, Lohrmann et al. 2019). Die derzeitige nukleare Stromerzeugung erfordert größere Wassermengen zur Kühlung, was zu Wasserstress führen kann, und die daraus resultierenden Kühlabflüsse können zu thermischer Verschmutzung in Flüssen und Ozeanen führen (Webster et al. 2013, Fricko et al. 2016, Raptis et al. 2016, Jin et al. 2019). Auch der IPCC (2018 Kap.5: 464-465) kommt auf der Grundlage ihrer Literaturübersicht zum gleichen Schluss, wobei die Autor*innen betonen, dass die Auswirkungen von Wasserstress für verschiedene Energiequellen wie Bioenergie, zentralisierte Solarenergie, Kern- und Wasserkrafttechnologien relevant sind. Interessanterweise unterscheiden sie nicht zwischen den Auswirkungen der Energieproduktion auf die Qualität und Quantität der Wasserversorgung und/oder den Auswirkungen von Wasserstress (aufgrund von Klimawandel oder thermischer/umweltbedingter Verschmutzung) auf die Energieproduktion, was eine differenziertere Diskussion eröffnen würde. Beispielsweise emittiert ein Kernkraftwerk thermische Verschmutzung und schwach radioaktive Metalle und Säuren in das Abwasser (Brugge und Buchner 2011). Andererseits müssen Kernkraftwerke abgeschaltet werden, wenn der Wasserstand unter einen bestimmten Schwellenwert sinkt. Bartos und Chester (2015) schätzen für die gefährdeten Kraftwerke im Westen der Vereinigten Staaten, dass der Klimawandel die durchschnittliche Erzeugungskapazität im Sommer um 1,1 - 3,0% senken könnte, bzw. die Reduzierung um 7,2 - 8,8% bei einer zehnjährigen Dürre erfolgen könnte, die zukünftig häufiger wird und in den Entwicklungsplänen nicht berücksichtigt ist. Für Europa weisen Feyen et al. (2020: 5) darauf hin, dass die Belastung durch den Klimawandel ein deutliches Nord-Süd-Gefälle aufweist, wobei die südlichen Regionen in Europa viel stärker von den Auswirkungen extremer Hitze, Wasserknappheit, Dürre, Waldbränden und Verlusten in der Landwirtschaft betroffen sind.

Mouratiadou et al. (2018) finden in ihrer Analyse auf der Grundlage von fünf integrierten Modellen heraus, dass die Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors zu Co-Benefits für die Wasserressourcen führt, die vor allem auf den Ausstieg aus der wasserintensiven, kohlebasierten thermoelektrischen

Stromerzeugung zurückzuführen sind und durch sehr wassersparende Technologien wie Windkraft und solare PV-Systeme ersetzt werden. Sie betonen aber auch, dass ein weiterer Ausbau der Kernenergie zu einem erhöhten Druck auf die Wassermwelt im Allgemeinen führen kann. Konkreter berichten Behrens et al. (2017: 2) in ihrer Analyse der Stromerzeugung im Zusammenhang mit Wasserstress in der Europäischen Union, dass Wasserbecken, die hauptsächlich in den Mittelmeerländern liegen mit weiteren in Bulgarien, Frankreich und Deutschland, im Jahr 2014 sehr hohe Entnahmen aufwiesen. Sie identifizierten Kohle- und Atomkraftwerke als die Hauptursache für die hohe Vulnerabilität insbesondere in Bulgarien und Frankreich, da diese Anlagen hohen Wasserbedarf für die Kühlung aufweisen. Roehrkasten et al. (2015) weisen auch darauf hin, dass potenzielle Wasserengpässe häufig nicht angemessen in die Entscheidungsfindung im Energiebereich einbezogen werden, und fordern, dass die Gebühren für die Wassernutzung im Energiesektor die tatsächlichen Kosten und Knappheiten widerspiegeln sollten, um die richtigen Marktsignale zu setzen.

Wie Jin et al. (2019) zu Recht betonen, ist der steigende Wasserstress sowohl für die erneuerbare als auch für die nicht-erneuerbare Stromerzeugung von zunehmender Besorgnis. Die fehlende Standardisierung der Messung (meist rein volumenbasierte, manchmal auch regionalisierte Wirkungsindikatoren eingeschlossen) sowie die unterschiedlichen Systemgrenzen in den Studien resultieren in unterschiedlichen Ergebnissen. Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich verschiedener Stromerzeugungstypen auf der Grundlage der Wasserverbrauchsmenge in logarithmischer Skala, so dass Datenpunkte über einen weiten Wertebereich kompakt dargestellt werden können. Zu berücksichtigen ist, dass der Bedarf an Grundwasser und Oberflächengewässer für Kühlung bei Kraftwerken generell, und im Falle der Kernenergie auch bei der Art der Bergbauaktivitäten und der Anreicherung (In-situ-Auslaugung, Übertage- und Untertagebergwerke), sehr unterschiedlich sein kann.

Abbildung 3 Grundwasser- und Oberflächengewässerverbrauch (Nutzung von Oberflächen- oder Grundwasser) über den Lebenszyklus über alle Arten der Energieerzeugung



Quelle: Jin et al. (2019). Der Wasserverbrauch wird auf einer logarithmischen Skala dargestellt. n = Anzahl der Studien, mdn = Medianwert des Wasserverbrauchs für jede Kraftstoffart. Die unteren und oberen Grenzen der Kästen stellen das 1. bzw. 3. Quartil dar, und die Linie darin ist der Median. Die Balken zeigen den minimalen und maximalen Bereich, Ausreißer ausgenommen. Kreise stellen die Ausreißer dar, während die Punkte den Durchschnitt für jede Kraftstoffart darstellen.

Der Grundwasser- und Oberflächengewässerverbrauch bei der Kernenergieproduktion ist durchschnittlich ähnlich wie bei Kohle und liegt etwas unter dem Energieträger Öl. Da der Wasserverbrauch nicht nur von der Endnachfrage der Haushalte beeinflusst wird, plädieren Wang et al. (2019: 104453) für eine sachgerechte Planung, da Erzeugungs- und Kühltechnologien "den Wasserverbrauch und die Wasserentnahme für die Stromerzeugung stark beeinflussen" und durch räumliche Disparitäten der lokalen Wasserressourcen und der Stromerzeugung stark beeinflusst werden. Darüber hinaus steht die Stromerzeugung in Wechselwirkung mit dem Endverbrauch, wo noch große Potentiale zur Steigerung der technologischen wie auch der verhaltensbedingten Energieeffizienz zu finden sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kernkraft im Vergleich zu den anderen Energiequellen überdurchschnittlich viel Grundwasser und Oberflächengewässer verbraucht. Dieses wird in konzentrierten Mengen und unterhalb einer bestimmten Temperaturgrenze zur Kühlung benötigt. Damit wird die Kernkraft anfällig für den Klimawandel. Erhöhte Wassertemperaturen und verringerte Flussläufe haben in den letzten Jahren weltweit zu erzwungenen Reduzierungen oder sogar Unterbrechungen der Stromerzeugung geführt, was zu höheren Kosten und Ausfällen geführt hat. Aus diesem Grund werden neue Kühltechnologien entwickelt, die jedoch wiederum mit höheren Kosten verbunden sind.

4.3 Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft (Artikel 13)

Die Taxonomie definiert ‚Kreislaufwirtschaft‘ als ein Wirtschaftssystem, in dem Produkte, Materialien und andere Ressourcen in der Wirtschaft so lange wie möglich erhalten bleiben, die Umweltauswirkungen ihrer Verwendung verringert werden, die Erzeugung von Abfall und gefährlicher Stoffe im Lebenszyklus vermieden oder verringert wird, auch durch die Anwendung der Abfallhierarchie (Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling).

Die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft erfordert Maßnahmen auf der Angebotsseite (Energieerzeugung) und auf der Nachfrageseite (Energieverbrauch), wobei sich die obige Definition nur auf die Angebotsseite bezieht. Im Falle der nuklearen Stromerzeugung und ihrer Lebenszyklusbetrachtungen geht es vor allem um die folgenden Punkte:

Die Langlebigkeit der verwendeten Materialien, die Verringerung der Umweltauswirkungen ihrer Verwendung, die Vermeidung oder Verringerung der Abfallerzeugung und gefährlicher Stoffe betrifft mehrere Dimensionen der nuklearen Stromerzeugung, die auch an anderer Stelle in diesem Bericht behandelt werden: Die Betrachtung umfasst den gesamten Lebenszyklus des Kraftwerkbaus, der Instandhaltung und der Stilllegung, die angewandte "von der Wiege bis zur Bahre"-Perspektive, einschließlich des Abbaus von Kernmaterial und seiner Nutzung und Entsorgung.

Uran ist die wichtigste Ressource für die nukleare Stromerzeugung. Nach Angaben der NEA und der IAEA (2016) befinden sich 5,7 Millionen Tonnen Uran in bekannten Reserven (fast ausschließlich außerhalb der EU).² Bei der derzeitigen Ausbeutungsrate zwischen 55.000 und 65.000 Tonnen/Jahr³ würden die Uranressourcen für etwa 90-100 Jahre nuklearer Stromerzeugung ausreichen (Carvalho 2017, Prävälle und Bandoc 2018), obwohl der Abbau ressourcenintensiver und teurer werden wird, wenn die

² Zusätzlich werden rund 13% der derzeitigen, weltweiten Nachfrage durch das Abrüstungsprogramm ‚Megatonns to Megawatts‘ abgedeckt.

³ Siehe: [Uranium production overview by the International Atomic Energy Agency](#) (12.6.2020)

Uranquellen weniger produktiv werden, weil hochgradige Mineralien weniger verfügbar sein werden und die Industrie sich auf niedriggradigere Erze konzentrieren muss (Mudd 2014). Obwohl die Industrie dies derzeit nicht als vordringliche Knappheit betrachtet, muss dies bei der strategischen Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Im Falle einer potenziell verstärkten Nutzung der Kernkraft bzw. von Uran würde sich die Zeitspanne des verfügbaren Urans entsprechend verkürzen, selbst wenn im Falle einer verstärkten Waffenabrüstung weiteres sekundäres Nuklearmaterial als Ressource für die Stromerzeugung verfügbar würde (was die Zeitspanne nochmals um einige Zeit verlängern würde). Dies ist ein Grund, warum die Industrie Thorium als potentielle alternative Quelle für Kernbrennstoff erforscht, wobei auch hier immer Uran benötigt wird.

Die negativen Auswirkungen des Uranabbaus und der Uranverarbeitung sind "vergleichbar mit denen der Kohle, daher wäre der Ersatz der Verbrennung fossiler Brennstoffe durch Kernkraft in dieser Hinsicht neutral" (IPCC 2018, Kap.5: 485).

Prävälie und Bandoc (2018) erstellten eine Übersicht über die quantitativen Analysen aus der akademischen Literatur zu radioaktiven Abfällen. Die Entstehungsrate von hoch-radioaktiven Abfällen wurde auf ca. 12.000 Tonnen/Jahr geschätzt (Gerstner 2009). Wenn jeder Reaktor (von den damals 448 weltweit in Betrieb befindlichen Reaktoren, von denen 143 in der EU)⁴ jährlich etwa 25-30 Tonnen hochradioaktive Abfälle produziert (IAEA 2009, Rosa et al. 2010) resultieren daraus über 250.000 Tonnen, die weltweit einer sicheren Endlagerung bedürfen und deren Radioaktivitätswerte über Jahrhunderte hinweg hoch bleiben können. Der globale politische und wissenschaftliche Konsens über die praktikabelste langfristige Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist die Lagerung in geologischen Tiefenlagern (NEA 2010). "Das Verfahren beinhaltet die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in einer Tiefe von mindestens mehreren hundert Metern und die Isolierung der Abfälle mit anthropogenen (z.B. speziell konstruierte Behälter) und natürlichen (z.B. unterirdische Standorte mit extrem geringer Durchlässigkeit umgebenden Gesteinen, in tektonisch stabilen Gebieten) Barrieren, um das Risiko der Freisetzung von Radionukliden in die Umwelt zu minimieren" (Prävälie und Bandoc 2018: 88). Gegenwärtig ist weltweit nur ein derartiger Standort im Bau, nämlich in Finnland. Die Akzeptanz eines geologischen Endlagers für Nuklearabfälle in der Nachbarschaft zu erreichen bleibt sicherlich eine Herausforderung, die in den meisten (demokratischen) Ländern langjährige partizipative Prozesse mit Interessenvertretern mit ungewissem Ausgang nach sich zieht.⁵

In Bezug auf Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling passt die Kernenergie derzeit nicht in ein Kreislaufwirtschaftsparadigma. Jeder Schritt in der Kernenergieproduktion, vom Uranabbau bis zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (manchmal auch mit Wiederaufbereitung - in Frankreich und Großbritannien), führt zu radioaktiven und chemischen Emissionen und Abfällen. Obwohl die Verlängerung der Lebensdauer von Kraftwerken eine gängige Praxis ist (es sei denn, ein Land entscheidet sich für den Ausstieg aus der Kernenergie) und die Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe teilweise machbar ist. Entweder wird abgebrannter Brennstoff in einem Abfalldepot zwischengelagert, oder es werden wiederverwendbare Komponenten zur Wiederaufbereitung abgetrennt, wobei der Restabfall zwischengelagert wird. Wegen technischer Herausforderungen und aus Kostengründen (die

⁴ Die Kernenergie liefert heute etwa 10 % des weltweiten Stroms aus etwa 440 Leistungsreaktoren, von denen im Jahr 2019 noch 126 Kernkraftwerke in 14 EU-Mitgliedstaaten in Betrieb waren (IEA 2020; [World Nuclear Association](#) (12.6.2020)).

⁵ Deshalb ist es inzwischen wahrscheinlicher, dass Länder mit einem niedrigeren demokratischen Entwicklungsstand Nuklearenergie einführen bzw. ausbauen (Neumann et al. 2020).

teilweise Wiederaufbereitung ist teurer als die direkte Endlagerung, bis die Uranpreise um ein Mehrfaches steigen - Ramana 2009) wird die überwiegende Menge an abgebrannten Brennelementen zwischengelagert, nicht entsorgt oder wiederaufbereitet. "Einfache Schätzungen legen nahe, dass, wenn nichts anderes getan wird, bis zum Jahr 2100 weltweit über eine Million Tonnen abgebrannter Brennelemente in Zwischenlagern liegen könnten (Taylor 2015: xxi). Aus diesem Grund wollen mehrere Nuklearunternehmen den Kernbrennstoffkreislauf effizienter gestalten, indem sie ab Mitte des Jahrhunderts Schnellreaktorsysteme der Generation IV einplanen, deren Einsatz die Effizienz des Produkt-Lebenszyklus verbessern könnte. Aber selbst wenn bis dahin effizientere Brennstoffkreisläufe entstehen, wird eine Endlagerstätte für hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung erforderlich sein (Taylor 2015: xxii).

Zum Thema Kreislaufwirtschaft müssen wir auch die Altlasten aus dem Uranbergbau erwähnen, wo Ablagerungen und saure Minenentwässerung "Quellen radioaktiver Schadstoffe sind, die die Umweltradioaktivität in Wasser, Böden und landwirtschaftlichen Produkten erhöhen" (IAEA 2005, Merkel & Arab 2015, Carvalho et al. 2014, 2016, alle zitiert in Carvalho 2017: 69). Ehemalige Uranstandorte in Europa und den USA (z.B. Wismut in DE, Straz pod Raskem in CZ) durchliefen kostspielige, von der Öffentlichkeit bezahlte Aufräum- und Sanierungsmaßnahmen, zu denen die Verlagerung von Abfällen, die "Abdeckung von Feststoffabfällen und die Behandlung von radioaktivem Wasser und sogar der Ersatz der Wasserversorgung in kontaminierten Gebieten durch nicht kontaminiertes Wasser, das von anderswo hergebracht wurde" gehörten, um die Auswirkungen der Uranauswaschung ins Grundwasser zu verringern. Es ist noch unklar, wie und wann diese Standorte für verschiedene Zwecke genutzt werden können. In Kapitel 5 dieses Berichts wird auf weltweit Tausende von verlassenen und kontaminierten Standorten verwiesen, die nach der Schließung der Bergwerke nicht ausreichend behandelt wurden.

4.4 Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (Artikel 14)

Ein wesentlicher Beitrag zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung erfordert nach Artikel 14 (a) die Vermeidung / Verminderung von Emissionen von anderen Schadstoffen als Treibhausgasen in Luft, Wasser oder Boden, (b) die Verbesserung der Luft-, Wasser- oder Bodenqualität bei gleichzeitiger Minimierung aller nachteiligen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt oder Risiken solcher Auswirkungen, (c) die Vermeidung oder Minimierung nachteiliger Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt bei der Herstellung, Verwendung oder Beseitigung von Chemikalien, (d) die Beseitigung von Abfällen und sonstigen Schadstoffen, oder (e) die Ermöglichung des oben Gesagten.

In den vergangenen Jahren durchgeführte Studien haben unser Verständnis von Strahlungseffekten auf eine begrenzte Anzahl von Spezien durch Studien an Testorganismen erheblich verbessert. Im Allgemeinen ist die Interpretation von **Studien über die Auswirkungen von Strahlung auf die Umwelt** oder wild lebende Tiere ein Bereich, in dem Meinungsverschiedenheiten in den Wissenschaften bestehen (z.B. Beresford et al. 2016, 2019a; Chesser & Baker 2006; Mousseau & Møller 2009, 2011; Smith 2019, alle zitiert von Beresford et al. 2019). Während einige Studien, die zu den Auswirkungen der Unfälle von Tschernobyl und Fukushima durchgeführt wurden, über signifikante Auswirkungen der Strahlung auf wild lebende Tiere selbst bei niedrigen Dosisraten berichten, konnten andere Analysen keine substantziellen Auswirkungen von hoher Strahlung auf wild lebende Tiere in der Ausschlusszone von Tschernobyl feststellen. Es gibt eine ganze Reihe von Faktoren, die als mögliche Gründe für diese Meinungsverschiedenheiten genannt werden, die hauptsächlich methodischer Natur sind. Auch Lecomte-

Pradines et al. (2020) bestätigen die obigen Ergebnisse im Großen und Ganzen und entwickeln 15 Empfehlungen zur Verbesserung der Methodik für zukünftige Feldstudien. Siehe auch das folgende Kapitel 3.5 über mögliche Auswirkungen auf die biologische Vielfalt und die Ökosysteme.

Der **Uranbergbau** kann Luft, Wasser und Boden kontaminieren (Brugge und Buchner 2011), indem erhebliches Abfallmaterial (Ablagerungen und Gestein) und Prozesswasser erzeugt wird, das schwach radioaktive Stoffe, Metalle und Säuren enthält. In der Vergangenheit konzentrierte sich die Epidemiologie des Uranbergbaus vor allem auf die Minenarbeiter und deren Radonexposition. Obwohl dies noch überwiegend zutrifft, hat sich ein neuerer Literaturkreis über die Umweltexposition in Wohngebieten in der Nähe von Uranabbau- und -verarbeitungsanlagen herausgebildet. Siehe auch IPCC (2018, Kap.5: 500) und die dort zitierte Literatur.

