



Dokumentation

CO₂-Emissionen der Kernenergie

CO₂-Emissionen der Kernenergie

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 138/19
Abschluss der Arbeit: 25. November 2019
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Methoden und Datenbanken	5
3.	Anteil an der Stromerzeugung der einzelnen Energieträger	7
4.	Studien zu CO₂-Emissionen der nuklearen Stromerzeugung	13

1. Einleitung

Ökobilanzierungen betrachten im Wesentlichen die CO₂-Emissionen der gesamten Prozesskette, Förderung, Produktion, Recycling und Entsorgung. Es gibt eine Vorkette, Folgeketten und eine Nachkette. Bei der Betrachtung der Kernkrafttechnologie beinhaltet die Vorkette u.a. den Bau des Kraftwerks und der benötigten Infrastruktur, die Urangewinnung und die Anreicherung bzw. Wiederaufarbeitung des Brennstoffs. Bei der Kernkrafttechnologie kommen aufgrund der Radioaktivität die Aufwände für Lagerung, Zwischenlagerung und Endlagerung des Abfalls und den Rückbau in der Nachkette hinzu. Die unterschiedlichen Generationen von Kraftwerkstechnologien (Generation III/III+, IV oder SMR, Small Modular Reactors) und die Qualität der Erze bei der Brennstoffherstellung gehen mit unterschiedlichen Anteilen in die CO₂-Ökobilanzierung ein. Zur Bilanzierung gehört auch die Betrachtung des möglichen Schadensausmaßes, die beim Betrieb, Rückbau, Lagerung und Endlagerung entstehen könnten.

Zu einer ökologischen Betrachtung gehörten auch die Ermittlung der Schadstoffemissionen, die Belastung von Boden und Gewässern und die Betriebssicherheit aller Komponenten.

Zahlreiche Studien haben eine Ökobilanzierung von Energieträgern vor und nach dem Beschluss zum Atomausstieg vorgenommen. Dabei wurden zum Teil die Emissionen der Primärenergien oder der Bruttostromerzeugung oder einzelne Prozesskomponenten oder Teilketten betrachtet. Die einzelnen Studien sind somit nicht direkt miteinander vergleichbar. Die Bundesregierung sieht „die Nutzung von Kernenergie vor dem Hintergrund des möglichen Schadensausmaßes auf Mensch und Umwelt nicht als Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung“ und betrachtet diese in ihren aktuellen Analysen nicht.¹

Vor dem Hintergrund der Emissionsreduktion der Treibhausgase (THG) argumentieren Befürworter der Kernenergie, dass Atomstrom CO₂-frei sei. Dies bezieht sich jedoch nur auf den reinen Prozess der Stromerzeugung. Betrachtet man die gesamte Prozesskette, so entstehen, je nach Vorgehensweise bei der Berechnung, relevante Werte.

Ein weiterer Aspekt ist die Regelbarkeit bzw. Lastfolgefähigkeit der Kernkraftwerke. In Zeiten geringer Nachfrage müssen Kraftwerke heruntergefahren werden und benötigen danach eine gewisse Anfahrzeit bis sie wieder volle Leistung erbringen können. Nach Aussage des Umweltbundesamtes sind Kernkraftwerke nur geringfügig kurzfristig regelbar. Bei einem hohen Anteil an Erneuerbaren Energien fluktuierender Erzeugung müssen Kraftwerke aber deutlich flexibler betrieben werden. Häufige Lastfolgen führen zu einem zusätzlichen technischen Verschleiß, der nicht nur bei einer Laufzeitverlängerung älterer Kraftwerke das Schadensrisiko erhöht.²

1 Umweltbundesamt (UBA), Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu) (2019). RESCUE Kurzfassung „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_kurzfassung_dt_final_komp.pdf

2 Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2017). „Lastfähigkeit deutscher Kernkraftwerke“, <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Hintergrundpapier-hp021.pdf>

Vor diesem Hintergrund sind verschiedene Erzeugungsformen von Strom nicht ohne weiteres untereinander austauschbar. Prognosen über die Entwicklung der Gesamtemissionen der Stromproduktion müssen diese Abhängigkeiten berücksichtigen.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine Aufstellung von Studien zur Ökobilanzierung von CO₂-Emissionen der nuklearen Stromerzeugung und Studien zur Untersuchung der Zusammenhänge von CO₂-Minderung, Nachhaltigkeit und Emissionshandel.

2. Methoden und Datenbanken

Eine umfangreiche und ausführliche Beschreibung der Quantifizierung der Indikatoren bzw. Messgrößen und der methodischen Bestimmung verschiedener Bilanzierungsarten behandelt eine Arbeit der Wissenschaftlichen Dienste. Eine kurze Beschreibung der CO₂-Bilanzierung, der Netto-Energiebilanz und der Energie-Rücklaufzeiten und ein Vergleich der CO₂-Bilanzen verschiedener Energieträger, die bis 2007 veröffentlicht wurden, finden sich dort ebenso. Die Werte liegen für Strom aus Kernkraft zwischen 16 bis 23 Gramm CO₂ pro kWh Strom.³

Zahlreiche Angaben bzw. Auswertungen von CO₂-Emissionsfaktoren, aus jeweils unterschiedlichen Jahren, stehen zur Verfügung. Die Faktoren der CO₂-Emissionen, in der Regel betrachtet bei vollständiger Verbrennung, beziehen sich auf den Brennstoffeinsatz [g/kWh], den Stromverbrauch [g/kWh] oder den Strommix [g/kWh]. Wobei die Angaben die Bereitstellung einer Kilowattstunde elektrischer Energie [kWh_{el}] oder die reine Wärmeerzeugung betreffen können. Aufgrund der hohen Umwandlungsverluste bei der Erzeugung der elektrischen Energie fallen die Werte für die Wärmeerzeugung geringer aus.⁴

