Ausarbeitung

Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken

© 2023 Deutscher Bundestag

Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 138/22
Abschluss der Arbeit: 09.12.2022
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung und Landwirtschaft

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.	**Fragestellung**	**4**
2.	**Vergleichsgrößen von Energieerzeugungstechnologien**	**4**
2.1.	Überblick	4
2.2.	Stromgestehungskosten (Levelized Costs of Electricity)	4
2.3.	Baukosten (Overnight Costs)	7
2.4.	Materialeinsatz pro Energieeinheit (Material intensity)	10
3.	**Ressourcen- und Materialeinsatz**	**13**
3.1.	Methodischer Überblick	13
3.2.	Materialeinsatz und Erzeugungsleistung	13
3.2.1.	Kernkraft	13
3.2.2.	Kohle	17
3.2.3.	Wind und Photovoltaik	18
3.2.4.	Vergleich mehrerer Technologien	23
3.3.	Materialeinsatz und Stromerzeugung	30
4.	**Zusammenfassende Analyse**	**35**
5.	**Fazit**	**39**
5.1.	Einschätzung zu den Ergebnissen des Materialbedarfs	39
5.2.	Einschätzung der wissenschaftlichen Methodiken	40
5.3.	Einschätzung zur Aussagekraft der Kennzahl „Materialeinsatz pro Energieeinheit“	41

1. Fragestellung

Bau und Unterhalt verschiedener Kraftwerke zur Stromerzeugung verursachen unterschiedliche Kosten. Diese Ausarbeitung wertete einschlägige Studien aus. Die Daten zum Materialbedarf und die Methodik der Berechnung der verschiedenen Studien sind dabei allenfalls nur unter Vorbehalt vergleichbar. Auch der Materialeinsatz pro Energieeinheit ist eine Kennzahl, die nur unter Vorbehalt aussagekräftig ist.

2. Vergleichsgrößen von Energieerzeugungstechnologien

2.1. Überblick

Bei der Erzeugung von Strom stellt sich immer die Frage der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Das Ziel der Energiewende, also die Umstellung des Energiesektors hin zur CO2-Neutralität, muss unter dem Gesichtspunkt bezahlbaren Stroms sichergestellt werden.

Die Wirtschaftlichkeit- und Umweltbelastung bei der Errichtung und dem Betrieb von Kraftwerken lässt sich anhand unterschiedlicher Kenngrößen messen. Dazu zählen die Kosten der Stromerzeugung bezogen auf die Lebenszykluskosten (**Stromgestehungskosten**), die **Baukosten** bezogen auf die Energieerzeugungskapazität und sowie der **Material**- und Ressourceneinsatz. Weitere verbreitete Kenngrößen sind Energy Return on (Energy) Investment (EROI) sowie die CO2-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus (Emission Life-Cycle Analysis – LCA). Bei dieser Ausarbeitung steht der Material- und Ressourceneinsatz von Kraftwerken im Mittelpunkt. Jedoch soll vorab kurz auf die Stromgestehungskosten und Baukosten als relevante Vergleichsgröße eingegangen werden, um die Vorteile und Limitationen einer reinen Ressourcenbetrachtung zu veranschaulichen.

2.2. Stromgestehungskosten (Levelized Costs of Electricity)

Der gängigste Vergleichswert bei der Stromerzeugung sind die **Stromgestehungskosten** (engl. Levelized Costs of Electricity – **LCOE**). Der Begriff der Gestehungskosten ist eine energiewirtschaftliche Größe und lässt sich vereinfacht mit „Herstellungskosten“ oder „Selbstkosten“ übersetzen. Die Stromgestehungskosten sind eine Maßeinheit, die die Kosten für die Errichtung und den jährlichen Betrieb einer Anlage ins Verhältnis zur Stromerzeugungsmenge der gesamten Lebensdauer der Anlage setzt. Nahezu alle Studien nutzen die LCOE als **Vergleichsmaßstab**, um die Kosten-/Nutzenanalyse verschiedener Energietechnologien zu illustrieren. Dies ermöglicht, die vorgelegten Daten auch international relativ systematisch und einheitlich zu erheben.

Allerdings basiert die Höhe der LCOE auf Modellrechnungen mit unterschiedlichen Anlagen-/Kraftwerksdaten, die auch **regional variieren** können. Daher lassen sich die Kosten von Konkurrenztechnologien – wenn überhaupt – nur annäherungsweise vergleichen.

LCOE berücksichtigen in ihrer ursprünglichen Berechnung nur die Kosten und Leistungen auf **Ebene der Anlagen/Kraftwerke**. Die entstehenden Kosten der Übertragung und der Stromverte-

lung werden vernachlässigt. Damit bleiben die Netzübertragungs- und damit die Integrationskosten für das Stromsystem unbeachtet.[1] Die Kosten für die Integration in das System, die nicht in den LCOE abgebildet sind, spiegeln sich in anderen Kenngrößen wider, wie den System LCOE[2] oder den Value-Adjusted Levelised Cost of Electricity (VALCOE)[3].

Beispiele für die Höhe der Stromgestehungskosten sind in den folgenden beiden Abbildungen illustriert.

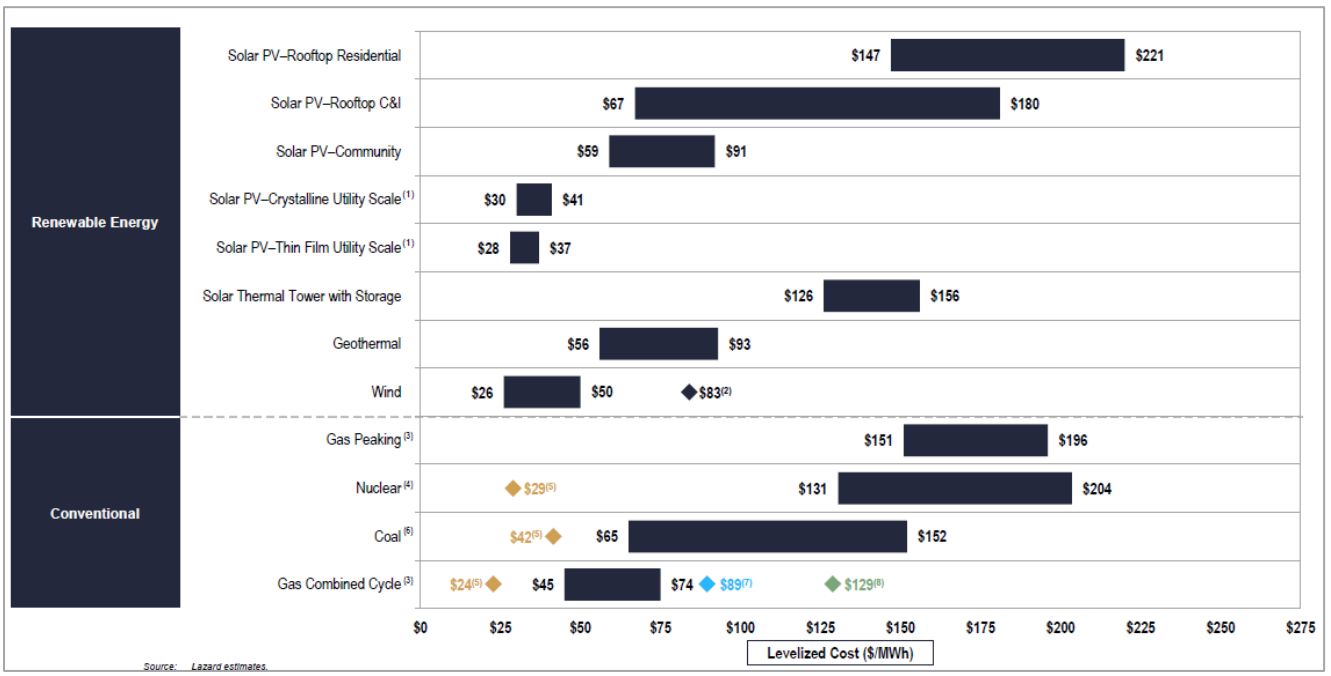

Abbildung 1: Gestehungskostenvergleich –Analyse (ohne öffentliche Subventionen)[4]

1 IEA (International Energy Agency) & NEA (Nuclear Energy Agency) (2020), Projected Costs of Generating Electricity, https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf, S. 14.

2 Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., Edenhofer, O. (2013), System LCOE: What are the costs of variable renewables?, Energy, Volume 63, S. 61-75, https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.072.

3 IEA (International Energy Agency) & NEA (Nuclear Energy Agency) (2020), Projected Costs of Generating Electricity, https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf, S. 75.

4 Lazard (2021), Lazard's levelized cost of energy analysis – Version 15.0, https://www.lazard.com/media/451881/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf, S. 3.

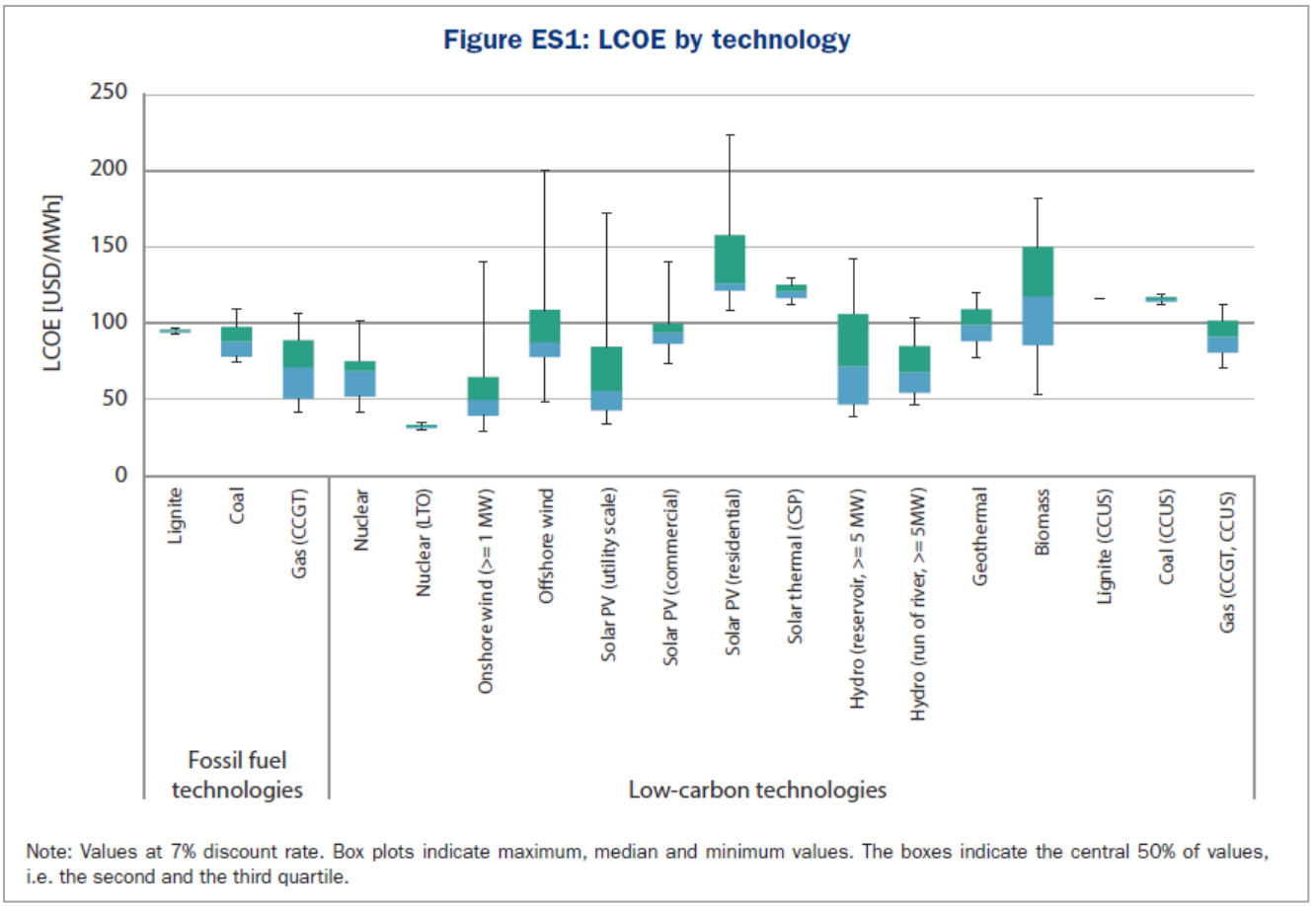

Abbildung 2: LCOE pro Energietechnologie[5]

Detailliertere Informationen und konkrete Höhen der Gestehungskosten unterschiedlicher Energieerzeugungstechnologien finden sich in zwei früheren Ausarbeitungen zu den Gestehungskosten für Strom aus Kernkraft und erneuerbaren Energien[6] sowie für fossile Energieträger.[7]

5 IEA (International Energy Agency) & NEA (Nuclear Energy Agency) (2020), Projected Costs of Generating Electricity, https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf, S. 14.

6 Wissenschaftliche Dienste (2022), Gestehungskosten von Strom im Vergleich, WD 5-3000-005/22, https://www.bundestag.de/resource/blob/887090/1867659c1d4edcc0e32cb093ab073767/WD-5-005-22-pdf-data.pdf.

7 Wissenschaftliche Dienste (2022), Interne und externe Kosten der Stromerzeugung: Gestehungskosten, Umweltkosten und Subventionen konventioneller und erneuerbarer Energien, WD 5 - 3000 - 123/22.

2.3. Baukosten (Overnight Costs)

Zur Vergleichbarkeit der Baukosten von Kraftwerken werden die Bauinvestitionskosten ins Verhältnis zur Stromproduktion gesetzt. Die sogenannten Overnight Costs beziehen sich auf die Baukosten eines Kraftwerks, als wenn während des Bauprozesses keinen Zinsen anfallen würden. Overnight bezieht sich das hypothetische Szenario, dass der Bau einen Kraftwerks über Nacht, also ohne/mit geringen Preisänderungen, Konstruktionsverzögerungen oder Zinsen, realisiert wird. Der Vergleichswert ist ein stark vereinfachter Ansatz, die Baukosten im Verhältnis zur Kraftwerkskapazität von unterschiedlichen Kraftwerkstypen abzuschätzen.[8]

Die IEA (International Energy Agency) & NEA (Nuclear Energy Agency) kalkulieren Overnight Costs folgendermaßen:[9]

> „Overnight construction costs include:
>
> - direct construction costs plus pre-construction costs, such as site licensing, including the environmental testing;
>
> - the indirect costs such as engineering and administrative costs that cannot be associated with a specific direct construction cost category, as well as capitalised indirect costs;
>
> - owners' costs that include any additional expenses incurred by the owners associated with the plant and plant site, but excluding offsite, beyond the busbar, transmission costs; and
>
> - contingency to account for changes in overnight cost during construction."

Die IEA & NEA errechnen auf Basis von Kraftwerken in unterschiedlichen Ländern die Spannweiten der Overnight Costs unterschiedlicher Energieerzeugungstechnologien (siehe Abbildung 3):

8 https://energyeducation.ca/encyclopedia/Overnight_cost_of_capital.

9 IEA (International Energy Agency) & NEA (Nuclear Energy Agency) (2020), Projected Costs of Generating Electricity, https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf, S. 37.