Was die Folgen radioaktiver **Strahlung auf die menschliche Gesundheit** betrifft, richtet die Literatur die meiste Aufmerksamkeit auf die Folgen hoher Strahlung nach Unfällen sowie auf die gesundheitlichen Folgen der Strahlung nach konstanter Niedrigdosisstrahlung auf Menschen, die in Bergwerken, Anlagen oder Abfalldeponien arbeiten oder in deren Nähe leben. Im Zusammenhang mit Strahlen- und Gesundheitsauswirkungen werden in der wissenschaftlichen Literatur vorwiegend mögliche Auswirkungen wie Krebs und Leukämie, Nicht-Krebserkrankungen und genetische Effekte sowie teratogene Effekte wie angeborene Missbildungen untersucht.

Während es klar ist, dass ionisierende Strahlung ein potentes Karzinogen darstellt, das durch DNA-Schäden Krebs auslöst (Behjati et al. 2016, Volkova et al. 2020), ist es weniger eindeutig, welche über die natürlich vorkommende Strahlung in der Natur hinausgehende Expositionshöhe ausreicht, um Krebs auszulösen.

Aus der neueren Literatur zu **Krebsrisiken bei Kindern** kamen Mazzei-Abba et al. (2020: R1) nach Durchsicht eines umfangreichen Literaturbestands zu dem Schluss, dass die empirische Abschätzung des Krebsrisikos bei Kindern im Zusammenhang mit **niedrig dosierter ionisierender Strahlung** (<100 mSv) nach wie vor eine Herausforderung darstellt. Die Autoren sehen den Hauptgrund darin, "dass die erforderliche Kombination von großen Stichprobengrößen mit einer genauen und umfassenden Expositionsabschätzung schwierig zu erreichen ist. ... Die Hauptherausforderung besteht darin, die individuelle Exposition von Kindern gegenüber Strahlung aus natürlichen und anderen Quellen sowie potenziell verwirrende strahlungsfreie Expositionen in solch großen Studienpopulationen genau abzuschätzen".

Aus der neueren Literatur über **Krebsrisiken bei Beschäftigten im Nuklearbereich** hatte eine multinationale Kohortenstudie, die in Lancet Hematology veröffentlicht wurde, einen relativ großen Einfluss auf die akademische Diskussion. Sie deutet auf "starke Beweise für einen positiven Zusammenhang zwischen lang anhaltender Strahlenexposition **bei niedrigen Dosen** und erhöhter Leukämie" bei Beschäftigten in der Kerntechnik hin. Die Relevanz dieser Kohortenstudie beruht auf der großen Stichprobe von mehr als 300.000 in die Analyse einbezogenen Kernarbeitern, von denen 147.000 aus Großbritannien stammen - die übrigen aus den USA und Frankreich (Leuraud et al., 2015: e276). Gleichzeitig kam das Studienteam (Richardson et al., 2015: h5359) zum Ergebnis eines linearen Anstiegs der relativen Krebsrate mit zunehmender Strahlenexposition. Diese Ergebnisse wurden durch einige komplementäre Forschungsarbeiten unterstützt, die seither veröffentlicht wurden: z.B. zeigen Grellier et al. (2017) "starke Evidenz" für Assoziationen zwischen niedrigen Dosen von Alpha-Strahlern und dem

Lungenkrebsrisiko; Deas et al. (2017: 167) verweisen auf "ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko bei industriellen Strahlenarbeitern, insbesondere bei denen, die Plutonium verarbeiten und radioaktive Partikel einatmen können" (siehe auch Natl. Res. Council. 2006, Grosche et al. 2006 und Muirhead et al. 2009). Aber auch diese Art von Studien wird kritisiert (Scott 2018, Vaiserman et al. 2018, Shibamoto und Nakamura 2018), und es wird darauf verwiesen, dass andere Studien sogar auf positive Auswirkungen niedriger Strahlendosen hinweisen. Diese Autoren argumentieren, dass epidemiologische Studien von Natur aus mit Verzerrungen verbunden sind. Shibamoto und Nakamura (2018) kommen zu dem Schluss, dass kontrollierte Laborstudien möglicherweise besser geeignet sind, um die Auswirkungen niedriger Strahlendosen zu bewerten.

Gillies et al. (2017: 276) versuchten, die Ergebnisse früherer Studien für **Niedrigdosisstrahlung** zu bestätigen, und fanden heraus, dass die Zusammenhänge zwischen Strahlendosis und **Nicht-Krebs-Mortalität** im Allgemeinen mit denen übereinstimmen, die in Studien zu Atombombenüberlebenden beobachtet wurden, aber potenzielle Störfaktoren, die mit Faktoren des Lebensstils zusammenhängen, könnten die Ergebnisse dennoch beeinflussen. Diese Ergebnisse stimmen im Großen und Ganzen mit einer früheren Studie von Muirhead et al. (2009) überein, die einige Hinweise auf einen steigenden Trend bei der Dosis in der Sterblichkeit bei Kreislauferkrankungen fanden, die jedoch zumindest teilweise auf Rauchen als Störfaktor zurückzuführen sein könnten.

Aus der neueren Literatur über **Krebsrisiken** vor allem von Bevölkerungsgruppen, die **hochdosierter ionisierender Strahlung** ausgesetzt sind, wurde in einer Reihe von Studien ein positiver Zusammenhang zwischen externer Strahlendosis und Krebs (sowie der Nicht-Krebstmortalität) gefunden. Zum Beispiel fanden Bazyka et al. (2018) eine signifikante Wirkung auf verschiedene Krebsarten bei ukrainischen Reinigungskräften nach dem Unfall von Tschernobyl.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die akademische Literatur über die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit die negativen Folgen hochdosierter ionisierender Strahlung deutlich macht. Ob sich niedrig dosierte Strahlung negativ auf die menschliche Gesundheit auswirkt, ist umstritten: Die Literatur scheint uneinig darüber zu sein, ab welcher Expositionshöhe negative Folgen auftreten würden. Dies konnte durch die bisher angewandten Forschungsmethoden nicht geklärt werden. Beim Uranbergbau fallen erhebliche Mengen an Abfallstoffen und Prozesswasser an, die schwach radioaktive Stoffe, Metalle und Säuren enthalten (was bis zu einem gewissen Grad auch für andere Bergbauaktivitäten gilt). Die Auswirkungen der Strahlung auf die Umwelt und die Tierwelt werden traditionell als ein blinder Fleck in der Forschungslandschaft angesehen, der im folgenden Kapitel weiter untersucht wird.

4.5 Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme (Artikel 15)

Nach Artikel 15 gilt eine wirtschaftliche Tätigkeit als wesentlicher Beitrag zum Schutz und zur Wiederherstellung der biologischen Vielfalt und der Ökosysteme, wenn diese Tätigkeit wesentlich zum Schutz, zur Erhaltung oder zur Wiederherstellung der biologischen Vielfalt oder zur Erreichung eines guten Zustands der Ökosysteme oder zum Schutz von Ökosystemen, die sich bereits in gutem Zustand befinden, beiträgt.

Die Energieproduktion wirkt sich auf die biologische Vielfalt und die Naturräume vor allem durch die Gewinnung von Rohstoffen, aber auch durch die Ableitung von Abwasser und die Abfallentsorgung aus. Wie immer sind der Rahmen bzw. der Fokus der Analyse sowie die gesetzten Systemgrenzen wichtig, um

Schlussfolgerungen zu entwickeln. Dies ist auch der Grund, warum Forscherinnen und Forscher bei der Frage, ob die Kernkraft Auswirkungen auf die biologische Vielfalt und die Ökosystemfunktionen hat, zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen kommen. Zum Beispiel schlussfolgern Brook und Bradshaw (2015) aus ihrer Untersuchung der Lebenszyklen verschiedener Energieoptionen mit Hilfe eines Multikriterien-Ansatzes, dass die Kernkraft eine gute Option für die Erhaltung der Biodiversität sei. Allerdings macht Diesendorf (2016: 668) ihre Annahmen und Entscheidungen zu Proliferation, Landnutzung, CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Kosten der Stromversorgung insofern lächerlich, als er auf Auslassungen und "inhärente Werturteile, die alle die Kernenergie zu begünstigen scheinen" verweist.

Andererseits kommt der IPCC (2018, Kap.5: 500) zum Thema "Gesunde terrestrische Ökosysteme" zu dem Schluss, dass (fortgeschrittene) nukleare Optionen immer noch mit Sicherheits- und Abfallbedenken aus dem Uranabbau und -verarbeitung behaftet sind, und verweist auf Bickerstaff et al. (2008), Sjöberg und Sjöberg (2009), Ahearne (2011), Corner et al. (2011), Visschers und Siegrist (2012) und IPCC (2014). Zuletzt fanden Lourenço et al. (2017) negativen Auswirkungen von Uranabbauabfällen auf Süßwasser-Ökosysteme am Beispiel von Fischembryonen und Zhou et al. (2020) negative Auswirkungen der Kontamination im Umfeld einer Uranmine auf das Ökosystem und die Gesundheit lokaler Gemeinschaften in Ostchina.

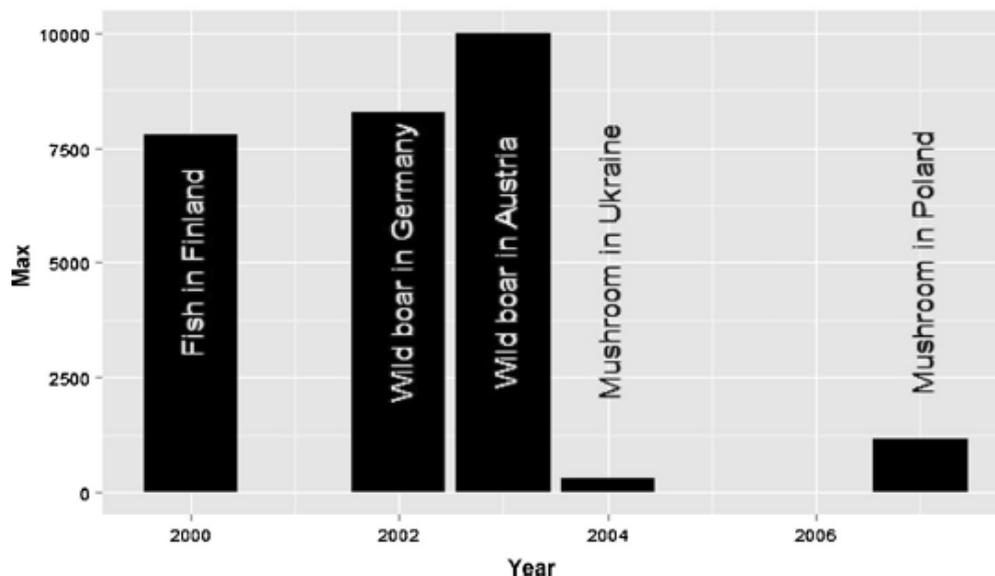
Wie oben diskutiert, ist die akademische Diskussion über die Auswirkungen niedrig dosierter Strahlung bei weitem noch nicht gelöst. Dies ist ein Grund dafür, dass nach dem Unfall im Kraftwerk Fukushima ein umfangreiches Forschungsprogramm ins Leben gerufen wurde, für das der ‚Blasse Grasblaue Schmetterling‘ als Umweltindikator für die Erforschung der radioaktiven Belastung definiert wurde. In den zahlreichen Publikationen zum Thema wird immer wieder über genetische Veränderungen nach der Hochdosis-Exposition berichtet, z.B. über anfängliche physiologische und genetische Schäden (Hiyama et al. 2012), die Retention/Speicherung von radioaktivem Cäsium in Schmetterlingspuppen (Nohara et al. 2014) und transgenerationale Effekte der anfänglichen Hochdosis-Exposition (Sakauchi et al. 2020).

Wehrden et al. (2012: 81) analysierten 521 Studien, die nach dem Unfall von Tschernobyl durchgeführt wurden, und schlussfolgern: "Erhöhte Strahlungsniveaus wurden bei einer Vielzahl von Arten festgestellt, sogar bis zu Tausenden von Kilometern vom Ort der Kernschmelze entfernt und nach mehr als zwei Jahrzehnten nach dem Unfall. In der Nähe des Reaktors sind physiologische und morphologische Veränderungen aufgetreten. Es wurden negative Auswirkungen auf die Ökosystemleistungen beobachtet, einschließlich der Kontamination von Wasser, Böden und der in der Natur vorkommenden Nahrungsmittel". Darüber hinaus (ebd.: 85) "werden Süßwasser und die damit verbundenen Fische in der Nähe des Unglücksortes für den menschlichen Verzehr für mehrere Jahrzehnte in der Zukunft nicht sicher sein. In ähnlicher Weise wird ehemaliges landwirtschaftliches Land innerhalb der ~2,700 km² großen Sperrzone um das Unglücksgebiet in absehbarer Zeit für die menschliche Nutzung ungeeignet bleiben ... Obwohl viele Ökosystemdienstleistungen stark reduziert wurden, insbesondere in der Nähe des Unglücksgebiets und bei den Versorgungsleistungen, scheinen sich einige andere Leistungen des Ökosystems günstiger entwickelt zu haben. Zum Beispiel hat die menschliche Entvölkerung in der Umgebung von Tschernobyl zur Rückkehr der natürlichen Vegetation geführt, was einigen Wildtierpopulationen zugutekam und wahrscheinlich die regulierende Funktion der CO₂-Abscheidung verbessert hat (Kuemmerle et al. 2011; Hostert et al. 2011)". Im Jahr 2020, d.h. 34 Jahre nach dem Unfall,

ist die Sperrzone von Tschernobyl in unterschiedlichem Ausmaß kontaminiert, mit einigen Hotspot-Regionen und anderen, in denen die Strahlenbelastung weniger besorgniserregend ist.⁶

Gralla et al. (2014) analysierten peer-reviewed Artikel mit Bezug auf Tschernobyl und Fukushima, in denen erhöhte Cs-137-Konzentrationen bei der Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen gemessen wurden. Sie identifizierten 121 Publikationen, in denen Cäsium-137-Gehalte in Nahrungs- und Futtermitteln sowie in Holz gemessen wurden.

Abbildung 4 Beispiele für langfristige radioaktive Kontamination bei der Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen mehr als fünfzehn Jahre nach Tschernobyl



Quelle: Gralla et al. (2014: 5) Beispiele für maximale Radioaktivität (Bq/kg) in Fleisch, Fisch und Pilzen (Nassgewichte) basierend auf Proben, die mehr als fünfzehn Jahre nach Tschernobyl genommen wurden.

Viele Autoren (z.B. Bonar et al. 2015; Lovett et al. 2015; Turney und Fthenakis 2011) weisen auf erhebliche Lücken im Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Energiesystemen und Ökosystemdienstleistungen auf breiterer Ebene hin. Holland et al. (2016: 183) bezeichnen Papathanasopoulou et al. (2015) als eines der wenigen Beispiele, "wo ein konsistenter Ansatz verwendet wurde, um mehrere Auswirkungen von Ökosystemdienstleistungen über verschiedene Energiesysteme hinweg zu vergleichen". Vier Hauptversorgungsoptionen (Biomasse, Erdgas, Kernenergie und Wind) wurden bewertet. Papathanasopoulou et al. (2015: 918) untersuchten die Auswirkungen verschiedener Energiesysteme auf die marinen Ökosystemleistungen und kamen zu dem Schluss, dass "der Nuklearsektor überwiegend negative Auswirkungen auf kulturelle Ökosystemleistungen hat, bedingt durch Offshore-Einleitungen bei der Aufnahme von Radionukliden durch marine biotische und abiotische Komponenten, erhöhte Wassertemperaturen in der Umgebung von nuklearen Offshore-Einleitungstunneln und deren Auswirkungen auf die Funktionsweise von Ökosystemen sowie Veränderungen der Wasserqualität und der Gemeinschaftsstrukturen".

⁶ Siehe: [Chernobyl: The end of a three-decade experiment, 14 February 2019](#) (12.6.2020)

Obwohl der Zusammenhang zwischen der Bereitstellung von Atomstrom und der biologischen Vielfalt und Ökosystemen noch zu wenig erforscht ist, deuten neuere Ergebnisse auf negative Auswirkungen des Uranabbaus (Abfälle) hin, insbesondere für Süßwasser-Ökosysteme aber auch für marine Ökosysteme.

5 Kriterium 3: Einhaltung der in Artikel 18 festgelegten sozialen Mindeststandards

Die in Artikel 18 genannten Mindeststandards sollen sicherstellen (wiederum nach dem Grundsatz ‚do no significant harm‘), dass Unternehmen die OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen und die Leitprinzipien der Vereinten Nationen für Wirtschaft und Menschenrechte, einschließlich der Grundprinzipien und Rechte aus den acht Kernübereinkommen, die in der Erklärung der Internationalen Arbeitsorganisation über grundlegende Prinzipien und Rechte bei der Arbeit festgelegt sind, und die Internationale Charta der Menschenrechte, befolgen.

Die OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen und die UN-Leitsätze zu Wirtschaft und Menschenrechten

Die OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen (2011), die die UN-Leitsätze (2011) enthalten, sind Empfehlungen, die von Regierungen an multinationale Unternehmen gerichtet werden. Die Richtlinien zielen darauf ab, sicherzustellen, dass die Tätigkeiten dieser Unternehmen im Einklang mit der Regierungspolitik stehen, um die Grundlage des gegenseitigen Vertrauens zwischen den Unternehmen und den Gesellschaften, in denen sie tätig sind, zu stärken. Die Richtlinien umfassen die Begriffe Menschenrechte, Offenlegung, Beschäftigung und Arbeitsbeziehungen (Ausbildung, Gesundheit, Sicherheit), Umwelt, Korruptionsbekämpfung, Verbraucherinteressen, Wissenschaft und Technologie, Wettbewerb und Besteuerung.

Die Erklärung der Internationalen Arbeitsorganisation (IAO) über grundlegende Prinzipien und Rechte bei der Arbeit

In der Erklärung der IAO über grundlegende Prinzipien und Rechte bei der Arbeit (1998) geht es darum, Gerechtigkeit, sozialen Fortschritt und die Beseitigung der Armut zu gewährleisten. Daran schließen sich z.B. das Recht auf Kollektivverhandlungen, die Abschaffung der Zwangsarbeit, die Abschaffung der Kinderarbeit und die Beseitigung der Diskriminierung in Beschäftigung und Beruf an.

Die acht IAO-Kernübereinkommen

Die grundlegenden Konventionen der IAO definieren Menschen- und Arbeitsrechte, die von den Unternehmen eingehalten werden sollten. Mehrere dieser internationalen Normen sind in der Charta der Grundrechte der Europäischen Union verankert, insbesondere das Verbot von Sklaverei und Zwangsarbeit und das Prinzip der Nichtdiskriminierung. Diese Mindeststandards gelten unbeschadet der Anwendung strengerer Anforderungen in Bezug auf Umwelt, Gesundheit, Sicherheit und soziale Nachhaltigkeit, die gegebenenfalls im Unionsrecht festgelegt sind.