Weitere Faktoren sind die reine Energiebereitstellung, die Nutzung der Energieträger durch Industrie oder Haushalte und die Einbeziehung oder das Herauslassen der Vorkette. Zum Teil wird die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigt, wobei insbesondere die Angaben der importierten Energieträger von Dritten bzw. von den jeweiligen Erzeugerländern abhängen. Alter und Wirkungsgrad der verwendeten Anlage bzw. des Kraftwerks lassen eine Vergleichbarkeit nur bedingt zu. Inwieweit sich Fördermethoden der einzelnen Länder und damit die Emissionsfaktoren unterscheiden und diese beziffert werden können, hängt auch von den Angaben der Erzeuger ab.⁵

Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Konventionelle Kraftwerke und erneuerbare Energien“, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-energien#textpart-1>

3 Lübbert, D., Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste (2007). „CO₂-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich“, WD 8 - 056/2007, <https://www.bundestag.de/resource/blob/504060/d408ca51555a813c5b3a750c4c0c1fa1/co2-bilanzen-verschiedener-energietraeger-im-vergleich-data.pdf>

4 Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE) (2010). „Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie“, https://www.ffe.de/download/wissen/186_Basisdaten_Energietraeger/Basisdaten_von_Energietraegern_2010.pdf

5 Umweltbundesamt (UBA) (2018). Kurzstudie „Bewertung der Vorkettenemissionen bei der Erdgasförderung in Deutschland“, Climate Change 02/2018, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-01-30_climate-change_02-2018_roadmap-gas_0.pdf

Die für Europa erstellten Bilanzen verwenden oft das Tool „Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme“ (GEMIS) des Öko-Instituts bzw. des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS), das über die Jahre weiterentwickelt und in unterschiedlichen Softwareversionen eingesetzt wurde.⁶

Vielfache Anwendung erfährt z.B. auch die Schweizer Datenbank „ecoinvent“, in der hunderte aktualisierter Ökobilanzen und Referenzdaten vorliegen.“⁷

Ein kanadisches Modell, GHGhenius, das für den europäischen Markt weiterentwickelt wurde, setzten die Experten für Auswertungen jüngsten Datums ein.⁸ Amerikanische Studien verwenden oft das GREET-Tool und die Datenbank eGRID.⁹

Das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission hat in den letzten Jahren einen Leitfaden für die Erstellung von Lebenszyklusanalysen erarbeitet. Der Leitfaden liefert Hilfestellung bei der Berechnung des ökologischen Fußabdrucks für Produktions- und Organisationsprozesse der Industrie. Es läuft derzeit der Pilotbetrieb.¹⁰

Für die Erstellung von Ökobilanzen gibt es eine Reihe von Normen. Grundsätze und Rahmenbedingungen von Ökobilanzen sind in der DIN EN ISO 14040 genormt. Die Norm umfasst Ökobilanz-Studien und Sachbilanz-Studien. Anforderungen und Verfahren der Ökobilanzierung und Anleitungen zu deren Erstellung beschreibt die DIN EN ISO 14044. Die Änderung A1 ergänzt die Informationen zu ökologischen Fußabdrücken (Footprints). Die DIN EN ISO 14045 beschreibt die Ökoeffizienzbewertung, die die Umweltauswirkungen unter Anwendung der Ökobilanz bewertet. Anforderungen und Anleitungen für die Durchführung einer kritischen Prüfung jeder Art von Ökobilanzen finden sich in der Norm DIN CEN ISO/TS 14071.¹¹

6 Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS) (2019). „GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme“, <http://iinas.org/gemis-de.html>

7 ecoinvent (2019). <https://www.ecoinvent.org/>

8 Umweltbundesamt (UBA) (2018). Kurzstudie „Bewertung der Vorkettenemissionen bei der Erdgasförderung in Deutschland“, Climate Change 02/2018, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-01-30_climate-change_02-2018_roadmap-gas_0.pdf

9 United States Environmental Protection Agency (EPA) “Emissions & Generation Resource Integrated Database (eGRID)”, <https://www.epa.gov/energy/emissions-generation-resource-integrated-database-egrid>

10 Europäische Kommission (2019). „European Platform on Life Cycle Assessment“, <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/aboutUs.html#menu1>

Europäische Kommission (2019). „Environmental Footprint“, <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>

11 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (DIN EN ISO 14040:2006)

Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (DIN EN ISO 14044:2006 + Amd 1:2017)

Umweltmanagement – Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen (DIN EN ISO 14045:2012)

Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beschreibt in seinem in seinem fünften Sachstandsbericht (ASR5) im Teilbericht „Technology-specific Cost and Performance Parameters“, im Kapitel A.III.2 „Energy Supply“, dass die CO₂-Emissionen der Stromerzeuger als Maß für den Vergleich der spezifischen Treibhausgasemissionen verschiedener Technologien verwendet werden können und beschreibt detailliert Messgrößen und Methoden. Die zugrundeliegenden Daten für die Kostenberechnungen sind in Tabellen aufgeführt.¹²