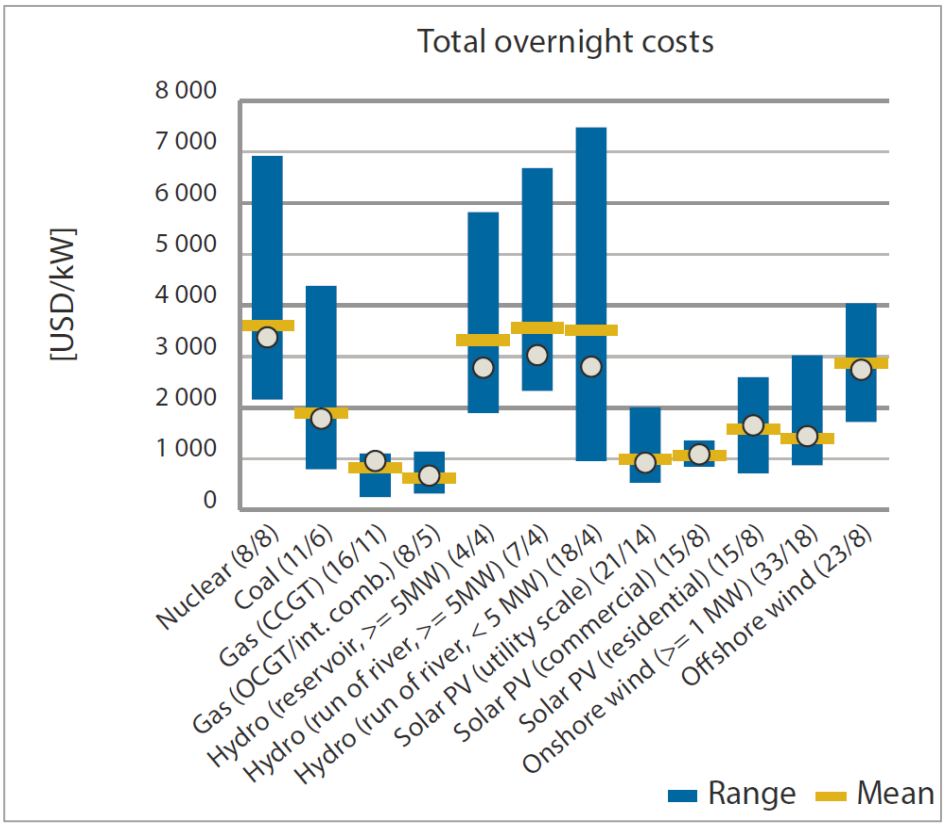

Abbildung 3: Total overnight costs (international)[10]

Anmerkungen: Die Werte in Klammern geben die Gesamtzahl der Datenpunkte und die Anzahl der Länder an.

Die US Energy Information Administration (EIA) zeigt projizierte Overnight Costs unterschiedlicher Energieerzeugungstechnologien in den USA, die sich auf die Etablierung neuer Technologien beziehen und regional angepasst wurden (z.B. Kühlsysteme in heißeren Regionen oder regional unterschiedliche Windverhältnisse) (siehe Abbildung 4):

10 IEA (International Energy Agency) & NEA (Nuclear Energy Agency) (2020), Projected Costs of Generating Electricity, https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf, S. 45.

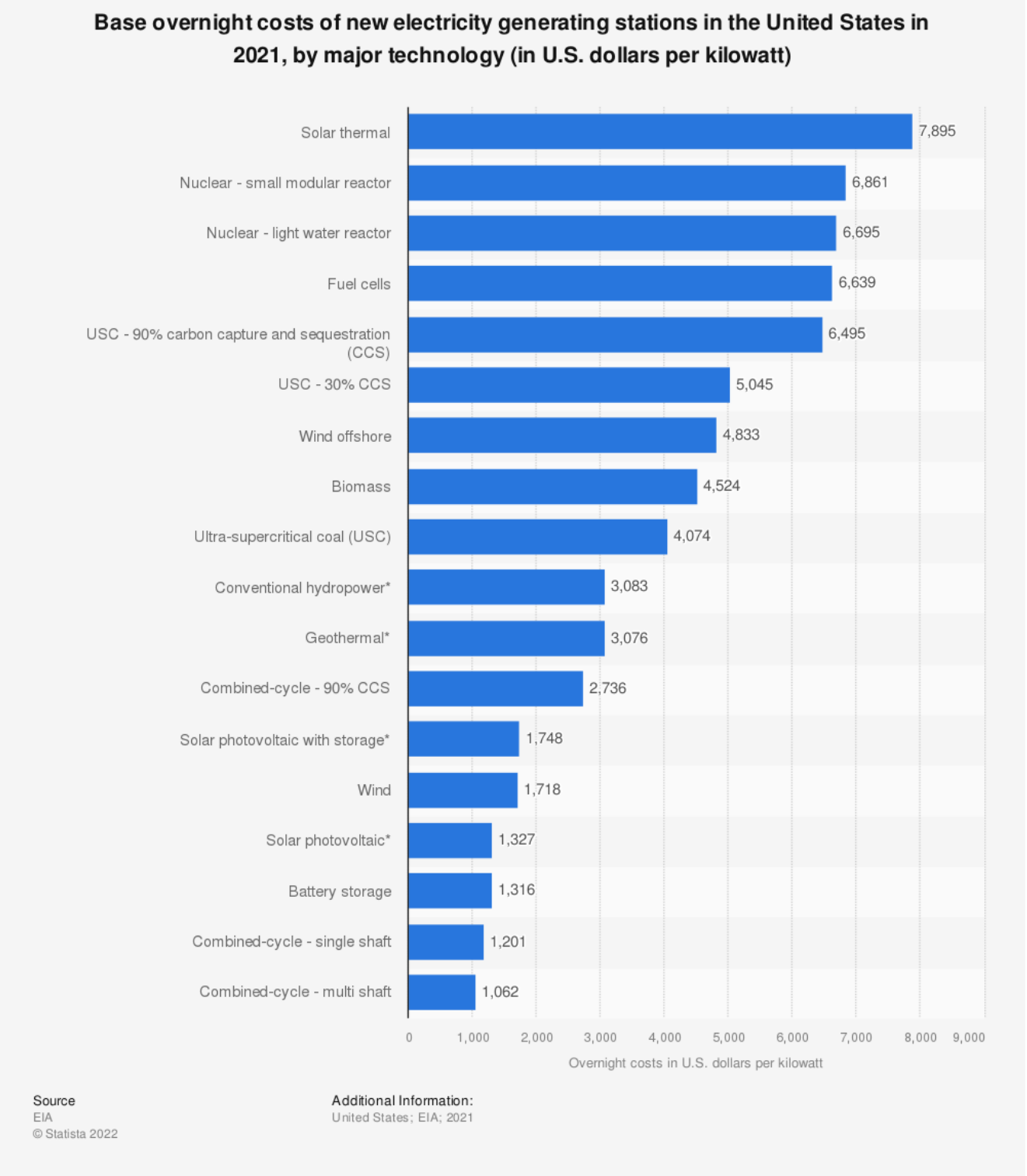

Abbildung 4: Base overnight costs of new electricity generating stations in the United States in 2021, by major technology (in U.S. dollars per kilowatt)[11]

Die Studien zeigen, dass es deutliche Unterschiede der Kosten gleicher Energieerzeugungstechnologien geben kann, die auf die länderspezifischen und regionalen Rahmenbedingungen zurück zu führen sind.

2.4. Materialeinsatz pro Energieeinheit (Material intensity)

Ein weniger weit verbreiteter Ansatz ist der benötigte Ressourcenbedarf pro generiertem kW oder kWh eines Kraftwerks. Der Materialeinsatz, z.B. von Zement, Aluminium oder Kupfer, wird ins Verhältnis gesetzt zur installierten Erzeugungsleistung oder zur Stromerzeugungsmenge bezogen auf den vollständigen Lebenszyklus.[12]

Der Materialeinsatz spielt sowohl ökonomisch, als auch bei der Nachhaltigkeit eine Rolle:

Rohstoffe sind in Zeit steigender Rohstoffpreise und gestörter Lieferketten zum einen ein entscheidender Kostenfaktor.[13] Zum anderen wird die Verfügbarkeit und Sicherung von Rohstoffen zur Energieversorgung immer stärker zum nationalen Sicherheitsaspekt.[14]

Darüber hinaus sind die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen mit Eingriffen in die Umwelt verbunden. Der Ressourcen-/Materialverbrauch der Energieerzeugung ist nach dem UNEP-Bericht[15] eine von fünf Einflussdimensionen fünf Einflussdimensionen für die Umwelt (neben Landverbrauch, Klima, Gesundheit bei Menschen und Gesundheit des umgebenen Ökosystems).

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen, dass der Material-/Ressourceneinsatz (speziell von Zement, Aluminium, Stahl und Kupfer) im Verhältnis zur Energiegewinnung bei konventionellen Kraftwerken tendenziell höher ist; allerdings belasten diese Kraftwerke andere Nachhaltigkeitsdimensionen weniger:

---

11 https://www.statista.com/statistics/519118/power-plant-base-overnight-costs-in-the-us-by-technology/ auf Basis von EIA (2022) https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf.

12 Für eine grundlegende Erklärung des Unterschieds zwischen Erzeugungsleistung und Stromerzeugung siehe https://www.smard.de/page/home/wiki-article/446/203666.

13 https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energiewirtschaft-der-preisverfall-der-erneuerbaren-ist-vorbei-energiewende-wird-teurer/28013512.html.

14 Wissenschaftliche Dienste (2022), Abhängigkeit deutscher Unternehmen von Rohstoffimporten, WD 5 - 3000 - 110/22, https://www.bundestag.de/resource/blob/922148/cb88309a1d91a8292826377880eab81b/WD-5-110-22-pdf-data.pdf.

15 United Nations Environment Programme – UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production. Report of the International Resource Panel. E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), https://www.resourcepanel.org/file/431/download?token=bWmEw0hl.

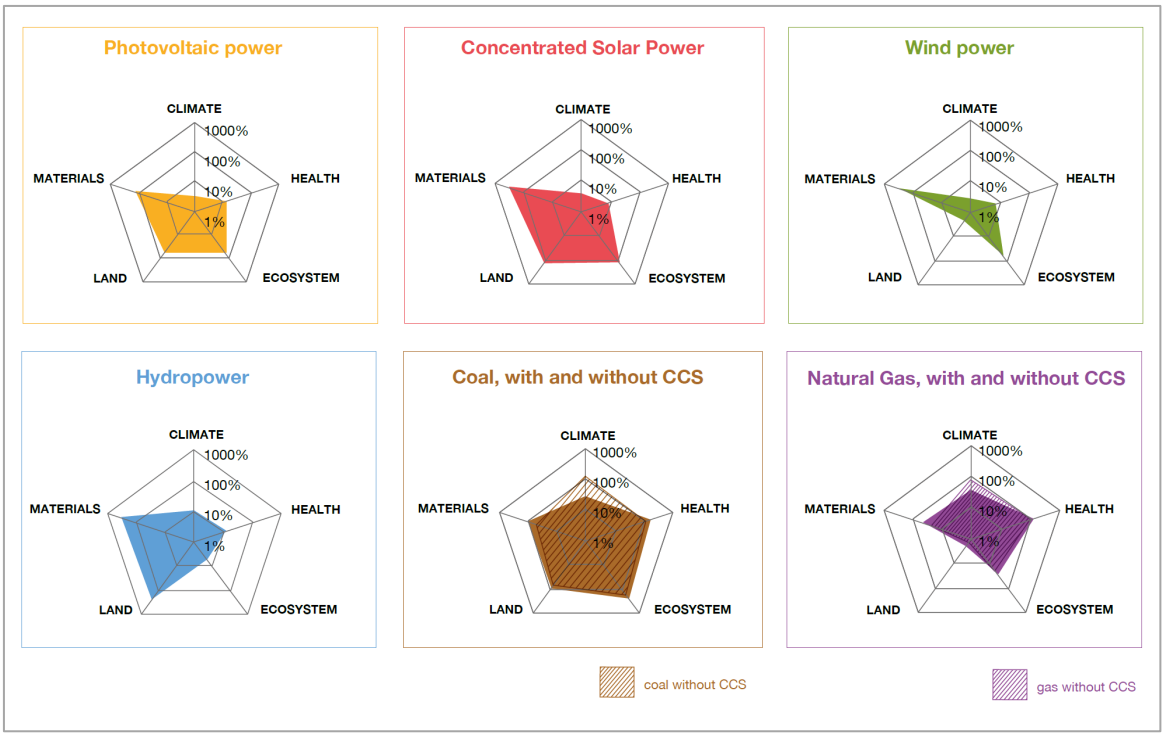

Abbildung 5: Einfluss verschiedener Stromerzeugungstechnologien auf fünf Umweltdimensionen im Vergleich zum durchschnittlichen globalen Energieerzeugungsmix[16]

16 UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production – Summary for Policymakers. Report of the International Resource Panel. E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), https://www.resourcepanel.org/file/240/download?token=BsSOMkGA, S. 39.

	Climate	Human health	Ecosystem health	Resources
WIND	Low GHG (++)	Reduced particulate exposure (++) Potentially reduced human toxicity (--)	Bird and bat collisions (+=) Low ecotoxicity (=-) Low eutrophication (=-)	High metal consumption (+=) Low water use (==) Low direct land use (==)
PHOTOVOLTAICS	Low GHG (==)	Low particulate matter (+=) Low human toxicity (=-)	Low eutrophication (+-) Low ecotoxicity (+-)	High metal use (+=) High direct land use for ground-based systems (++)
CONCENTRATED SOLAR POWER	Low GHG (==)	Low particulate matter (=-) Low human toxicity (=-)	Concern about heat transfer fluid (+=) Low eutrophication (+-) Low ecotoxicity (+-)	High water use (++) High land use (++)
HYDROPOWER	Low fossil GHG (++) High biogenic GHG from some dams (==)	Low air pollution impacts (=-)	Riparian habitat change (reservoir and downstream) (++)	High water use due to evaporation (+-) High land use for reservoirs (+=)
GEOTHERMAL POWER	Low fossil GHG (+-) Geogenic GHG for some types (=+)	Air and water pollution from geofluid flow in some sites (=-)	Aquatic habitat change/pollution (+=)	High water use for cooling (+=)
COAL WITH CCS GAS WITH CCS	Low GHG (++) Substantial fugitive methane emissions (==) Concern about CO_2 leakage (-=)	Solvent-related emissions (==) High particulate matter (==) High human toxicity (++)	High eutrophication (++) High ecotoxicity (+=)	Increased fossil fuel consumption (++) Limited CO_2 storage volume (++)

KEY:

First symbol	(+) high agreement among studies	(=) moderate agreement	(-) low agreement
Second symbol	(+) robust evidence (many studies)	(=) medium evidence	(-) limited evidence

Abbildung 6: Überblick der Einflüsse verschiedener Energieerzeugungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsdimensionen Klima, Gesundheit bei Menschen, Gesundheit des umgebenen Ökosystems und Ressourcenbedarf[17]

Anmerkung: Referenz ist der derzeitige, globale Energiemix

Vergleicht man nur den Rohstoffverbrauch über die verschiedenen Stromerzeugungstechnologien, übergeht man andere wesentliche Einflüsse der Energieerzeugung auf die Umwelt.

17 UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production – Summary for Policymakers. Report of the International Resource Panel. E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), https://www.resourcepanel.org/file/240/download?token=BsSOMkGA, S. 37.

3. Ressourcen- und Materialeinsatz

3.1. Methodischer Überblick

Diese Ausarbeitung identifiziert nationale und internationale Studien, die die Ressourcenverbräuche einiger oder mehrerer Energieerzeugungsanlagen untersuchen. Dabei stehen die gängigsten Energieerzeugungsanlagen im Mittelpunkt, wie Wind, Solar (sowohl Photovoltaikanlagen (PV) als auch Solarkraftwerke), Kohle, Wasserkraft, Kernkraft und Erdgas. Da nur wenige Studien alle Typen von Energieerzeugungsanlagen behandeln, werden auch Studien berücksichtigt, die lediglich eine oder mehrere dieser Typen untersuchen. Daten zur Kernenergie und Kohlekraft wurden nicht immer mit den erneuerbaren Erzeugungstechnologien in Vergleich gesetzt.

Studien mit einer breiten Datenbasis der einzelnen Erzeugertechnologien liegen vor allem bei erneuerbaren Energien Wind und PV vor. Für Kernenergie und auch Kohlekraft bezieht diese Ausarbeitung Studien ein, die nur einzelne der wenige der genannten Erzeugungstechnologien betrachten. Es gibt nur sehr wenige Studien, die den Vergleich über alle Technologien mit einer breiten Datenbasis unterlegen. Unterschiedliche Methoden zur Ressourcenmessung, unterschiedliche Erzeugungstechnologien, sowie unterschiedliche Datengrundlagen lassen sich nur begrenzt zueinander ins Verhältnis setzen. Daher unterteilt diese Ausarbeitung die Studien wie folgt:

Einerseits lassen sich die Ergebnisse von Untersuchungen an einzelnen Erzeugungstechnologien darstellen. Hier kann davon ausgegangen werden, dass der Ressourcenverbrauch einiger weniger Technologien in sich schlüssig ist, jedoch fehlt die Vergleichbarkeit zu anderen Technologien. Andererseits sind die Studien, die eher einen breiten Ansatz verfolgen (im Sinne des Vergleichs möglichst vieler Erzeugertechnologien), separat darzustellen. Hier ist die Vergleichbarkeit höher, nur ist die Validität der Daten zu den Ressourcenverbräuchen einzelner Erzeugungstechnologien geringer (teilweise ist die Herkunft der Daten nicht angegeben).