Die Kernübereinkommen der IAO (1998) decken Themen ab, die als grundlegende Prinzipien und Rechte bei der Arbeit gelten und im Wesentlichen die Vereinigungsfreiheit und die wirksame Anerkennung des Rechts auf Kollektivverhandlungen, die Beseitigung aller Formen der Zwangsarbeit, die wirksame Abschaffung der Kinderarbeit und die Beseitigung der Diskriminierung in Beschäftigung und Beruf umfassen.

Die Internationale Charta der Menschenrechte

Die Internationale Charta der Menschenrechte besteht aus der Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte (1948 von der UNO-Generalversammlung verabschiedet, in der die Menschenrechtsstandards festgelegt sind) und dem Internationalen Pakt über bürgerliche und politische Rechte (1966, in dem bestimmte Rechte und ihre Einschränkungen definiert sind). Der Pakt verpflichtet seine Parteien zur Achtung der bürgerlichen und politischen Rechte des Einzelnen, einschließlich des Rechts auf Leben, Religionsfreiheit, Redefreiheit, Versammlungsfreiheit, Wahlrecht und das Recht auf ein ordnungsgemäßes Verfahren und einen fairen Prozess.

Gesamtbeurteilung hinsichtlich Einhaltung sozialer Mindeststandards

Die Übereinstimmung der Kernenergieproduktion mit den Kriterien, die in den oben genannten Richtlinien, Erklärungen, Konventionen und Gesetzen festgelegt sind, deckt ein breites Spektrum ab, das in der akademischen Literatur sehr heterogene Beachtung fand. Dies ist auch der Grund, warum in dieser Literaturübersicht nur ein begrenzter Teil des Spektrums abgedeckt werden kann.

Zum Beispiel könnten nach den Allgemeinen Richtlinien der OECD-Richtlinien für multinationale Unternehmen (2011: 19-20) mögliche Konflikte (eventuell wahrscheinlicher als bei anderen Kriterien) entstehen aus (a) dem Menschenrecht auf Zugang zu Wasser in der erforderlichen Qualität und Quantität, (b) Gesundheits- und Umweltproblemen, die sich aus der Strahlenbelastung (auf lokale Gemeinschaften oder global im Falle von Unfällen) und deren Offenlegung ergeben, und wiederum (b) Gesundheits- und Umweltproblemen, die sich aus Bergbau und -verarbeitung, Anlagenbetrieb oder Abfallentsorgung auf lokale Gemeinschaften ergeben.

Das Menschenrecht auf Zugang zu sauberem Wasser ist in Bergbauregionen sicherlich ein Thema. Zum Beispiel berichten Wang et al. (2012) über stark erhöhte Konzentrationen von Radionukliden und Metallen in den Abwässern aus dem extensiven Abbau von Uran in der nördlichen Region der Provinz Guangdong, China, und (2016) über erhöhte natürliche Radioaktivität bei ArbeiterInnen in der Umgebung einer granithaltigen Uranlagerstätte.

Mögliche Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen sowohl niedrig- als auch hochdosierter Strahlung (nach Unfällen) werden bereits in den Kapiteln 3.4 und 3.5 dieses Berichts behandelt, und wird hier nicht wiederholt.

Sarkar (2019) weist auf die weniger strengen gesetzlichen Rahmenbedingungen und schlecht durchgesetzten Arbeitsgesetze in asiatischen und afrikanischen Uranbergwerken hin, die zu niedrigen Betriebskosten führen. Der Autor betont auch "reichlich Beweise" dafür, dass die Industrie gegen Umweltvorschriften verstößt, sowie unethische Praktiken, die eine ernsthafte Bedrohung für die öffentliche Gesundheit darstellen (z.B. Postar 2017 und Hecht 2012 für Subsahara-Afrika). Graetz (2014) weist auf Sicherheits- und Gesundheitsfragen in Uranbergwerken und Menschenrechtsverletzungen gegenüber indigenen Gemeinschaften in verschiedenen Teilen der Welt hin (vor allem in Australien, Kanada, den Vereinigten Staaten und mehreren afrikanischen Staaten), die in der Geschichte des Uranbergbaus ein Thema waren, und nun zu Widerstand gegen die weitere Ausbeutung der Uranreserven führt. Malin & Alexis-Martin (2020: 513) beschreiben in ihrer Einleitung zu einer Sonderausgabe über Uranforschung, dass "historische Betriebe wie Minen und Hütten tausende von verlassenen und kontaminierten Standorten hinterlassen haben, viele davon auf öffentlichem Land und auf indigenem

Land ... obwohl sich nun viele Minen in Privatbesitz von multinationalen Konzernen (MNCs) befinden. Diese großen nichtstaatlichen Organisationen siedeln ihrer Betriebe oft in Regionen im Sinne eines 'race to the bottom' an: sie nutzen Regulierungsarbitrage, um eine geographisch ungünstige Gesetzgebung zu umgehen, die den Minenarbeitern, Gemeinden und Ökosystemen einen besseren Schutz bieten würde ... Dies hat tiefgreifende Folgen für die Umwelt- und Gesundheitspolitik in Bezug auf Uran, insbesondere für wirtschaftlich weniger entwickelte Staaten (LEDCs), in denen der Wirtschaft Vorrang vor Fragen der Umweltgesundheit, der Kultur, der Gesellschaft und des Staates eingeräumt werden kann. ... Die enormen Auswirkungen auf die indigenen Völker wurden in verschiedenen Zusammenhängen betrachtet, unter anderem: in den Gemeinden der australischen Ureinwohner (Banerjee 2000) und in postkolonialen Kontexten der Nutzung von Boden durch den Bergbau; in den indischen West Khasi Hills (Karlsson 2009), wo Uranvorkommen in der Nähe von indigenem und Stammesland gefunden wurden; und in den USA, wo zahlreiche Stammes-, Pueblo- und andere indigene Gemeinschaften weiterhin mit den Hinterlassenschaften der Urankontamination leben - und mit den gegenwärtigen Bedrohungen einer erneuten Entwicklung (Brugge et al. 2007, Pasternak 2010, Malin 2015). Allein die Navajo Nation hat über 500 verlassene Uranminen (Kapoor 2018, Malin 2018)".

Grundsätzlich ist es möglich, Uran unter Anwendung von Arbeitssicherheitsstandards abzubauen und zu produzieren, die den Strahlenschutz der ArbeiterInnen und der Umwelt gewährleisten (IAEA, 2014), obwohl die Realität schwacher öffentlicher Einrichtungen in zahlreichen Ländern dazu führt, dass diese Standards nicht durchgesetzt werden. "Die derzeitige große Herausforderung für Uranbergbauunternehmen besteht darin, den Abbau und die Gewinnung so zu organisieren, dass die Strahlensicherheit und der Umweltschutz, auch nach der Sanierung der Minen, in den Rohstoffpreisen enthalten sind, und kontaminierte Altstandorte zu vermeiden" (Carvalho 2017: 70).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Uranbergbau und dessen Verarbeitung während ihrer gesamten Geschichte in verschiedenen Teilen der Welt mit Menschenrechts- und Sicherheitsfragen zu kämpfen hatte. Dies betrifft sowohl die Arbeitsbedingungen der Beschäftigten in den Bergwerken als auch das Menschenrecht auf Zugang zu Ressourcen, wie zu sauberem Wasser und Land für die lokale Bevölkerung.

6 Übergangs- und ermöglichende Tätigkeiten (Artikel 10 (2) und Artikel 16)

Gemäß Art. 10 (2) sind 'Übergangstätigkeiten' zwar mit der Klimaneutralität unvereinbar, aber sie werden für den Übergang zu einer klimaneutralen Wirtschaft als notwendig erachtet. Um als Übergangstätigkeiten anerkannt zu werden, müssen sie

- a) Treibhausgasemissionswerte aufweisen, die den besten Leistungen des Sektors oder der Industrie entsprechen ('best-in-class Ansatz'),
- b) die Entwicklung und Einführung CO₂-armer Alternativen nicht behindern, und
- c) in Anbetracht der wirtschaftlichen Lebensdauer von CO₂-intensiven Vermögenswerten nicht zu Lock-in-Effekten bei diesen Vermögenswerten führen.

Nach Artikel 16 kann eine Wirtschaftstätigkeit einen wesentlichen Beitrag zu einem oder mehreren der in Artikel 9 genannten Umweltziele leisten, indem sie es unmittelbar anderen Tätigkeiten ermöglicht, einen wesentlichen Beitrag zu einem oder mehreren dieser Ziele zu leisten, und wenn diese Wirtschaftstätigkeit

1. in Anbetracht der wirtschaftlichen Lebensdauer von Vermögenswerten, die den langfristigen Umweltzielen abträglich sind, nicht zu Lock-in-Effekten bei diesen Vermögenswerten führt, und
2. auf der Grundlage von Lebenszyklusüberlegungen wesentliche positive Auswirkungen auf die Umwelt hat.

Laut der IEA (2020: 43) "sind feste fossile Brennstoffe wie Stein- oder Braunkohle ausgeschlossen, aber Gas und Kernenergie könnten potenziell als ermöglichende oder Übergangsaktivitäten bezeichnet werden".⁷

Nach den in Kapitel 2.1. berichteten Ergebnissen sind die Gruppe der Branchenbesten in Bezug auf niedrige Treibhausgasemissionen die Solarenergie, die Geothermie, die Wasserkraft, die Meeresenergie und die Windenergie, mit Abstand gefolgt von der Photovoltaik, der Kernkraft und der Bioenergie. Damit gehört die Kernenergie bei den Treibhausgasemissionen nicht zu den Besten des Sektors.

Eine Verbindung zwischen der Kernkraft und einer ermöglichenden Rolle für eine andere gut funktionierende Technologie wird in der Literatur hauptsächlich mit dem, im großen Maßstab erzeugten, sauberem Wasserstoff assoziiert, der mit der Kernkraft als Hauptenergiequelle verbunden wird (z.B. Yildiz & Kazimi 2006, Orhan et al. 2012, El-Emam & Özcan 2019). Aufgrund der Energieintensität des Wasserstoffproduktionsprozesses wird die verwendete Energiequelle zum Hauptfaktor, um den potenziellen Umweltnutzen zu beeinflussen, selbst auf der Grundlage von Lebenszyklusbetrachtungen. Es hängt also sehr stark davon ab, wie die Umweltauswirkungen der Kernenergie beurteilt werden.

Nukleare Energie als Übergangs- bzw. Brückentechnologie würde zutreffen, wenn das Energiesystem als Ganzes nicht ohne Atomkraft auf einen nachhaltigen Pfad transformiert werden könnte. Die Argumentation in der wissenschaftlichen Literatur hat sich dahingehend entwickelt, dass auf der Grundlage detaillierter Simulationen (z.B. Jacobson 2011, Aghahosseini et al. 2020) und neuerer praktischer Erfahrungen (z.B. frühzeitige Abschaltung der letzten Kohlekraftwerke in Schweden und Österreich, kontinuierliche Einspeisung erneuerbarer Ressourcen in das Netz in anderen Ländern) Brückentechnologien nicht notwendig sind.⁸ Weitere Simulationsstudien für die EU (z.B. Capros et al. 2019: 110960) zeigen, dass die Kernenergie "in den meisten Dekarbonisierungsszenarien unter dem Niveau von 2015 liegt".

Lock-in beschreibt das Phänomen, dass ein technisches und politisches System auf einen neuen Weg zu bringen schwierig ist, sobald es eine Eigendynamik entwickelt hat und damit auf einem bestimmten Weg ‚fixiert bzw. eingesperrt‘ ist. In Hinblick auf die langfristigen Umweltziele können verschiedene Lock-ins relevant sein, insb. technologische und wirtschaftliche Lock-ins, die miteinander verbunden sind.

Wirtschaftliches und technologisches ‚Lock-in‘: Wegen der sehr hohen Anfangskosten für die Errichtung von Kernkraftwerken ist die Amortisierung dieser Anfangskosten nur dann realisierbar, wenn die Anlagen eine lange Lebensdauer aufweisen. Aus diesem Grund ist es durchaus üblich, die Lebensdauer alter Kernkraftwerke über die geplante Laufzeit hinaus zu verlängern, aber diese müssen im Durchschnitt alle 50 Jahre ersetzt werden. Der Bau von Kernkraftwerken dauert etwa 6-12 Jahre, und die Stilllegung 20-50

⁷ Siehe auch: [European Parliament press release on the adoption of criteria for sustainable investment](#) (18.6.2020)

⁸ Siehe: [CNBC report: Austria's last coal-fired power station closes as the country pushes renewables](#); [EURACTIV report: Sweden adds name to growing list of coal-free states in Europe](#) (Zugriff: 10.6.2020)

Jahre (Abbott 2011). Die Flächen werden danach für einen beträchtlichen Zeitraum brachgelegt ohne weitere Nutzungsmöglichkeiten; hinzu kommen die bereits erwähnte Probleme und Kosten bei radioaktiven Abfällen, die künftigen SteuerzahlerInnen u.a. für Sicherung und Aufräumung aufgebürdet werden. Die wirtschaftliche und technologische Einbindung wird auch dann relevant, wenn die gesellschaftliche Akzeptanz der Kernenergieproduktion nach Unfällen abstürzt, wie wir bei den Ausstiegsländern wie Deutschland, der Schweiz, Belgien, Schweden und Spanien nach dem Unfall von Fukushima sehen können, und auch in zahlreichen Studien dokumentiert wurde (z.B. Sun et al. 2016, Tsujikawa et al. 2016, Visschers & Siegrist 2013).

Abbott (2011) kam zu dem Schluss, dass die Kernenergie nicht skalierbar ist und dass Investitionen stattdessen auf wirklich skalierbare Technologien zur Unterstützung eines nachhaltigen Energiewechsels umgelenkt werden sollten. Technologie- und Markt-Lock-ins können sich aus subventionierten Technologien mit langer Lebensdauer ergeben, wobei das Argument der hohen Subventionen für die Kernenergie in der Vergangenheit mehrfach vorgebracht wurde (z.B. Alberici et al. 2014). Wenn andere Technologien während der Laufzeit eines Kraftwerks kosteneffizienter werden, bleibt der Markt für eine beträchtliche Dauer verzerrt.

Ökologisches ‚Lock-in‘ bezieht sich auf die sich selbst aufrechterhaltende Trägheit, die durch naturverbrauchende Energiesysteme geschaffen wird und die öffentliche und private Bemühungen zur Einführung alternativer Energietechnologien hemmt. Im Zusammenhang mit der Kernenergie können zahlreiche Umweltschränkungen bestehen. Die erste besteht darin, geeignete Standorte für Kernkraftwerke zu finden: Eine schwierige Aufgabe, da ein geeigneter Standort eine geringe Bevölkerungsdichte, den Ausschluss von Naturkatastrophengebieten und den Zugang zu massiven Wasservorkommen erfordert (Abbott 2011).

Nach 40-50 Jahren Entwicklung wird die Frage der Lagerung hochaktiver Nuklearabfälle mit ihren sehr langfristigen Folgen immer noch heftig diskutiert, vor allem wegen der Unsicherheiten aufgrund unvorhergesehener geologischer Bewegungen und radioaktiver Leckagen ins Grundwasser. Gelegentlich werden kostenintensive Optionen in Betracht gezogen und in einem Fall in Finnland umgesetzt. Darüber hinaus ist die Sanierung von Uranminen nach wie vor ein ungelöstes Thema, da in den verschiedenen Teilen der Welt tausende verlassene Uranminen existieren, die sich oft im Besitz der Energiekonzerne befinden, die sie früher bewirtschaftet haben; oder die Minen liegen auf indigenem Land, das für lange Zeit nicht für andere Zwecke genutzt werden kann (CoRWM 2006, Kapoor 2018, Malin & Alexis-Martin 2020).

7 Querschnittsthemen

7.1 Beste verfügbare Technologie

Die Internationale Energieagentur (IEA 2020: 4) betont, dass "die Sicherheit der Stromversorgung im Mittelpunkt der Bemühungen der EU stehen muss, da die Geschwindigkeit der Transition zu sauberer Energiebereitstellung, extreme Wetterereignisse und Bedrohungen der Cybersicherheit das Stromsystem zusätzlich belasten". Hier spielen neue Technologien eine wichtige Rolle, wobei Bedrohungen der Cybersicherheit besonders bedeutend sind, sei es hinsichtlich der Koordination von Stromnetzen oder die Sicherung der Energieproduktion vor Netzattacken, also auch von Atomkraftwerken. Die gegenwärtige

und zukünftige Perspektive der Kernenergie wird in der Literatur eher widersprüchlich diskutiert. Einige der gängigeren Argumente werden wie folgt formuliert:

- Leichtwasser gekühlte Reaktoren, die mit 3-4% angereichertem Uran betrieben werden, sind seit den 1980er Jahren in Betrieb, wobei viele von ihnen eine volle Betriebsdauer von 40 Jahren erreicht haben.
- Während dieser jahrzehntelangen Erfahrung wurde eine Reihe von Sicherheitsfortschritten erzielt. Vor allem nach dem Kernschmelzunfall auf Three Mile Island im Jahr 1979 wurden umfangreiche Nachrüstungen an Druckwasserreaktoren (DWR) vorgenommen, die zu erheblichen Verbesserungen des Betriebs und der Sicherheit führten.
- Die Sicherheit von Kernreaktorsystemen und ihren Komponenten war von Anfang an wichtig. Dennoch wurden nach Jahren des Betriebs gelegentlich unerwartete Probleme entdeckt (z.B. Korrosion in bestimmten wichtigen Reaktorkomponenten), die dann zur Festlegung von Vorschriften für den Austausch von Komponenten führten (Knapp & Pevec 2018: 96).
- Im Gegensatz zur Kernfusion ist die verbesserte Kernspaltung reif für die Umsetzung. Die Befürworter erwarten profunde Effekte durch die Standardisierung des Designs in einem groß angelegten Nuklearprogramm, bei dem die Reduzierung der CO₂-Emissionen und die Kostensenkung im Vordergrund stehen, und nicht die Einführung innovativer Reaktortypen (z.B. Knapp & Pevec 2018). Aus diesem Grund empfehlen diese Autoren wegen der inhärenten Herausforderungen nicht, die Kerntechnologien der Generation IV in naher Zukunft in großem Umfang einzuführen (die Reaktoren der Generation IV zielen auf die Entwicklung der Kernspaltungsenergie durch die Erhöhung der Kernbrennstoffeffizienz und die Verringerung der Erzeugung hochradioaktiver Abfälle ab).
- Eine der greifbareren aktuellen Entwicklungen scheinen kleine modulare Reaktoren zu sein, die in Fabriken hergestellt und zu den Standorten transportiert werden können, obwohl es ungewiss ist, ob es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, und ab wann dies verfügbar wäre.
- Verbesserte Kühltechnologien haben das Potenzial, die negativen Auswirkungen der klimabedingten Wasserknappheit zu verringern, auf EU-Ebene insbesondere relevant für Kernkraftwerke in Südeuropa (Feyen et al. 2020). Ein wichtiges Ziel ist die Verringerung des Frischwasserverbrauchs, beispielsweise durch den Einsatz von Hybridkühlung (Byers et al. 2014), welche die Versorgungssicherheit erhöhen kann, jedoch mit der Kehrseite höherer Kosten. Zhang et al. (2018) zeigen, dass in China die Süßwasserentnahme vom Wachstum der thermoelektrischen Stromerzeugung abgekoppelt wurde, da im Untersuchungszeitraum vermehrt Luft- und Meereswasserkühlungstechnologien sowie fortschrittliche große Erzeugungseinheiten und Verbesserungen der Wassernutzungseffizienz eingesetzt wurden.
- Insbesondere die Trockenkühlungstechnologie für thermoelektrische Kraftwerke zielt darauf ab, die Widerstandsfähigkeit von Kernkraftwerken gegenüber dem Klimawandel zu verbessern, da in Trockenperioden weniger Wasser zur Verfügung steht. Die Kehrseite der Medaille ist, dass dies die Kosten für die Bereitstellung von Kernenergie in die Höhe treibt (und potenziell die klimawandelrelevanten Emissionen erhöht), ebenso wie andere Faktoren, die die Lebensdauer der Kernenergie beeinflussen (in den Phasen des Bergbaus und der Verarbeitung sowie der Reduzierung und Entsorgung radioaktiver Abfälle).
- Brüterreaktoren sind technologisch unausgereift (mit einem Technologie-Bereitschaftsgrad (technology readiness level) von 3 bis 5 auf der neustufigen Skala, abhängig vom Design), teurer als Leichtwasserreaktoren, unzuverlässig, potenziell unsicher und stellen ein ernstes Proliferationsrisiko dar (Brown et al. 2018).