3. Anteil an der Stromerzeugung der einzelnen Energieträger

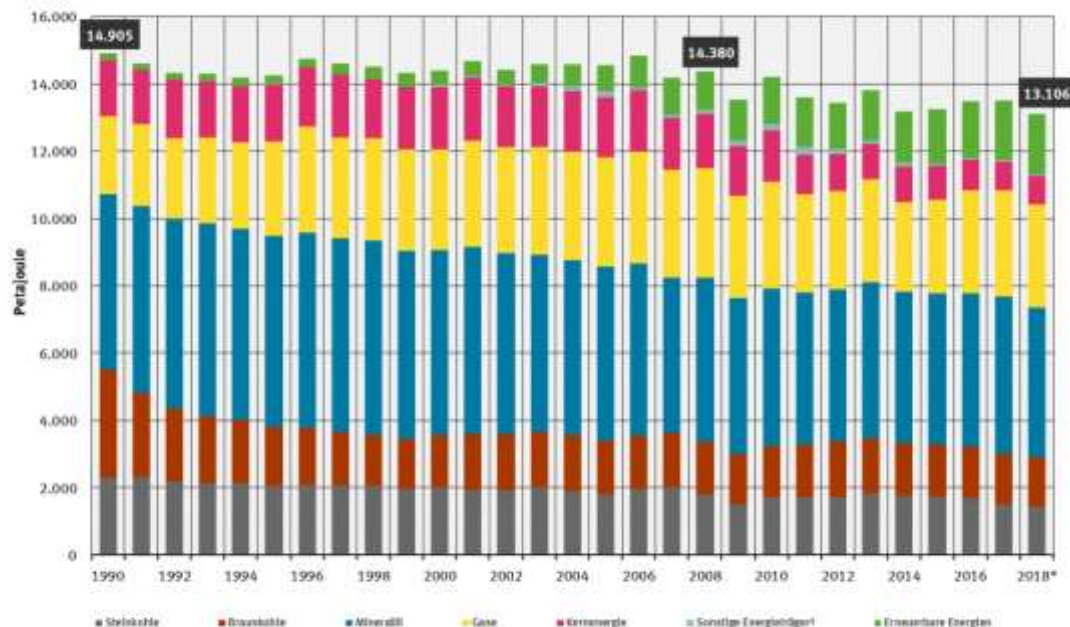
Das Umweltbundesamt führt in seiner Studie zur ressourcenschonenden Treibhausgasneutralität aus: „Der Anteil der fossilen und nuklearen Energieträger an der Bruttostromerzeugung lag im Jahr 2018 noch bei knapp 50 % im Gegensatz zu 84 % 1990. Im Jahr 2011 hat Deutschland den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen, sodass bis 2022 dieser Anteil auf null sinkt. Der Anteil erneuerbarer Energien betrug 2018 35 %. Bis zum Jahr 2030 soll der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch 65 % erreichen.“¹³

Die folgende Tabelle zeigt beispielsweise, dass der Anteil der erneuerbaren Energien an der Primärenergie stetig zunimmt und stärker steigt, als der Anteil der Kernenergie abnimmt.

Umweltmanagement – Ökobilanz – Prozesse der Kritischen Prüfung und Kompetenzen der Prüfer (DIN EN ISO/TS 14071)

- 12 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). „Technology-specific Cost and Performance Parameters“, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf, Seite 1331 ff. in: Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. 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
- 13 Umweltbundesamt (UBA), Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu) (2019). RESCUE-Studie „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“, 36/2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf

Abbildung 5-2: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern



Quelle: (UBA auf Basis AG Energiebilanzen, 2019)

Die Bundesregierung hat ein Politzszenario erstellen lassen, das die Entwicklung der CO₂-Emissionen der Bruttostromerzeugung in verschiedenen Maßnahmen-Szenarien darstellt. Die nachfolgende Tabelle der Studie zeigt die zeitliche Entwicklung der Bruttostromerzeugung der Energieträger von 2008 bis 2035. Für die Stromerzeugung mittels Kernenergie reduziert sich der Anteil von 149 TWh im Jahr 2008 über 67 TWh im Jahr 2020 und nach dem Kernenergieausstieg im Jahr 2025 auf null. Der Anteil der Erneuerbaren Energien ist von 89 TWh bis geschätzte 247 TWh im Jahr 2020 gestiegen. Schätzungen gehen von einem weiteren Anstieg aus. Der Anteil der Braunkohle ist bis 2015 etwas gestiegen und nimmt nach dem Kohleausstieg für die Zukunft ab. Im betrachteten Zeitraum sinkt die Bruttostromerzeugung von 637 TWh bis 2035 auf geschätzte 587 TWh.¹⁴

14 Umweltbundesamt (UBA) (2018). „Politiksznarien für den Klimaschutz VII-Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2035“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-01-11_climate-change_01-2018_politiksznarien-vii.pdf

Tabelle A-4-5: Bruttostromerzeugung im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2008-2035

	2008	2012	2015	2020	2025	2030	2035
	TWh						
Kernenergie	149	99	100	67	0	0	0
Braunkohle	151	161	169	153	144	130	79
Steinkohle	125	116	122	108	102	67	80
Öl	10	8	3	3	3	1	1
Erdgas	89	76	33	36	40	42	57
Gichtgas	0	0	8	8	7	7	7
Kokereigas	0	0	2	2	2	2	2
Müll	23	25	8	8	8	8	8
Sonstige	0	0	1	1	1	1	1
Erneuerbare	89	138	188	248	302	339	351
Wasser	20	22	21	22	23	23	24
Wind	41	51	83	131	176	216	232
davon onshore	41	51	74	110	138	160	172
davon offshore			9	21	39	56	61
PV	4	26	34	41	50	56	59
Biomasse	23	40	50	51	49	36	26
Geothermie	0	0	0	2	4	7	10
Pumpspeicher (Inländisch)	6	6	4	3	3	3	4
Bruttostromerzeugung	637	630	637	636	610	599	587
Veränderung zu 2008	0%	-1%	0%	0%	-4%	-6%	-8%
Export-Import-Saldo (Import positiv)	-22	-23	-34	-53	-48	-43	-28
Exportanteil der Bruttostromerzeugung	4%	4%	5%	8%	8%	7%	5%
Bruttostromverbrauch	615	607	603	583	562	556	560
Veränderung zu 2008	0%	-1%	-2%	-5%	-9%	-10%	-9%

Quelle: AGEB (2012–2014), Modellrechnungen Fraunhofer-ISI und Öko-Institut

„Die Kernenergie-Stromerzeugung nimmt bis zum Jahr 2020 proportional zum Leistungsrückgang um ca. ein Drittel ab (von 94 TWh im Jahr 2012 auf 63 TWh im Jahr 2020). Gemäß dem Ausstiegsbeschluss nach AtG 2011 findet ab dem Jahr 2025 keine Kernenergiestromerzeugung mehr statt.“¹⁵