Die meisten Studien analysieren den Materialeinsatz zum Bau der Kraftwerke. Dies umfasst den Materialeinsatz im Verhältnis zur **installierten Erzeugungsleistung (MW)**, die ein Kraftwerk zu einem gewissen Zeitpunkt (theoretisch) im Stande ist, maximal zu leisten. Wenige Studien bewerten den Materialeinsatz gesehen auf den gesamten Lebenszyklus des Kraftwerks. Sie setzen den Materialeinsatz ins Verhältnis zur tatsächlichen **Energieerzeugung (MWh)** in Bezug auf einen bestimmten Zeitraum (die Betriebsdauer eines Kraftwerks). Diese Sichtweise ist realistischer, da die installierte Kapazität einer Windturbine 2 MW betragen kann, die jedoch aufgrund der Windfluktuation beispielsweise nur an 50 Prozent der Tage im Jahr erreicht wird.

3.2. Materialeinsatz und Erzeugungsleistung

3.2.1. Kernkraft

Die Studie von Anigstein et al. (2004) befasst sich allein mit Kernkraftanlagen. Die verwendeten Daten beruhen auf Angaben der NRC (Nuclear Regulatory Commission). Diese veröffentlicht Daten zu Referenzeinrichtungen. Referenzeinrichtung für Siedewasserreaktoren war primär das Washington Nuclear Project 2 mit einer Gesamtleistung von 3.320 MWt (1.155 MWe). Das Gesamtvolumen an Beton wird mit 147.880 m^3 angegeben, was mit einem Dichtegrad von 2.4 g/cm^3 eine Gesamtbetonmenge von 355.000 t ergibt. Sowohl für Kupfer als auch für Aluminium beste-

hen keine offiziellen Mengenangaben für das Referenzkraftwerk der Kategorie Siedewasserreaktor. Deshalb greifen die Autoren der Studie auf verfügbare Daten zu Druckwasserreaktoren zurück und unterstellen, dass die gleichen Mengen auch in Siedewasserreaktorkraftwerken verbaut werden. Für die Berechnungsgrundlage von Stahl wird der Begriff der ferrous metals herangezogen. Hierbei handelt es sich jedoch dem Wortsinne nach nicht ausschließlich um Stahl, sondern auch um sonstige eisenhaltige Metalle. Anhand der Mengen und der Kraftwerksgesamtleistung von 1.155 MWe lassen sich die jeweiligen Materialmengen (Abbildung 7) in t pro MW bestimmt werden.

Category	Material mass (t)			
	Concrete[a]	Ferrous metals	Aluminum	Copper
Activated	176	327	N/A	N/A
Surficially radioactive	123	8,668	58	N/A
Suspect	0	3,025	N/A	52
Potentially cleared	281,000	19,374	2	62
Clean	73,700	2,677	10.7	580
Total	355,000	34,071	70.7	694

N/A - not available

[a] Based on concrete density of 2.4 g/cm^3

Abbildung 7: Aufstellung der in dem Kernkraftwerk verwendeten Ressourcen in Tonnen [18]

Bryan & Dudley (1974) befassen sich ebenfalls mit dem Materialbedarf von Kernkraftwerken. Berechnungsgrundlage hierfür ist ein typischer Druckwasserreaktor mit einer Leistung von 1.000 MWe. Laut Autoren werden für die Berechnungen weder ein verbessertes radioaktives Abfallbehandlungssystem noch alternative Kühlkörper beachtet, da diese während des Baus des Kraftwerkes noch nicht vorherrschend waren. Untersucht wurden die Materialien Kupfer, Stahl, Aluminium, Beton, Eisen, Blei, Zement, Nickel und noch weitere geringfügig enthaltene Materialien.

Die konkreten Bestandteile des Kraftwerkes wurden aus Ausstattungskatalogen entnommen. Weitere Mengen wurden durch Hochrechnungen ermittelt und bei den Herstellern erfragt (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9). Anhand der Gesamtleistung der Anlagen lässt sich das Verhältnis von der Menge an Ressourcen pro Kilowatt Leistung bestimmen:

18 Anigstein, R.; Chmelynski, H. J.; Loomis, D. A.; Marschke, S. F.; Mauro, J. J.; Olsher, R. H. et al. (2004): Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities. Appendices A through E. U.S. Nuclear Regulatory Commission, https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1640/v2/sr1640v2.pdf, S. A-13.

APPENDIX B
COMPILATION OF COMPOSITE MATERIALS OF CONSTRUCTION FOR A TYPICAL 1000-MWe PWR

ACCOUNT	SYSTEM[a]	QUANTITIES				
		ALUMINUM (METRIC TONS)	BABBITT METAL (METRIC TONS)	BRASS (METRIC TONS)	BRONZE (METRIC TONS)	CARBON STEEL (METRIC TONS)
	ENTIRE PLANT	18.14	0.42	10.10	25.14	32731.27
21	STRUCTURES AND SITE	1.19	0.0	2.93	0.21	16519.30
211	SITE IMPROVEMENTS	0.05	0.0	0.0	0.0	1692.94
212	REACTOR BUILDING	0.14	0.0	0.34	0.02	7264.23
213	TURBINE BUILDING	0.82	0.0	1.43	0.07	3641.16
214	INTAKE AND DISCHARGE	0.0	0.0	0.02	0.00	333.66
215	REACTOR AUXILIARIES	0.05	0.0	0.15	0.01	1358.73
217	FUEL STORAGE	0.06	0.0	0.10	0.00	364.60
218	MISCELLANEOUS BUILDINGS	0.08	0.0	0.88	0.10	1863.99
22	REACTOR PLANT EQUIPMENT	5.22	0.0	0.0	0.54	3444.93
221	REACTOR EQUIPMENT	0.0	0.0	0.0	0.0	429.99
222	MAIN HEAT TRANSFER SYSTE	0.0	0.0	0.0	0.04	1686.54
223	SAFEGUARDS COOLING SYSTE	0.0	0.0	0.0	0.13	274.15
224	RADWASTE SYSTEM	0.0	0.0	0.0	0.02	35.20
225	FUEL HANDLING SYSTEMS	0.0	0.0	0.0	0.01	81.98
226	OTHER REACTOR EQUIPMENT	0.0	0.0	0.0	0.35	823.53
227	INSTRUMENTATION AND CONT	5.22	0.0	0.0	0.0	113.53
23	TURBINE PLANT EQUIPMENT	1.17	0.28	6.89	21.48	10958.35
231	TURBINE-GENERATORS	0.0	0.27	0.0	19.74	4138.66
232	HEAT REJECTION SYSTEMS	0.0	0.0	0.36	0.72	2501.06
233	CONDENSING SYSTEMS	0.0	0.0	1.50	0.24	1359.80
234	FEED-HEATING SYSTEM	0.0	0.00	3.89	0.32	1367.76
235	OTHER EQUIPMENT	0.0	0.00	1.13	0.45	1541.28
236	INSTRUMENTATION AND CONT	1.17	0.0	0.0	0.0	49.80
24	ELECTRIC PLANT EQUIPMENT	4.10	0.14	0.0	2.48	965.46
241	SWITCHGEAR	0.0	0.0	0.0	0.74	30.40
242	STATION SERVICE EQUIPMEN	0.02	0.14	0.0	0.72	654.12
243	SWITCHBOARDS	4.08	0.0	0.0	0.05	86.98
244	PROTECTIVE EQUIPMENT	0.0	0.0	0.0	0.45	5.90
245	STRUCTURES AND ENCLOSURE	0.0	0.0	0.0	0.0	112.49
246	POWER AND CONTROL WIRING	0.0	0.0	0.0	0.51	75.57
25	MISCELLANEOUS EQUIPMENT	6.46	0.0	0.29	0.43	843.23
251	TRANSPORTATION AND LIFTI	0.0	0.0	0.0	0.0	529.34
252	AIR AND WATER SERVICE SY	0.0	0.0	0.29	0.0	232.56
253	COMMUNICATIONS EQUIPMENT	0.34	0.0	0.0	0.0	4.67
254	FURNISHINGS AND FIXTURES	6.12	0.0	0.0	0.43	76.66

[a]THE LAST WORD IN SOME TITLES IS TRUNCATED BECAUSE OF SPACE LIMITATIONS.

Abbildung 8: Aufstellung der anteilig verbauten Menge an Ressourcen in Tonnen pro Kilowattstunde installierter Leistung des Kernkraftwerkes (1)[19]

19 Bryan, R. H.; Dudley, I. T. (1974), Estimated quantities of materials contained in a 1000- MWe PWR power plant. Oak Ridge National Laboratory, https://www.osti.gov/servlets/purl/4284838, S. 37.

APPENDIX B (CONTINUED)

ACCOUNT	SYSTEM[a]	QUANTITIES				
		CONCRETE (METRIC TONS)	COPPER (METRIC TONS)	GALVANIZED IRON (METRIC TONS)	INCONEL (METRIC TONS)	INSULATION (METRIC TONS)
	ENTIRE PLANT	179681.06	694.06	1257.46	124.24	921.63
21	STRUCTURES AND SITE	146472.19	33.11	814.23	0.0	21.22
211	SITE IMPROVEMENTS	4887.23	1.53	17.89	0.0	0.0
212	REACTOR BUILDING	54328.98	9.29	301.27	0.0	15.92
213	TURBINE BUILDING	15930.64	1.57	196.41	0.0	5.31
214	INTAKE AND DISCHARGE	13215.10	0.23	3.63	0.0	0.0
215	REACTOR AUXILIARIES	33875.50	0.77	109.77	0.0	0.0
217	FUEL STORAGE	7163.29	0.32	43.36	0.0	0.0
218	MISCELLANEOUS BUILDINGS	17071.41	19.41	141.91	0.0	0.0
22	REACTOR PLANT EQUIPMENT	981.47	50.43	5.51	124.24	194.12
221	REACTOR EQUIPMENT	135.50	6.80	0.0	0.09	0.0
222	MAIN HEAT TRANSFER SYSTE	732.44	9.80	1.63	124.15	30.42
223	SAFEGUARDS COOLING SYSTE	0.0	2.87	1.09	0.0	11.25
224	RADWASTE SYSTEM	0.0	0.23	0.82	0.0	106.12
225	FUEL HANDLING SYSTEMS	12.82	0.18	0.24	0.0	0.38
226	OTHER REACTOR EQUIPMENT	100.71	1.50	1.73	0.0	45.94
227	INSTRUMENTATION AND CONT	0.0	29.04	0.0	0.0	0.0
23	TURBINE PLANT EQUIPMENT	30506.26	51.37	4.67	0.0	706.29
231	TURBINE-GENERATORS	11352.87	35.18	0.48	0.0	106.41
232	HEAT REJECTION SYSTEMS	15143.26	3.04	2.18	0.0	0.0
233	CONDENSING SYSTEMS	1281.78	1.27	0.61	0.0	307.13
234	FEED-HEATING SYSTEM	109.87	1.20	0.54	0.0	165.99
235	OTHER EQUIPMENT	2618.48	0.70	0.86	0.0	126.75
236	INSTRUMENTATION AND CONT	0.0	9.98	0.0	0.0	0.0
24	ELECTRIC PLANT EQUIPMENT	4263.46	556.53	431.05	0.0	0.0
241	SWITCHGEAR	0.0	2.78	1.36	0.0	0.0
242	STATION SERVICE EQUIPMEN	128.18	19.06	8.57	0.0	0.0
243	SWITCHBOARDS	0.0	13.47	0.0	0.0	0.0
244	PROTECTIVE EQUIPMENT	0.0	39.01	0.0	0.0	0.0
245	STRUCTURES AND ENCLOSURE	1135.29	0.0	421.11	0.0	0.0
246	POWER AND CONTROL WIRING	0.0	482.21	0.0	0.0	0.0
25	MISCELLANEOUS EQUIPMENT	457.78	2.61	2.00	0.0	0.0
251	TRANSPORTATION AND LIFTI	0.0	0.47	0.0	0.0	0.0
252	AIR AND WATER SERVICE SY	457.78	1.17	0.0	0.0	0.0
253	COMMUNICATIONS EQUIPMENT	0.0	0.98	0.64	0.0	0.0
254	FURNISHINGS AND FIXTURES	0.0	0.0	1.36	0.0	0.0

[a]THE LAST WORD IN SOME TITLES IS TRUNCATED BECAUSE OF SPACE LIMITATIONS.

Abbildung 9: Aufstellung der anteilig verbauten Menge an Ressourcen in Tonnen pro Kilowattstunde installierter Leistung des Kernkraftwerkes (2)[20]

Eine Studie des Paul Scherrer Instituts[21] untersucht jeweils einen Siedewasserreaktor- (KKL) und Druckwasserreaktor (KKG), die sich in den Schweizer Städten Leibstadt und Gösgen befinden. Beide Kraftwerke gehören der 1.000 MWe-Klasse an. Die verwendeten Materialien führt Abbildung 10 auf.

20 Bryan, R. H.; Dudley, I. T. (1974), Estimated quantities of materials contained in a 1000-MWe PWR power plant. Oak Ridge National Laboratory, https://www.osti.gov/servlets/purl/4284838, S. 38.

21 Dones R. et al. (2007), Life Cycle Inventories of Energy Systems: Result for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, http://ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf.

		KKG [t]	KKL [t]
Steel			
Total components (high alloyed)		21'911	20'440
Structural steel (low alloyed)		5'570	5'570
Reinforcing bars (unalloyed)		33'680	40'030
Copper		1'473	1'473
Titanium			130.6
Aluminium		200	200
Concrete	*[m^3]*	*169'200*	*200'200*
Fibre cement		5'300	5'300
Oil		200	200
Wood	*[m^3]*	*6'720*	*8'000*
Paper		850	4'250

Abbildung 10: Material und Energiebedarf für das Siedewasserreaktor- und Druckwasserreaktorkernkraftwerk[22]

3.2.2. Kohle

In einer Studie untersuchen Spath et al. (1999) ein Kohlekraftwerk mit einer Leistung von 500 MW. Das Kraftwerk verfügt über eine Kohlenstaub-Dampfkesselanlage. Die Autoren beziehen sich auf Daten, die eine andere Studie bereitstellt.[23] Die Mengen an Beton, Stahl, Aluminium und Eisen rechnen Spath et al. in Kilogramm pro MW um (Abbildung 11):

Table 18: Plant Material Requirements (Base Case)

Material	Amount required (kg/MW plant capacity)
Concrete	158,758
Steel	50,721
Aluminum	419
Iron	619

Abbildung 11: Material für Kohlekraftwerke[24]

22 Dones R. et al. (2007), Life Cycle Inventories of Energy Systems: Result for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, http://ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf, S. 77.

23 DynCorp (1995), Assessment of the Environmental Benefits of Renewables Deployment: A Total Fuel Cycle Analysis of the Greenhouse Gas Impacts of Renewable Generation Technologies in Regional Utility Systems, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X96001508.

24 Spath, P. L.; Mann, M. K.; Kerr, D. R. (1999), Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. National Renewable Energy Laboratory, https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25119.pdf, S. 54.