- Einige Autoren plädieren für ein neues hybrides oder integriertes nuklear-erneuerbares Energiesystem (Suman 2018), bei dem die Nukleartechnologie die Grundlast und erneuerbare Energien den verbleibenden Energiebedarf decken würden.
- Langfristig gehen Knapp & Pevec (2018) davon aus, dass die Brennstoffressourcen durch die Verwendung der Alternativen U238 / Th232 gedeckt werden können, die sehr hohe Energiemengen ermöglichen und den Bedarf für mehrere Jahrhunderte decken würden. Banerjee & Gupta (2019: 1607) unterstützen grundsätzlich diesen Standpunkt, sehen aber auch, dass "anspruchsvolle technologische Aufgaben wie die entfernte Herstellung von Brennstoff auf der Basis von U233 und die Wiederaufbereitung des entsprechenden abgebrannten Brennstoffs im industriellen Maßstab angegangen werden müssen, um einen nachhaltigen Th-U233-Brennstoffkreislauf zu betreiben". Andere wie Uribe (2018) sind weniger optimistisch und verweisen auf andere Sicherheitsrisiken, darunter das Proliferationsrisiko. Zusätzlich zum Proliferationsrisiko umfasst die Th232-Zerfallskette harte Betastrahler (Tl und Bi). Auch die Tritium (H3)-Produktion im Reaktor ist höher. Beide verursachen potentielle Umweltschäden und stellen technologische Herausforderungen dar (Dodd & van Hienen 1995).
- Für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts erwarten Knapp & Pevec (2018), dass inhärent sichere Schmelz-Thorium-Reaktoren mit den Fusionsreaktoren konkurrieren werden, was aber auch im Falle der Realisierung unter dem derzeitigen Klimawandel-Szenario zu spät kommen würde.

Optimisten gehen davon aus, dass die Kernfusion um die Mitte des Jahrhunderts ausgereift sein wird (Herrera-Velázquez 2007, Pacchioni 2019), obwohl dies von der Mehrheit der Experten stark in Frage gestellt wird. Es gibt heute kein Fusionskraftwerk, das mehr Energie erzeugen kann, als es zur Einleitung und Aufrechterhaltung der Fusion benötigt. Dämmungsmaterial, das dem Neutronenbeschuss standhalten kann ohne langlebigen Atommüll zu erzeugen, befindet sich noch in Entwicklung. Selbst Befürworter der Fusion rechnen nicht damit, dass die erste kommerzielle Anlage vor 2050 ans Netz gehen könnte. Selbst wenn sie sich als technologisch durchführbar und kosteneffektiv erweisen sollte (wobei beides zum jetzigen Zeitpunkt noch unklar ist), würde eine weltweite Diffusion dieser Technologie noch weitere Jahrzehnte dauern. Das wird als zu spät beurteilt, um die globale Erwärmung in den Griff zu bekommen (Brown et al. 2018).

Über die Technologie hinaus sind auch Governance-Aspekte relevant. Der IPCC (2018, Kap.4: 315) kam zu dem Schluss, dass sich die politische, wirtschaftliche, soziale und technische Durchführbarkeit von Sonnenenergie, Windenergie und Stromspeichertechnologien in den letzten Jahren dramatisch verbessert hat, während bei der Kernenergie und der Kohlendioxidabscheidung und -speicherung im Stromsektor keine ähnlichen Verbesserungen zu verzeichnen waren. "Da Unfälle jedoch die weltweite öffentliche Akzeptanz dieser Industrie beeinträchtigen, wurde die Frage aufgeworfen, inwieweit die Sicherheit der Anlagen durch wirtschaftlichen und politischen Druck geschwächt werden könnte (Finon 2013, Budnitz 2016). Dies wirft die Frage nach der internationalen Beherrschung ziviler Nuklearrisiken und einer verstärkten internationalen Zusammenarbeit zwischen Regierungen, Unternehmen und Technik auf (Walker & Lönnroth 1983, Thomas 1988, Finon 2013), die auf den Erfahrungen der Internationalen Atomenergiebehörde beruht."

7.2 Intergenerationelle Risiken

Jacobson (2019) unterscheidet zwei Risikokategorien, die für gegenwärtige und zukünftige Generationen relevant sind: (1) Risiken, die ihre Fähigkeit beeinträchtigen, den **Klimawandel und die**

Luftverschmutzung zu reduzieren (einschließlich Verzögerungen zwischen Planung und Betrieb, Emissionen, die zur globalen Erwärmung und zur Luftverschmutzung beitragen, sowie Kosten); und (2) Risiken, die ihre Fähigkeit beeinträchtigen, **Energie- und Umweltsicherheit** (abgesehen von Klima- und Luftverschmutzung) zu gewährleisten (einschließlich des Risikos der Verbreitung von Waffen, schwerer Unfälle, des Risikos radioaktiver Abfälle sowie des Krebsrisikos im Bergbau und des Risikos der Landverödung).

In den Kapiteln 2 und 3 erörtern wir den Klimawandel und andere Nachhaltigkeitsfragen im Zusammenhang mit der Nutzung der Kernenergie. Sie werden oft als Probleme des intergenerationellen Wohlergehens dargestellt. Die Argumente für die Eindämmung des Klimawandels und eine langfristige Umweltpolitik hängen daher davon ab, wie das Wohlergehen der heutigen Generation gegenüber dem künftigen Generationen abgewogen wird. Dies macht es zu einer Frage der moralischen Haltung, der Anwendung angemessener oder keiner Diskontsätze und kann ein Anreiz für schuldenfinanzierte grüne öffentliche Investitionen sein (Sachs 2015).

Das größte Risiko der Kernkraft im Zusammenhang mit Energie- und Umweltsicherheit ist das **Risiko der Waffenproliferation**. Die Zunahme der Kernkraftnutzung hat Staaten vermehrt in der Lage versetzt, Plutonium zu gewinnen oder Uran zur Herstellung von Atomwaffen anzureichern. Uran und Thorium können zur Herstellung von Kernbrennstoff in einem Brüterreaktor verwendet werden. Die Kernkraft schafft eine Infrastruktur von Material und Fachwissen, das für die Waffenherstellung genutzt werden kann. Die verschiedenen Reaktortypen weisen einen unterschiedlichen Grad an Proliferationsresistenz auf, aber unabhängig davon, wie sie gekennzeichnet sind, ist es eine Tatsache, dass alle Kernbrennstoffe und alle Nuklearprodukte in einer schmutzigen Bombe, wenn nicht gar in einer Atombombe, verwendet werden können (Abbott 2011). "Friedliche nukleare Zusammenarbeit und Atomwaffen sind in zweierlei Hinsicht miteinander verbunden. Erstens haben alle Technologien und Materialien im Zusammenhang mit einem Kernwaffenprogramm legitime zivile Anwendungen. Beispielsweise sind Urananreicherungs- und Plutoniumwiederaufbereitungsanlagen von Natur aus doppelt verwendbar, da sie zur Herstellung von Brennstoff für Leistungsreaktoren oder von Spaltmaterial für Kernwaffen genutzt werden können. Zweitens baut die zivile nukleare Zusammenarbeit eine Wissensbasis in nuklearen Angelegenheiten auf" (Fuhrmann 2009: 12).

Der IPCC erkennt diese Tatsache an. Der Bau eines Atomreaktors zur Energiegewinnung in einem Land, das derzeit keinen Reaktor besitzt, erhöht das Risiko der Entwicklung von Atomwaffen in diesem Land. Insbesondere erlaubt es dem Land, Uran zur Verwendung in der Kernkraftanlage zu importieren. Wenn das Land dies möchte, kann es Uran heimlich anreichern um waffenfähiges Uran herzustellen, indem Plutonium aus Uranbrennstäben gewonnen und für Atomwaffen verwendet wird. Das bedeutet nicht, dass irgendein oder jedes Land dies tun wird, aber historisch gesehen haben es einige getan, und das Risiko ist hoch. Der IPCC kommt mit ‚robuster Beweislage und hoher Übereinstimmung‘ zu dem Schluss, dass die Sorge um die Verbreitung von Kernwaffen ein Hindernis und ein Risiko für die zunehmende Entwicklung der Kernenergie darstellt: "Zu den Hindernissen und Risiken, die mit einer zunehmenden Nutzung der Kernenergie verbunden sind, gehören **Betriebsrisiken** und die damit verbundenen Sicherheitsbedenken, **Risiken des Uranabbaus**, finanzielle und regulatorische Risiken, **ungelöste Fragen der Abfallentsorgung**, Bedenken hinsichtlich der **Verbreitung von Kernwaffen** und eine negative öffentliche Meinung" (Bruckner et al. 2014: 517).

Der IPCC (2018, Kap.5: 485) stellt ebenso fest, dass "ein nicht zu vernachlässigendes Risiko für **Unfälle** in Kernkraftwerken und Abfallbehandlungsanlagen besteht". Die **langfristige Lagerung von Atommüll** ist ein politisch brisantes Thema. CoRWM (2006) überprüfte systematisch die Optionen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle und kam zu dem Schluss, dass zwar keine der Optionen ideal ist, dass aber die geologische Endlagerung die beste verfügbare langfristige Lösung darstellt und dass eine Zwischenlagerung erforderlich ist. Aber bisher wurde diesbezüglich nur in Finnland eine ernsthafte Anstrengung unternommen (siehe oben). Darüber hinaus deuteten Forscher kürzlich an, dass die vorgeschlagenen "Materialien für die Lagerung nuklearer Abfälle ein Korrosionsproblem haben könnten", was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass der radioaktive Abfall in die Umwelt gelangt (Guo et al. 2020). Abgesehen von den technischen Überlegungen sind radioaktive Abfälle aus mehreren Gründen eine ethische Frage. Sie stehen im Zusammenhang mit Kernkraft, Kernwaffen und den Gefahren der Proliferation und des Terrorismus, die alle ethische Bedenken aufwerfen. Radioaktivität wirkt sich ungleichmäßig zwischen Orten und über Generationen hinweg aus und wirft **ethische Fragen der Fairness** auf. Sie ist auch eine ethische Frage, weil sie aufgrund ihrer Langlebigkeit und Komplexität sowohl in den Bereich der Wissenschaft fällt als auch eine Wertefrage darstellt. Bei der Bewertung von technologischen Optionen ist es nötig, sowohl empirisches als auch ethisches Wissen, Fakten und Werte zu kombinieren.

7.3 Wirtschaftlichkeit der Kernenergie

Einige betrachten die Kernenergie als eine Schlüsseltechnologie zur Bekämpfung des Klimawandels, während andere eine Industrie im Niedergang sehen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es problematisch, dass es nicht möglich ist, die Kosten zu senken und auf Bedenken hinsichtlich der öffentlichen Akzeptanz, der Sicherheit, des Atommülls und der Verbreitung von Atomwaffen einzugehen. Die Betriebskapazität stagniert seit mehr als zwei Jahrzehnten (Markard et al. 2020).

Vor fast drei Jahrzehnten bedeuteten immer **strengere Umweltauflagen** für Generatoren höhere Kapital- und Betriebskosten für Umweltschutzaktivitäten (MacKerron 1992). Komplexere Genehmigungen und wachsende Sicherheitsbedenken trieben den Rückgang an (Müller & Thurner 2017, Markard et al. 2020).

Die Liberalisierung des Energiemarktes in den 1990er Jahren hat die Situation für die Kernenergie verschärft (Jamasp & Pollitt 2005). In liberalisierten Märkten sind Investitionen gewinnorientiert, wobei die Wahl der Technologie dem Markt überlassen bleibt. Die mit der Kernenergieerzeugung verbundenen Risiken machen sie aus den Gründen (1) bis (4) für Investoren unattraktiv, selbst wenn ihre Stromgestehungskosten jenen Kosten der dominanten Technologie ähnlich sind.

(1) Die **langen Vorlaufzeiten der Kernenergie** (5 Jahre im optimistischsten Szenario, 10-19 Jahre beobachtet) **laufen der Präferenz der Investoren für eine kürzere Amortisationsdauer zuwider**.

(2) Die Größe eines typischen Nuklearblocks und der damit verbundene **hohe Mindestbedarf an Vorabinvestitionen** verringern die Zahl der potenziellen Investoren. Der IPCC (2018) wies auch darauf hin, dass die Kosten der Kernenergie in einigen entwickelten Ländern im Laufe der Zeit gestiegen sind, was hauptsächlich auf die Marktbedingungen zurückzuführen ist, unter denen die **erhöhten Investitionsrisiken von Technologien mit hohem Kapitaleinsatz** erheblich geworden sind. "**Learning by doing**"-Prozesse konnten diesen Trend oft nicht kompensieren, weil sie durch fehlende Standardisierung und Serieneffekte gebremst wurden (Grubler 2010).

(3) Die Schwierigkeit, zuverlässige Kostenschätzungen zu erhalten, wird durch die Liste der erheblich verzögerten Bauarbeiten und Kostenüberschreitungen veranschaulicht. Dies erklärt auch, warum in liberalisierten westlichen Marktwirtschaften so wenige neue Kernkraftwerke gebaut werden. In zentralen Planwirtschaften können die Kapitalkosten versteckt werden. Darüber hinaus können einige der Faktoren, die hohe Kosten verursachen, in zentralen Planwirtschaften gemildert werden, z.B. ist die Wahrscheinlichkeit regulatorischer Verzögerungen geringer (Difiglio & Wanner 2013). **Länder mit liberalisierten Märkten, die die Nukleartechnik weiterentwickeln, setzen De-Risking-Instrumente durch langfristige Verträge** mit garantierten Verkaufspreisen ein (Difiglio & Roques 2013). So arbeitet das Vereinigte Königreich beispielsweise mit öffentlichen Garantien, die einen Teil der Vorab-Investitionskosten neu geplanter Nuklearkapazitäten abdecken. Diese Dynamik ist in Ländern wie China und Südkorea unterschiedlich ausgeprägt, wo **monopolistische Bedingungen** im Elektrizitätssystem aufgrund stabiler Beziehungen zwischen den Sicherheitsbehörden und den Bauherren eine Verringerung der Investitionsrisiken, den Einsatz von Serieneffekten und die Verbesserung der technischen Kapazitäten der Nutzer ermöglichen (Schneider et al. 2017, IPCC 2018).

(4) Das größere Ausmaß der Nukleartechnologie **setzt Investoren größeren Ausfallsrisiken (downside risks) aus**. Kleine modulare Reaktorsysteme lösen dieses Problem, stehen aber vor anderen wirtschaftlichen Problemen (Roques et al. 2006).

Die Finanzierung des Baus neuer Kernkraftwerke erfordert aufgrund der Kapitalintensität, der vorsichtigen Erfahrungen mit technischen Schwierigkeiten und der schleichenden regulatorischen Belastung (Bürokratiebelastung) während der Bauphase einen erheblichen Risikoaufschlag gegenüber konkurrierenden Technologien. Zwei potenziell positive Eigenschaften der Kernenergieerzeugung, die sie für Investoren attraktiver machen könnten. (1) Die Kosten der Kernenergieerzeugung reagieren nicht auf Gas- und CO₂-Preise. (2) Investitionen in die Kernenergie können als Absicherung gegen die Volatilität und das Risiko von Gas- und CO₂-Preisen für ein (großes) Erzeugungsunternehmen betrachtet werden. Die Kosten für die Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen sind jedoch auch unempfindlich gegenüber CO₂-Preisen und können als Absicherung gegen die oben erwähnte Volatilität und das Risiko verwendet werden (Roques et al. 2006).

Kleine modulare Reaktoren (Small Modular Reactors, SMR) sind "bewusst klein dimensioniert, d.h. Konstruktionen, die sich nicht auf große Größen skalieren lassen, sondern ihre Kleinheit nutzen, um bestimmte Leistungsmerkmale zu erreichen" (Ingersoll 2009: 589). SMR versprechen überschaubare Baukosten, Terminalsicherheit und -reduzierung sowie geringere Vorlaufkosten. Die geringere Kapazität von SMRs wird wahrscheinlich zu einer Verlagerung der Kostentreiber weg vom Kapital hin zu Betriebs- und Wartungskosten führen. Die Fixkosten für den Betrieb einer SMR sinken nicht mit der Größe der Kapazität: daher ist die Spanne zwischen Betriebskosten und Einnahmen bei einer SMR geringer als bei einem großen Kernkraftwerk. Keiner der SMR-Entwürfe weist alle Merkmale auf, die das Fehlen von Größenvorteilen ausgleichen sollten. Im Allgemeinen könnten SMRs die Baukosten im Vergleich zu großen Reaktoren senken, aber es ist unwahrscheinlich, dass SMRs niedrigere Kosten für die Erzeugung jeder einzelnen Einheit elektrischer Energie aufweisen als große Reaktoren (Mignacca & Locatelli 2020). Um sie für Investoren attraktiv zu machen, müssen SMRs nachweisen, dass die reduzierten Baurisiken im Zusammenhang mit Zeit- und Kostenüberschreitungen den Verlust an Betriebseinnahmen mindern (Agar & Locatelli 2020). Ein Bericht der OECD-Agentur für Kernenergie aus dem Jahr 2016 kam jedoch zu dem Schluss, dass selbst der von einem russischen schwimmenden Kraftwerk erzeugte Strom voraussichtlich etwa 200 US\$ (180 €) pro Megawattstunde (MWh) kosten wird, wobei die hohen Kosten auf den hohen

Personalbedarf, die hohen Brennstoffkosten und die für die Instandhaltung des Binnenschiffs und der Küsteninfrastruktur erforderlichen Ressourcen zurückzuführen sind (OECD 2016). Man müsste Tausende solcher Reaktoren bauen, um einen signifikanten Beitrag im Rahmen des Klimawandel-Szenarios zu leisten, was aus mehreren Gründen nicht plausibel ist.