Die Autoren der Politzszenarien kommen u.a. zu dem Ergebnis, dass „der steigende Anteil nicht-fossiler Energieträger (Kernenergie und erneuerbare Energien) am gesamten Energiemix ebenfalls emissionsmindernd wirkt. Der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie wird hierbei mehr als

15 Umweltbundesamt (UBA) (2018). „Politiksznarien für den Klimaschutz VII-Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2035“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-01-11_climate-change_01-2018_politiksznarien-vii.pdf

kompensiert durch den Ausbau erneuerbarer Energien, so dass in der Gesamtschau eine Emissionsreduktion von bis zu 127 Mio. t CO₂-Äquivalenten bis zum Jahr 2035 für das betrachtete Szenario erreicht wird.“¹⁶

Die nachfolgenden Grafiken enthalten statistische Zahlenangaben zur Höhe der CO₂-Emissionen durch die Stromerzeugung und den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2018 für verschiedene Einheiten und die Daten der CO₂-Emissionen durch die Stromerzeugung in Deutschland nach Art der Erzeugung für das Jahr 2010. Detaillierte Zahlen liefert die AG Energiebilanzen.¹⁷

16 Umweltbundesamt (UBA) (2018). „Politikszenerarien für den Klimaschutz VII-Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2035“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-01-11_climate-change_01-2018_politikszenerarien-vii.pdf

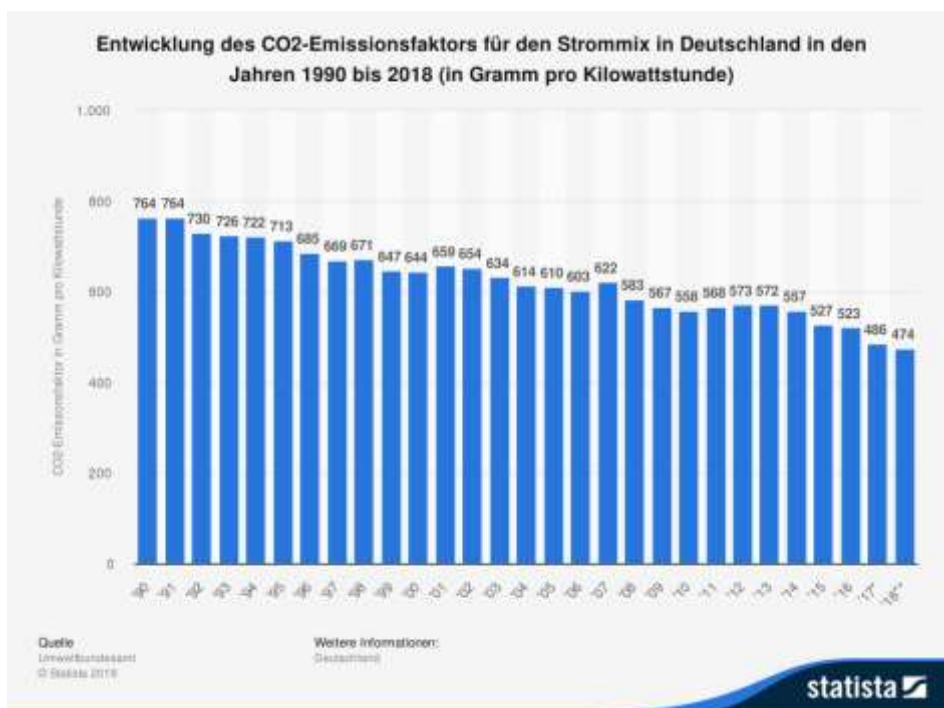
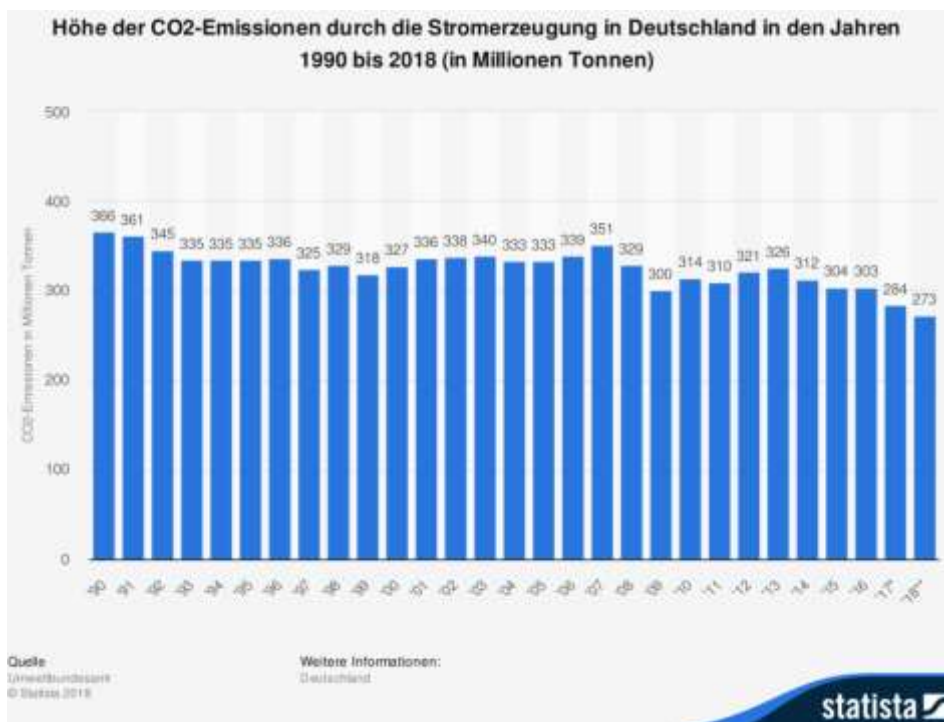
17 statista (2018). „CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in Deutschland nach Art der Erzeugung* im Jahr 2010“, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/233868/umfrage/co2-emissionen-bei-der-stromerzeugung-nach-erzeugungsart/>

statista (2018). Dossier „CO₂-Emissionen in Deutschland“, <https://de.statista.com/download/MTU3NDI0NjE3MyMjMTUzMDQzIyM2OTIwIyMxIyNwZGYjI1N0dWR5>

statista (2018). Dossier „Treibhausgasemissionen in Deutschland“, <https://de.statista.com/download/MTU3NDI0NTU5NyMjMTUzMDQzIyMyMjkwNCMjMSMjcGRmIyNTdHVkeQ==>