Detaillierter untersuchen Dones et al. (2007) Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke. Dazu bestimmen sie die Ressourcenmengen für den Bau von jeweils zwei Braun- und Steinkohlekraftwerk mit einer Leistung von 100 und 500 MW. Bei den Kraftwerken handelt es sich um deutsche Kraftwerke, die erhobenen Daten stammen aus dem Jahr 1980. Die Studienersteller haben eigenständige Berechnungen der Leistung pro Tonne verbauter Ressource vorgenommen. Hierbei differenzieren sie zwischen Beton, Stahl, Kupfer, Aluminium, Mineralwolle und Plastik:

	100 MW				500 MW			
	Hard coal		Lignite		Hard coal		Lignite	
	ESP & FGD		ESP & FGD		ESP, FGD, & $DeNO_x$		ESP & FGD	
	t/MW	kg/TJ_{in}	t/MW	kg/TJ_{in}	t/MW	kg/TJ_{in}	t/MW	kg/TJ_{in}
Concrete	400	281	500	250	250	176	300	150
Steel total	100	70	130	65	80	56	100	50
Unalloyed steel	90	63	117	59	72	51	90	45
Low alloyed steel	9	6.3	11.7	5.9	7.2	5.1	9	4.5
High alloyed steel	1	0.7	1.3	0.7	0.8	0.6	1	0.5
Copper	1.5	1.1	1.5	0.8	1.3	0.9	1.3	0.7
Aluminium	1	0.7	1	0.5	0.6	0.4	0.6	0.3
Mineral wool	1	0.7	1	0.5	0.75	0.5	0.75	0.4
Plastics	1.5	1.1	1.5	0.8	1	0.7	1	0.5
		MJ/TJ_{in}		MJ/TJ_{in}		MJ/TJ_{in}		MJ/TJ_{in}
Electricity		90		80		70		60
Building machines		400		350		300		250
Oil heating		400		350		300		250

Abbildung 12: Material- und Energiebedarf für den Bau von Steinkohle und Braunkohlekraftwerken[25]

3.2.3. Wind und Photovoltaik

In einer Studie des Joint Research Centers der EU untersuchen Alves Dias et al. (2020)[26] den Materialbedarf für Windkraftwerke und Photovoltaikanlagen. Die Studie unterscheidet hinsichtlich Windkraftwerken zwischen den gängigen Rohstoffen Zement, Aluminium, Glas/Carbon, Stahl und Aluminium und gibt darüber hinaus noch weitere Rohstoffe an. Hinsichtlich der Windkraftwerke wird eine Unterscheidung in Subkategorien von Direktantriebsturbinen und Getriebeantriebsturbinen vorgenommen. Die ermittelten Mengenwerte stammen aus verschiedenen Quellen:

25 Dones R. et al. (2007), Life Cycle Inventories of Energy Systems: Result for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, http://ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf, S. 54.

26 Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., & Carrara, S. (2020), Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system (Europäische Kommission, Gemeinsame Forschungsstelle, Hrsg.), Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859.

Table 2. Material usage estimates in t/GW for different wind turbine types

Material	Range	DD-EESG	DD-PMSG	GB-PMSG	GB-DFIG
Concrete	243 500-413 000	369 000	243 000	413 000	355 000
Steel	107 000-132 000	132 000	119 500	107 000	113 000
Polymers	4 600	4 600	4 600	4 600	4 600
Glass/carbon composites	7 700-8 400	8 100	8 100	8 400	7 700
Aluminium (Al)	500-1 600	700	500	1 600	1 400
Boron (B)	0-6	0	6	1	0
Chromium (Cr)	470-580	525	525	580	470
Copper (Cu)	950-5 000	5 000	3 000	950	1 400
Dysprosium (Dy)	2-17	6	17	6	2
Iron (cast) (Fe)	18 000-20 800	20 100	20 100	20 800	18 000
Manganese (Mn)	780-800	790	790	800	780
Molybdenum (Mo)	99-119	109	109	119	99
Neodymium (Nd)	12-180	28	180	51	12
Nickel (Ni)	240-440	340	240	440	430
Praseodymium (Pr)	0-35	9	35	4	0
Terbium (Tb)	0-7	1	7	1	0
Zinc (Zn)	5 500	5 500	5 500	5 500	5 500

Abbildung 13: Materialbedarf für Windturbinen in t/GW[27]

Hinsichtlich Photovoltaikanlagen wird zwischen Zement, Kupfer, Aluminium, Glas, Plastik und Stahl unterschieden. Die Werte basieren auf einer Schätzung für das Jahr 2018, für welche eine Studie aus dem Jahr 2015[28] als Grundlage diente.

27 Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., & Carrara, S. (2020), Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system (Europäische Kommission, Gemeinsame Forschungsstelle, Hrsg.). Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859, S. 21.

28 Jean, J., Brown, P. R., Jaffe, R. L., Buonassisi, T., & Bulović, V. (2015). Pathways for solar photovoltaics. Energy & Environmental Science, 8(4), 1200–1219, https://doi.org/10.1039/C4EE04073B, https://joel-jean.com/documents/Jean2015_EES.pdf.

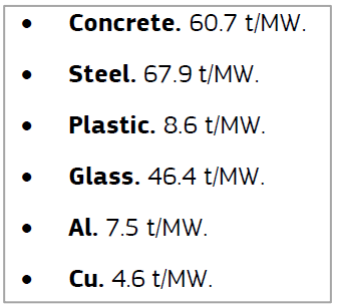

Abbildung 14: Materialbedarf für PV in t/GW[29]

In einer umfangreichen Literaturstudie haben Lyang et al. (2022)[30] Materialverbräuche für den Bau von Windenergie- und Photovoltaikanlagen zusammengetragen. Die Studie untersucht den Materialbedarf in der Vergangenheit und prognostiziert zukünftige Entwicklungen. Hierzu wurden Daten aus 132 Artikeln erhoben, die zwischen 1998 und 2020 veröffentlicht wurden. Insgesamt wurden für die Windenergieerzeugungsanlagen 634 und für Photovoltaikanlagen 602 verschiedene Werte analysiert. Graphisch wurden die verschiedenen Angaben zur besseren Gegenüberstellung in Boxplot-Diagrammen dargestellt.

Die Werte entstanden aus unterschiedlichen Zielsetzungen. Sie variieren hinsichtlich globaler oder lokaler Betrachtungen, statische oder dynamische Analyse, rückwirkende Betrachtung oder zukünftige Prognose und hinsichtlich der Anzahl verschiedener untersuchter Ressourcen.

Die Autoren untersuchen und analysieren die ausgewählten Studien hinsichtlich der aufgeführten Technologien, untersuchten Materialien, Untersuchungsmethode und geographischem und zeitlichem Untersuchungsrahmen. Insgesamt konnten Daten zu 55 metallischen Bestandteilen und zu sechs nicht-metallischen Bestandteilen ausgewertet werden. Seltene Erden wurden besonders häufig untersucht. 60 % der Studien differenzieren hinsichtlich On- und Offshore Windenergieerzeugungsanlagen und 20 % unterscheiden nach Antriebsart der Turbine (Direktantrieb oder Getriebeturbine):

29 Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., & Carrara, S. (2020), Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system (Europäische Kommission, Gemeinsame Forschungsstelle, Hrsg.). Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859, S. 36.

30 Liang, Y., Kleijn, R., Tukker, A., & van der Voet, E. (2022). Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112334, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112334, S. 7.

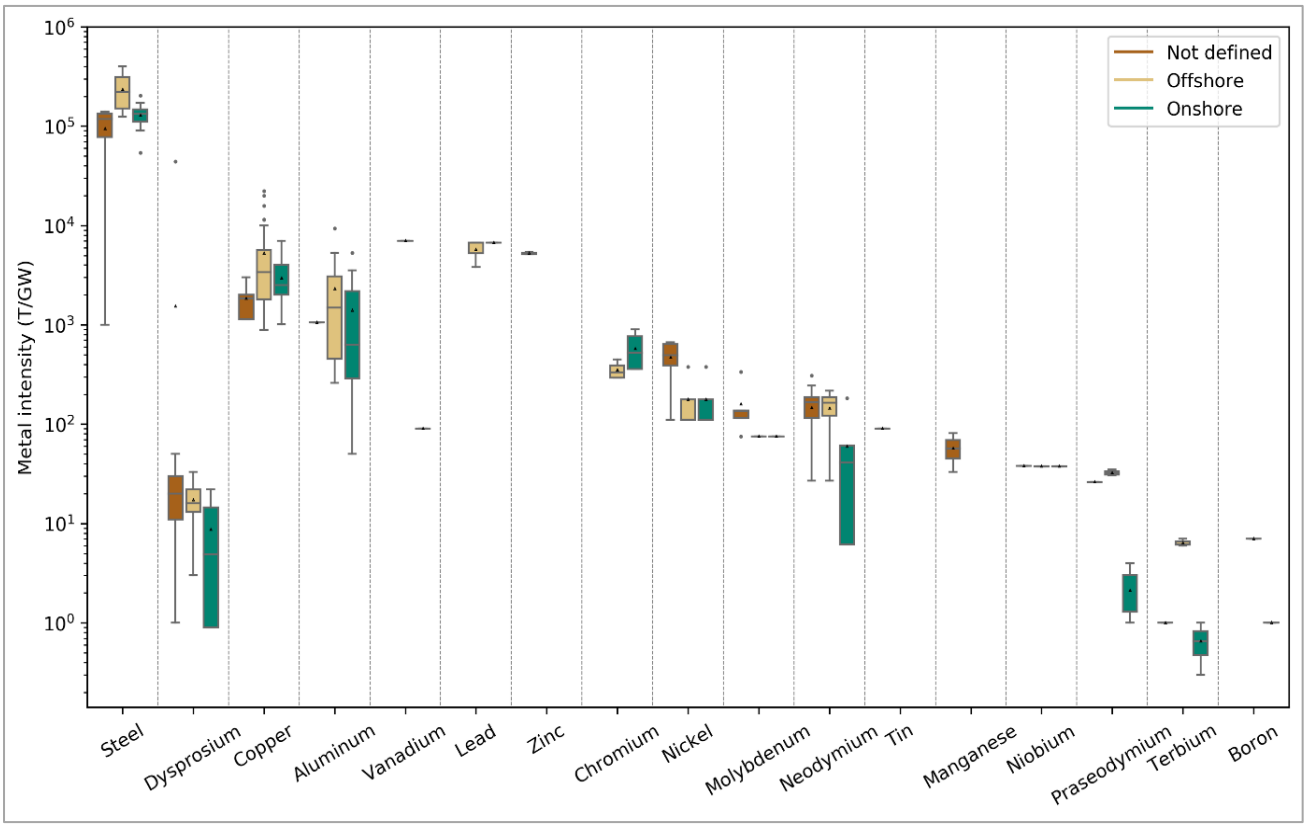

Abbildung 15: Bedarf der Materialmengen bei Windkraftwerken Onshore und Offshore in t/GW[31]

Die Daten zeigen ebenfalls auf, dass die Art des Windturbinengetriebes Einfluss auf die benötigten Metalle und deren Menge hat (siehe Abbildung 16):

31 Liang, Y., Kleijn, R., Tukker, A., & van der Voet, E. (2022), Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112334, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112334, S. 7.

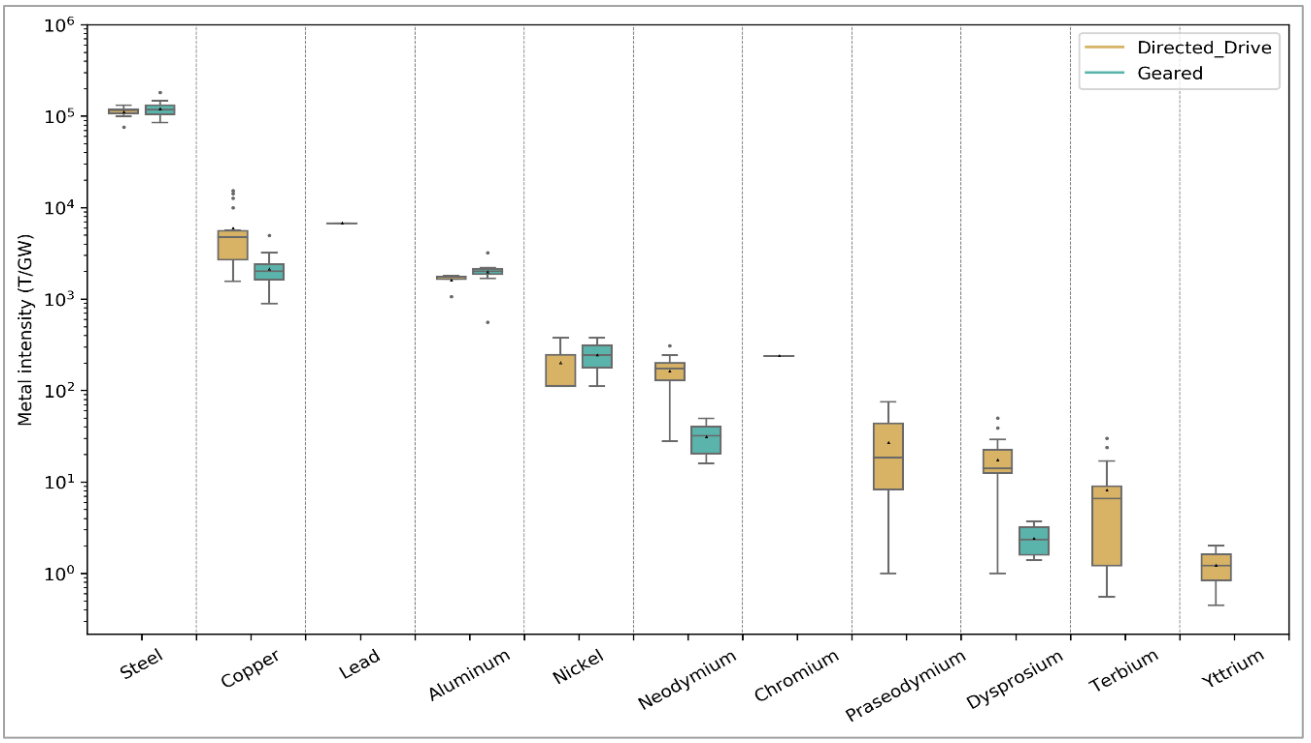

Abbildung 16: Bedarf der Materialmengen bei Windkraftwerken mit Antriebsformen Direct Drive und Geared in t/GW[32]

Hinsichtlich Photovoltaikanlagen konnten ebenfalls verschiedene Unterkategorisierungen getroffen werden, wie bspw. die Unterteilung in kristalline Solarzellen (c-Si) oder Dünnschichtsolarzellen, welche amorphes Silicium (a-Si), Cadmiumtellurid (cdTe) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) beinhalten. Da sich die dritte Generation von Solarzellen (bspw. organische Solarzellen) noch in der Entwicklung befinden und nicht genug Daten ermittelt werden konnten, wurden diese nicht berücksichtigt.

32 Liang, Y., Kleijn, R., Tukker, A., & van der Voet, E. (2022), Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112334,https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112334, S. 7.

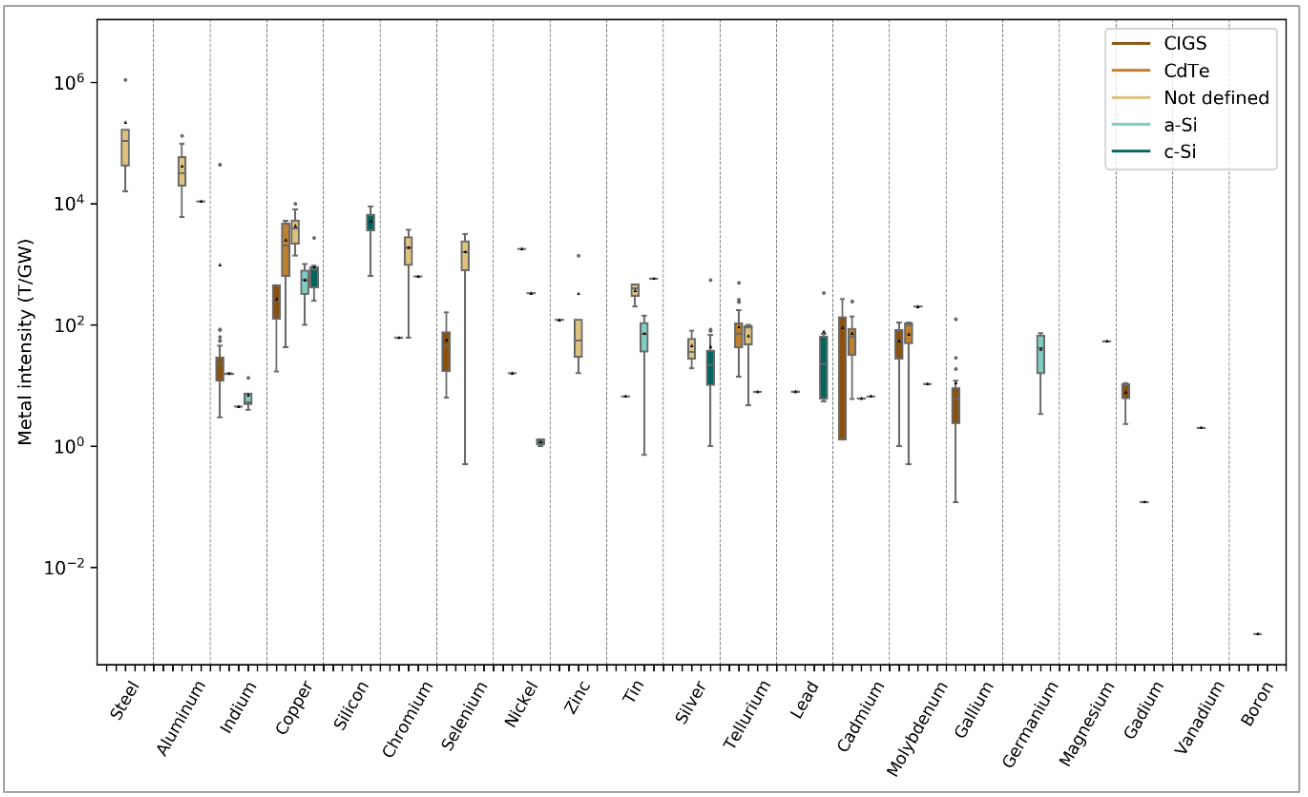

Abbildung 17: Bedarf der Materialmengen bei Photovoltaikanlagen unterschiedlicher Beschichtungen in t/GW[33]

Hinsichtlich der Prognose des Materialbedarfs für den zukünftigen Ausbau fokussiert sich der Großteil der Studien auf Materialien für kritische Komponenten der Anlagen. In Folge dessen wird der Materialbedarf von Beton und Stahl nicht erfasst.