Die ersten operativen Einheiten für die SMR sind seit Jahren angekündigt, aber bisher wurde noch keine eingesetzt (Mignacca & Locatelli 2020). Die britische Regierung strebt an, die ersten SMR-Einheiten bis 2030 einsatzbereit zu haben. Die Bauzeit für laufende Projekte scheint sich im Bereich von acht bis neun Jahren zu bewegen.

SMRs werden die wirtschaftliche Herausforderung nur noch erhöhen. SMRs sind wirtschaftlich nicht wettbewerbsfähig mit großen Kernreaktoren (Mignacca & Locatelli 2020). Darüber hinaus argumentiert Cooper (2014), dass es keinen Grund zur Annahme gibt, dass SMR-Eigenschaften die Nachfrage nach Kernkraftwerken erhöhen würden. Ramana & Ahmad (2016) heben hervor, dass SMRs den Bedarf an Standorten erhöhen, wenn man bedenkt, dass mehr SMRs erforderlich sind, um die gleiche Leistung eines großen Reaktors zu erreichen. Kürzlich schätzte das australische CSIRO-Institut die hoffnungslos unwirtschaftlichen Baukosten für SMRs auf 16.304 A\$ pro Kilowatt (kW) (Graham et al. 2020). Der CSIRO-Bericht löste eine lebhafte Diskussion in der Branche aus. Ihm standen optimistischere Zahlen zu einem "hypothetischen Reaktor" gegenüber, aber der Durchschnitt der öffentlich verfügbaren Daten liegt leicht über dem CSIRO-Wert.⁹

Nur sehr wenige Studien haben die Betriebs-, Wartungs- und Stilllegungskosten der SMR analysiert. Es besteht eine Wissenslücke über die Kosten und den Nutzen der modularen Bauweise (Mignacca & Locatelli 2020). Cooper (2014) weist auch darauf hin, wie herausfordernd und kapitalintensiv die Schaffung einer massiven Montagelinie wäre. Dieser Ansatz könnte auch den Wettbewerb behindern, der Innovation und Kostenreduzierung vorantreibt, indem Subventionen und öffentliche Garantien in einer Technologie gebunden werden. Darüber hinaus können Lerneffekte die Nachteile der Größenordnung nicht ausgleichen, weil der Unterschied zwischen dem Lernen vor Ort und dem Lernen weltweit besteht und weil eine große Anzahl von SMRs erforderlich ist, um vom Lerneffekt zu profitieren.

Schließlich erschwert der **jüngste Erfolg der erneuerbaren Energien** die Entwicklung der Kernenergie noch weiter (Markard et al. 2020). Beispielsweise sind die Stromgestehungskosten (engl. Levelized Cost of Electricity, LCOE, auch: Nivellierte Energiekosten) der Photovoltaik zwischen 2010 und 2016 um mehr als 60% gesunken (Ram et al. 2018). Ein Vergleich mit einer Business-as-usual (BAU)-Strategie zeigt, dass ein zu 100% auf erneuerbaren Energien basierendes Stromsystem 55-69% billiger ist als eine BAU-Strategie ohne und mit Treibhausgasemissionskosten (Aghahosseini et al. 2020). Markard et al. (2020) stellen fest, dass eine erodierende Akteursbasis, schrumpfende Chancen in liberalisierten Strommärkten, das Auseinanderbrechen bestehender Netze, Legitimitätsverlust, zunehmende Kosten- und Zeitüberschreitungen sowie aufgegebene Projekte Anzeichen für den Niedergang der Kernkraft sind (Markard et al. 2020).

In Bezug auf die Kernenergie hob der IPCC die Bereitstellung einer stabilen Grundlaststromversorgung, geringere Preisvolatilität und lokale Beschäftigung als positiv hervor (IPCC 2014, IPCC 2018, Kap.5: 507).

⁹ Siehe: [Reneweconomy report: Small modular reactor rhetoric hits a hurdle](#) (Zugriff: 18.6.2020)

Auf der anderen Seite weist der IPCC auf die infrastrukturellen Altlastenkosten von Abfall und stillgelegten Reaktoren hin (Marra & Palmer 2011, Greenberg 2013, Skipperud et al. 2013, Tyler et al. 2013, IPCC 2014).

Nach Verbruggen (2008) und Brown et al. (2018) ergänzen sich erneuerbare Energien und Kernenergie nicht gut. Aufgrund ihrer hohen Kapitalkosten und ihrer langsamen Lastwechselrate (OECD/NEA 2012) sind Kernkraftwerke am wirtschaftlichsten, wenn sie die ganze Zeit mit voller Leistung betrieben werden, während die Variabilität der erneuerbaren Energien einen flexiblen Regelenergiepark erfordert. Es gibt aber auch gegensätzliche Ansichten dazu, z.B. von Suman (2018), der argumentiert, dass die Kernenergie die Grundlast und die erneuerbaren Energien den verbleibenden Energiebedarf decken würden.

Für den Vergleich von Stromerzeugungstechnologien und die Entscheidung zwischen ihnen bezieht sich die Energiewirtschaft häufig auf die Stromgestehungskosten (LCOE), die nur die privaten Kosten, nicht aber die externen Kosten (Kosten der Treibhausgasemissionen, Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, die langfristige Abfallentsorgung, die Stilllegung von Anlagen, die Finanzierung und Budgetüberschreitungen) und somit nicht die gesamten sozialen Kosten umfassen. Frühere Versionen der Vollkostenberechnung im Energiesektor sind im Projekt ExternE¹⁰ zu finden (Owen 2006, Rafaj & Kypreos 2007). Ram et al. (2018) zielen darauf ab, die Vollkosten der Stromerzeugung durch die Internalisierung der Kosten der Treibhausgasemissionen und anderer externer Kosten über verschiedene Stromerzeugungs- und -speichertechnologien in allen G20-Ländern zu berücksichtigen.

Drei Aspekte werden in den LCOE-Berechnungen nicht berücksichtigt. Der LCOE ist ein Indikator für den Vergleich der Kosten der Stromproduktion zwischen einzelnen Technologien, nicht für die Gesamtkosten des Energiesystems:

(a) Die **Kosten für das Management von Unterbrechungen**. Eine höhere Durchdringung mit Sonnen- oder Windenergie würde bedeuten, dass im Vergleich zur Spitzenlast in einem Netz eine höhere installierte Kapazität erforderlich ist, so dass genügend "betriebsbereite" Kapazität im System vorhanden ist, wenn Kraftwerke für erneuerbare Energien nicht laufen können. Netzverbindungen zu anderen Netzen tragen dazu bei, das Ausmaß des Problems der Unterbrechungen zu verringern (Timilsina 2020).

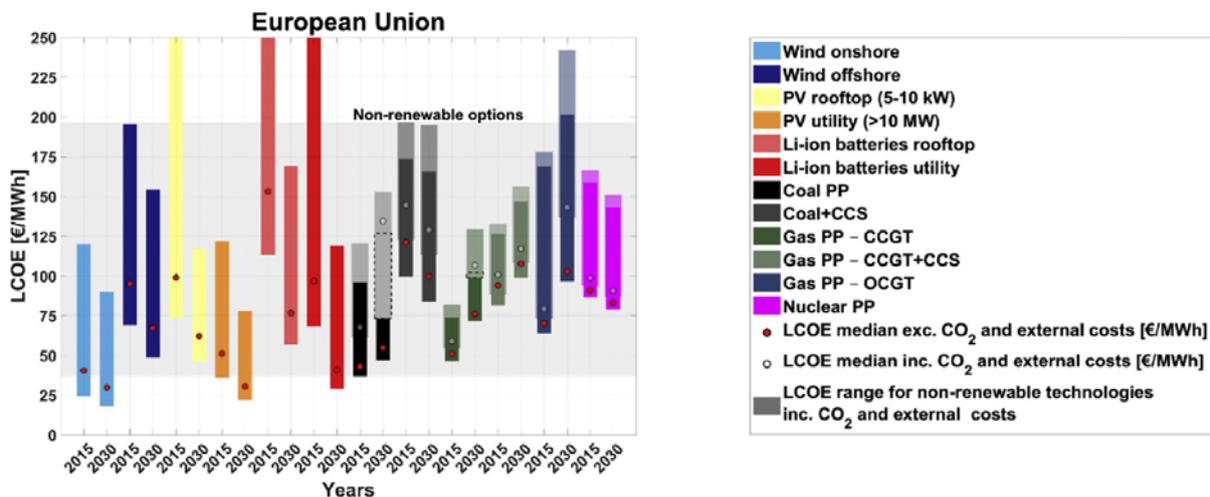
(b) Der **modulare und dezentrale Charakter** einiger Technologien für erneuerbare Energien, insbesondere von Solar- und Mikro-Wasserkraftwerken, ist von großem Wert für den **Zugang zu Elektrizität in entlegeneren und ländlichen Gebieten weltweit** (Timilsina 2020).

(c) Die Schätzungen des LCOE enthalten auch nicht die **Kosten, die mit nuklearen Unfällen verbunden** sind. Ein schwerer Nuklearunfall in Frankreich könnte Kosten in Höhe von rund 120 Milliarden € und ein katastrophaler Nuklearunfall in Höhe von rund 400 Milliarden € verursachen (Pascucci-Cahen & Patrick 2013, IRSN 2014, Ashley et al. 2017). Nach Ansicht der Leiter der Behörden für nukleare Sicherheit und Strahlenschutz "kann die Möglichkeit eines schweren Unfallszenarios (d.h. Fukushima-ähnlich) ohne oder mit unzureichenden Informationen über den Anlagenzustand nicht völlig ausgeschlossen werden" (Bijlholt et al. 2014: 7). Die schwierige Situation, die durch potenziell hohe Kosten, Risiken und Unsicherheiten gekennzeichnet ist, wird durch schwache Institutionen noch verschärft. Die maximale nukleare Haftungsanforderung für die Betreiber von Kernkraftwerken ist nach dem revidierten Pariser Übereinkommen auf 700 Millionen € begrenzt. Die Notwendigkeit, eine unbegrenzte Haftung zu sichern, würde die wirtschaftliche Berechtigung der Kernenergie verschlechtern. Unter den gegenwärtigen

¹⁰ Siehe: [ExternE Projekt: "External Costs of Energy"](#) (18.6.2020).

Bedingungen ist es offensichtlich, dass die Steuerzahler im Falle eines schweren oder katastrophalen Unfalls für Schäden aufkommen müssen.

Abbildung 5 Stromgestehungskosten (LCOE) inkl. CO₂-Kosten und andere externe Kosten für die Europäische Union in 2015 und 2030 (€/MWh_{e,l}).



Quelle: Ram et al. (2018: 699). Der Bereich der LCOE-Werte nach Technologie für die Jahre 2015 und 2030 wird durch die Balken dargestellt. Die Spanne der LCOE-Werte für konventionelle Technologien (Kohle, Gas und Kernenergie) umfasst auch CO₂-Äq und externe Kosten. Die Mediane der LCOE-Werte für die verschiedenen Technologien werden durch die roten Punkte (ohne CO₂-Äq und externe Kosten) und die weißen Punkte (mit CO₂-Äq und externen Kosten) dargestellt.

Ram et al. (2018) fassen die LCOE aller Technologien in Erneuerbare Energien und Speicherung zusammen, einschließlich Wind onshore, Wind offshore, PV auf dem Dach, PV-Versorgungsunternehmen, Li-Ionen-Batterien auf dem Dach und Li-Ionen-Batterien-Versorgungsunternehmen sowie fossile und nukleare Brennstoffe, einschließlich Kohle-PP, Kohle mit CCS, CCGT, CCGT mit CCS, OCGT und nukleare PP. Im Vergleich zu anderen LCOE-Schätzungen wie Lazard (2019), IRENA (2017, 2018) und Agora Energiewende (2017) sind die Schätzungen von Ram et al. (2018) in Bezug auf die LCOE-Werte erneuerbarer Technologien, insbesondere PV im Versorgungsbereich und Onshore-Wind, eher konservativ. Darüber hinaus werden die LCOE-Werte der erneuerbaren Energien und der Speicherung im Vergleich zu den LCOE-Werten der fossilen Brennstoffe und der Kernenergie bewertet, mit und ohne Berücksichtigung der externen Kosten und der CO₂-Äq-Kosten für 2015 sowie 2030.

Ram et al. (2018) berechneten niedrige, mittlere und hohe LCOE, um nationale Unterschiede in den LCOE-Komponenten und die Varianz der Energieerzeugung aus verschiedenen Technologien zu berücksichtigen. Die Varianz kann im Fall der PV- und Windenergieerzeugung auf geografische Faktoren zurückzuführen sein, aber auch auf die Art und Weise, wie die Technologien im Energiesystem eingesetzt werden (Spitzenlast- vs. Grundlastkraftwerke). Die Hauptfaktoren für die Varianz des LCOE sind Investitionsausgaben, Investitionen und Überschreitungen sowie Volllaststunden. Die Berechnungen wurden von Martikainen (2019) kritisiert, worauf Ram et al. (2020) mit einer starken Entgegnung reagierten.

In der Europäischen Union weist die Onshore-Windenergie derzeit den niedrigsten Gesamt-LCOE auf, insbesondere in Regionen hoher Breitengrade (entweder im Norden oder im Süden). Im Jahr 2030 werden PV-Solarkraftwerke in allen G20-Ländern die niedrigste LCOE aller Technologien aufweisen, mit Ausnahme der nordeuropäischen Länder, in denen die Onshore-Windenergie weiterhin die niedrigste LCOE aufweist.

Auf globaler Ebene, vertreten durch alle G20-Länder, wird die Photovoltaik auf Dächern im Jahr 2030 wettbewerbsfähiger als die konventionelle Energieerzeugung (fossile Brennstoffe und Kernenergie), insbesondere wenn eine vollständige Kostenspanne für alle Technologien internalisiert wird (Ram et al. 2018).

Herkömmliche Brennstoffe werden 2030 deutlich weniger wettbewerbsfähig, wenn die Kosten von CO₂-Äq und anderen Externalitäten vollständig berücksichtigt werden. Gasbasierte Technologien, wichtige Anbieter von Flexibilität für globale Energiesysteme, haben das Potenzial, den gesamten LCOE durch den Wechsel von Erdgas zu nachhaltigerem biobasiertem oder synthetischem Methan zu reduzieren. Die CO₂-Abscheidung und -speicherung bietet die Möglichkeit, die mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe verbundenen Kosten zu senken, bleibt aber trotz der zu erwartenden Kostensenkungen durch die Entwicklung der CCS-Technologie deutlich höher als bei der Erzeugung erneuerbarer Energien. Es muss darauf hingewiesen werden, dass Netto-Null-Emissionen mit CCS auf der Basis fossiler Brennstoffe unmöglich sind und immer noch höhere Kosten mit sich bringen als auf erneuerbaren Energien basierende Energiesysteme (Ram et al. 2018).

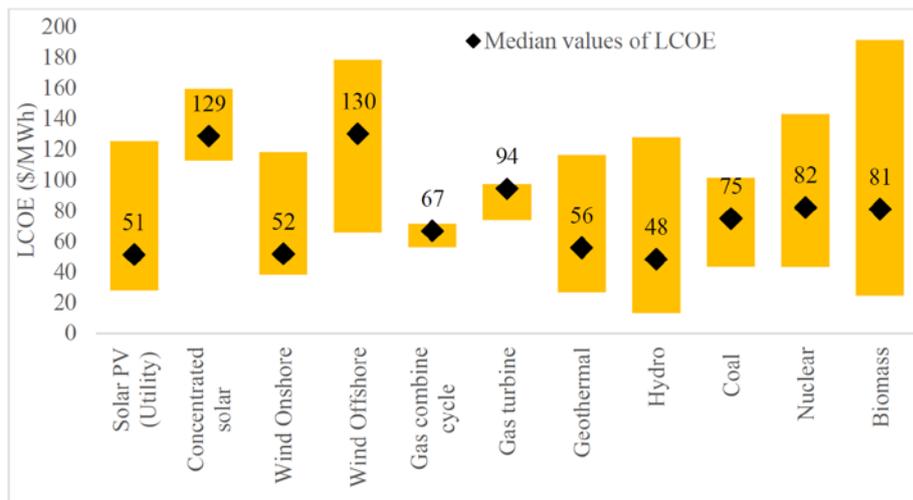
Die Kernkraft hat in den meisten G20-Ländern bereits 2015 ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Wind- und Solarenergie verloren und verschlechtert ihre relative Wettbewerbsfähigkeit gegenüber erneuerbaren Energien im Jahr 2030 weiter, wenn hohe soziale, ökologische und wirtschaftliche Kosten in den LCOE-Berechnungen internalisiert werden (Ram et al. 2018).

In Frankreich und Deutschland ist der LCOE-Wert der Onshore-Windenergie (mit 47 und 44 €/MWh_{el}) derzeit wettbewerbsfähig mit der auf fossilen Brennstoffen basierenden Energie (Kohle hat einen LCOE von 43 und 42 €/MWh_{el}), und bis 2030 werden der LCOE-Wert der Onshore-Windenergie (29 und 28 €/MWh_{el}) und der PV im Versorgungsbereich (32 und 40 €/MWh_{el}) wesentlich niedriger sein. In Italien wird mit fossilen Brennstoffen im Jahr 2015 Strom (Kohle mit einem LCOE-Wert von 43 €/MWh_{el}) mit einem niedrigeren LCOE produziert, während 2030 Windkraftanlagen an Land (29 €/MWh_{el}) und PV-Anlagen im Versorgungsmaßstab (27 €/MWh_{el}) einen viel niedrigeren LCOE-Wert haben werden (Ram et al. 2018).

Kostenberechnungen in Ram et al. (2018) zeigten, dass erneuerbare Energien und Speicherung bis 2030 billiger sind als fossile und nukleare Quellen, selbst ohne Berücksichtigung der externen Kosten. Der Kostenrückgang der Wind- und Solar-Photovoltaik (PV)-Technologien hat die meisten Erwartungen der Industrie übertroffen. Dass erneuerbare Energien "viel zu teuer" sind, gilt nicht mehr. Die G20-Länder haben die Möglichkeit, ihre Energiekosten bis 2030 erheblich zu senken, indem sie in erneuerbare Energien investieren. Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien bieten 2030 die niedrigsten LCOE-Bereiche der G20-Länder. Die Photovoltaik im Versorgungsbereich weist im Allgemeinen die niedrigsten Werte zwischen 16 und 117 €/MWh_{el} auf, und der LCOE-Bereich für Onshore-Windenergie liegt zwischen 16 und 90 €/MWh_{el}. Die Photovoltaik auf dem Dach bietet im Allgemeinen die nächstniedrigeren LCOE-Werte zwischen 31 und 126 €/MWh_{el}, gefolgt von den LCOE-Werten für Offshore-Windenergie zwischen 64 und 135 €/MWh_{el}. Solare PV- und Batteriesysteme sind auf LCOE-Basis im Versorgungsbereich zwischen 21 und 165 €/MWh_{el} und im Privatkundenbereich zwischen 40 und 204 €/MWh_{el} äußerst wettbewerbsfähig. Erneuerbare Energien haben beträchtlichen Zusatznutzen, wie eine bessere Gesundheit der Bürger, niedrigere Gesundheitskosten und eine verbesserte Energiesicherheit.