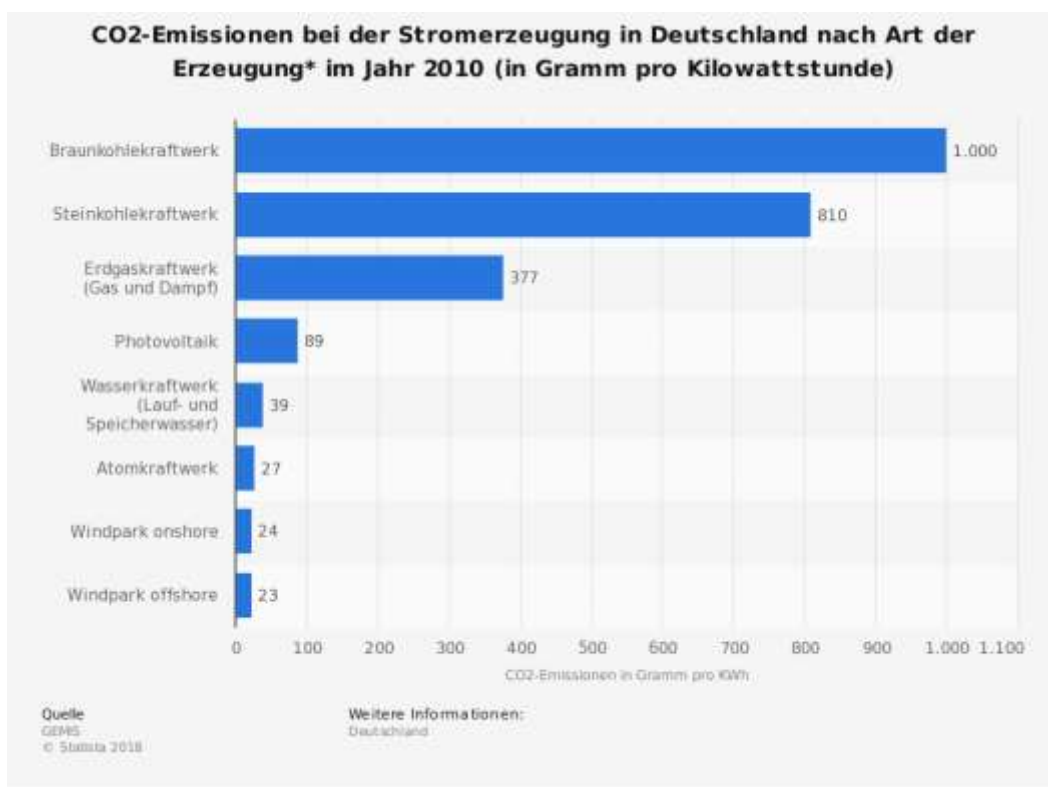
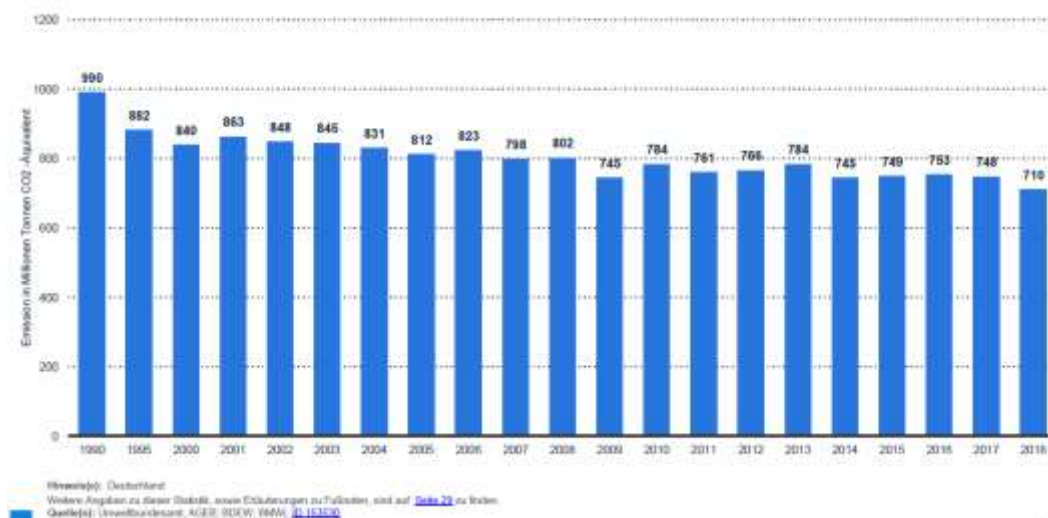
Umweltbundesamt (UBA) (2018). „Energiebedingte Emissionen durch Stromerzeugung“, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#textpart-3>

AG Energiebilanzen e.V. (AGEB) (2019). „Arbeit in Zahlen“, https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_broschuere_2012_web.pdf und „Bruttostromerzeugung“, https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20181214_brd_stromerzeugung1990-2018.pdf



Energiebedingte Treibhausgasemissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2018 (in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent)

