

Metalle für die Energiewende

Warum wir die Rohstoffwende und die Energiewende zusammendenken sollten



**Metalle für die Energiewende – Warum
wir die Rohstoffwende und die
Energiewende zusammendenken sollten**

Inhalt

Erneuerbare Energie und metallische Rohstoffe – Ein undifferenzierter Diskurs?	6
Abbildung 1 – Prognose des Verbrauchsanstiegs für erneuerbare Energietechnologien und Elektromobilität von 2020 bis 2050 (in Prozent)	7
Abbildung 2 – Länderkarte mit den wichtigsten Produzenten ausgewählter Rohstoffe	8
Tatsächliche Materialbedarfe der erneuerbaren Energietechnologien	9
Abbildung 3 – Materialbedarf für EE-Zubau im Vergleich zum Gesamtjahresverbrauch 2020 in Deutschland in Tonnen	10
Materialverbrauch in Relation zur produzierten Energie	11
Abbildung 4 – Metallbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh	12
Abbildung 5 – Massenmetallbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh	12
Abbildung 6 – Bedarf an kritischen Rohstoffen für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh	14
Abbildung 7 – Gesamtrohstoffbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh	14
Abbildung 8 – Treibhausgasemissionen ausgewählter Energietechnologien mit regionaler Variation in g CO2 Äquivalenten/kWh	16
Abbildung 9 – Kumulierter Lebenszyklus-Energiebedarf, in MJ/kWh	16
Exkurs Carbon Capture and Storage/CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung	19
Emissionen im Verhältnis zur erzeugten Energie	20
Materialintensität – Die Rolle der Mobilität	21
Abbildung 10 – Materielle Bestandteile einer 400 Kilogramm schweren Batterie von Volkswagen	21
Fazit und Ausblick	22
Abbildung 11 – Prozentuale Marktanteile entlang der PV-Lieferkette nach Ländern	22
Tabellenanhang zu Abbildung 2	23
Abbildung 2 – Wichtigste Produzenten ausgewählter Rohstoffe	23
Bildnachweise und Quellen	25
Endnoten	26
Impressum	27

Erneuerbare Energie und metallische Rohstoffe – Ein undifferenzierter Diskurs?



Das Bauxit in Guinea wartet auf den Export nach Deutschland, wo es zu Aluminium weiterverarbeitet wird.
Photo: Igor Grochev, Unsplash

Viele Bergbaukonzerne präsentieren sich als grüne Unternehmen. Denn ihre Rohstoffe werden für erneuerbare Energien oder die Elektromobilität benötigt. So präsentiert sich der brasilianische Bergbaukonzern Vale auf seiner Website¹ als „Guardians of the Rainforest“, Beschützer des Regenwaldes. Dabei wurde der Konzern erst im Dezember 2021 von einem brasilianischen Gericht zu einer Geldstrafe verurteilt, weil er 15 Hektar zum Teil geschützten Waldes abgeholzt haben soll. Vale betreibt zudem die größte Eisenmine der Welt im brasilianischen Carajás-Gebirge. Sie befindet sich inmitten des Regenwaldes und hat samt dazugehöriger Infrastruktur für massive Entwaldung gesorgt. Der Konzern trägt auch die Verantwortung für das „sozial-ökologische Verbrechen“ von Brumadinho, bei dem ein Rückhaltebecken am 25. Januar 2019 barst und 270 Menschen in den Tod riss sowie große Teile des Ökosystems des 540 Kilometer langen Flusses Paraopeba zerstörte.²

Vale ist der drittgrößte Bergbaukonzern der Welt und nicht der einzige, bei dem grüne Präsentation und traurige Realität weit auseinander klaffen. Der zweitgrößte Bergbaukonzern der Welt kommt aus Australien. Rio Tinto hebt auf seiner Website³ hervor, dass

„decarbonisation is an urgent priority for us and the world“ (Dekarbonisierung ist eine dringliche Priorität für uns und die Welt). Dabei ist Rio Tinto unter anderem an der Ausweitung einer Bauxitmine in Guinea beteiligt, bei der sowohl Menschenrechte verletzt als auch Umwelt zerstört wurde.⁴

Wenig verwunderlich betont auch der größte Bergbaukonzern der Welt: „At BHP, we’re focused on the resources the world needs to develop and decarbonise“⁵ (Bei BHP fokussieren wir uns auf die Ressourcen, die die Welt zur Entwicklung und Dekarbonisierung benötigt). Dabei zeigt eine Studie von TNI und dem London Mining Network, dass der britische Konzern in den letzten drei Jahren über 1,2 Milliarden US-Dollar für die Ölproduktion ausgegeben hat, allerdings im Vergleich dazu nur gut 200 Millionen für die Kupfergewinnung.⁶

Weil Metalle und technologische Entwicklungen aber im Kampf gegen die Klimakatastrophe benötigt werden, können sich diese Unternehmen „grün waschen“, also einen ökologischen Anstrich geben: Ohne Metalle funktioniert weder unser Energiesystem (weder das fossile noch das erneuerbare) noch unsere Mobilität, Kommunikation oder andere

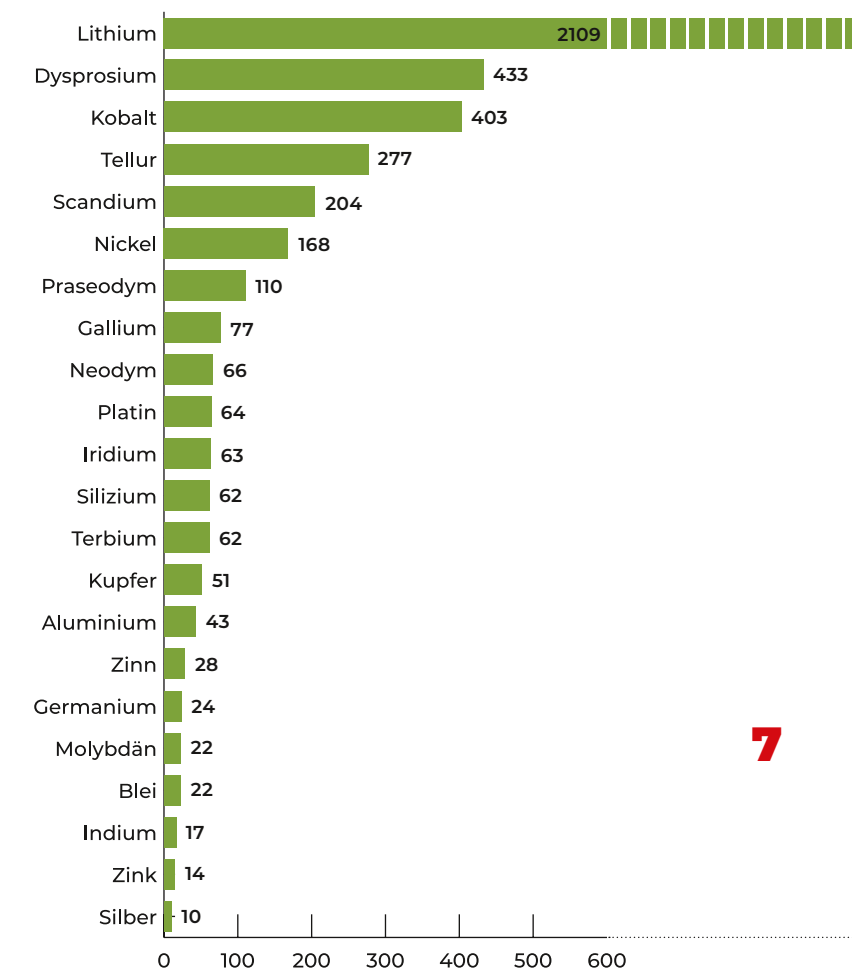
Technologien. Die nicht nachhaltige, dreckige und an vielen Orten zerstörerische Bergbauindustrie wird gebraucht, sowohl für den Erhalt des Status Quo als auch für die Transformationen. Doch wenn die Transformationen als Erneuerung des Status Quo geplant werden – sprich unter Mobilität weiterhin individuelle Automobilität, beim Energieverbrauch nicht über Reduktion, bei Technologien nur höher, weiter, schneller gilt – dann werden wir bis zum Jahr 2050 ein Vielfaches an Lithium, Kobalt, Kupfer und anderen Metallen für diese sogenannten grünen Technologien benötigen. Das zeigen zahlreiche Prognosen.⁷ Doch was „grüne Technologien“ sind, wird häufig unterschiedlich definiert. Während viele zu allererst an Windkraft- und Solaranlagen denken, können diese Technologien auch batteriebetriebene Autos, 3D-Drucker und andere Technologien umfassen, zu denen es durchaus nachhaltigere Alternativen geben kann.