Diese Ergebnisse von Ram et. al. (2020) stimmen größtenteils mit den Ergebnissen einer anderen aktuellen Studie von Timilsina (2020) überein. Was die Medianwerte der LCOEs betrifft, so sind Wasserkraft, Photovoltaik, Onshore-Wind und Geothermie im Vergleich zu den übrigen Technologien günstiger. Wasserkraft ist am günstigsten, gefolgt von Solar-PV, Onshore-Wind und Geothermie. Nur die Offshore-Windenergie schneidet deutlich schlechter ab als in Ram et al. (2020); die konzentrierte Solarenergie, die in Ram et al. (2020) nicht berücksichtigt wurde, ist am teuersten.

Abbildung 6 Der Bereich der Stromgestehungskosten (LCOE) für die maximalen und minimalen Werte der Kapitalkosten, wenn andere Inputvariablen standardisiert werden (€/MWh).



Source: Timilsina (2020:13).

Timilsina (2020) konzentriert sich auf die sieben Faktoren, die die LCOE-Werte in erster Linie beeinflussen: Diskontsatz, Übernacht-Baukosten, Betriebs- und Wartungskosten, Brennstoffpreise, Heizrate, Kapazitätsverfügbarkeitsfaktor und wirtschaftliche Lebensdauer. Timilsina (2020) zeigt, dass im unteren Bereich der Kapitalkosten die LCOE-Werte von Technologien für erneuerbare Energien, mit Ausnahme der konzentrierten Solarenergie und der Offshore-Windenergie, niedriger sind als die von Technologien auf der Grundlage fossiler Brennstoffe und der Kernenergie. Da die Kapitalkosten der auf Biomasse basierenden Technologie je nach Art des Rohstoffs stark variieren, hängt die Kostenwettbewerbsfähigkeit von Biomasse gegenüber fossilen Brennstoffen und Kernenergie von der Art des Rohstoffs ab.

Timilsina (2020) veranschaulicht anhand vieler Datenquellen, wie stark die Werte der Inputvariablen, insbesondere die Kapitalkosten, für eine bestimmte Technologie variieren. Es werden auch die Auswirkungen verschiedener Faktoren auf die LCOEs aller in der Studie betrachteten Technologien dargestellt. Da die Kapitalkosten bei erneuerbaren Technologien die Hauptkomponente des LCOE darstellen, ist der LCOE für diese Variable empfindlich. Es wird festgestellt, dass die Kapazitätskostenelastizitäten des LCOE erneuerbarer Energiequellen zwischen 0,7 und 1,0 variieren, wenn die Kapitalkosten nicht mit anderen Inputvariablen, wie z.B. Kapazitätsfaktoren, verknüpft sind. Erneuerbare Energien reagieren auch empfindlich auf die Kapazitätsauslastungsfaktoren und die wirtschaftliche Lebensdauer der Technologien. Dies gilt auch für die Kerntechnik.

7.4 Zeitliche Perspektive von Klimaschutzmaßnahmen

Bis 2030 muss die Transformation der Energiesysteme und Energieinfrastrukturen wirksam eingeleitet werden. Das derzeitige **Tempo des Ausbaus der Kernenergie wird in vielen Ländern durch die mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz** aufgrund der Sorge über Unfallrisiken und die Entsorgung radioaktiver Abfälle **eingeschränkt** (IPCC 2014 Kap.2 & AR5). Die derzeitige Zeitspanne zwischen dem Datum der Entscheidung und der Inbetriebnahme der Anlagen wird mit 10-19 Jahre angegeben (Lovins et al., 2018), was bedeutet, dass die zu ersetzenden Kohlekraftwerke noch bis zu 20 Jahre in Betrieb wären. Diese Verzögerung bei der Stilllegung von fossil befeuerten Kraftwerken wäre höchst problematisch, da sie die Erreichung des Klimaziels unmöglich machen würde.

Im Gegensatz dazu haben **Windenergie- und PV-Systeme sehr kurze Planungs- und Implementierungszeiten** (2-5 Jahre für Solar- oder Windkraftanlagen), und PV-Systeme können oft dort installiert werden, wo tatsächlich Strom benötigt wird. Bei der Windenergie hat die Beteiligungsmöglichkeit der lokalen Bevölkerung im Rahmen von kooperativen Planungsansätzen durch finanzielles Kapital, Wissen und Netzwerke zur Mobilisierung dazu beigetragen, dass Planungs- und Implementierungsphasen deutlich verkürzt wurden (Wolsink 2007), und die damit verbundene Wertschöpfung in der Region verblieb.

Angesichts der Tatsache, dass der Neubau von Kernkraftwerken im Vergleich zu den erneuerbaren Energien sowohl auf der Grundlage des LCOE als auch auf der Grundlage der wertbereinigten nivellierten Elektrizitätskosten (VALCOE) ungünstig ist, kommt die IEA in ihrem jüngsten Bericht zu dem Schluss, dass die Laufzeitverlängerung (LTE) und/oder der Langzeitbetrieb (LTO) auf absehbare Zeit vielversprechende nukleare Optionen darstellen. Bei einem durchschnittlichen Reaktoralter von etwa 35 Jahren in der EU ist die Verlängerung der Lebensdauer bestehender Kernkraftwerke, die sicher betrieben werden können, jedoch eine Herausforderung (IEA 2020). Laufzeitverlängerung als Strategie gegen die aufgezählten wirtschaftlichen Herausforderungen, vor denen der nukleare Neubau steht, erscheint aus Sicherheitsgründen problematisch, und selbst bei Laufzeitverlängerung ist es notwendig, Ersatzkapazitäten aufzubauen.

8 Zusammenfassende Bewertung

In diesem Meta-Review wurde schwerpunktmäßig die wissenschaftliche Literatur der letzten 10-15 Jahre über die Beziehung der Kernenergie zu den verschiedenen ökologischen und sozialen Zielen der Taxonomie-Verordnung gesichtet.

Die Taxonomie enthält drei Kriterien, die erfüllt sein müssen, um als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung eingestuft zu werden: Erstens, einen ‚wesentlichen‘ Beitrag zu mindestens einem der sechs Umweltziele leisten (oder zumindest die Ermöglichung anderer, einen ‚wesentlichen‘ Beitrag zu leisten) und zweitens, die Erfüllung des Kriteriums "Do No Significant Harm" zu allen anderen Umweltzielen, und drittens, der Entsprechung der in der Taxonomie angeführten internationalen Sozialstandards.

Dieses Review soll zu einem klareren Bild über die Frage der Einhaltung der DNSH-Kriterien durch die Kernenergie beitragen, welche aufgrund der komplexen Zusammenhänge und der damit verbundenen Risiken sowie der bei der Kernenergieerzeugung angewandten Managementpraktiken recht umstritten war. Dieses Ziel konnte bis zu einem gewissen Grad erreicht werden. Allerdings liegen nicht für jedes der betrachteten Umweltziele wissenschaftlich eindeutige Ergebnisse vor. Wie bereits im Taxonomy Technical Report vom Juni 2019 erwähnt, gibt es für wichtige DNSH-Ziele Lücken in den verfügbaren Daten. Dennoch war es möglich, über die im Technischen Bericht zitierte Literatur deutlich hinauszugehen, um die wissenschaftliche Basis der Diskussion zu erweitern.

Insgesamt ist die Kernenergie im Vergleich zu fossilen Brennstoffen als eine Energiequelle mit geringen Treibhausgasemissionen anerkannt. Bioenergie, Kernkraft und Photovoltaik sind die drei "treibhausgasarmen" Energiequellen mit relativ höheren Emissionen im Vergleich zu den "Niedrig-Treibhaus-Champions" Sonne, Erdwärme, Wasser, Ozean und Wind, was die Kernkraft zu einer treibhausgasarmen Technologie macht, aber nicht ganz zu den Besten in diesem Sektor ('best-in-class Ansatz'). Darüber hinaus wären CO₂-intensive Kohlekraftwerke bis zu 10-20 Jahre weiter operativ bis die Kernkraftwerke in Betrieb genommen werden könnten. Die in den letzten Jahren zunehmenden Analysen im Themenfeld kommen zu Schluss, dass der Hauptbeitrag zur Reduzierung von CO₂-Schadstoffen in Zukunft durch steigende Energieeffizienz und erneuerbaren Energien geleistet wird.

In wirtschaftlicher Hinsicht wurde festgestellt, dass sich der Business Case der Kernenergie in den letzten Jahrzehnten abgeschwächt hat. Basierend auf einer Vollkostenrechnung in Europa ist dies unter anderem auf den jüngsten Erfolg der erneuerbaren Energien zurückzuführen, wobei sich die Kosten von PV-Modulen innerhalb von 10 Jahren um 80% verringert haben und jene von Windturbinen um 30% gesunken sind, sowie auf ein größeres öffentliches Interesse an den Zusatznutzen der erneuerbaren Energietechnologien. Auf diese Weise sind Energiesysteme auf der Basis erneuerbarer Energien nicht nur machbar, sondern bereits wirtschaftlich tragfähig und jedes Jahr kostengünstiger. Aus diesem Grund ist die Kernenergie bereits heute von den erneuerbaren Energiequellen überholt worden und sich der Unterschied in Zukunft sehr wahrscheinlich noch vergrößern wird.

Die Risiken nuklearer Unfälle werden auch weiterhin bestehen bleiben, weil die Wahrscheinlichkeit von Unfällen zwar verringert, aber niemals ausgeschlossen werden kann (Bijholt et al. 2014). Zu den weiteren Hindernissen und Risiken, die mit einer zunehmenden Nutzung der Kernenergie verbunden sind, gehören Betriebsrisiken und die damit verbundenen Sicherheitsbedenken, Risiken des Uranabbaus, finanzielle und regulatorische Risiken, ungelöste Fragen der Abfallentsorgung, Bedenken hinsichtlich der Verbreitung von

Kernwaffen und die damit einhergehende negative öffentliche Meinung. Darüber hinaus bleibt das komplexe Thema radioaktiver Abfälle, und die Herausforderungen in Zusammenhang mit der gesellschaftlichen Akzeptanz, bestehen. Wir leben bereits heute in einer Welt, in der mehr als eine Viertelmillion Tonnen hochradioaktiver Abfälle aus der Kernkraftproduktion zwischengelagert sind (und tlw. undicht werden könnten), die bis 2100 weltweit auf über eine Million Tonnen anwachsen könnten. Darüber hinaus waren Sicherheits- und Gesundheitsfragen in Uranbergwerken und Menschenrechtsverletzungen gegenüber indigenen Gemeinschaften in verschiedenen Teilen der Welt während der gesamten Geschichte des Uranbergbaus ein Thema.

Die verfügbaren Daten und dementsprechend auch die wissenschaftlichen Analysen sind nicht immer vollständig, um die Kernenergie anhand der in der Taxonomie definierten Kriterien und Ziele zu beurteilen. Auch wenn somit Bewertungen nach einzelnen Kriterien hinterfragt werden können, erscheint die Argumentation sinnvoll, dass ein erheblicher Teil der wissenschaftlichen Literatur bei der zusammengenommenen Betrachtung der ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen der Kernenergieproduktion eher Nachteile sehen. Die Vorteile scheinen durch die Umweltschäden und Risiken, die mit dem Bergbau, der Kernenergieproduktion und der Lagerung nuklearer Abfälle verbunden sind bzw. nahegelegt werden können, sowie durch die Gefahren nuklearer Unfälle, aufgehoben zu werden.

Ob die Kernenergie in einen zukünftigen nachhaltigen Energiemix mit substanziellen CO₂-Reduktionen einbezogen werden sollte, wird in der Literatur in unterschiedlichen Schattierungen diskutiert, aber zunehmend in Richtung eines Ausstiegs aus der Kernenergie. Der Grund dafür ist, dass es andere Energiequellen mit zum Teil noch geringeren Treibhausgasemissionen und geringeren wirtschaftlichen und sozialen Kosten sowie (intergenerationellen) Risiken gibt, welche die guten Leistungen beim Klimaschutz nicht kompromittieren.

9 Literatur

- Abbott, D. (2011). Is nuclear power globally scalable? *Proceedings of the IEEE*, 99(10), 1611-1617.
- Agar, A. S. and G. Locatelli (2020). *Economics of nuclear power plants. Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*. S. U.-D. Khan and A. Nakhabov, Woodhead Publishing.
- Aghahosseini, A., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2020). Towards sustainable development in the MENA region: Analysing the feasibility of a 100% renewable electricity system in 2030. *Energy Strategy Reviews*, 28, 100466.
- Agora Energiewende (2017). *Future Cost of Onshore Wind*. Berlin. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Future_Cost_of_Wind/Agora_Future-Cost-of-Wind_WEB.pdf
- Akdag, S., & Yıldırım, H. (2020). Toward a sustainable mitigation approach of energy efficiency to greenhouse gas emissions in the European countries. *Heliyon*, 6(3), e03396.
- Akram, R., Chen, F., Khalid, F., Ye, Z., & Majeed, M. T. (2020). Heterogeneous effects of energy efficiency and renewable energy on carbon emissions: Evidence from developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119122.
- Akram, R., Majeed, M. T., Fareed, Z., Khalid, F., & Ye, C. (2020). Asymmetric effects of energy efficiency and renewable energy on carbon emissions of BRICS economies: evidence from nonlinear panel autoregressive distributed lag model. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15.
- Almond, D., Edlund, L., & Palme, M. (2009). Chernobyl's subclinical legacy: prenatal exposure to radioactive fallout and school outcomes in Sweden. *The Quarterly Journal of Economics*, 124(4), 1729-1772.
- Ashley, S. F., Vaughan, G. J., Nuttall, W. J., Thomas, P. J., & Higgins, N. A. (2017). Predicting the cost of the consequences of a large nuclear accident in the UK. *Process Safety and Environmental Protection*, 112, 96-113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.032>
- Azzuni, A., & Breyer, C. (2018). Definitions and dimensions of energy security: a literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 7(1), e268.
- Baker PJ & Hoel DG. (2007). Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities. *European Journal of Cancer Care*, 16, 355-363.
- Banerjee, S., & Gupta, H. P. (2019). Nuclear Power from Thorium: Some Frequently Asked Questions. In *Thorium—Energy for the Future*, conference paper, 11-26.
- Bartos, M., Chester, M. (2015). Impacts of climate change on electric power supply in the Western United States. *Nature Climate Change*, 5, 748–752.
- Bazyka, D., Pryszyzhnyuk, A., Gudzenko, N., Dyagil, I., Belyi, D., Chumak, V., & Buzunov, V. (2018). Epidemiology of late health effects in Ukrainian Chornobyl cleanup workers. *Health physics*, 115(1), 161-169.
- Behjati, S., Gundem, G., Wedge, D. C., Roberts, N. D., Tarpey, P. S., Cooke, S. L., ... & Nik-Zainal, S. (2016). Mutational signatures of ionizing radiation in second malignancies. *Nature Communications*, 7(1), 1-8.
- Behrens, P., Van Vliet, M. T., Nanninga, T., Walsh, B., & Rodrigues, J. F. (2017). Climate change and the vulnerability of electricity generation to water stress in the European Union. *Nature Energy*, 2(8), 1-7.
- Beresford, N., Horemans, N., Raines, K. E., Wood, M. D., Orizaola, G., Laanen, P., ... & Bonzom, J. M. (2019). Towards solving a scientific controversy - The effects of ionising radiation on the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 106033.
- Berger, A. et al. (2017). How much can nuclear energy do about global warming? *International Journal of Global Energy Issues*, 40(1/2), 43-78.
- Bickerstaff, K., Lorenzoni, I., Pidgeon, N. F., Poortinga, W., & Simmons, P. (2008). Reframing nuclear power in the UK energy debate: nuclear power, climate change mitigation and radioactive waste. *Public Understanding of Science*, 17(2), 145–169.

- Bijlholt, J., C. Constantinou, A. Janssens, J. Djounova, N. Fueleop, F. Gering, J. Lieser, O. Halldorsson, S. Haywood and P. Hofer (2014). [HERCA-WENRA Approach for a better cross-border coordination of protective actions during the early phase of a nuclear accident](#). Stockholm.
- Bollaerts, K., Simons, K., Van Bladel, L., De Smedt, T., Sonck, M., Fierens, S., ... & Francart, J. (2018). Childhood leukaemia near nuclear sites in Belgium, 2002–2008. *European Journal of Cancer Prevention*, 27(2), 184–191.
- Bonar, P. A., Bryden, I. G., & Borthwick, A. G. (2015). Social and ecological impacts of marine energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 486-495.
- Bonisoli-Alquati, A., Koyama, K., Tedeschi, D. J., Kitamura, W., Sukuzi, H., Ostermiller, S., ... & Mousseau, T. A. (2015). Abundance and genetic damage of barn swallows from Fukushima. *Nature Scientific Reports*, 5, Article number 9432.
- Boratyński, Z., Arias, J. M., Garcia, C., Mappes, T., Mousseau, T. A., Møller, A. P., ... & Tukalenko, E. (2016). Ionizing radiation from Chernobyl affects development of wild carrot plants. *Nature Scientific Reports*, 6, Article number: 39282.
- Borrás, S., & Edler, J. (2020). The roles of the state in the governance of socio-technical systems' transformation. *Research Policy*, 49(5), 103971.
- BP (2019). *BP Statistical Review of World Energy 2019*. 68th edition.
- Brook, B.W., Bradshaw, CJA. (2015). Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 29(3), 702–712.
- Brown, T.W., Bischof-Niemz, T., Blok, K., Breyer, C., Lund, H., Mathiesen, B.V. (2018). Response to 'Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 834-847.
- Brugge, D., & Buchner, V. (2011). Health effects of uranium: new research findings. *Reviews on Environmental Health*, 26(4), 231-249.
- Budnitz, R.J., (2016). Nuclear power: Status report and future prospects. *Energy Policy*, 96, 735–739.
- Burgherr, P., & Hirschberg, S. (2014). Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector. *Energy Policy*, 74, S45-S56.
- Byers, E. A., Hall, J. W., & Amezcaga, J. M. (2014). Electricity generation and cooling water use: UK pathways to 2050. *Global Environmental Change*, 25, 16-30.
- Capros, P., Zazias, G., Evangelopoulou, S., Kannavou, M., Fotiou, T., Siskos, P., ... & Sakellaris, K. (2019). Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality. *Energy Policy*, 134, 110960.
- Carayannis, E. G., Draper, J., & Iftimie, I. A. (2020). Nuclear Fusion Diffusion: Theory, Policy, Practice, and Politics Perspectives. *IEEE Transactions on Engineering Management*, doi: 10.1109/TEM.2020.2982101.
- Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, et al. (2005). Risk of cancer after low doses of ionising radiation - retrospective cohort study in 15 countries. *The British Medical Journal*, 331, 77–80.
- Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: time for change. *Food and Energy Security*, 6(2), 61-77.
- Christodouleas, J. P., Forrest, R. D., Ainsley, C. G., Tochner, Z., Hahn, S. M., & Glatstein, E. (2011). Short-term and long-term health risks of nuclear-power-plant accidents. *New England Journal of Medicine*, 364(24), 2334-2341.
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), 294-303.
- Clack, C.T.M. et al. (2017). Evaluation of a proposal for reliable low-cost grid power with 100% wind, water, and solar. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(26), 6722–6727.
- Cooper, M. (2014). Small modular reactors and the future of nuclear power in the United States. *Energy Research & Social Science*, 3, 161-177. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.07.014>
- CoRWM (2006). *Managing our radioactive waste safely - Committee on Radioactive Waste Management's recommendations to government*, CoRWM Doc 700,