3.2.4. Vergleich mehrerer Technologien

Die internationale Energieagentur (International Energy Agency) (IEA 2021)) veröffentlichte eine Szenariostudie, um den Ressourcenbedarf und die Versorgungslage mit Rohstoffen für die Energietransition abzuschätzen. In der Studie werden die verschiedenen verwendeten Ressourcen für Energieerzeugungsanlagen dargestellt. Es wird zwischen Offshore- und Onshore-Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen, Kernreaktoren, Kohlekraftwerken und Erdgaskraftwerken unterschieden. Bei den untersuchten Rohstoffen handelt es sich ausschließlich um Metalle und seltene Erden. Die aktuellen und perspektivischen Materialintensitäten wurden aus Literaturquellen und Expertengesprächen gewonnen (siehe Abbildung 18).

33 Liang, Y., Kleijn, R., Tukker, A., & van der Voet, E. (2022, Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112334, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112334, S. 8.

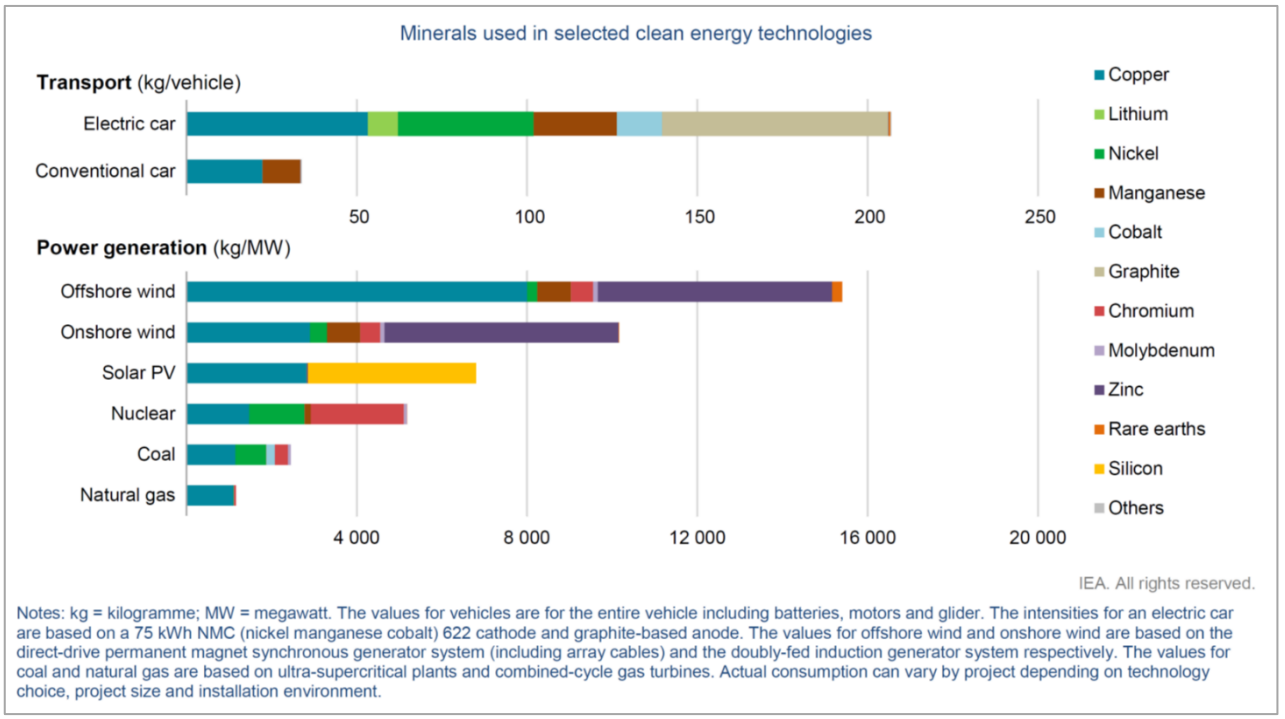

Abbildung 18: Verwendete Mineralien in verschiedenen Energieerzeugungstechnologien[34]

Hinsichtlich des Ressourcenbedarfs für Windenergie- und Photovoltaikanlagen differenzieren die Autoren nach alternativen Antriebs- oder Beschichtungstechnologien. Abhängig vom jeweiligen Typus **verändert sich der Ressourcenbedarf**. Der Ressourcenverbrauch der einzelnen Turbinentypen unterscheidet sich wie in der Darstellung erkennbar signifikant. Gleiches gilt für PV-Alternativen zu den Silizium-basierten Solar-Panels, die die Nachfrage nach einzelnen Materialien verschieben (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).

34 IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions, S. 26.

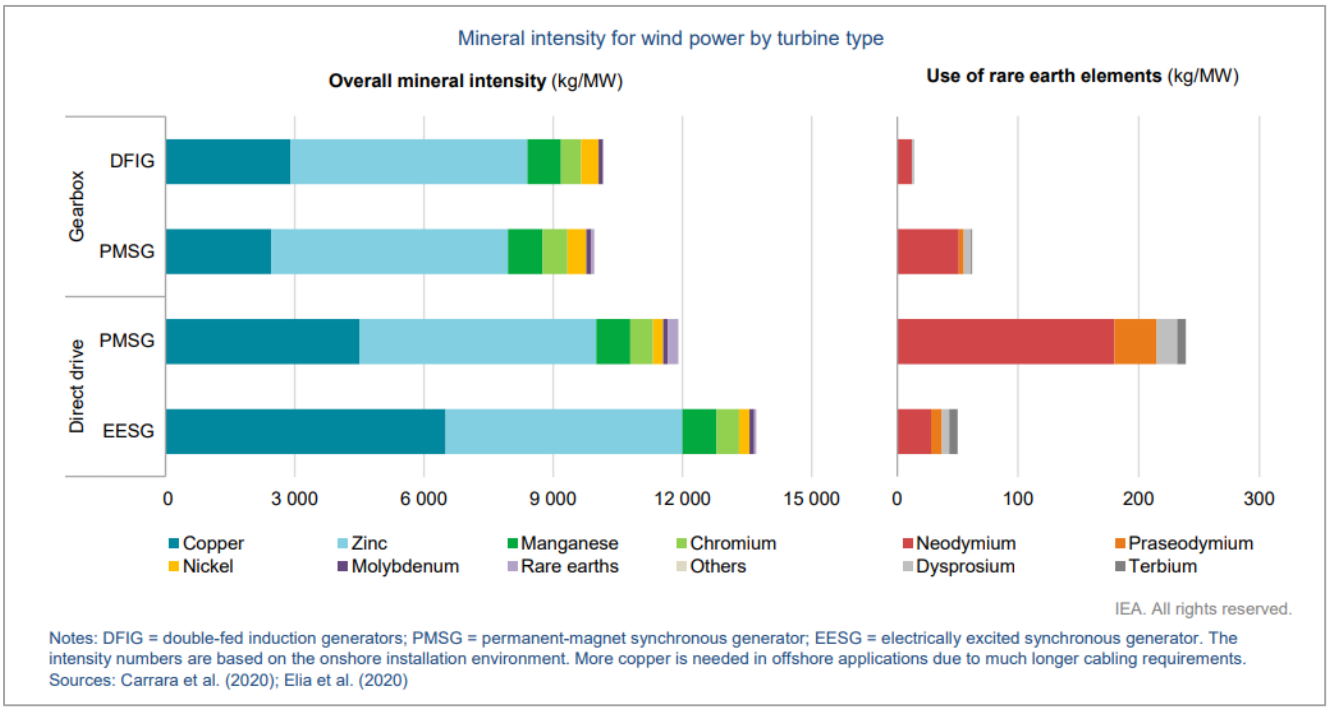

Abbildung 19: Materialbedarf nach Antriebstechnologie bei Windkraftwerken[35]

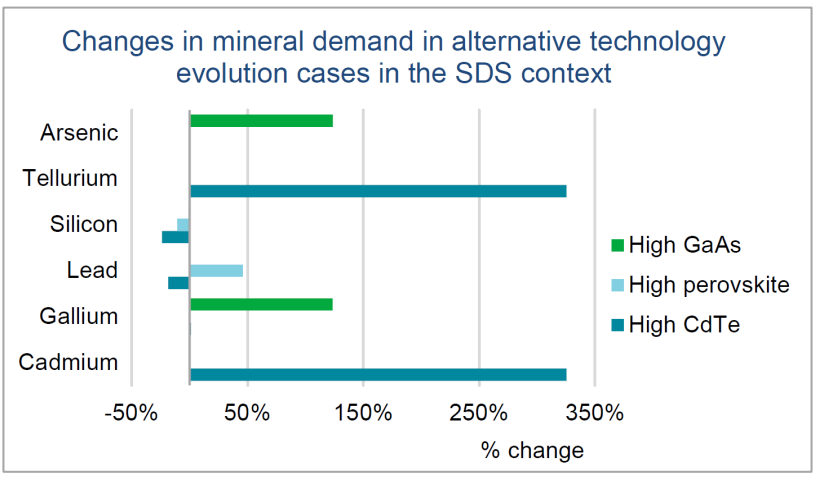

Abbildung 20: Materialbedarf nach Solarpanel-Typen[36]

Vidal et al. (2013) ermitteln den durchschnittlichen Bedarf an Rohstoffen zur Errichtung von verschiedenen Energieerzeugungsanlagen. Dargestellt werden Windkraftanlagen, Photovoltaikanlagen, Sonnenwärmekraftwerke, Wasserspeicherkraftwerke, Kernkraftwerke, Kohlekraftwerke und

35 IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions, S. 65.

36 IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions, S. 62.

Gaskraftwerke. Hinsichtlich der Photovoltaikanlagen differenzieren die Autoren zwischen PV1 und PV2. Auffällig ist, dass die unter PV1 aufgeführten Daten um ein Vielfaches höher sind als die Daten für PV2. Zum Datenursprung wird hinsichtlich PV1 auf die Studie von Pacca et al. (2002) verwiesen. Nur anhand der Veröffentlichung ist nicht nachvollziehbar, wie die große Abweichung zustande kommt. Bei den Kernkraftwerken handelt es sich um Kraftwerke mit Druckwasserreaktoren. Soweit ersichtlich haben die Autoren selbst keine Daten erhoben, sondern die Daten aus verschiedenen Studien zusammengetragen und grafisch dargestellt. Insgesamt wird zwischen den Materialien Stahl, Kupfer, Glas, Aluminium und Beton unterschieden.

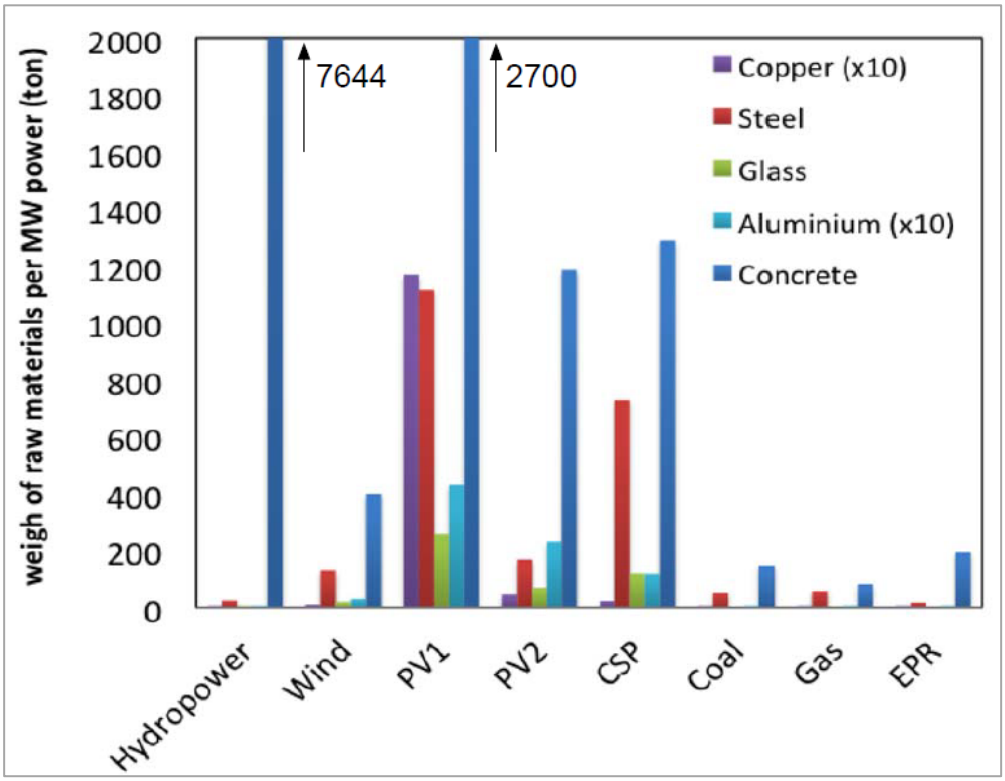

Abbildung 21: Materialbedarf verschiedener Energieerzeugungstechnologien[37]

Vier Jahre später untersuchen Vidal et al. (2017) erneut den Materialbedarf für Photovoltaikanlagen, und für Kern-, Kohle-, Wind-, Wasser-, Gas- und Sonnenkraftwerke. Hinsichtlich Photovoltaikanlagen wird zwischen Dach- und Freiflächenanlagen differenziert, hinsichtlich Windkraft zwischen Onshore- und Offshoreanlagen. Es wird zwischen den vier Ressourcen Beton, Stahl, Aluminium und Kupfer unterschieden. Insgesamt wurden 100 Datenpunkte verwendet. Die Autoren ziehen Vergleiche mit zwei anderen Veröffentlichungen. Es zeigt sich kein einheitliches Bild, wie sich die Materialmengen im Zeitverlauf entwickelt haben (siehe Abbildung 22).