Die grundsätzliche Herausforderung bleibt, dass gleich mehrere Wirtschaftssektoren, vor allem im Energie-, Verkehrs-, Metallverarbeitungs- und Agrarbereich vor einer grundlegenden Transformation stehen. Der Ausstieg aus fossiler Energie, dem Haupttreiber der Klimakrise, hat höchste Priorität. Metalle werden dafür von der E-Mobilität über Windkraft- und Solaranlagen bis hin zur Digitalisierung benötigt. Dabei hat sich die benötigte Menge der metallischen Rohstoffe in den letzten zwanzig Jahren in etwa verdreifacht. Außerdem sind mit China und Indien neue wichtige Akteure auf dem Weltmarkt hinzugekommen. Die Versorgung mit metallischen Rohstoffen ist dadurch zu einem der zentralen wirtschaftspolitischen Themen geworden. 2011 erstellte die Europäische Union daher erstmals eine strategische Liste mit „kritischen Rohstoffen“. Kritisch heißt in dem Kontext, dass die Nutzung der Rohstoffe für die europäische Industrie essenziell ist und gleichzeitig politische Risiken die kontinuierliche Versorgung der europäischen Industrie gefährden. Diese Liste wird alle drei Jahre überprüft. Im Jahr 2020 zählten etwa Bauxit, Kobalt, Lithium, Graphit oder Phosphor zu den kritischen Rohstoffen.⁸

Viele dieser kritischen Rohstoffe werden tatsächlich dringend für die Energiewende gebraucht. Die Universität Leuven hat im Auftrag des europäischen Bergbauverbandes berechnet, dass sich der Metallverbrauch allein für „saubere Technologien“¹ bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Gesamtverbrauch 2020 massiv erhöhen wird (vgl. Abbildung 1).

¹ Saubere Technologien: In der Studie werden unter diesem Label sowohl Windkraft, Solarenergie Wasserkraft, Geothermie, Biomasse und Wasserstoff als auch Atomkraft, Elektromobilität und die dazugehörigen Batterien geführt. (Gregoir S.10)

Abbildung 1 – Prognose des Verbrauchsanstiegs für erneuerbare Energietechnologien und Elektromobilität von 2020 bis 2050 (in Prozent)



Eigene Darstellung, Daten: <https://eurometaux.eu/media/jsfne00y/final-slides-ku-leuven-study-presentation-25-4.pdf>

Der Anstieg des Verbrauchs metallischer Rohstoffe in vielen Prognosen wird nur selten mit den häufig negativen Konsequenzen des Bergbaus in Kontext gesetzt. Generell findet ein Großteil des metallischen Bergbaus in China, Australien und Ländern des Globalen Südens statt (vgl. Abbildung 2). In vielen dieser Länder gibt es Konflikte um den Abbau, sei es um die Wassernutzung, Landnutzung oder aufgrund von Emissionen in Luft, Böden oder Wasser. Zudem haben der Rohstoffabbau und die Weiterverarbeitung von Erzen zu Metallen einen großen Einfluss auf die Klimakrise⁹. Zum einen tragen neue Abbauprojekte zur Zerstörung des Regenwaldes bei. In Brasilien, so schätzen Wissenschaftler*innen, sind von 2005 bis 2015 zehn Prozent der Entwaldung auf Bergbauaktivitäten zurückzuführen. Das ressourcenspezialisierte Beratungsunternehmen Levin Sources schätzt, dass der internationale Bergbau für etwa sieben Prozent der globalen Entwaldung verantwortlich ist.¹⁰ Ein großer Teil der Entwaldung findet in



Diese Mine frisst sich in den philippinischen Regenwald.
Photo: Michael Reckordt

Regionen mit Tropenwäldern statt, neben Brasilien vor allem in Südostasien und in Westafrika. Die Rodungen von Flächen für den Abbau von Bauxit in Guinea, von Gold in Ghana oder von anderen Rohstoffen in der Region nehmen immer größere Ausmaße an.