Treibhausgas - Energiebedingte Emissionen in Deutschland bis 2018



4. Studien zu CO₂-Emissionen der nuklearen Stromerzeugung

Die spezifischen CO₂-Emissionen fossiler Energieträger werden in einer Zusammenfassung des Umweltbundesamtes aufgelistet.¹⁸ Die Angaben für Kernenergietechnologien sind abhängig von der Vorgehensweise und gehen weit auseinander. Die Schweizerische Eidgenossenschaft beziffert beispielsweise ein CO₂-Äquivalent zwischen 5 und 40 g CO₂-Äquivalenten/kWh.¹⁹

Die Größenordnungen der spezifischen CO₂-Emissionen einzelner Energieträger mit und ohne Einbeziehung der Vorkette der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. finden sich in der nachfolgenden Tabelle.²⁰

Tabelle 1: *Spezifische CO₂-Emissionen der eingesetzten Energieträger zur Stromerzeugung, Deutscher Strommix 2009 /Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen/, /FfE-interne Daten/*

Strom aus: (für Deutschland, 2009)	Bruttonutzungsgrad in %	Spez. CO ₂ -Emissionen in g/kWh _{netto} ohne Vorkette	Spez. CO ₂ -Emis- sionen in g/kWh _{netto} inkl. Vorkette
Steinkohle	41,0	894	931
Braunkohle	38,0	1.152	1.175
Mineralöl	39,2	776	859
Erdgas	44,4	469	518
Sonstige	83,2	277	297
Wasser-/Windkraft	100,0	-	32
Kernenergie	33,0	-	11
Insgesamt	40,7	542	570

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Eine Studie der Universität Stuttgart untersucht im Rahmen einer Dissertation welche Auswirkungen Veränderungen im nuklearen Brennstoffkreislauf auf die Life Cycle CO₂-Emissionen der Stromerzeugung aus Kernenergie haben können. „Ziel des Arbeitsberichtes ist es, die CO₂-Emissionen, die sich aus der nuklearen Prozesskette ergeben, in einem höheren Detaillierungsgrad abzubilden und den Beitrag der verschiedenen Prozessschritte hinsichtlich der CO₂-Emissionen der

18 Umweltbundesamt (UBA) (2016). „CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf

19 Bundesamt für Energie (BFE), Schweizerische Eidgenossenschaft (2017). „Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies“, <https://www.psi.ch/sites/default/files/import/lea/HomeEN/Final-Report-BFE-Project.pdf>

20 Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) (2010). „Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie“, https://www.ffe.de/download/wissen/186_Basisdaten_Energietraeger/Basisdaten_von_Energietraegern_2010.pdf

nuklearen Stromerzeugung zu untersuchen. Hierbei werden unterschiedliche Rahmenbedingungen und Annahmen für die einzelnen Prozesse analysiert, die die zukünftige Entwicklungen charakterisieren.“ Die Autoren haben die einzelnen Komponenten der Prozesskette gemäß ISO 140140 modelliert. Datenbasis war die Datenbank „ecoinvent“ und eigene Berechnungen. Sie erstellten für Deutschland eine Basisprozesskette und fanden heraus, dass für Deutschland die Uranerzkonzentration in der Mine und die Wahl des Anreicherungsverfahrens die Parameter mit dem größten Einfluss auf die spezifischen CO₂-Emissionen der Bereitstellung von Kernenergiestrom aus Leichtwasserreaktoren sind. Ihr Ergebnis ergab sehr geringe Werte für die spezifischen CO₂-Emissionen von 7 g CO₂/kWh_{el}.²¹

Literaturstudien

Eine Studie untersucht die unterschiedlichen Ergebnisse dreier Ökobilanzierungen. Die Treibhausgasemissionen der Kernenergie schwanken zwischen 8, 58 g CO₂/kWh_{el} und mehr als 110 g CO₂/kWh_{el}. Was im Wesentlichen mit den sehr unterschiedlichen Eingangsdaten begründet wird.²²

Eine Literaturstudie aus dem Jahr 2016 vergleicht die Umwelteinwirkungen von erneuerbaren und nuklearer Energieerzeugung. Der Artikel beinhaltet u.a. Grafiken zum Treibhausgaspotential der Energieträger und betrachtet insbesondere das Schadenspotential verschiedener Energieträger. Wobei nur Technologien der Generation II, bzw. der Tschernobyl-Reaktor eingebunden wurden.²³

Studien des Öko-Instituts

Das Öko-Institut untersucht im Rahmen einer Studie die Gesamtemissionen und Lebenszykluskosten von nuklearen, fossilen und erneuerbaren Technologien zur Strombereitstellung und vergleicht die Ergebnisse mit Ergebnissen aus der Literatur. Nach der Bestimmung des Öko-Instituts führt Strom aus Kernenergie zu rund 32 g CO₂ kWh_{el}. Die Studie hat unter Nutzung der, vom Institut aufgebauten, Datenbank „GEMIS“, die spezifischen Treibhausgas-Vermeidungskosten, d. h. - das Verhältnis der Menge vermiedener Treibhausgasemissionen zur Kostendifferenz einer Referenzoption - ermittelt. Die THG-Vermeidungskosten für Kernenergiestrom liegen bei 15 bis 30 €/t vermiedener CO₂-Äquivalente. „Kleinere erdgasbetriebene Blockheizkraftwerke, Windenergie (onshore) und neue Laufwasserkraftwerke haben höhere Erzeugungskosten als die Referenzoption, so dass ihre Treibhausgas-Vermeidungskosten zwischen 30 und 40 €/t vermiedener

21 Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (2007). Arbeitsbericht „CO₂-Emissionen der nuklearen Stromerzeugung“, https://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/arbeitsberichte/downloads/Arbeitsbericht_02.pdf

22 Beerten, J. et al., Energy Policy (2009). „Greenhouse gas emissions in the nuclear life cycle: A balanced appraisal“, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509005102>