- <https://www.gov.uk/government/publications/managing-our-radioactive-waste-safely-corwm-doc-700> . London: 195.
- Council of the European Union. Position of the Council at first reading with a view to the adoption of a Regulation of the European Parliament and of the Council on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088. Interinstitutional File: 2018/0178 (COD), 1 April 2020, Brussels.
- Davis, L. W. (2012). Prospects for nuclear power. *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 49-66.
- Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., ... & Clack, C. T. (2018). Net-zero emissions energy systems. *Science*, 360(6396).
- Deas, S. D., Huprikar, N., & Skabelund, A. (2017). Radiation exposure and lung disease in today's nuclear world. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 23(2), 167-172.
- Debs, A. & Monteiro, N. P. (2017). Conflict and Cooperation on Nuclear Nonproliferation. *Annual Review of Political Science*, 20, 331-349.
- Després, J. & Adamovic, M. (2020). Seasonal impacts of climate change on electricity production. EUR 29980 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/879978, JRC118155.
- Diesendorf, M. (2016). Subjective judgments in the nuclear energy debate. *Conservation Biology*, 30(3), 666-669.
- Diesendorf, M., Elliston, B. (2018). The feasibility of 100% renewable electricity systems: A response to critics. *Renewable & Sustainable Energy Reviews.*, 93, 318–330.
- Difiglio, C. and B. Wanner (2013). Economics of Nuclear Power in Liberalized Power Markets. *International Seminar on Nuclear War and Planetary Emergencies—45th Session: The Role of Science in the Third Millennium*, World Scientific.
- Ding, X., Tian, W., Chen, Q., & Wei, G. (2019). Policies on water resources assessment of coastal nuclear power plants in China. *Energy Policy*, 128, 170-178.
- Dodd, D. H., & van Hienen, J. F. A. (1995). The radiological risks associated with the thorium fuelled HTGR fuel cycle. A comparative risk evaluation (No. ECN-I--95-039). Netherlands Energy Research Foundation (ECN).
- Dong, K., Sun, R., Hochman, G. (2017). Do natural gas and renewable energy consumption lead to less CO₂ emission? Empirical evidence from a panel of BRICS countries. *Energy*, 141, 1466e1478.
- Dong, K., Sun, R., Jiang, H., & Zeng, X. (2018). CO₂ emissions, economic growth, and the environmental Kuznets curve in China: What roles can nuclear energy and renewable energy play? *Journal of Cleaner Production*, 196, 51-63.
- Durmaz, A., & Sogut, O. S. (2006). Influence of cooling water temperature on the efficiency of a pressurized-water reactor nuclear-power plant. *International Journal of Energy Research*, 30(10), 799-810.
- Alberici, S., Boeve, S., Preevoort, v.P. et al. (2014). Subsidies and costs of EU energy. Final Report. Project number DESNL14583 by Ecofys, KPMG, CASE, and CE Delft, on behalf of the European Commission, DG Energy, Brussels.
- Einor, D., Bonisoli-Alquati, A., Costantini, D., Mousseau, T. A., & Møller, A. P. (2016). Ionizing radiation, antioxidant response and oxidative damage: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 548, 463-471.
- El-Emam, R. S., & Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 220, 593-609.
- EU Technical Expert Group on Sustainable Finance (2020). Taxonomy: Final report. March 2020, Brussels.
- Fairlie, I., MacKerron, G., Wealer, B. (2018). World Nuclear Waste Report (WNWR). Focus Europe, 7 December 2018, Brussels.
- Feyen L., Ciscar J.C., Gosling S., Ibarreta D., Soria A. (editors) (2020). Climate change impacts and adaptation in Europe. JRC PESETA IV final report. EUR 30180EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/171121, JRC119178.

- Finon, D., & Roques, F. (2013). European electricity market reforms: The “Visible Hand” of public coordination. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2(2), 107-124.
- Forzieri, G. Bianchi, A., Batista e Silva, F., Marin Herrera, MA, Leblois, A., Lavalle, C., C.J.H. Aerts, J., Feyen, L. (2018). Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, 97-107.
- Fricko, O., Parkinson, S. C., Johnson, N., Strubegger, M., van Vliet, M. T., & Riahi, K. (2016). Energy sector water use implications of a 2°C climate policy. *Environmental Research Letters*, 11(3), 034011.
- Fuhrmann, M. (2009). Spreading temptation: Proliferation and peaceful nuclear cooperation agreements. *International Security*, 34(1), 7-41.
- Gillies, M., Richardson, D. B., Cardis, E., Daniels, R. D., O'Hagan, J. A., Haylock, R., ... & Thierry-Chef, I. (2017). Mortality from circulatory diseases and other non-cancer outcomes among nuclear workers in France, the United Kingdom and the United States (INWORKS). *Radiation Research*, 188(3), 276-290.
- Godsey, K. M. (2019). Life Cycle Assessment of Small Modular Reactors Using US Nuclear Fuel Cycle. All Theses. 3235. https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/3235
- Gökgöz, F., & Güvercin, M. T. (2018). Energy security and renewable energy efficiency in EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 226-239.
- Graetz, G. (2014). Uranium mining and First Peoples: the nuclear renaissance confronts historical legacies. *Journal of Cleaner Production*, 84, 339-347.
- Graham, P. Hayward, J., Foster, J., & Havas, L. (2020). GenCost 2019-20. CSIRO publications repository: CSIRO, 2020. <https://doi.org/10.25919/5eb5ac371d372>
- Gralla, F., Abson, D. J., Møller, A. P., Lang, D. J., & von Wehrden, H. (2014). The impact of nuclear accidents on provisioning ecosystem services. *Ecological Indicators*, 41, 1-14.
- Greenberg, M. R. (2013). Public Stakeholders: What We Know and Expect. *Nuclear Waste Management, Nuclear Power, and Energy Choices: Public Preferences, Perceptions, and Trust*. London, Springer: 45-64.
- Grellier, J., Atkinson, W., Bérard, P., Bingham, D., Birchall, A., Blanchardon, E., ... & Do, M. T. (2017). Risk of lung cancer mortality in nuclear workers from internal exposure to alpha particle-emitting radionuclides. *Epidemiology*, 28(5), 675–684.
- Grosche, B., Kreuzer, M., Kreisheimer, M., Schnelzer, M., & Tschense, A. (2006). Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998. *British Journal of Cancer*, 95(9), 1280-1287.
- Grubler, A. (2010). The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing. *Energy Policy*, 38(9), 5174-5188.
- Guo, X., Gin, S., Lei, P., Yao, T., Liu, H., Schreiber, D. K., ... & Vienna, J. D. (2020). Self-accelerated corrosion of nuclear waste forms at material interfaces. *Nature Materials*, 19(3), 310-316.
- Hecht, G. (2012). The work of invisibility: radiation hazards and occupational health in South African uranium production. *Int. Labor Work. Hist.*, 81, 94-113.
- Heinävaara, S. et al. (2010). Cancer incidence in the vicinity of Finnish nuclear power plants: an emphasis on childhood leukemia. *Cancer Causes & Control*, 21(4), 587–595.
- Herrera-Velázquez, J. E. (2007). *Nuclear Fusion as an Energy Option for the 21 st Century. Towards a Cleaner Planet*, Springer: 405-419.
- Hiyama, A., Nohara, C., Kinjo, S., Taira, W., Gima, S., Tanahara, A., & Otaki, J. M. (2012). The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Nature Scientific Reports*, 2, 570.
- Hiyama, A., Nohara, C., Taira, W., Kinjo, S., Iwata, M., & Otaki, J. M. (2013). The Fukushima nuclear accident and the pale grass blue butterfly: evaluating biological effects of long-term low-dose exposures. *BMC evolutionary biology*, 13(1), 168, doi:10.1186/1471-2148-13-168.

- Holland, R. A., Beaumont, N., Hooper, T., Austen, M., Gross, R. J., Heptonstall, P. J., ... & Taylor, G. (2018). Incorporating ecosystem services into the design of future energy systems. *Applied Energy*, 222, 812-822.
- Holland, R. A., Scott, K., Hinton, E. D., Austen, M. C., Barrett, J., Beaumont, N., ... & Eigenbrod, F. (2016). Bridging the gap between energy and the environment. *Energy Policy*, 92, 181-189.
- Hong, S., C.J.A. Bradshaw, and B.W. Brook (2015). Global zero-carbon energy pathways using viable mixes of nuclear and renewables. *Applied Energy*, 143, 451-459.
- Horemans, N., Spurgeon, D. J., Lecomte-Pradines, C., Saenen, E., Bradshaw, C., Oughton, D., ... & Adam-Guillermin, C. (2019). Current evidence for a role of epigenetic mechanisms in response to ionizing radiation in an ecotoxicological context. *Environmental Pollution*, 251, 469-483.
- IAEA (2018). *Climate Change and Nuclear Power 2018*. International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA (2019). *Nuclear Technology Review*. GC(63)/INF/2, International Atomic Energy Agency, Vienna
- Ibrahim, S., Ibrahim, M., & Attia, S. (2014). The impact of climate changes on the thermal performance of a proposed pressurized water reactor: nuclear-power plant. *International Journal of Nuclear Energy*, 2014, 1-7.
- IEA (2019a). *World Energy Outlook 2019*. International Energy Agency, Paris.
- IEA (2019b). *Nuclear power in a clean energy system*. International Energy Agency, Paris.
- IEA (2020). *European Union 2020 - Energy Policy Review*. International Energy Agency, Paris.
- ILO Declaration on Fundamental Principles and Rights at Work (1998). Adopted by the International Labour Conference at its Eighty-sixth Session, Geneva, 18 June 1998 (Annex revised 15 June 2010).
- Ingersoll, D. T. (2009). Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in Nuclear Energy*, 51(4), 589-603. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.01.003>
- IPCC (2011). *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014, ch.2 & AR5). Bruckner T., I. A. Bashmakov, Y. Mulugetta, H. Chum, A. de la Vega Navarro, J. Edmonds, A. Faaij, B. Fungtammasan, A. Garg, E. Hertwich, D. Honnery, D. Infield, M. Kainuma, S. Khennas, S. Kim, H. B. Nimir, K. Riahi, N. Strachan, R. Wisser, and X. Zhang. Energy Systems. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 511-597.
- IPCC (2018). *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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
- IPCC (2018, ch.2). Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño. Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC (2018, ch.4). de Coninck, H., A. Revi, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Buckeridge, A. Cartwright, W. Dong, J. Ford, S. Fuss, J.-C. Hourcade, D. Ley, R. Mechler, P. Newman, A. Revokatova, S. Schultz, L. Steg, and T. Sugiyama. Strengthening and Implementing the Global Response. In: *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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skeea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2018, ch.5). Roy, J., P. Tschakert, H. Waisman, S. Abdul Halim, P. Antwi-Agyei, P. Dasgupta, B. Hayward, M. Kanninen, D. Liverman, C. Okereke, P.F. Pinho, K. Riahi, and A.G. Suarez Rodriguez: Sustainable Development, Poverty Eradication and Reducing Inequalities. In: *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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skeea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IRENA - International Renewable Energy Agency, 2017. *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi. <http://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewablecosts-and-markets>
- IRENA - International Renewable Energy Agency, 2018. *Renewable Power Generation Costs in 2017*.
- IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire). (2014). *Methodology used in IRSN nuclear accident cost estimates in France: IRSN*.
- Jacobson, M. Z. (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science*, 2009(2), 148-173.
- Jacobson, M. Z. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154-1169.
- Jacobson, M. Z. (2019). *Evaluation of Nuclear Power as a Proposed Solution to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security*. In: *100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything*, Textbook in press, Cambridge University Press.
- Jamasb, T. and M. Pollitt (2005). Electricity market reform in the European Union: review of progress toward liberalization & integration. *The Energy Journal*, 26, 11-41.
- Jaramillo, P., Griffin, W.M., Matthews, H.S. (2007). Comparative life-cycle air emissions of coal, domestic natural gas, LNG, and SNG for electricity generation. *Environ. Sci. Technol.* 41, 6290e6296. <https://doi.org/10.1021/es063031o>
- Jenkins, J. D., Luke, M., & Thernstrom, S. (2018). Getting to zero carbon emissions in the electric power sector. *Joule*, 2(12), 2498-2510.
- Jenkins, J., Z. Zhou, R. Ponciroli, R. Vilim, F. Ganda, F. De Sisternes and A. J. A. e. Botterud (2018). The benefits of nuclear flexibility in power system operations with renewable energy. *Applied Energy*, 222, 872-884.
- Jin, T., & Kim, J. (2018). What is better for mitigating carbon emissions – Renewable energy or nuclear energy? A panel data analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 464-471
- Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A., & Scherer, L. (2019). Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109391.
- Junji Cao, Armond Cohen, James Hansen, Richard Lester, Per Peterson and Hongjie Xu (2016). China-U.S. cooperation to advance nuclear power. *Science*, 353 (6299), 547-548.

- Kan, X., Hedenus, F., & Reichenberg, L. (2020). The cost of a future low-carbon electricity system without nuclear power for Sweden. *Energy*, 195, 117015.
- Kanellakis, M., Martinopoulos, G., & Zachariadis, T. (2013). European energy policy - A review. *Energy Policy*, 62, 1020-1030.
- Karkour, S., Ichisugi, Y., Abeynayaka, A., & Itsubo, N. (2020). External-Cost Estimation of Electricity Generation in G20 Countries: Case Study Using a Global Life-Cycle Impact-Assessment Method. *Sustainability*, 12(5), 2002.
- Khatib, H., & Difulio, C. (2016). Economics of nuclear and renewables. *Energy Policy*, 96, 740-750.
- Kim, S.H., K. Wada, A. Kurosawa, and M. Roberts (2014). Nuclear energy response in the EMF27 study. *Climatic Change*, 123(3-4), 443-460.
- Knapp, V., & Pevec, D. (2018). Promises and limitations of nuclear fission energy in combating climate change. *Energy Policy*, 120, 94-99.
- Koo, Y. H., Yang, Y. S., & Song, K. W. (2014). Radioactivity release from the Fukushima accident and its consequences: A review. *Progress in Nuclear Energy*, 74, 61-70.
- Koomey, J. and N. E. Hultman (2007). A reactor-level analysis of busbar costs for US nuclear plants, 1970-2005. *Energy Policy* 35(11), 5630-5642.
- Kopytko, N., & Perkins, J. (2011). Climate change, nuclear power, and the adaptation-mitigation dilemma. *Energy Policy*, 39(1), 318-333.
- Kreuzer, M., Fenske, N., Schnelzer, M., & Walsh, L. (2015). Lung cancer risk at low radon exposure rates in German uranium miners. *British Journal of Cancer*, 113(9), 1367-1369.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J., Adeyi, O., Arnold, R., Baldé, A. B., ... & Chiles, T. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512.
- Lau, L. S., Choong, C. K., Ng, C. F., Liew, F. M., & Ching, S. L. (2019). Is nuclear energy clean? Revisit of Environmental Kuznets Curve hypothesis in OECD countries. *Economic Modelling*, 77, 12-20.
- Lavrinenko, A., Mappes, T., Tukalenko, E., Mousseau, T. A., Møller, A. P., Knight, R., ... & Watts, P. C. (2018). Environmental radiation alters the gut microbiome of the bank vole *Myodes glareolus*. *The ISME Journal*, 12(11), 2801-2806.
- Lazard (2019). Lazard's Levelised Cost of Energy Analysis. Version 13.0. <https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019>
- Lecomte-Pradines, C., Adam-Guillermin, C., Gashchak, S., Bradshaw, C., Copplestone, D., & Beresford, N. A. (2020). More than thirty years after the Chernobyl accident: What do we know about the effects of radiation on the environment? *Journal of Environmental Radioactivity*, 211(106108)
- Lenzen, M (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2178-2199.
- Leuraud, K., Richardson, D. B., Cardis, E., Daniels, R. D., Gillies, M., O'Hagan, J. A., ... & Schubauer-Berigan, M. K. (2015). Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *The Lancet Haematology*, 2(7), e276-e281.
- Linares, P., & Conchado, A. (2013). The economics of new nuclear power plants in liberalized electricity markets. *Energy Economics*, 40, S119-S125.
- Little, M. P., Azizova, T. V., Bazyka, D., Bouffler, S. D., Cardis, E., Chekin, S., ... & Harrison, J. D. (2012). Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and estimates of potential population mortality risks. *Environmental Health Perspectives*, 120(11), 1503-1511.
- Lohrmann, A., Farfan, J., Caldera, U., Lohrmann, C., & Breyer, C. (2019). Global scenarios for significant water use reduction in thermal power plants based on cooling water demand estimation using satellite imagery. *Nature Energy*, 4(12), 1040-1048.

- Lourenço, J., Marques, S., Carvalho, F. P., Oliveira, J., Malta, M., Santos, M., ... & Mendo, S. (2017). Uranium mining wastes: The use of the Fish Embryo Acute Toxicity Test (FET) test to evaluate toxicity and risk of environmental discharge. *Science of the Total Environment*, 605, 391-404.
- Lovering, J.R., Yip, A., Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy*, 91, 371–382.
- Lovett, A. A., Dockerty, T. L., Papathanasopoulou, E., Beaumont, N. J., & Smith, P. (2015). A framework for assessing the impacts on ecosystem services of energy provision in the UK: an example relating to the production and combustion life cycle of UK produced biomass crops (short rotation coppice and *Miscanthus*). *Biomass and Bioenergy*, 83, 311-321.
- Lovins, A.B., T. Palazzi, R. Laemel, and E. Goldfield (2018). Relative deployment rates of renewable and nuclear power: A cautionary tale of two metrics. *Energy Research & Social Science*, 38, 188-192.
- MacKerron, G. (1992). "Nuclear costs: why do they keep rising?" *Energy Policy*, 20(7), 641-652.
- Malin, S. A., & Alexis-Martin, B. (2020). Assessing the state of uranium research: Environmental justice, health, and extraction. *The Extractive Industries and Society*, 7(2), 512-516.
- Markard, J., Bento, N., Kittner, N., & Nuñez-Jimenez, A. (2020). Destined for decline? Examining nuclear energy from a technological innovation systems perspective. *Energy Research & Social Science*, 67, 101512.
- Marra, J. E. and R. A. Palmer (2011). Chapter 7 - Radioactive Waste Management. Waste. T. M. Letcher and D. A. Vallerio. Boston, Academic Press: 101-108.
- Martikainen, J.-P. (2019). Response to 'A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015–2030'. *Journal of Cleaner Production*, 208, 142-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.049>
- Masanet, E., Chang, Y., Gopal, A. R., Larsen, P., Morrow III, W. R., Sathre, R., ... & Zhai, P. (2013). Life-cycle assessment of electric power systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 107-136.
- Mazzei-Abba, A., Folly, C. L., Coste, A., Wakeford, R., Little, M. P., Raaschou-Nielsen, O., ... & Auvinen, A. (2020). Epidemiological studies of natural sources of radiation and childhood cancer: current challenges and future perspectives. *Journal of radiological protection*, 40(1), R1.
- McLean, A. R., Adlen, E. K., Cardis, E., Elliott, A., Goodhead, D. T., Harms-Ringdahl, M., ... & Muirhead, C. R. (2017). A restatement of the natural science evidence base concerning the health effects of low-level ionizing radiation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1862), 2017.1070.
- Metz-Flamant, C., Laurent, O., Samson, E., Caer-Lorho, S., Acker, A., Hubert, D., ... & Laurier, D. (2013). Mortality associated with chronic external radiation exposure in the French combined cohort of nuclear workers. *Occupational and environmental medicine*, 70(9), 630-638.
- Mignacca, B., & Locatelli, G. (2020). Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109519. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2019). Ecosystem maintenance energy and the need for a green EROI. *Energy Policy*, 131, 229-234.
- Mouratiadou, I., Bevione, M., Bijl, D. L., Drouet, L., Hejazi, M., Mima, S., ... & Luderer, G. (2018). Water demand for electricity in deep decarbonisation scenarios: a multi-model assessment. *Climatic change*, 147(1-2), 91-106.
- Mudd, G.M. (2014). The future of yellowcake: a global assessment of uranium resources and mining *Sci. Total Environ.*, 472, 590-607.
- Muirhead, C. R., O'hagan, J. A., Haylock, R. G. E., Phillipson, M. A., Willcock, T., Berridge, G. L. C., & Zhang, W. (2009). Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers. *British Journal of Cancer*, 100(1), 206-212.
- Müller, W. C., & Thurner, P. W. (Eds.). (2017). *The politics of nuclear energy in Western Europe*. Oxford University Press.