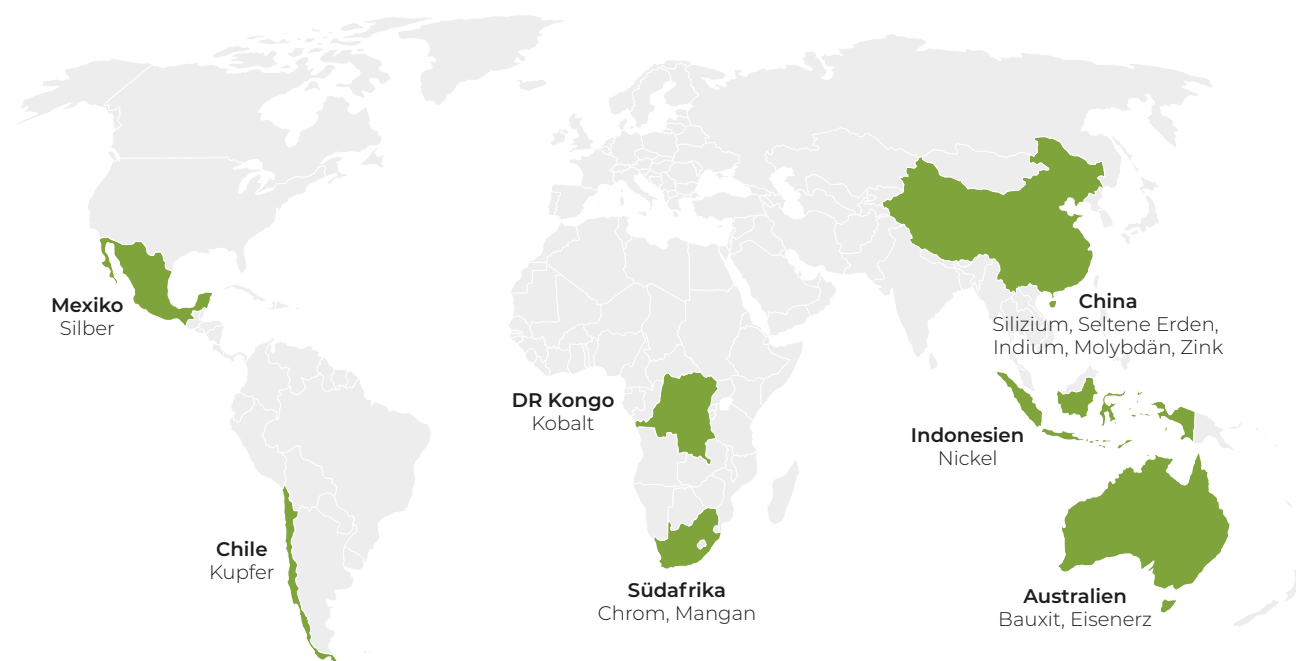
Zum anderen erzeugen der Abbau und die Weiterverarbeitung von Eisenerz/Stahl (in etwa sieben¹¹ bis elf¹² Prozent der globalen

CO₂-Emissionen), Bauxit/Aluminium (in etwa zwei¹³ bis drei¹⁴ Prozent der globalen CO₂-Emissionen), Kupfer (0,3 Prozent der globalen CO₂-Emissionen)¹⁵, Nickel (0,27 Prozent der globalen CO₂-Emissionen)¹⁶ sowie der weiteren etwa 90 metallischen Elemente zusammen bis zu 15 Prozent der globalen CO₂-Emissionen. Erschreckenderweise haben laut einer Analyse von Bloomberg Intelligence¹⁷ hingegen nur elf von 46 Metall- und Bergbauunternehmen überhaupt eine Strategie, um Emissionen zu reduzieren.

Eine Forscher*innengruppe um den japanischen Umweltwissenschaftler Takuma Watari hat kürzlich anhand von Ökobilanzen und Stoffstromanalysen gezeigt, dass die globalen Metallnutzungsziele und die Wachstumsprognosen der Weltbank, der EU-Kommission oder auch der Bundesregierung nicht mit dem Zwei-Grad-Klimaziel vereinbar sind.¹⁸

Daraus ergeben sich einige Fragen: Stehen die Energiewende und der Ausbau erneuerbarer Energien im Widerspruch zu einer Rohstoffwende mit Reduktionszielen für Metalle? Wie viele Rohstoffe benötigt dieser Ausbau erneuerbarer Energien und wie steht er im Verhältnis zum Gesamtverbrauch? Welche Treiber für die hohen Prognosen für den Metallverbrauch sind ansonsten auszumachen?

Abbildung 2 – Länderkarte mit den wichtigsten Produzenten ausgewählter Rohstoffe



Eigene Darstellung,
Daten: U.S. Geological Survey, 2022, Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202 p.,
<https://doi.org/10.3133/mcs2022>

Tatsächliche Materialbedarfe der erneuerbaren Energietechnologien

Es existieren nur wenig ganzheitliche Betrachtungen, die den Materialbedarf für PV- und Windkraftanlagen darstellen. Eine erste Publikation erschien im Jahr 2011 vom WWF¹⁹ und berechnete, dass für die globale, einhundertprozentige Versorgung mit erneuerbaren Energien (25.000 TWh) im Jahr 2050 in etwa 3,2 Milliarden Tonnen Stahl, 310 Millionen Tonnen Aluminium und 40 Millionen Tonnen Kupfer benötigt werden würden. Andere Studien, zum Beispiel vom World Energy Council, gehen allein für das Jahr 2040 schon von 40.000 TWh benötigter Energie weltweit aus²⁰, wodurch auch die Werte für den Materialverbrauch angepasst werden müssten. Gleichzeitig mangelt es an Berechnungen, inwieweit sich technologischer Wandel bei Windkraft- und PV-Anlagen positiv auf den Verbrauch von metallischen Rohstoffen auswirkt. Hans-Josef Fell, ehemaliges Parlamentsmitglied für die Grünen und einer der Initiator*innen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, argumentiert, dass zwar der Anteil der Stromproduktion aus Windkraft erhöht werden müsse, aber nicht die Anzahl der Windräder. Durch technologische Innovation könne deren Anzahl in Deutschland sogar „von derzeit rund 30.000 auf rund 24.000 Anlagen sinken“.²¹

Am 11. Januar 2022 machte der Minister des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Robert Habeck, bei seiner Eröffnungsbilanz zum Thema Klimaschutz deutlich, dass der Strom bis 2030 zu 80 Prozent aus erneuerbaren Quellen stammen soll. Dafür visiert das BMWK für das Jahr 2030 eine installierte Kapazität von 130 GW aus Windkraftanlagen (100 GW an Land und 30 GW auf See) und 215 GW aus Solaranlagen an. Laut Deutscher Rohstoffagentur (DERA) waren 2020 in Deutschland 63 GW Windkraft- und 54 GW Photovoltaikkapazitäten installiert, welche respektive 132 TWh beziehungsweise 51 TWh produzierten. Innerhalb des deutschen Strommix ist Wind damit in den letzten Jahren die maßgebliche Energiequelle. Photovoltaik reiht sich jedoch hinter Braunkohle, Kernenergie und Gas ein.

Die DERA beziffert den Nettozubau von Windkraftanlagen von 2021 bis 2030 – ohne Repowering, also dem Austausch alter Windkraftanlagen durch leistungsfähigere, neuere – auf 67 GW.²² Für diesen Zubau werden neben Zement einige Metalle bzw. Metallprodukte benötigt. Für den Nettozubau von



Dreimal mehr Beton als Stahl soll bis 2030 in Windkraftanlagen in Deutschland verbaut werden.
Photo: LEEROY Agency, Pixabay

Photovoltaik im selben Zeitraum – ebenfalls ohne Repowering – geht die DERA von 161 GW aus.²³ Zur Einordnung wird dem kumulierten und dem jährlich prognostizierten Materialbedarf für den Wind- und Solarausbau in Abbildung 3 der deutsche Gesamtverbrauch der jeweiligen Rohstoffe in 2020 gegenübergestellt.