23 McCombie, Ch. et al. (2016). „Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts“, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516301240>

CO₂-Äquivalente liegen.“ Nach Aussage der Autoren zeigt der Vergleich, „dass erneuerbare Energien und Effizienz-Optionen (inklusive erdgasbetriebener GuD²⁴ in Kraft-Wärme-Kopplung) im Hinblick auf Treibhausgas-Vermeidungskosten wettbewerbsfähiger sind als Atomstrom - und dies selbst dann, wenn keine externen Kosten für nukleare Risiken veranschlagt werden.“²⁵

Weitere Studien des Öko-Instituts behandeln u.a. die „Klimaeffekte einer kurzfristigen Abschaltung der deutschen Kernkraftwerke“ im Rahmen der CO₂-Bepreisung und des Emissionshandelsystems der Europäischen Union (ETS).²⁶

Das Wuppertal-Institut hat ebenfalls verschiedene Studien, meist von Verbänden, analysiert, die die Strompreiseffekte bei einem kurzfristigen Kernenergieausstieg diskutieren.²⁷

Artikel in „Momentum Quarterly“

Ein inputvariables Modell aus dem Jahr 2015 vergleicht die Szenarien „Kohleausstieg“ und „Atomausstieg“. Dabei werden die Emissionen der Stromanteile der einzelnen Energieträger ohne Einbeziehung der Ökobilanzierung oder der Schadenswirkung betrachtet. Beim Referenzszenario „Atomausstieg bis 2020“ erreichen die erneuerbaren Energien bis 2020 einen Anteil von 35 %. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis: „Der Atomausstieg verhindert, dass der Stromsektor bis 2022 einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann. Die Emissionsintensität des deutschen Stroms wird sich bis 2020 kaum ändern, eine Kilowattstunde wird dann etwa genauso viel CO₂ verursachen wie heute, nämlich ca. 520 g/kWh. [Dieser Wert aus den Schätzungen von 2015 liegt etwas schlechter als der heutige Emissionswert.] Der Zubau der erneuerbaren Energien kompensiert den Rückbau der Atomkraft, die Kohleverstromung bleibt dadurch auf fast konstantem Niveau.“ Nach den Modellrechnungen liegen die Emissionen 2022 beim Atomausstieg bei 330 Mio. t CO₂. Die Autoren befürworten nach Analyse der reinen Stromanteile den Kohleausstieg vor dem Atomausstieg und schlagen vor, das Risiko eines Schadensfalls für einen Weiterbetrieb bis 2030

24 GuD = Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk

25 Öko-Institut e.V. (2007). Arbeitspapier „Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung“, <https://www.oeko.de/oekodoc/318/2007-008-de.pdf>

26 Öko-Institut e.V. für Umweltstiftung WWF Deutschland (2011). Kurzanalyse „Schneller Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland. Kurzfristige Ersatzoptionen, Strom- und CO₂-Preiseffekte“, <https://www.oeko.de/oeko-doc/1121/2011-008-de.pdf>

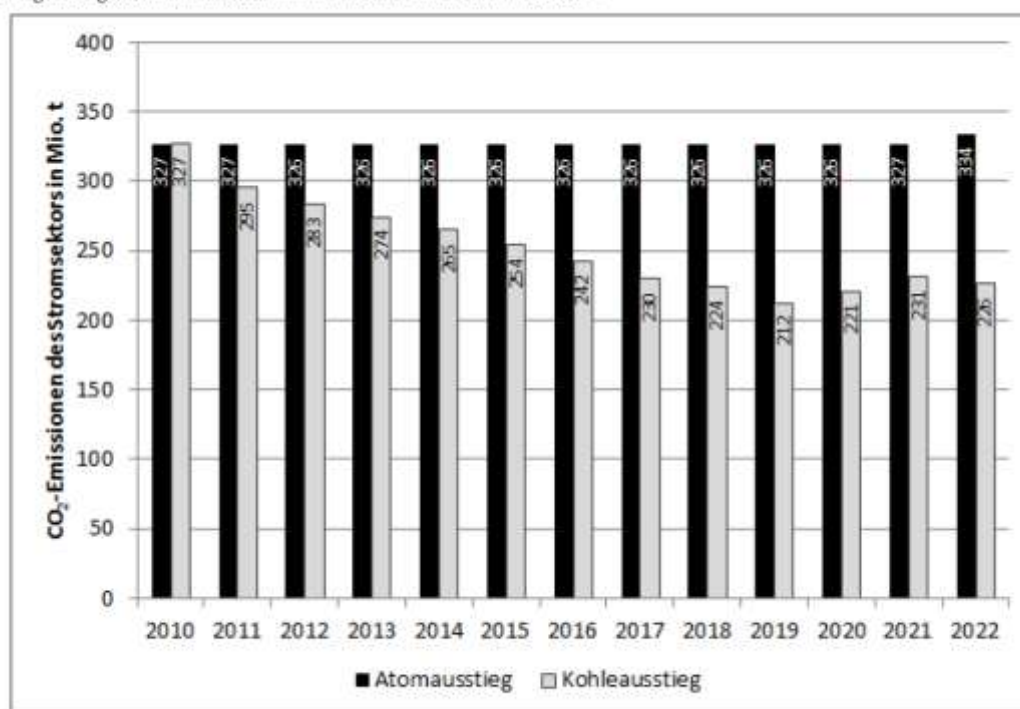
Öko-Institut e.V. für Umweltstiftung WWF Deutschland (2010). „Erste Auswertungen der „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“, <https://www.oeko.de/oekodoc/1064/2010-110-de.pdf>, Seite 14

Öko-Institut e.V. für Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009). „Laufzeitverlängerungen für die deutschen Kernkraftwerke? - Kurzanalyse zu den potenziellen Strompreiseffekten“, <https://www.oeko.de/oekodoc/911/2009-024-de.pdf>