- Natl. Res. Council. (2006). Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase. Washington, DC: Natl. Acad. Press.
- Naumann, G., Cammalleri, C., Mentaschi, L., & Feyen, L. (2020). Increasing economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. Submitted to Nature Climate Change for peer review.
- NEA (Nuclear Energy Agency) and IAEA. (2016). Uranium 2018: Resources, production and demand. OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development), Paris.
- Neumann, A., Sorge, L., von Hirschhausen, C., & Wealer, B. (2020). Democratic quality and nuclear power: Reviewing the global determinants for the introduction of nuclear energy in 166 countries. *Energy Research & Social Science*, 63, 101389.
- Nian, V., Chou, S. K., Su, B., & Baully, J. (2014). Life cycle analysis on carbon emissions from power generation—The nuclear energy example. *Applied Energy*, 118, 68-82.
- Nohara, C., Hiyama, A., Taira, W., Tanahara, A., & Otaki, J. M. (2014). The biological impacts of ingested radioactive materials on the pale grass blue butterfly. *Nature Scientific Reports*, 4, 4946
- O'Neill, BC, Kriegler, E., L. Ebi, K., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, DS, J. van Ruijven, B., van Vuuren, DP, Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, *Global Environmental Change*, 42, 169-180.
- OECD (2011). OECD Guidelines for Multinational Enterprises, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264115415-en>
- OECD / NEA (2012). Nuclear energy and renewables: system effects in low-carbon electricity systems. Nuclear Energy Agency, OECD, Paris, France.
- OECD (2019). Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations: Compiling a Set of Essential Records for a Radioactive Waste Repository. Radioactive Waste Management and Decommissioning 2019, OECD Nuclear Energy Agency (NEA) No. 7423.
- OECD. (2016). Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf>
- Orhan, M. F., Dincer, I., Rosen, M. A., & Kanoglu, M. (2012). Integrated hydrogen production options based on renewable and nuclear energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6059-6082.
- Owen, A. D. (2006). Renewable energy: Externality costs as market barriers. *Energy Policy*, 34(5), 632-642.
- Pacchioni, G. (2019). The road to fusion. *Nature Reviews Physics*, 1(6), 360-362.
- Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, 127, 259-270.
- Papathanasopoulou, E., Beaumont, N., Hooper, T., Nunes, J., & Queirós, A. M. (2015). Energy systems and their impacts on marine ecosystem services. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 917-926.
- Pascucci-Cahen, L., & Patrick, M. (2013). Massive radiological releases profoundly differ from controlled releases. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.
- Pearce, M. S., Salotti, J. A., Little, M. P., McHugh, K., Lee, C., Kim, K. P., ... & Parker, L. (2012). Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *The Lancet*, 380(9840), 499-505.
- Pereira, R., Barbosa, S., & Carvalho, F. P. (2014). Uranium mining in Portugal: a review of the environmental legacies of the largest mines and environmental and human health impacts. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(2), 285-301.
- Perera, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezini, J. L., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150-159.
- Perrier, Q. (2018). The second French nuclear bet. *Energy Economics*, 74, 858-877.

- Pitkanen, L. (2020). Tactics and strategies of containment: Preserving state power in Canadian uranium refining. *The Extractive Industries and Society*, 7(2), 544-555.
- Ponciroli, R., Y. Wang, Z. Zhou, A. Botterud, J. Jenkins, R. Vilim and F. J. N. T. Ganda (2017). "Profitability evaluation of load-following nuclear units with physics-induced operational constraints." 200(3): 189-207.
- Portugal-Pereira, J., Ferreira, P., Cunha, J., Szklo, A., Schaeffer, R., & Araújo, M. (2018). Better late than never, but never late is better: Risk assessment of nuclear power construction projects. *Energy Policy*, 120, 158-166.
- Postar, S. (2017). The half-lives of African uranium: A historical review. *The Extractive Industries and Society*, 4(2), 398-409.
- Právělie, R., & Bandoc, G. (2018). Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications. *Journal of environmental management*, 209, 81-92.
- Rafaj, P., & Kypreos, S. (2007). Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model. *Energy Policy*, 35(2), 828-843. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.003>
- Ram, M., Child, M., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Lohrmann, A., & Breyer, C. (2018). A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030. *Journal of Cleaner Production*, 199, 687-704. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.159>
- Ram, M., Child, M., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Lohrmann, A., & Breyer, C. (2020). Authors' reply to the letter to the editor: Response to 'A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015–2030'. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118530. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118530>
- Ramana, M. V., & Ahmad, A. (2016). Wishful thinking and real problems: Small modular reactors, planning constraints, and nuclear power in Jordan. *Energy Policy*, 93, 236-245. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.012>
- Raptis, C. E., van Vliet, M. T., & Pfister, S. (2016). Global thermal pollution of rivers from thermoelectric power plants. *Environmental Research Letters*, 11(10), 104011.
- Riahi, K. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, Vol. 42. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Riahi, K., Kriegler, E., Johnson, N., Bertram, C., Den Elzen, M., Eom, J., ... & Longden, T. (2015). Locked into Copenhagen pledges - implications of short-term emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals. *Technological Forecasting and Social Change*, 90, 8-23.
- Richardson, D. B., Cardis, E., Daniels, R. D., Gillies, M., O'Hagan, J. A., Hamra, G. B., ... & Schubauer-Berigan, M. K. (2015). Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *THE BRITISH MEDICAL JOURNAL*, 351, h5359.
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow III, W. R., Zhou, N., ... & Cresko, J. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 266, 114848.
- Roehrkasten S, Schaeuble D, Helgenberger S. (2015). Secure and sustainable power generation in a water-constrained world, IASS (<https://doi.org/10.2312/iass.2015.023>).
- Rogelj, J. et al. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C. *Nature Climate Change*, 8(4), 325–332, doi:10.1038/s41558-018-0091-3
- Roques, F. A., W. J. Nuttall, D. M. Newbery, R. de Neufville and S. Connors (2006). Nuclear power: a hedge against uncertain gas and carbon prices? *The Energy Journal* 27(4), 1-24.
- Rosa, E. A., Tuler, S. P., Fischhoff, B., Webler, T., Friedman, S. M., Sclove, R. E., ... & Leschine, T. M. (2010). Nuclear waste: knowledge waste? *Science*, 329(5993), 762-763.

- Sachs, J. D. (2015). Climate Change and Intergenerational Well-Being. In L. Bernard & W. Semmler (Eds.), *The Oxford Handbook of the Macroeconomics of Global Warming*: Oxford University Press.
- Sagan, S.D. (2011). The Causes of Nuclear Weapons Proliferation. *Annual Review of Political Science*, 14(1), 225–244.
- Sakauchi, K., Taira, W., Hiyama, A., Imanaka, T., & Otaki, J. M. (2020). The Pale Grass Blue Butterfly in Ex-Evacuation Zones 5.5 Years after the Fukushima Nuclear Accident: Contributions of Initial High-Dose Exposure to Transgenerational Effects. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(1), 242-252
- Sarkar, A. (2019). Nuclear power and uranium mining: current global perspectives and emerging public health risks. *Journal of Public Health Policy*, 40(4), 383-392.
- Schaeffer, R., Szklo, A. S., de Lucena, A. F. P., Borba, B. S. M. C., Nogueira, L. P. P., Fleming, F. P., ... & Boulahya, M. S. (2012). Energy sector vulnerability to climate change: a review. *Energy*, 38(1), 1-12.
- Schiermeier, Q., Tollefson, J., Scully, T., Witze, A., & Morton, O. (2008). Energy alternatives: Electricity without carbon. *Nature News*, 454(7206), 816-823.
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Katsuta, T., & Ramana, M. V. (2017). *The world nuclear industry status report 2017*. Paris.
- Schwenk-Ferrero, A. (2013). German Spent Nuclear Fuel Legacy: Characteristics and High-Level Waste Management Issues. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 293792, doi:10.1155/2013/293792.
- Scott, B. R. (2018). A critique of recent epidemiologic studies of cancer mortality among nuclear workers. *Dose-Response*, 16(2), 1559325818778702.
- Sermage-Faure, C., Laurier, D., Goujon-Bellec, S., Chartier, M., Guyot-Goubin, A., Rudant, J., ... & Clavel, J. (2012). Childhood leukemia around French nuclear power plants—the Geocap study, 2002–2007. *International journal of cancer*, 131(5), E769-E78.
- Shibamoto, Y., & Nakamura, H. (2018). Overview of biological, epidemiological, and clinical evidence of radiation hormesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(8), 2387.
- Sjoberg, L., & Drottz-Sjoberg, B. M. (2009). Public risk perception of nuclear waste. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 11(3-4), 248-280.
- Skipperud, L., G. Strømman, M. Yunusov, P. Stegnar, B. Uralbekov, H. Tillboev, G. Zjazjev, L. S. Heier, B. O. Rosseland and B. Salbu (2013). Environmental impact assessment of radionuclide and metal contamination at the former U sites Taboshar and Digmai, Tajikistan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 123, 50-62.
- Smith, K. R., Frumkin, H., Balakrishnan, K., Butler, C. D., Chafe, Z. A., Fairlie, I., ... & McMichael, A. J. (2013). Energy and human health. *Annual Review of Public Health*, 34, 159-188.
- Socolow, R.H. & Glaser, A. (2009). Balancing risks: nuclear energy & climate change. *Daedalus*, 138(4). DOI: 10.1162/daed.2009.138.4.31.
- Sovacool, B. K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 36(8), 2950-2963.
- Sovacool, B. K., & Saunders, H. (2014). Competing policy packages and the complexity of energy security. *Energy*, 67, 641-651.
- Spycher, B. D., Feller, M., Zwahlen, M., Rösli, M., von der Weid, N. X., Hengartner, H., ... & Swiss National Cohort Study Group. (2011). Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland: a census-based cohort study. *International Journal of Epidemiology*, 40(5), 1247-1260.
- Steinhauser, G., Brandl, A., & Johnson, T. E. (2014). Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 470, 800-817.
- Suman, S. (2018). Hybrid nuclear-renewable energy systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 181, 166-177.
- Sun, C., Zhu, X., & Meng, X. (2016). Post-Fukushima public acceptance on resuming the nuclear power program in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 685-694.

- Taylor, R. Preface. In: Taylor, R. (Ed.). (2015). *Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel*. Woodhead Publishing Series in Energy no. 79, Elsevier.
- Ten Hoeve, J. E., & Jacobson, M. Z. (2012). Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Energy & Environmental Science*, 5(9), 8743-8757.
- The Lancet (2019). Accountability and nuclear accidents: Fukushima verdict – Editorial. Vol 394, 1114.
- Tierney Kieran M., Graham K.P. Muira, Gordon T. Cook, Johanna J. Heymans, Gillian MacKinnona, John A. Howeb, Sheng Xua, Andrew Brownlowc, Nicholas J. Davisonc, Mariel ten Doeschatec, Rob Deavilled (2017). Nuclear reprocessing-related radiocarbon (¹⁴C) uptake into UK marine mammals. *Marine Pollution Bulletin* 124 (2017), 43-50.
- Timilsina, G.R. (2020). *Demystifying the Costs of Electricity Generation Technologies*. Policy Research Working Paper 9303. Development Research Group, World Bank, Washington, DC.
- Tondel, M., Lindahl, L. (2019). Intergenerational Ethical Issues and Communication Related to High-Level Nuclear Waste Repositories. *Curr Envir Health Rpt* 6, 338–343.
- Tong, D., Zhang, Q., Zheng, Y., Caldeira, K., Shearer, C., Hong, C., ... & Davis, S. J. (2019). Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 C climate target. *Nature*, 572(7769), 373-377.
- Tsujikawa, N., Tsuchida, S., & Shiotani, T. (2016). Changes in the factors influencing public acceptance of nuclear power generation in Japan since the 2011 Fukushima Daiichi nuclear disaster. *Risk Analysis*, 36(1), 98-113.
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261-3270.
- U.S. Department of Energy (2013). *U.S. Energy Sector Vulnerabilities to Climate Change and Extreme Weather*. DOE/PI-0013.
- United Nations (1948). *The International Bill of Human Rights*. United Nations General Assembly, New York and Geneva.
- United Nations (2011). *Guiding Principles on Business and Human Rights: Implementing the United Nations 'Protect, Respect and Remedy' Framework*. HR/PUB/11/04, United Nations Human Rights Office of the High Commissioner, New York and Geneva.
- Uribe, E. (2018). Protactinium presents a challenge for safeguarding thorium reactors (No. SAND2018-8490C). Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, CA (United States).
- Vaiserman, A., Koliada, A., Zabuga, O., & Socol, Y. (2018). Health impacts of low-dose ionizing radiation: current scientific debates and regulatory issues. *Dose-Response*, 16(3), 1559325818796331.
- van der Zwaan, B. (2013). The role of nuclear power in mitigating emissions from electricity generation. *Energy Strategy Reviews*, 1(4), 296-301 .
- Van Vliet, M. T., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Vögele, S., Lettenmaier, D. P., & Kabat, P. (2012). Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Climate Change*, 2(9), 676-681.
- van Vuuren, D.P. et al., (2017). Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global Environmental Change*, 42, 237–250, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008.
- Varbanov, Petar Sabev/Oclon, Pawel/Chin, Hon Huin (2019). Towards Efficient and Clean Process Integration: Utilisation of Renewable Resources and Energy-Saving Technologies. *Energies*, 12(21), DOI: 10.3390/en12214092.
- Verbruggen, A. (2008). "Renewable and nuclear power: A common future?" *Energy Policy* 36(11): 4036-4047.
- Verbruggen A., Laes, E. (2015). Sustainability assessment of nuclear power: Discourse analysis of IAEA and IPCC frameworks. *Environmental Science & Policy*, Vol. 51, 170-180.
- Visschers, V. H., & Siegrist, M. (2013). How a nuclear power plant accident influences acceptance of nuclear power: Results of a longitudinal study before and after the Fukushima disaster. *Risk Analysis: An International Journal*, 33(2), 333-347.

- Volkova, N. V., Meier, B., González-Huici, V., Bertolini, S., Gonzalez, S., Vöhringer, H., ... & Gerstung, M. (2020). Mutational signatures are jointly shaped by DNA damage and repair. *Nature Communications*, 11(1), 1-15.
- Wang, J., Liu, J., Chen, Y., Song, G., Chen, D., Xiao, T., ... & Yin, M. (2016). Technologically elevated natural radioactivity and assessment of dose to workers around a granitic uranium deposit area, China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 310(2), 733-741.
- Wang, J., Liu, J., Li, H., Song, G., Chen, Y., Xiao, T., ... & Zhu, L. (2012). Surface water contamination by uranium mining/milling activities in Northern Guangdong Province, China. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 40(12), 1357-1363.
- Wang, C., Lin, L., Olsson, G., Liu, Y., & Xu, M. (2019). The scope and understanding of the water–electricity nexus. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104453.
- Warner, E.S., Heath, G.A. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Electricity Generation - Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), 73-92.
- Waseem, A., Ullah, H., Rauf, M. K., & Ahmad, I. (2015). Distribution of natural uranium in surface and groundwater resources: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(22), 2391-2423.
- Watts, N., Adger, W. N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., ... & Cox, P. M. (2015). Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet*, 386(10006), 1861-1914.
- Webster, M., Donohoo, P., & Palmintier, B. (2013). Water-CO₂ trade-offs in electricity generation planning. *Nature Climate Change*, 3(12), 1029-1032.
- Wehrden, H. V., Fischer, J., Brandt, P., Wagner, V., Kümmerer, K., Kuemmerle, T., ... & Hostert, P. (2012). Consequences of nuclear accidents for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Letters*, 5(2), 81-89.
- Wheatley, S., Sovacool, B. K., & Sornette, D. (2016). Reassessing the safety of nuclear power. *Energy Research & Social Science*, 15, 96-100.
- Wolsink, M. (2007). Wind power implementation: The nature of public attitudes: Equity and fairness instead of ‘backyard motives’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1188-1207.
- Won, E. J., & Lee, J. S. (2014). Gamma radiation induces growth retardation, impaired egg production, and oxidative stress in the marine copepod *Paracyclops nana*. *Aquatic Toxicology*, 150, 17-26.
- Xu, Y. (2020). Will energy transitions impact financial systems? *Energy*, 194, 116910.
- Yahyapour, R., Amini, P., Rezapour, S., Cheki, M., Rezaeyan, A., Farhood, B., ... & Najafi, M. (2018). Radiation-induced inflammation and autoimmune diseases. *Military Medical Research*, 5(1), 9.
- Yildiz, B., & Kazimi, M. S. (2006). Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(1), 77-92.
- Yim, M.-S. & J. Li (2013). Examining relationship between nuclear proliferation and civilian nuclear power development. *Progress in Nuclear Energy*, 66, 108–114.
- Zhang, C., Zhong, L. & Wang, J. (2018). Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. *Nature Energy*, 3, 792–799.
- Zhou, Z., Yang, Z., Sun, Z., Liao, Q., Guo, Y., & Chen, J. (2020). Multidimensional pollution and potential ecological and health risk assessments of radionuclides and metals in the surface soils of a uranium mine in East China. *Journal of Soils and Sediments*, 20(2), 775-791.
- Zinkle, S.J. & Was, G.S. (2013). Materials challenges in nuclear energy. *Acta Materialia*, 61(3), 735-758.