Aus der Tabelle wird deutlich, dass der jährliche Metallbedarf für den Ausbau von Windkraftanlagen im Bereich der Massemetalle Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel und Zink nur geringe Teile des derzeitigen Gesamtverbrauchs ausmachen. Der Bedarf an Seltenen Erden ist relativ gesehen am höchsten und würde rund neun Prozent des jährlichen Verbrauchs ausmachen. Auf Grund des zu erwartenden Preisanstiegs und Chinas Monopolstellung in der Gewinnung Seltener Erden geht die DERA für Europa zukünftig von einer Reduzierung und Substitution Seltener Erden in den Windradturbinen aus. Das dänische Windkraftunternehmen Vestas setzt zum Beispiel bereits heute in allen Modellen auf Turbinen mit einem Getriebeantrieb, der den Bedarf an Seltenen Erden auf ein Siebtel reduziert.²⁴

Die PV-Anlagen fallen beim Verbrauch von Aluminium und Kupfer etwas stärker ins Gewicht als Windkraft. Das ist auf die deutlich größere GW-Kapazität zurückzuführen. Der jährliche Bedarf an Silizium würde in etwa 32

Abbildung 3 – Materialbedarf für EE-Zubau im Vergleich zum Gesamtjahresverbrauch 2020 in Deutschland in Tonnen

Rohstoffe	Materialbedarf für Zubau von 67 GW Wind bis 2030	Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Windkraft	Materialbedarf für Zubau von 161 GW Solar bis 2030	Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Solar	Materialverbrauch in Deutschland 2020 (z.T. Annäherungen)
Zement	27.400.000	2.740.000	9.600.000	960.000	30.108.000
Stahl	9.500.000	950.000	10.700.000	1.070.000	31.200.000
Aluminium	100.000	10.000	1.200.000	120.000	2.560.600
Kupfer	160.000	16.000	730.000	73.000	1.046.000
Nickel	31.000	3.100	-	-	50.019
Zink	450.000	4.500	-	-	377.500
SE	5.500	550	-	-	4.862
Silizium	-	-	600.000	60.000	189.600
Glas	-	-	730.000	73.000	10.309.000
Silber	-	-	2000	200	1.170

Eigene Darstellung, ausführliche Quellenangaben siehe Seite 25

Prozent und für Silber 17 Prozent des Gesamtverbrauchs dieser Rohstoffe im 2020 ausmachen. Um möglichen Engpässen und Preissteigerungen entgegenzuwirken, wird derzeit bereits an verschiedenen Dünnschichtmodulen geforscht, die einen deutlich geringeren Bedarf dieser beiden Rohstoffe haben.

Für die insgesamt im Jahr 2020 weltweit installierten Windenergiekapazitäten in Höhe von 95 GW wurden laut DERA 0,6 Prozent der globalen Betonproduktion, 0,6 Prozent der globalen Stahlproduktion und 1,6 Prozent der Gusseisenproduktion verwendet. Der Bedarfsanteil an den Rohstoffmärkten von Windkraftanlagen war am höchsten bei Zink (mit 3,9 Prozent), Molybdän (3,5 Prozent) und Seltenen Erden (3,2 Prozent). Aus diesen Zahlen der DERA lässt sich also erkennen, dass der Zubau an Windkraftanlagen keine treibende Nachfrage nach Metallen darstellt. Die global installierten Solarenergiekapazitäten in Höhe von 138 GW beanspruchten ebenfalls nur 0,2 Prozent der Betonproduktion und 0,5 Prozent der globalen Stahlproduktion. Auch größere Bedarfsanteile bei Silizium (16,8 Prozent), Germanium (15,6 Prozent), Silber (10,0 Prozent) und Indium (4,6 Prozent) stellen zwar eine signifikante Menge, aber noch keine treibende Nachfrage auf den Rohstoffmärkten dar.

Bemessen am globalen Materialverbrauch von Windkraft und Solarenergie wird sichtbar, dass Erneuerbare bisher kein treibender Faktor für die hohen Prognosen des zukünftigen Metallverbrauchs sind. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch das Öko-Institut in einer Studie im Auftrag mehrerer grüner Europaabgeordneter.²⁵ Zwar ist der Ausbau von Windkraft und Photovoltaik laut der Studie nicht rohstoffneutral. Sehr hohe Nachfrageanteile von grünen Technologien werden bei den Rohstoffen Kobalt, Lithium, Niobium, Tantal sowie leichten und schweren Seltenen Erden identifiziert. Bei genauerer Betrachtung fällt aber auf, dass zumindest Kobalt und Lithium vor allem in der Elektromobilität eine große Rolle spielen und somit das Ergebnis verzerren. Lithium, Kobalt und Tantal spielen in der Produktion von Windkraft- und PV-Anlagen, wenn überhaupt, nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Materialverbrauch in Relation zur produzierten Energie



Auch die fossile Stromproduktion ist sehr materialintensiv, wie dieses alte Kraftwerk verdeutlicht.
Photo: Benita Welter, Pixabay

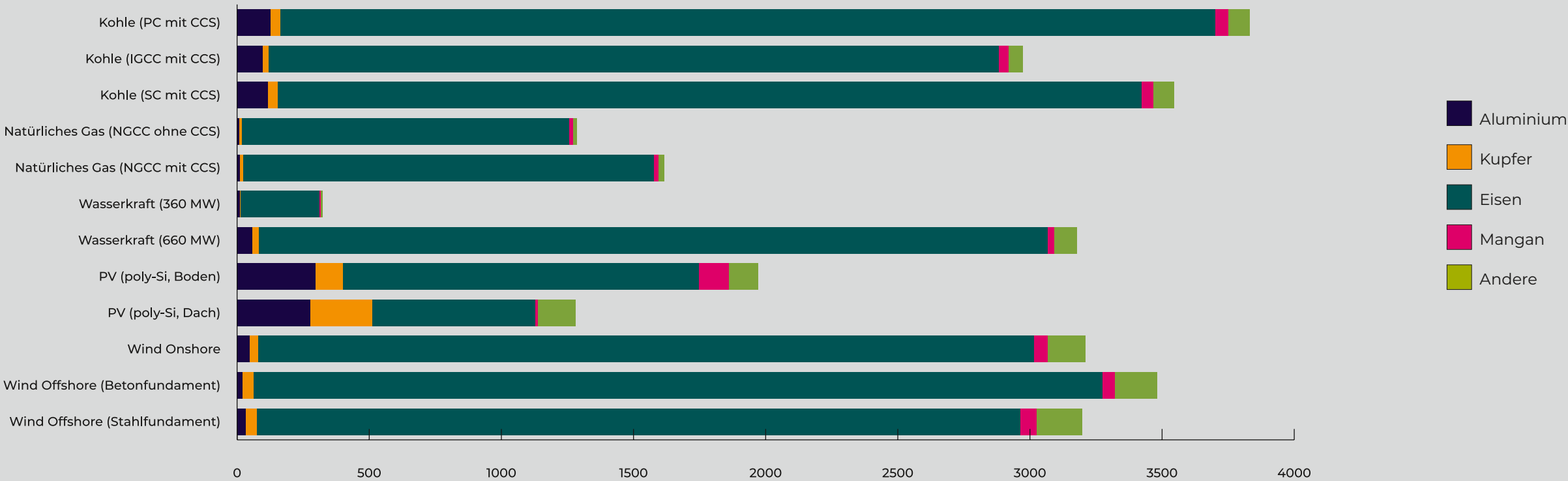
Neben der Frage nach dem absoluten Materialbedarf ist die Materialeffizienz ein wichtiger Indikator zum Vergleich fossiler und erneuerbarer Energieträger. Diese wurde von der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) in einer Lebenszyklusanalyse verschiedener Energieinfrastrukturen untersucht.²⁶ Daraus geht hervor, dass der metallische Materialbedarf pro Megawattstunde grundsätzlich für alle Energieproduktionstechnologien hoch liegt, dass aber Batterierohstoffe wie Lithium und Kobalt für Wind-, Solar und Wasserkrafttechnologien kaum ins Gewicht fallen.