27 Wuppertal-Institut für das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW (2011). „Kurzstudie zu möglichen Strompreiseffekten eines beschleunigten Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie“, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/3785/file/3785_Kernenergie_Ausstieg.pdf

hinzunehmen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Emissionen bis 2022 für beide Szenarien ohne Einbeziehung der Ökobilanzen.²⁸

Abbildung 6: Prognosen der Emissionen im deutschen Stromsektor 2010-2022



Quellen: eigene Darstellung nach eigener Berechnung)

Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW)

Der Bericht des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW) untersucht, ob Atomkraft eine wirtschaftliche und saubere Option für eine zukünftige nachhaltige Energieversorgung darstellt. Hierzu beleuchtet er zum einen aus wirtschaftshistorischer Perspektive die politischen und institutionellen Bedingungen und Kosten, zu denen Atomkraftwerke weltweit errichtet worden sind. Zum anderen ermitteln detaillierte Simulationsrechnungen den erwarteten Nettobarwert für heutige Investitionen aus betriebswirtschaftlicher Perspektive. Die Analysten kommen zu dem

28 Becker, B. Momentum Quarterly (2015). „Klimaschutz in Deutschland: Realität oder Rhetorik?“, Vol. 4, No. 1, Seite 3-22, <https://www.momentum-quarterly.org/ojs2/index.php/momentum/article/download/1752/1416>

Tabelle der Emissionen aus der Stromerzeugung: https://docs.google.com/spreadsheets/d/14PRbcMzQF-9VeR-Fvq-MoHraDhwtGhLr9ZeXsLgx23Xo/edit?hl=en_US&hl=en_US#gid=0

Erläuterungen zum Modell: „Zusätzliche CO₂-Emissionen durch den Atomausstieg: ein Modell“, <https://docs.google.com/document/d/1xVr9xUsH3vSKllgLGfYtDKbnuYlukEHdfXn9H9n2Io0/edit>

Schluss, „dass Atomkraft in der Vergangenheit keine saubere und kostengünstige Energiequelle war und dies auch in der Zukunft nicht sein wird.“²⁹

Die Autoren zitieren einen Emissionswert aus einem häufiger zitierten Artikel von 66 g CO₂-Äquivalenten/kWh für die nukleare Stromerzeugung.³⁰

Eine Gegendarstellung des Berichts liefert ein Artikel in der Zeitschrift „atw“, der die Berechnungen des IPCC mit einen geringeren Wert von 12 g CO₂/kWh bevorzugt und damit begründet, dass dieser Wert auch vom Schweizerischen Paul Scherrer Institut verwendet werde.³¹

Das Paul Scherrer Institut zieht in seiner Analyse für die Schweiz den Schluss: „Die CO₂-Emissionen können realistischerweise nur halbiert werden, wenn drastisch weniger fossile Energie verbraucht, gleichzeitig neue erneuerbare Energien ausgebaut und Kernenergie im Energiemix beibehalten wird.“³²

Internationale Atomenergie Agentur (IAEA)

Eine ausführliche Betrachtung der Nachhaltigkeit nuklearer Kraftwerke hat die Internationale Atomenergie Agentur veröffentlicht. Für Leichtwasserreaktoren wurde ein mittlerer Wert der Treibhausgasemissionen von 14,9 g CO₂-Äquivalente/kWh aus einem Bereich von 5,6 bis 19,7 g CO₂-Äquivalente/kWh aus über 200 Einzelergebnissen ermittelt.³³

29 Wealer, B. et al. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW) (2019). „Zu teuer und gefährlich: Atomkraft ist keine Option für eine klimafreundliche Energieversorgung“, DIW Wochenbericht Nr. 30 (2019), DOI: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2019-30-1 , 511-520

30 Benjamin K. Sovacool, Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. Energy Policy 36 (2008). 2950–2963, zitiert in DIW 2019, S. 519, https://www.nirs.org/wp-content/uploads/climate/background/sovacool_nuclear_ghg.pdf

31 Wendland, A.V. et al., atw (2019). „Das DIW-Papier über die „teure und gefährliche“ Kernenergie auf dem Prüfstand“, atw, Vol. 64 (2019), Issue 10 October, https://www.kernd.de/kernd-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/artikel/atw_2019-10_wendland_peters.pdf

Treyer, K., et al., Paul Scherrer Institut (PSI) (2014). „Life cycle inventories of electricity generation and power supply in version 3 of the ecoinvent database—part I: electricity generation“, <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-013-0665-2>

32 Paul Scherrer Institut (PSI) (2014). „Die Vermessung des ökologischen Fußabdrucks“, <https://www.psi.ch/de/media/forschung/die-vermessung-des-oekologischen-fussbadrucks>

Paul Scherrer Institut (PSI) (2009). „Strukturen und Auswirkungen nationaler und internationaler Energiesysteme – nationale Klimaziele für die Schweiz“, <https://www.psi.ch/de/media/forschung/strukturen-und-auswirkungen-nationaler-und-internationaler-energiesysteme>

33 International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016). „Nuclear Power and Sustainable Development“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1754web-26894285.pdf>, Seite 49 ff.

Greenpeace e.V.

Die Greenpeace Studie behandelt die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen auf den Emissionshandel für den Atomausstieg und für den Fall einer Verlängerung bis 2035 für verschiedene Szenarien des Emissionshandels. „Die Ergebnisse der Studie legen nahe, dass die Energieeffizienzpolitik der Bundesregierung und die Ausgestaltung des Europäischen Emissionshandelssystems in der Lage sind, die Effekte des Atomausstiegs auf die Strompreise und den Klimaschutz abzufedern beziehungsweise mittelfristig zu kompensieren.“³⁴

* * *

34 Greenpeace (2012). „Der Atomausstieg: Kaum Auswirkungen auf Strompreise und Klimaschutz“, <https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/20120706-Auswirkungen-Atomausstieg-kurz.pdf>