37 Vidal, O.; Goffé, B.; Arndt, N. (2013): Metals for a low-carbon society. Nature Geoscience, 6, 894–896 2013, S. 894.

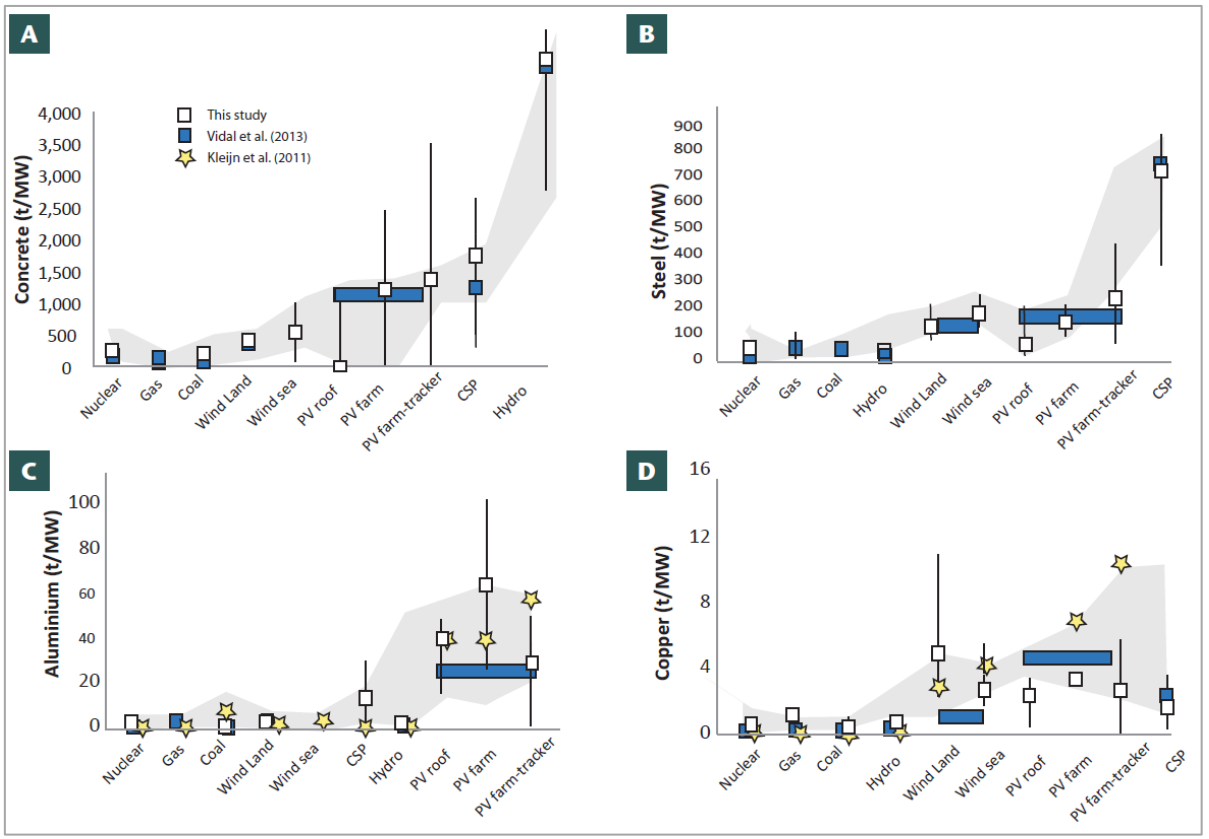

Abbildung 22: Vergleichend Werte für den Materialbedarf unterschiedlicher Stromerzeugungstechnologien[38]; CSP: concentrated solar power; Bei dieser Technik zur Stromerzeugung werden Spiegel verwendet, die das Sonnenlicht konzentriert weitergeben und Dampfturbinen oder Motoren betreiben.

Drei vergleichende Fallstudien eines Wasserkraftwerks, eines **Kohlekraftwerks** und eine **Erdgaskraftwerks** in den USA werden in der Arbeit von Pacca und Horvath (2002)[39] untersucht. Alle Kraftwerke befinden sich in einer Region, so dass regulatorische, klimatische und ökonomische Rahmenbedingen ähnlich sind. Mit einheitlicher Methode werden die Materialienmengen, sowie deren CO2-Ausstoß verglichen. Hierbei werden Beton-, Stahl-, Kupfer- und Aluminiummengen bestimmt. Zusätzlich werden aber auch die Brennstoffmengen über die Betriebsdauer aufgeführt.

38 Vidal, O., Rostom, F., François, C., & Giraud, G. (2017). Global Trends in Metal Consumption and Supply: The Raw Material–Energy Nexus. Elements, *13*(5), 319–324, https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.319, S. 321.

39 Pacca, S. & Horvath, A. (2002). Greenhouse Gas Emissions from Building and Operating Electric Power Plants in the Upper Colorado River Basin. Environmental Science & Technology, 36(14), 3194–3200, https://doi.org/10.1021/es0155884.

TABLE 1. Major Construction Inputs and GWE (after 20 yr) for Glen Canyon Hydroelectric Plant[a]

inputs	total MT	unit cost (1992 $/MT)	total cost (1992 $)	GHG emissions (MT of CO_2 equiv) CO_2	$+ CH_4$	$+ N_2O$	$= GWE$
concrete	9 906 809	30[b]	297 652 257	400 792	751	7 898	409 441
excavation (m^3)	4 711 405	na	114 839 000	3 812			3 812
turbines and turbine generator sets	na	na	65 193 084	41 725	45	249	42 019
power distribution and transformers	na	na	13 754 764	12 358	16	79	12 453
steel	32 183	385[c]	12 402 138	43 710	29	244	47 583
copper	90	2 368[c]	214 167	186	0	2	188
aluminum	67	1 268[c]	84 804	157	0	2	159
total			503 240 216	500 000	1 000	9 000	500 000

[a] Total emissions are rounded to one significant digit. MT, metric ton; GWE, global warming effect; na, not available. [b] Ref *39*. [c] Ref *40*.

Abbildung 23: Materialinput für Glen Canyon Wasserkraftwerk nach 20 Jahren[40]

TABLE 2. Major Construction Inputs and GWE (after 20 yr) for a Photovoltaic Plant[a]

construction inputs	total MT	unit cost (1992 $/MT)	total cost (1992 $)	GHG emissions (MT of CO_2 equiv) CO_2	$+ CH_4$	$+ N_2O$	$= GWE$
steel	4 600 276	385[b]	1 772 797 382	6 957 724	4 216	35 924	6 997 865
copper	480 029	2 368[b]	1 136 805 659	984 580	1 617	10 504	996 701
electricity (MWh)	7 556 010	36[c]	268 780 863	2 152 447	1 077	20 407	2 173 931
aluminum	177 788	1 268[b]	225 374 699	428 610	405	6 558	435 573
cement	2 222 356	55[b]	121 362 849	410 263	394	15 497	426 153
glass	1 066 731	50[b]	53 336 538	56 951	67	759	57 777
total			3 578 457 990	10 000 000	8 000	90 000	10 000 000

[a] Total emissions are rounded to one significant digit. [b] Ref *40*. [c] Ref *41*.

TABLE 3. Major Construction Inputs and GWE (after 20 yr) for a Wind Farm[a]

construction inputs	total MT	unit cost (1992 $/MT)	total cost (1992 $)	GHG emissions (MT of CO_2 equiv) CO_2	$+ CH_4$	$+ N_2O$	$= GWE$
steel	289 987	385[b]	111 751 615	426 296	258	2 201	428 755
electricity (MWh)[c]	1 691 678	36[d]	40 756 138	317 231	158	3 008	320 397
concrete	1 266 172	30[e]	37 927 398	51 225	96	1 009	52 330
aluminum	6 275	1 268[b]	7 954 337	14 703	13	225	14 941
plastics	20 169	220[f]	4 445 273	5 090	7	53	5 150
copper	1 569	2 368[b]	3 715 021	3 127	4	33	3 164
glass	4 930	50[b]	246 511	256	0	3	259
oil	448	106[d]	47 380	204	0	1	205
sand	9 412	4[b]	37 743	55	0	0	55
total			206 881 416	800 000	500	7 000	800 000

[a] Total emissions are rounded to one significant digit. [b] Ref *40*. [c] Derived by assuming that all energy input is electricity, then excluding embedded material energy from Table 6 from ref *36*, assuming 67% construction and 33% decommissioning energy requirements, and scaled up to 4480 turbines. [d] Ref *41*. [e] Ref *39*. [f] Ref *42*.

Abbildung 24: Materialinput für das Kohle- und Gaskraftwerk nach 20 Jahren[41]

40 Ebd.

41 Ebd.

In ihrer Studie vergleichen White und Kulcinski (2000)[42] Kohle-, Kernkraft-, Fusion-[43] und Windkraftanlagen und berechnen die Menge an Ressourcen pro Kilowatt Leistung. Die der Auswertung zugrunde liegenden Daten wurden aus anderen Studien übernommen; so wurde hinsichtlich des Kernkraftwerkes auf Daten aus der vorher aufgeführten Studie von Bryan & Dudley (1974) zurückgegriffen (Kap. 3.2.1). Differenziert wird zwischen einer Vielzahl an Rohstoffen, darunter Kupfer, Stahl, Aluminium und Beton. Der Vergleich zeigt, dass Kernkraftwerke große Mengen an Materialen benötigen, die andere Kraftwerke nicht benötigen und daher in die Vergleiche kaum einbezogen werden.

Table 4: Summary of Power Plant Materials (Tonnes/GW_e-installed)

	Coal[11]	Fission[12]	Fusion[13]	Wind[14]
Aluminum	255	18	323	0
B_4C	0	0	1,374	0
Chromium	122	0	0	0
Concrete	74,257	179,681	505,799	305,891
Copper	454	729	6,951	211
Fiberglass	0	0	0	19,863
Helium	0	0	94	0
Insulation Materials	0	922	0	0
Lead	0	46	13,898	0
Lithium	0	0	1,153	0
Manganese	112	434	0	0
Mercury	0	0	2	0
Molybdenum	42	0	0	0
Nickel	10	125	708	0
NbTi	0	0	144	0
Silver	0	0.5	0	0
Sodium Metal	0	0	12,085	0
Steel – Carbon / Low Alloy	39,681	33,988	50,835	75,516
Steel - Stainless	612	2,080	56,883	9,049
Vanadium	4	0	0	0
Yttrium	0	0	3	0
Zirconium	0	0	68	0
Total	**115,550**	**217,590**	**650,319**	**410,529**

Abbildung 25: Materialbedarf verschiedener Kraftwerke in t/GW[44]

42 White, S. W., & Kulcinski, G. L. (2000), Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO2 gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants. Fusion Engineering and Design, 48(3), 473-481, https://doi.org/10.1016/S0920-3796(00)00158-7.

43 Da es bisher keine Fusionskraftwerke gibt, nehmen die Autoren einen Forschungsfusionsreaktor als Grundlage.

44 White, S. W., & Kulcinski, G. L. (2000), a.a.O., S. 478.

3.3. Materialeinsatz und Stromerzeugung

Eine Studie der UNEP[45] analysiert den Ressourceneinsatz pro Menge der Stromerzeugung, die während der Gesamtbetriebslaufzeit eines Kraftwerks gewonnen wurde. Diese Ausarbeitung ist sehr detailliert und umfasst neben den gängigen Energieerzeugungstechnologien zudem eine große Anzahl an untersuchten Ressourcen.

Hierfür wird eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt, die nicht nur die Auswirkungen der Technologie während ihres Betriebes untersucht, sondern ebenfalls die Produktion, Konstruktion, Instandhaltung und Entsorgung der Anlagen berücksichtigt.[46] Dementsprechend unterscheiden sich die ermittelten Daten zu anderen untersuchten Studien, die lediglich die Kapazität der Anlage mit den zur Errichtung aufzuwendenden Ressourcen abgleichen. Aufgrund des unterschiedlichen Formates der Daten ist eine Vergleichbarkeit dieser Studie zu anderen aufgeführten Studien nicht möglich. Jedoch können die einzelnen Energieerzeugungsanlagen, die in der Studie behandelt werden, untereinander verglichen werden. Untersucht werden Energieerzeugungsanlagen vom Typ Photovoltaikanlage, Solar-, Kohle-, Erdgas-, Wasser- und Windkraftwerk. Hinsichtlich der einzelnen Energieerzeugungsanlagen wird weiterhin zwischen verschiedenen Typen unterschieden. Differenziert wird zwischen den Ressourcen Aluminium, Zement, Kupfer und Eisen. Weiterhin werden die Werte für drei verschiedene Zeitpunkte dargestellt, 2010, 2030 und 2050, wobei es sich für letztere beide um Prognosen handelt, um dem technologischen Fortschritt Rechnung zu tragen (siehe Abbildung 26 bis Abbildung 29):

45 UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production. Report of the International Resource Panel. E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), https://www.resourcepanel.org/file/431/download?token=bWmEw0hl.

46 Ebd, S. 18.

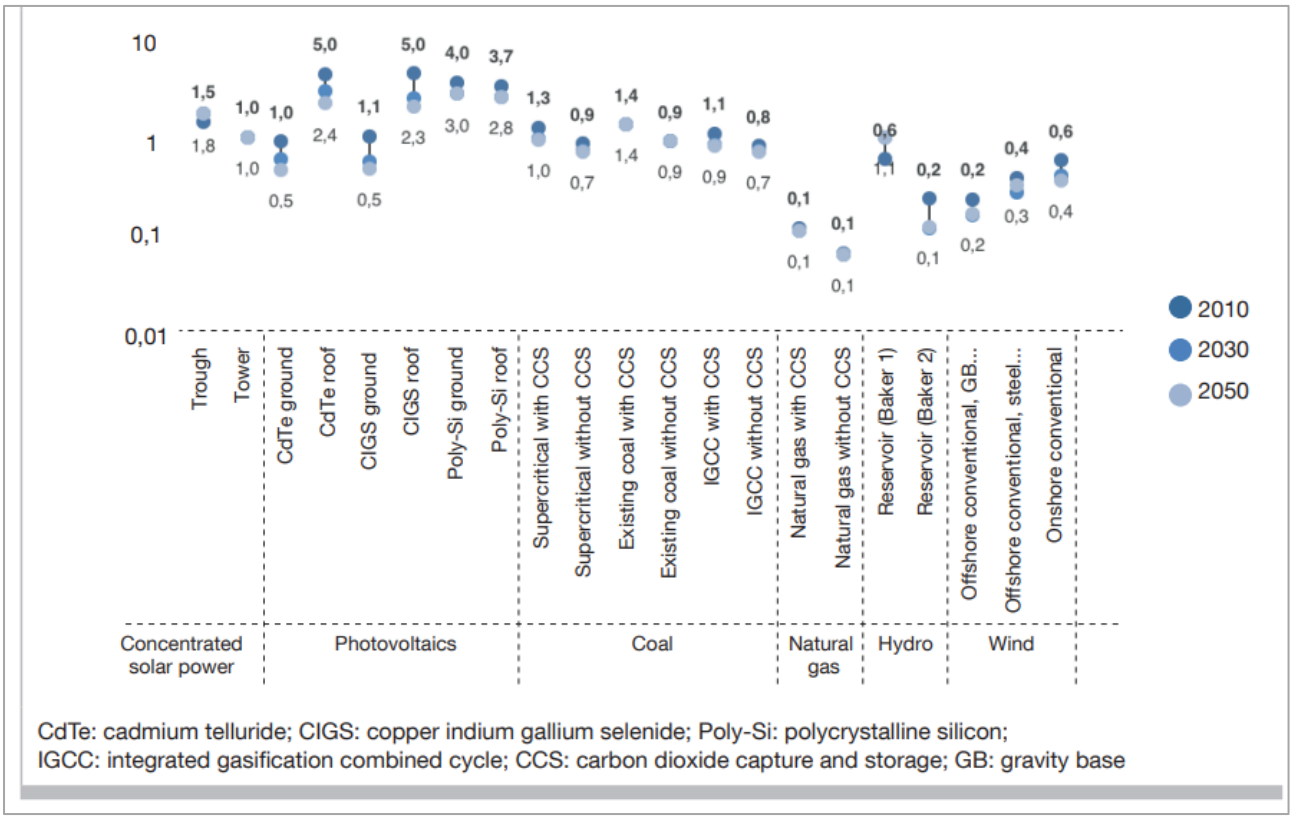

Abbildung 26: Vergleich des Aluminiumbedarfs verschiedener Erzeugungstechnologien pro 1 kWh in Europa[47]