Unsere Datengrundlage ist vom Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) aus der UNECE-Studie „Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources“.²⁷ Daraus haben wir uns die Materialbedarfe für Kohlekraft, Gas, Hydroenergie, Photovoltaik und Windkraftanlagen angesehen. Wir haben für dieses Papier die Materialbedarfe von Kohlekraftwerken ohne CCS (Carbon-Capture and Storage)

sowie Atomkraft² nicht im Detail analysiert, da die politischen Weichenstellungen deutlich gegen den zukünftigen Neubau solcher Anlagen sprechen. Bei PV-Anlagen haben wir uns ebenfalls auf die gängigen und marktbeherrschenden Technologien fokussiert, obwohl diese deutlich rohstoffintensiver sind als in der Entwicklung befindliche Dünnschichtmodule.

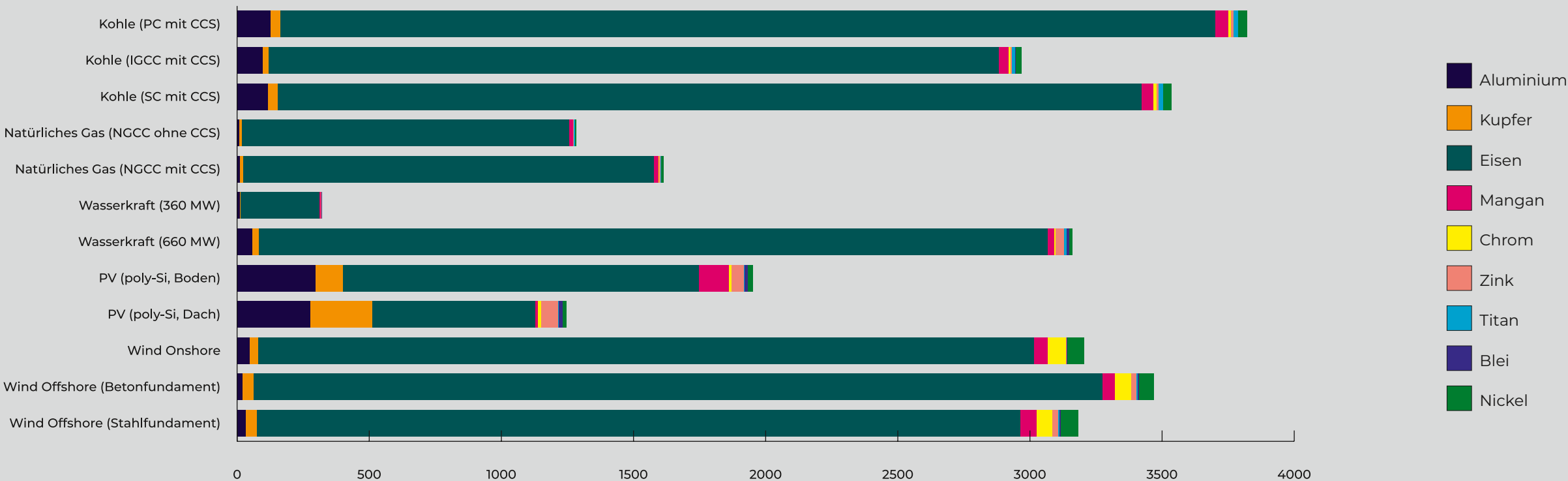
² Atomkraft wird hier nicht im Detail betrachtet, da sich die Bundesregierung für einen Atomausstieg entschlossen und weitestgehend umgesetzt hat. Dafür gibt es gute Gründe: Im Bereich Nuklearenergie fallen im Gegensatz zu anderen Energieträgern radioaktive Abfälle an, deren Endlagerung weiterhin ungelöst ist. Fragen der Reaktorsicherheit haben mit der Nuklearkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 und der russischen Invasion der Ukraine mit Kampfhandlungen und Artilleriefeuer in unmittelbarer Nähe zu Kernkraftwerken eine neue Schärfe erhalten. Zudem wird ein großer Teil der Brennstoffe in Russland und Kasachstan produziert, was wiederum eine erneute geostrategische Abhängigkeit von Russland erzeugen könnte. Am Beispiel Frankreich lässt sich außerdem erkennen, wie problematisch die Kühlung und Instandhaltung der Reaktoren mit der voranschreitenden Klimaerwärmung ist und dass Atomkraft alles andere als ein konstanter und verlässlicher Energielieferant ist.

Abbildung 4 – Metallbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh



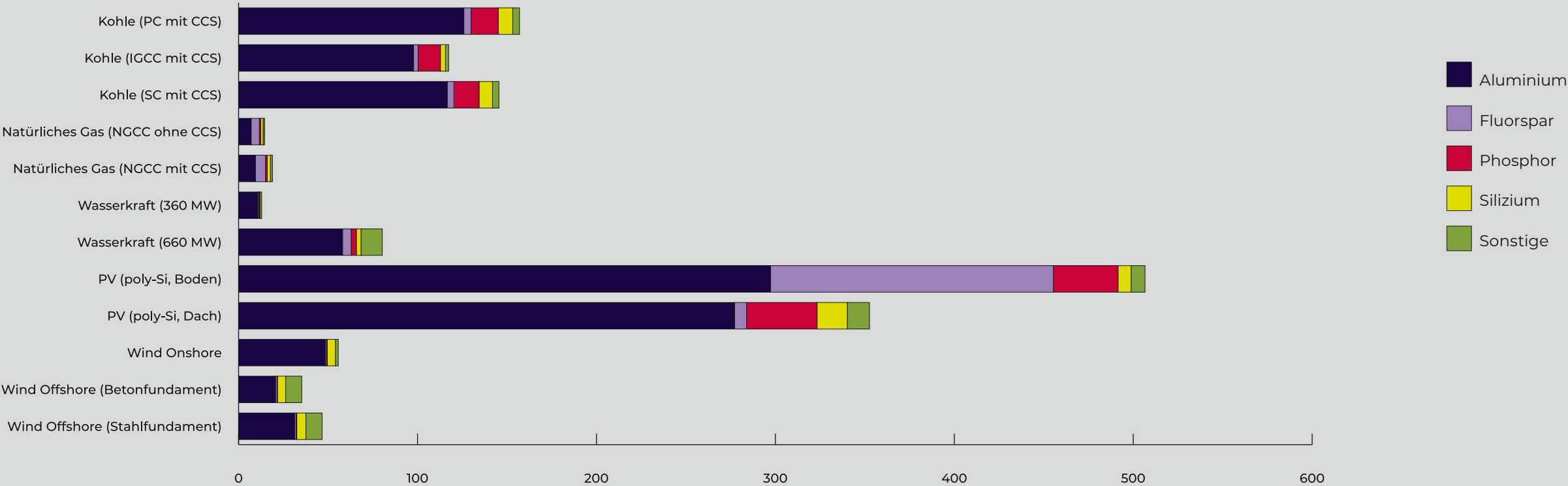
Eigene Darstellung,
Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021):
Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

Abbildung 5 – Massenmetallbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh



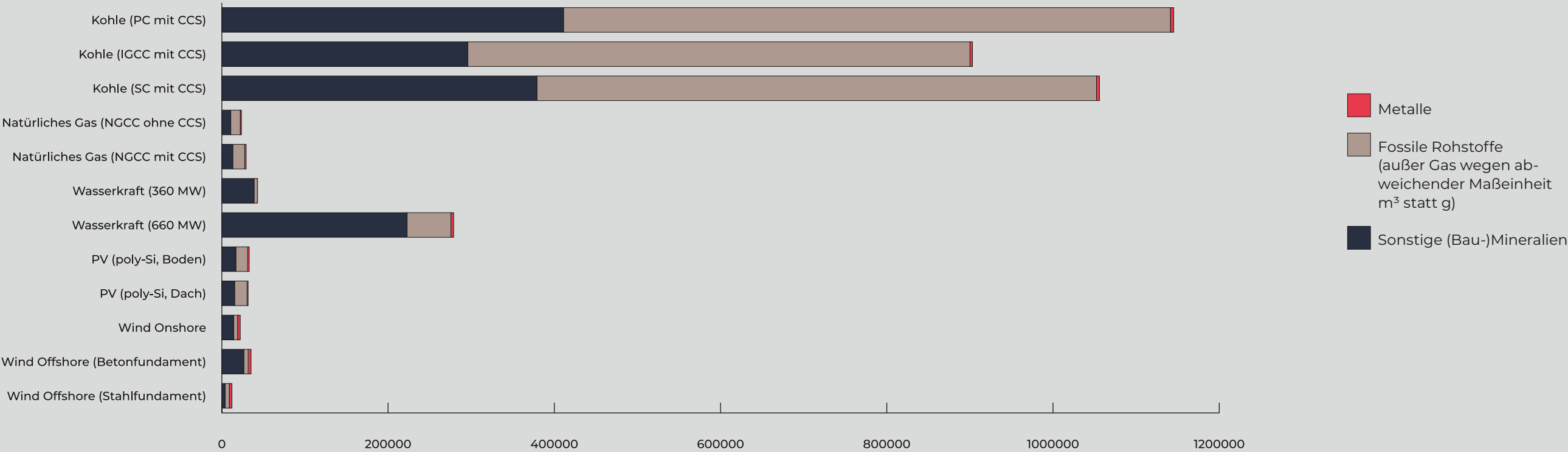
Eigene Darstellung,
Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021):
Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

Abbildung 6 – Bedarf an kritischen Rohstoffen für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh



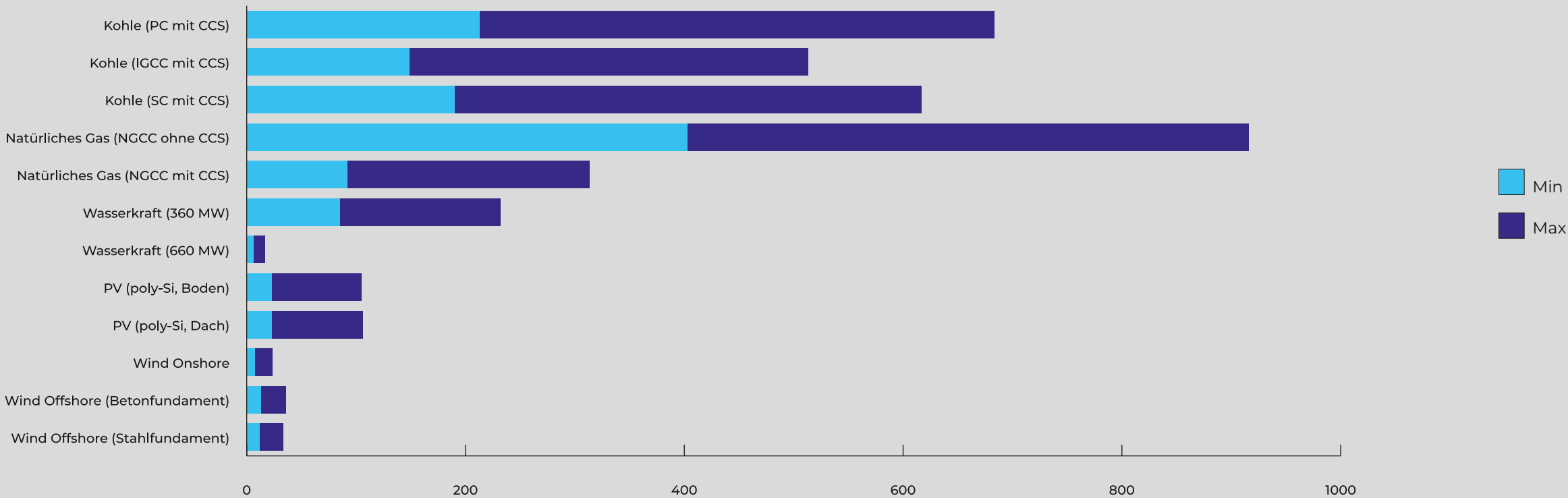
Eigene Darstellung,
Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021):
Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

Abbildung 7 – Gesamtrohstoffbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh



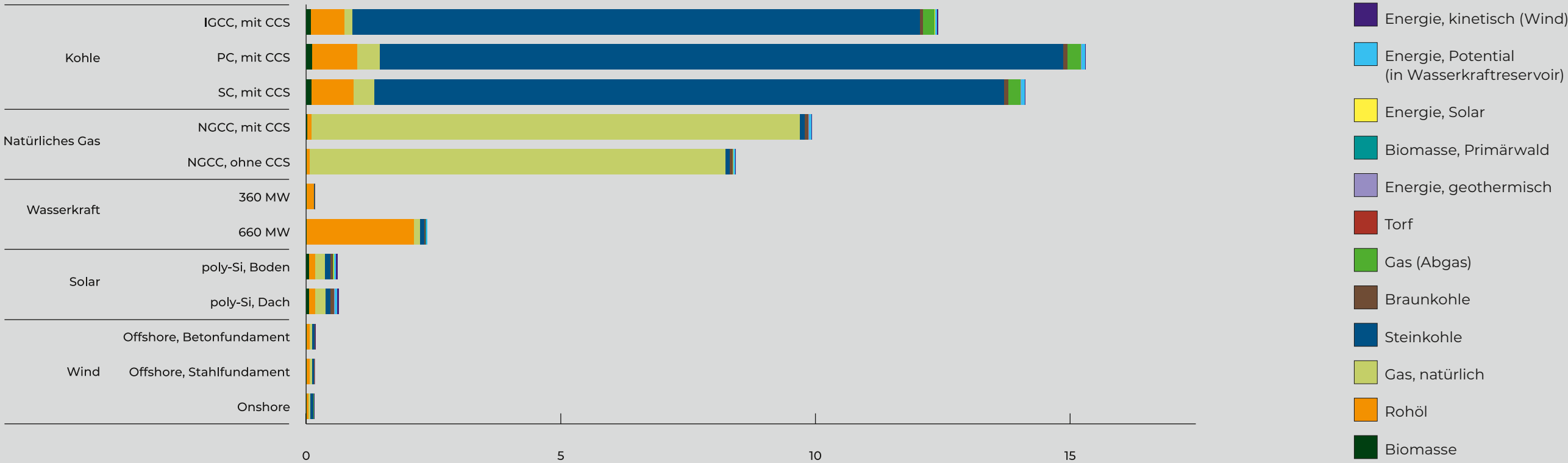
Eigene Darstellung,
Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021):
Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

Abbildung 8 – Treibhausgasemissionen ausgewählter Energietechnologien mit regionaler Variation in g CO2 Äquivalenten/kWh



Eigene Darstellung,
Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021):
Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

Abbildung 9 – Kumulierter Lebenszyklus-Energiebedarf, in MJ/kWh



Eigene Darstellung,
Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021):
Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe



Windparks müssen mittelfristig Kohlekraftwerke verdrängen. Photo: Hans-Jürgen Münzer, Pixabay

Generell zeigen die Abbildungen 4 und 5, dass bei allen Energietechnologien Eisen (und Stahl) den größten Anteil des Materialbedarfs ausmachen. Dieser Metallverbrauch ist insbesondere bei Windkraftanlagen, Kohlekraftwerken und großen Wasserkraftanlagen sichtbar. Vom Materialbedarf pro erzeugter Megawattstunde sind vor allem kleine Wasserkraft, sowie PV- und Gaskraftwerke am sparsamsten und deren Materialintensität deutlich geringer.

Wenn wir nun auf die Diskussion um die von der Europäischen Union als „kritisch“ klassifizierten Rohstoffen eingehen, verändern sich die Gewichtungen leicht. Zu den kritischen Rohstoffen zählen mittlerweile insgesamt 30 Rohstoffe – darunter mit Schweren und Leichten Seltenen Erden zwei Rohstoffgruppen. Ein Blick auf Abbildung 6 macht deutlich, dass vor allem für Solaranlagen, aber auch für Gas- und Kohleinfrastrukturen eine Reihe kritischer Rohstoffe benötigt werden. Gewichtsmäßig sticht vor allem das Massenmetall Aluminium heraus, das aus Bauxit gewonnen wird. Während für die Windkraft und kleine Wasserkraftwerke mit Abstand am wenigsten kritische Metalle benötigt werden, liegt der Bedarf für Solaranlagen und große Wasserkraftwerke leicht über dem der fossilen Energietechnologien. Dabei sollte allerdings nicht vergessen werden, dass Gas- und Kohlekraftwerke, anders als die Erneuerbaren, für ihren Betrieb eine konstante Zufuhr fossiler Rohstoffe benötigen. Wie enorm dieser Bedarf insbesondere für Kohlekraftwerke ist, wird in Abbildung 9 deutlich. Denn im Vergleich zu der Metallnutzung wird noch einmal knapp die dreifache Menge an fossilen Rohstoffen

im Lebenszyklus für diese Art der Energiegewinnung genutzt. Dies trifft auch für Gas zu, das auf Grund der unterschiedlichen Bemessungseinheit m^3 statt kg in Abbildung 7 nicht auftaucht. Beim Blick auf die CO_2 Emissionen in Abbildung 8 und Abbildung 9, die den kumulierten Energiebedarf in Form von Rohstoffen der Kraftwerke in MJ pro kWh darstellt, wird allerdings deutlich, wie viel emissionsärmer und energieeffizienter erneuerbare Energien sind, wenn der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Materialbedarfe für erneuerbare Energien nicht deutlich höher sind als die für die fossile Energieproduktion. Im Gegenteil, Windkraft braucht vor allem Massemetalle und bisher noch einige Seltene Erden. Bei den von der EU als kritisch definierten Rohstoffen schneiden Windkraftanlagen zusammen mit kleinen Wasserkraftanlagen mit deutlichem Abstand am besten ab. Für die Produktion von Solarenergie werden hingegen deutlich mehr kritische Rohstoffe benötigt, darunter vor allem Aluminium und Silizium. In der Materialintensität bei allen Metallen schneiden die Solaranlagen zusammen mit kleinen Wasserkraftanlagen mit am besten ab. Obwohl Erdgas in Bezug auf Massemetalle etwas materialeffizienter als erneuerbare Alternativen ist, hat es neben den klimatreibenden CO_2 -Emissionen auch eine problematische Rolle als geopolitisches Druckmittel, die seit der russischen Invasion der Ukraine deutlich zum Tragen kommt. Steigende Energiepreise stellen sowohl Industrie als auch Regierungen vor wachsende Probleme und Versorgungsunsicherheit. Die Versorgungslücken werden derzeit unter

anderem mit Fracking-Gas geschlossen, dessen Gewinnung noch verheerendere sozio-ökologische Folgen hat als konventionelle Bohrverfahren.

Zudem stehen dem Metallbedarf der erneuerbaren Energien die Treibhausgasemissionen der fossilen Brennstoffe gegenüber. Bei der Verbrennung von Erdgas wurden 2021 in Deutschland 55,8 Tonnen CO_2 pro Terajoule freigesetzt, für Steinkohle 93,5 Tonnen CO_2 pro Terajoule und für Hartbraunkohle 94,4 Tonnen CO_2 pro Terajoule, ohne dass hier Emissionen aus dem Bau und Erhalt der Infrastrukturen, der Gewinnung oder dem Transport der Brennstoffe miteinbezogen wurden.²⁸ Für Solar- und Windenergie beträgt dieser Wert 0. Lucas Gilsbach (BGR) stellt zur Einordnung die Emissionen aus der Kupferproduktion dem CO_2 -Einsparpotential gegenüber und erläutert:

„Beispielsweise benötigt eine 5-MW-Offshore-Windkraftanlage samt Infrastruktur bis zu 30 t Kupfer. Unter Annahme von 3.066 Wind-Volllaststunden pro Jahr (Auslastung von 35 Prozent) und eines mittleren CO_2 -Ausstoßes von 474 g CO_2 /kWh durch die Stromerzeugung in Deutschland hilft jede in einer Windkraftanlage eingesetzte Tonne Kupfer damit ca. 240 t CO_2 pro Jahr einzusparen, was etwa das 100fache des durch die Produktion des Kupfers erzeugten Ausstoßes ist.“²⁹

Diese Analyse der Materialbedarfe für die Stromerzeugung soll in keiner Weise die Herausforderungen und möglichen sozialen und ökologischen Auswirkungen sowie globalen Ungerechtigkeiten des hohen Metallbedarfs erneuerbarer Energieinfrastruktur abstreiten. Auch die Rohstoffe für Solarenergie und für Windenergie müssen unter den höchstmöglichen ökologischen und sozialen Standards abgebaut werden. Gerade da sich viele der Abbauregionen in Ländern des Globalen Südens befinden, sind auch developmentspolitische Belange zu berücksichtigen.