47 Ebd, S. 431.

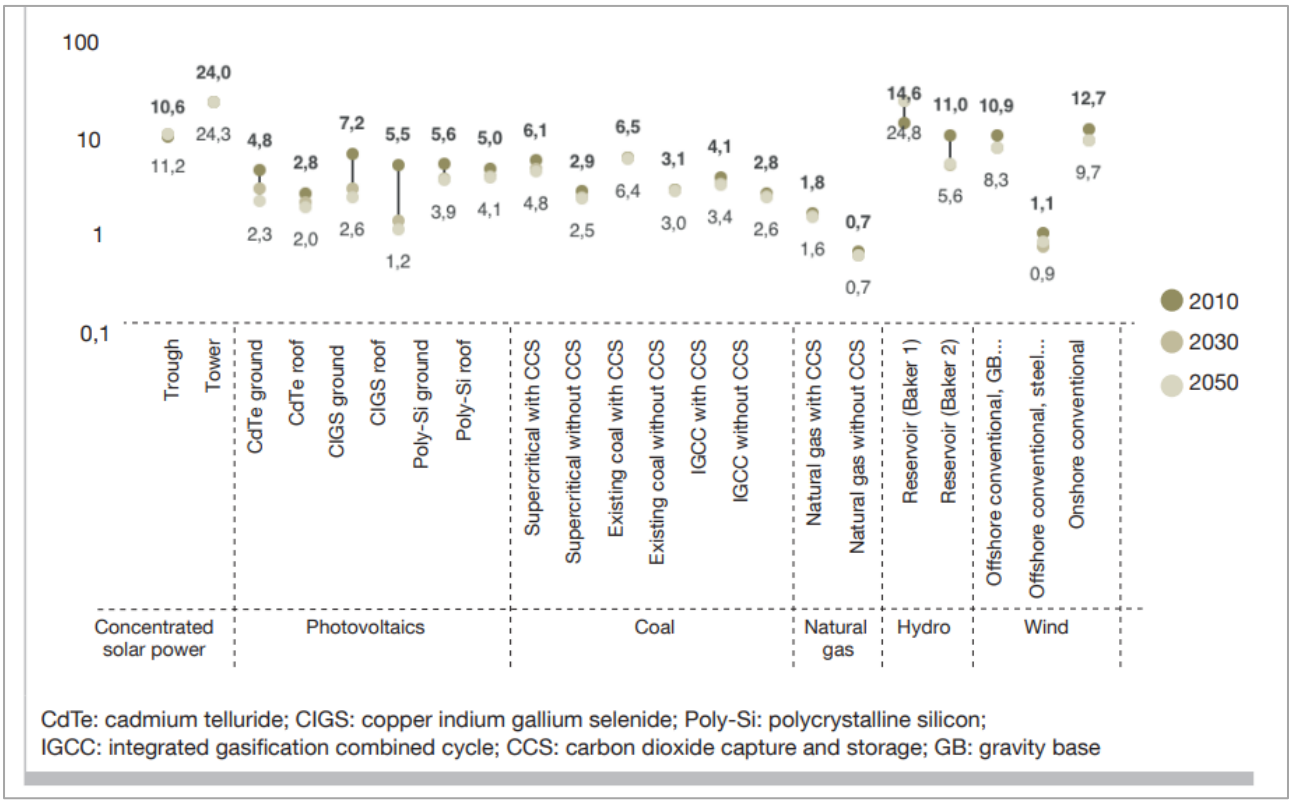

Abbildung 27: Vergleich des Zementbedarfs verschiedener Erzeugungstechnologien pro 1 kWh in Europa[48]

48 Ebd.

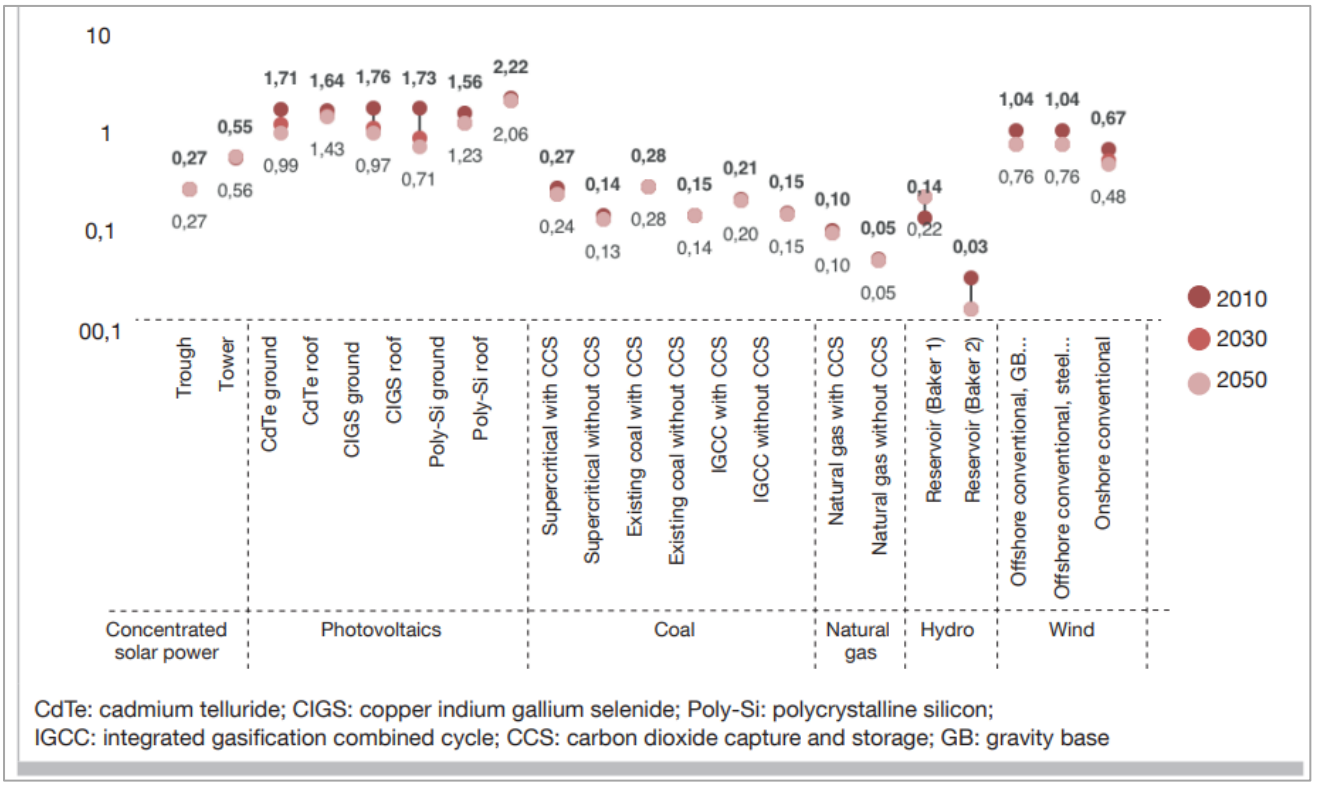

Abbildung 28: Vergleich des Kupferbedarfs verschiedener Erzeugungstechnologien pro 1 kWh in Europa[49]

49 Ebd., S. 432.

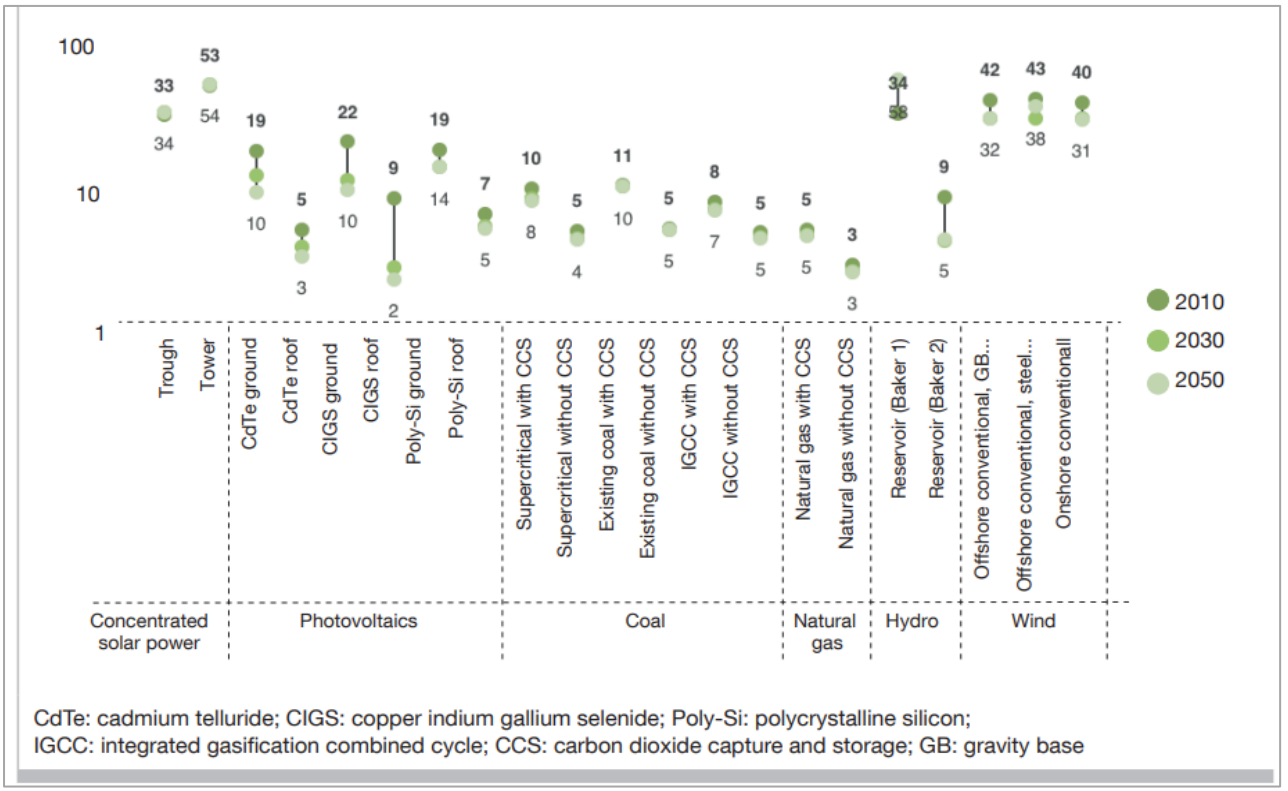

Abbildung 29: Vergleich des Eisenbedarfs verschiedener Erzeugungstechnologien pro 1 kWh in Europa[50]

Das US Department of Energy veröffentlichte in einem Anhang eines Technology Assessments unter anderem den Materialverbrauch verschiedener Erzeugungstechnologien über den Lebenszyklus eines Kraftwerks (siehe Abbildung 30). Die Herkunft der Daten wird in dem Simulationswerkzeug GREET 2 2014 der Argonne National Laboratory angegeben.

50 Ebd.

Materials (ton/TWh)	Generator only				Upstream energy collection plus generator			
	Coal	NGCC	Nuclear PWR	Biomass	Hydro	Wind	Solar PV (silicon)	Geothermal HT binary
Aluminum	3	1	0	6	0	35	680	100
Cement	0	0	0	0	0	0	3,700	750
Concrete	870	400	760	760	14,000	8,000	350	1,100
Copper	1	0	3	0	1	23	850	2
Glass	0	0	0	0	0	92	2,700	0
Iron	1	1	5	4	0	120	0	9
Lead	0	0	2	0	0	0	0	0
Plastic	0	0	0	0	0	190	210	0
Silicon	0	0	0	0	0	0	57	0
Steel	310	170	160	310	67	1,800	7,900	3,300

Key: **NGCC** = natural gas combined cycle; **PWR** = pressurized water reactor; **PV** = photovoltaic; **HT** = high temperature

Abbildung 30: Materialbedarf verschiedener Energietechnologien[51]

4. Zusammenfassende Analyse

Die Ergebnisse zu den Studien, die den Materialeinsatz ins Verhältnis zur Erzeugungsleistung setzen, sind in der folgenden Tabelle nach den Energieerzeugungsanlagen sortiert.

Berücksichtigung fanden alle Studien, die hinsichtlich der behandelten Rohstoffe oder aber der verwendeten Methodik für den Vergleich geeignet waren. Die Studie der IEA (2021) konnte nicht verwendet werden, da sie ausschließlich Metalle und seltene Erden behandelt.

Einige Daten mussten geschätzt werden, da sie nur graphisch aber nicht nummerisch im Diagramm aufgeführt waren.

Einige Studien (Anigstein et al, 2004; Pacca et al, 2002) stellen keine eigenständigen Berechnungen hinsichtlich der anteilig verbauten Menge an Ressourcen in Tonnen pro Kilowattstunde installierter Leistung des Kernkraftwerkes auf, sondern gaben lediglich die Gesamtmenge der verbauten Rohstoffe der jeweiligen Anlage und die Gesamtleistung der Anlage wieder. Aus diesen Informationen ließen sich die entsprechenden Verhältnisse errechnen.

51 US Department of Energy (2015), Quadrennial Technology Review – An assessment of energy technologies and research opportunities, Chapter 10: Concepts in integrated analysis, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter10.pdf, S. 13.

Zum Teil haben Studien andere Einheiten verwendet (t/GW in Alves et al. 2020; Lyang et al. 2022; White und Kulcinski (2000) und kg/MW in IEA, 2021, Spath et al., 1999). Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Werte von Alves et al. (2020), Lyang et al. (2022), White und Kulcinski (2000) und Spath et al. (1999) für die nachfolgende Tabelle in t/MW umgerechnet.

Die Verbräche sind nach den Materialien sortiert, die in allen Studien angegeben wurden. Wie eingangs bereits erläutert wurde, werden in den unterschiedlichen Studien wesentlich mehr Materialien aufgeführt, je nach untersuchten Erzeugertyp. In der Übersichtstabelle sind die fünf wesentlichsten Materialen dargestellt, was jedoch nur einen kleinen Ausschnitt darstellt.

Unter diesen Vorbehalten ist die Tabelle als Zusammenfassung und Orientierung zu verstehen.

Energieerzeugungsanlage	Kupfer (t/MW)	Stahl (t/MW)	Glas (t/MW)	Aluminium (t/MW)	Beton (t/MW)	Quelle
Wind	1,15	130	5	3	400	** Vidal et al, 2013
Wind - Direktantrieb	8,9	115,32		1,3		** Lyang et al, 2022
Wind - Direktantrieb	5,5					***, **** IEA, 2021
Wind - Getriebeturbine	2,1	118,99		1,8		** Lyang et al, 2022
Wind - Getriebeturbine	2,59					***, **** IEA, 2021
Wind - Offshore	8,2	257,7		3		** Lyang et al, 2022
Wind - Offshore	8					*** IEA, 2021
Wind - Offshore	2,59	188			550	*** Vidal et al, 2017
Wind - Onshore	3,5	134,6		1,6		** Lyang et al, 2022
Wind - Onshore	2,9					*** IEA, 2021
Wind - Onshore	4,94	128		3,5	450	*** Vidal et al, 2017
Solar (1)	120	1117	259	43	2700	** Vidal et al, 2013
Solar (2)	4,5	170	69	35	1100	** Vidal et al, 2013
Solar	4,5	78		45,1		** Lyang et al, 2022
Solar	2,9					*** IEA, 2021
Solar	2,74	151		45,2	866	***, ***** Vidal et al, 2017
Sonnenwärmekraftwerk	2,35	730	120	12	1300	** Vidal et al, 2013
Sonnenwärmekraftwerk	1,65	720		13,9	1750	*** Vidal et al, 2017
Wasser	0,07	25	0,01	0,05	7644	* Pacca & Horvath , 2002
Wasser	0,52	42		3,1	4700	*** Vidal et al, 2017
Erdgas		51,1		0,23	71,3	- Pacca & Horvath, 2002
Erdgas	1,36					*** IEA, 2021
Erdgas	1,31					*** Vidal et al, 2017
Kohle	0,09	52,5		0,5	150	** Vidal et al, 2013
Kohle		62,2		0,62	178	- Pacca et al, 2002
Kohle		50,7		0,42	159	** Spath et al, 1999
Kohle	0,45	40,3		0,26	74,3	** White & Kulcinski, 2000
Kohle	1,14					*** IEA, 2021
Kohle	0,47			1,7	200	*** Vidal et al, 2017
Steinkohle - Gesamtanlagenleistung 100 MW	1,5	100		1	400	** Dones et al, 2007
Braunkohle - Gesamtanlagenleistung 100 MW	1,5	130		1	400	** Dones et al, 2007
Steinkohle - Gesamtanlagenleistung 500 MW	1,3	80		0,6	250	** Dones et al, 2007
Braunkohle - Gesamtanlagenleistung 500 MW	1,3	100		0,6	250	** Dones et al, 2007
Kernkraft	0,6	29,5		0,06	307	* Anigstein et al, 2000
Kernkraft	0,69	42,6		0,02	180	* Bryan & Dudley, 1974
Kernkraft	1,6					*** IEA, 2021
Kernkraft	0,51	60		3,5	250	*** Vidal et al, 2017
Kernkraft - Druckwasserreaktor	0,56	18	0,01	0,56	194	** Vidal et al, 2013
Kernkraft - Druckwasserreaktor	1,52	63,05		0,21	418,64	** Dones et al, 2007
Kernkraft - Siedewasserreaktor	1,26	56,69		0,17	412,43	** Dones et al, 2007

Erläuterungen:

- Hinsichtlich Solar (1) und Solar (2) verwendete der Studienautor zwei verschiedene Quellen und entschied sich, diese gesondert zu betrachten.
- * Primärquellen – selbst erhobene Daten
- ** Sekundärquellen – Daten aus anderen Studien
- *** Die Daten wurden anhand der graphischen Darstellung in den Diagrammen vom Wissenschaftlichen Dienst geschätzt, da die nummerischen Werte in den Studien nicht ersichtlich waren.
- **** Bei den Daten handelt es sich um einen berechneten Mittelwert. Hinsichtlich Direktantriebsturbinen ergibt sich dieser aus den Untergruppen PMSG und EESG und hinsichtlich Getriebeturbinen aus den Untergruppen DFIG und PMSG.

- ***** Bei den Daten handelt es sich um einen berechneten Mittelwert. Dieser ergibt sich aus den Werten PV-Dachanlagen, PV-Freiflächenanlagen und PV-Freiflächen Solartracker.
- - Keine Angabe des Datenursprungs in der Studie

Die Werte zeigen, dass sich die Materialmengen in den Studien bezogen auf die gleiche Energieerzeugungstechnologie teilweise extrem voneinander unterscheiden können. Größter Ausreißer sind die Werte von Vidal et al. 2013 für die Solartechnik (1), die sich teilweise um das 70-fache vom niedrigsten Wert in der Kategorie unterscheiden.

Methodisch ist der direkte Vergleich der Werte untereinander wenig sinnvoll. Zu sehr weichen die verschiedenen Studien aufgrund der Erstellungszeitpunkte und Messmethoden voneinander ab. Zumal einige Studien bereits Metastudien sind, die wiederum zahlreiche Quellen ausgewertet haben, und ein Vergleich mit einer Einzelfallstudie die Ergebnisse verzerren würde.

Tendenziell zeigt sich jedoch ein höherer Materialbedarf in den aufgeführten Materialgruppen bei der Erzeugungsleistung von Wind- und Solaranlagen. Diese Tendenz wurde in diversen Studien hervorgehoben:

> „Renewable technologies, however, lead to a number of other concerns, principally their direct ecological impacts associated with land and water use, and their increased consumption of iron, cement and copper. Similar ecological impacts related to land and water use are also associated with fossil fuels: for example, land use by coal mining is similar in scale to that of wind and solar power. […] The modest increase in iron and cement use associated with low-carbon technologies does not pose a serious problem given the availability of those resources and the relatively small share of total demand related to electricity systems. The use of copper and functionally important metals, however, may pose some concerns in the long term, depending on opportunities for substitution which are not yet fully understood."[52]

Jedoch muss der Ressourcenverbrauch als Trade-off zur Verringerung des CO2-Ausstoßes und zum Eingriff in Ökosysteme in Kontext gesetzt werden (siehe hierzu im Detail Kap.5).

Die Studien, die die **Stromerzeugung** vergleichen (Kap. 3.3), konnten nicht hinzugezogen werden, da sie den gesamten Lebenszyklus, und nicht nur die installierte Energieerzeugungskapazität, betrachten. Diese beiden im Kapitel 3.3. vorgestellten Studien der UNEP (2020) und des US Department of Energy (2015) kommen zu **sehr unterschiedlichen Ergebnissen**. Beide Ergebnisse lassen sich jedoch schwer vergleichen, da in der UNEP-Studie die relevanten Technologien wesentlich feiner – im Gegensatz zu den Zahlen des US Department of Energy – untergliedert werden. Weiterhin unterscheiden sich die meisten Werte erheblich. Gründe dafür könnten der jeweilige Stand der Technik oder die regionalen Rahmenbedingungen sein (weltweite vs. US-spezifische Durchschnittswerte). Große Unterschiede können auch die Herkunft der Daten sein, da die

52 UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production – Summary for Policymakers. Report of the In-ternational Resource Panel. E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), https://www.resourcepanel.org/file/240/download?token=BsSOMkGA, S. 36.

Daten des US Department of Energy auf einer Simulationssoftware basieren, deren Annahmen und Basisdaten nicht einsehbar sind.

5. Fazit

Der Ressourcen- bzw. Materialeinsatz ist eine Kennzahl im Energiesektor, um den Materialbedarf zum Bau von Energieerzeugungstechnologien ins Verhältnis zur installierten Erzeugungsleistung oder zur Stromerzeugungsmenge über den Gesamtlebenszyklus zu vergleichen.

5.1. Einschätzung zu den Ergebnissen des Materialbedarfs

Der Vergleich mit konventionellen Energietechnologien **an sich** betrachtet zeigt, dass der **Materialeinsatz bei Solar- und Windkraftwerken bei den betrachteten Materialgruppen höher** ist. Über alle Erzeugergruppen hinweg **weichen** die Menge in Tonnen pro Megawatt-Kapazität jedoch teilweise **stark voneinander ab**. Besonders deutlich wird dies bei Liang, et al. (2022) (Kap. 3.2.3), die die Quartile, also die prozentuale Verteilung der Materialverbrauchswerte, bei erneuerbaren Energien in Boxplot-Diagrammen angeben. Die Recherche zeigt jedoch auch die Ursachen, die diese wesentlichen Abweichungen in den Ergebnissen erklären:

- Die Ressourcenmenge für Brennstoffe (Gas, Kohle, Öl, Uran) ist nicht in den Ressourcenberechnungen enthalten. Lediglich die Errichtung des Kraftwerks wird betrachtet. Eine Ausnahme stellen Lebenszyklusbetrachtungen dar, die die Brennstoffmenge mitberücksichtigen:

  > "For conventional coal power, the amount of coal required to fuel a power plant is approximately 250 g/kWh, so the total mass flow associated with a coal fired power plant is much larger than that of a renewable power plant."[53]

- Die Rahmenbedingungen – in welchem Land, unter welchen topographischen Bedingungen, zu welchen Kosten und welche Technologiegeneration bis hin zu welchen untersuchten Materialien – entscheiden über die Höhe. Die Höhe kann daher deutlich variieren.

- Materialmengen großer Kraftwerke (z.B. Wasserkraftwerke, Atomkraftwerke) sind enorm und oftmals von lokalen Gegebenheiten (topografische, rechtliche, ökonomische) abhängig und damit schwer generalisierbar.

- Der Vergleich zeigt, dass Kernkraftwerke weitere große Mengen an Materialen benötigen, die andere Kraftwerke nicht benötigen und daher in die Vergleiche kaum einbezogen werden.

---

53 UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production – Summary for Policymakers. Report of the International Resource Panel. E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), https://www.resourcepanel.org/file/240/download?token=BsSOMkGA, S. 28 f.

– Der technische Fortschritt bei erneuerbaren Energien in den vergangenen Jahren schlug sich deutlich in höheren Energieeffizienzen (und damit Kostenreduktionen) der Anlagen wider (siehe beispielhaft die Energieeffizienzsteigerung von PV-Zellen in Abbildung 31).

– Die Datenlage für erneuerbare Energien ist umfangreicher; erneuerbare Energien sind besser erforscht. Große Bandbreiten an Daten für den Kraftwerksbau von Kohle-, Gas- und Kernkraftwerken sind in einer sehr viel geringen Anzahl vorhanden.

– Inkonsistenten in den Daten entstehen häufig durch neue Unterkategorisierungen verschiedener Erzeugungstechnologien (z.B. wird nicht zwischen Braun- und Steinkohle unterschieden, oder verschiedenste PV-Beschichtungstechnologien werden gesondert untersucht).

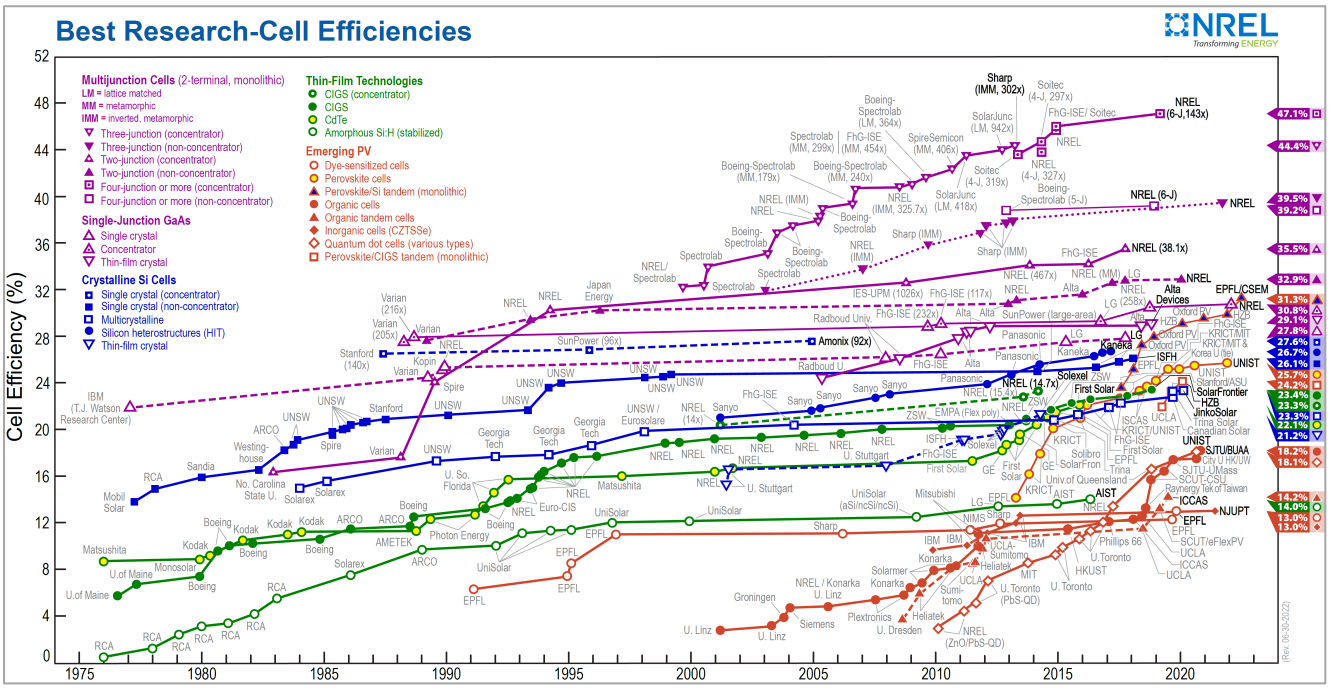

Abbildung 31: Efficiencies for research cells for a range of photovoltaic technologies, plotted from 1976 to the present[54]

5.2. Einschätzung der wissenschaftlichen Methodiken

Weiterhin zeigt sich, dass der **Vergleich verschiedener Studien**, die den Materialverbrauch (mit)untersuchen, **an sich problematisch** ist. Die durchgeführte Literaturrecherche bringt dazu folgende Erkenntnisse:

– Ziel vieler Studien ist es, entweder den Ressourcenaufwand zwischen den Energieerzeugungstechnologien zu vergleichen, oder aber die Abschätzung zu treffen, welche Materialmengen für bestimmte zeitliche Horizonte bei Transformationspfaden des Energiesektors

54 https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies-rev220630.pdf.

benötigt werden (z.B. Materialaufwand für die Erzeugung bestimmter Strommengen im Jahr 2040 durch erneuerbare Energien).

- Studien, die mehrere Energieerzeugungstechnologien betrachten, basieren tendenziell auf Sekundärdaten, die aus anderen Studien stammen. Das macht den direkten Vergleich zwischen den Technologien schwierig, da sich die Datenerhebungsmethoden (Umfang und Zeiträume der Ressourcenmengen) unterscheiden.
- Studien mit Primärdaten basieren oftmals auf einer eher geringeren Fallzahl.
- Die Daten über den Materialverbrauch von Kraftwerken sind oftmals nicht-öffentliche Daten, die Einschränkungen unterliegen, und werden teilweise hochgerechnet. Einige Studien machen keine Angaben über den Datenursprung.
- Daten zur PV- und Windenergieerzeugung sind oftmals in größerer Zahl vorhanden, allerdings unterliegen die Materialverbräuche stetigen technologischen Weiterentwicklungen und Kostenreduktionen. Der Zeitpunkt der Datenerhebung wird damit für den Vergleich kritisch.

5.3. Einschätzung zur Aussagekraft der Kennzahl „Materialeinsatz pro Energieeinheit“

Die Kennzahl ist in ihrer Einfachheit bestechend und sehr illustrativ. Wie bei der Betrachtung einer einzelnen Kennzahl verleitet der Vergleich innerhalb nur einer Dimension dazu, **andere Material-, Wirkungs- und Leistungsdimensionen zu vernachlässigen**:

- Die Studien betrachten unterschiedliche Materialien und Technologien. Die am weitesten verbreiteten Materialien sind Beton (teilweise wird auch Zement als Grundstoff für Beton neben Wasser, Sand und Kies betrachtet), Aluminium, Kupfer, Stahl und Glas; teilweise noch viele weitere Materialien. Wiederholt stehen seltene Erden und andere seltene Metalle im Mittelpunkt. Der Detailgrad, wie weit auf Materialebene die Energieerzeugertechnologien verglichen werden, erschwert die studienübergreifenden Aussagen.
- Die Auflistung benötigter Materialien bedeutet zwangsweise nicht, dass diese knapp sind. Ebenso sagt die pure Quantität benötigter Materialien wenig über deren kritische Verfügbarkeit aus. Mit anderen Worten ist eine große benötigte Menge an Zement weniger kritisch, als eine viel kleinere Menge an seltenen Erden oder Metallen, die im Verhältnis dazu zum Bau benötigt werden.
- Die Mengen an seltenen Erden und Materialien, die nicht im ausreichenden Vorkommen zu finden sind, würden aber in einer Abschätzung des strategischen Ressourcenbedarfs eine wesentliche Rolle spielen.
- Weiterhin sagt der Ressourcenverbrauch nichts über die Möglichkeiten aus, zu welchem Grad die Materialien recycelt und wiederverwendet werden können:

> "Moreover, the degree of material recycling varies widely from technology to technology and material to material, and design, as well as consumer behavior and social attitudes can have a big impact on how easily recyclable certain materials will be."[55]

- Auch der Substitution von wesentlichen Materialien zugunsten kleinerer Mengen mit geringerer Umweltauswirkung wird kaum Rechnung getragen.
- Im größeren Maßstab ist der Ressourcenverbrauch allein im Kontext anderer Einflussdimensionen auf die Umwelt zu betrachten. Die Errichtung von Kraftwerken ist eine Abwägung zwischen der Versorgungssicherheit und Umwelteinflüssen (Einfluss auf Mensch und Ökosysteme, Baumaterialverbräuche und Brennstoffbeschaffung), die – egal bei welcher Technologie – immer stattfindet.
- Betrachtet man die anderen Umweltauswirkungen von erneuerbaren Energien, wird deutlich, dass dies in ihren Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch, Tier und Natur auch Nachteile haben (siehe Abbildung 32).

55 US Department of Energy (2015), Quadrennial Technology Review – An assessment of energy technologies and research opportunities, Chapter 10: Concepts in integrated analysis, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter10.pdf, S. 13

Figure 8: Overview over the life cycle impacts , land occupation, and material requirements of different technology groups in the year 2010.

Abbildung 32: Übersicht der Auswirkungen auf Klima, Gesundheit und Umwelt und den Land- und Ressourcenbedarf unterschiedlicher Energieerzeugungstechnologien[56]

* * *

56 UNEP (2016) Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production – Summary for Policymakers. Report of the International Resource Panel. E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), https://www.resourcepanel.org/file/240/download?token=BsSOMkGA, S. 40