Fakt ist, dass wir für eine global gerechte Energiewende, sparsam mit Rohstoffen umgehen müssen. Dazu braucht es zirkuläre Ökonomie und die absolute Reduktion des Verbrauchs in anderen Industriezweigen. Außerdem wird deutlich, dass nicht die erneuerbaren Energietechnologien an sich das Problem sind, sondern die Stromerzeugung generell. Während wir bei Kohle- und Gaskraftwerken vor allem über die Dimension der fossilen Rohstoffe sprechen, wird vollkommen vergessen, dass auch diese Art von fossilen Kraftwerken große Mengen an Metallen für die Infrastruktur benötigen. Diese ist im Vergleich zur erzeugten Megawattstunde Strom nicht weniger materialintensiv.

Exkurs Carbon Capture and Storage / CO_2 -Abscheidung und -Speicherung

Für die aufgeführten Rohstoffbedarfe für Kohle- und Gaskraftwerke wurde die zur Minderung des Klimawandels geplante CO_2 -Abscheidung und -Speicherung, kurz CCS einberechnet. CCS wird angewendet, um das im Produktions- bzw. Verbrennungsprozess entstehende CO_2 aufzufangen und transportfähig zu machen. Anschließend wird es per LKW, Zug oder Schiff vom Entstehungsort zu einer meist unterirdischen Lagerstätte transportiert. Dafür kommen zum Beispiel erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten in Frage. Diese werden zuvor von innen versiegelt, damit das CO_2 nicht im Nachhinein wieder austreten kann. Die Fossilindustrie verspricht sich davon einen CO_2 -neutralen Betrieb der Anlagen und lobbyiert auf diesem Weg dafür, fossile Infrastruktur durch die grüne Transformation zu retten. CCS ist jedoch umstritten. Zum einen sind die Anlagen sehr teuer und müssten mit üppigen Steuergeldern bezuschusst werden. Zum anderen bestehen Sicherheitsrisiken. Sollte das CO_2 aus den unterirdischen Lagerstätten austreten, würden sowohl Luft als auch Grundwasser vergiftet. Deshalb kam es an angedachten Lagerorten bereits zu zivilen Protesten, ähnlich derer gegen atomare Endlager.

Um die Klimaerwärmung auf zwei Grad zu begrenzen, müssten außerdem laut IEA (International Energy Agency) pro Jahr 70 bis 100 Anlagen gebaut werden. Nach mehr als 50 Jahren Forschung sind bis dato nur 26 CCS-Anlagen auf der ganzen Welt in Betrieb. Bestehende und geplante Kapazitäten werden besonders für die energieintensive Stahl und Zementproduktion benötigt, da hier bisher, anders als in der Energieproduktion, keine emissionsarmen Alternativen existieren.³⁰ Die bereits mangelnden Kapazitäten jetzt noch für neue fossile Projekte zu vereinbaren, scheint also mehr als fragwürdig. Dennoch haben wir aus Gründen der Transparenz Kohlekraftwerke mit CCS in den Vergleich aufgenommen.

Emissionen im Verhältnis zur erzeugten Energie



Das Kräfteverhältnis von Strom aus Windkraft und Strom aus fossilen Kraftwerken wird sich schnell verändern müssen.
Photo: S. Hermann / F. Richter, Pixabay

Um die gravierenden Unterschiede beim Emissionsausstoß, die den Umstieg auf erneuerbare Energien erst nötig machen, noch genauer einzuordnen, soll an dieser Stelle der Schadstoffausstoß entlang des gesamten Lebenszyklus der Energietechnologien in Relation zur produzierten Energie gesetzt werden.

In Abbildung 8 wurde deutlich sichtbar, dass die Treibhausgasemissionen von Gas- und Kohlekraftwerken selbst bei Einsatz von CCS um ein Vielfaches höher liegen als bei Erneuerbaren. Insbesondere Windenergie verursacht kaum Emissionen während es bei Solarenergie größere regionale Unterschiede gibt. Selbst der höchste Emissionswert der Solarenergie liegt aber noch unter dem niedrigsten vorhandenen Wert für fossile Energie, in diesem Falle Gas mit CCS.

Weitere Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Sven Ullrich berechnete zum Beispiel, dass schon bei der Herstellung der Anlagen inklusive der Installation deutlich weniger CO₂ ausgestoßen wird als bei fossilen Kraftwerken. Nach seiner Berechnung beträgt das CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde Strom aus einer Solaranlage mit monokristallinen Solarmodulen zwischen 43 und 63 Gramm. Zum

Vergleich: Ein Braunkohlekraftwerk emittiert für jede Kilowattstunde produzierten Stroms satte 1.140 Gramm CO₂-Äquivalente. Ein Gaskraftwerk stößt zwar weniger CO₂ aus, doch liegen mit 490 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde die Emissionen noch mehr als zehn Mal höher als die Treibhausgasbelastung einer Solaranlage an einem guten Standort in Deutschland mit monokristallinen Modulen aus chinesischer Herstellung.³¹

Eine noch geringere CO₂-Belastung hat die Stromproduktion mit Windkraftanlagen, und das trotz des hohen Aufwands und der großen Menge an Material, die in eine solche Anlage fließen. Doch die höheren Stromerträge machen diesen Aufwand wieder wett. So liegen die herstellungs-, installations- und wartungsbedingten Emissionen so niedrig, dass der Strom, der mit einer Offshore-Windanlage produziert wird, nur mit 5,4 bis 11,8 Gramm CO₂-Äquivalente pro Kilowattstunde zu Buche schlägt. An einem guten Windstandort an Land betragen die CO₂-Äquivalente auf eine Kilowattstunde produzierten Strom gerechnet 6,1 bis 11,2 Gramm. An einem Ort mit schlechterem Windaufkommen liegen sie zwischen 5,2 und 15,6 Gramm CO₂-Äquivalente pro Kilowattstunde.³²

Materialintensität – Die Rolle der Mobilität

Wie wir anhand der Daten der Universität Luxemburg aufzeigen konnten, sind erneuerbare Energietechnologien im Vergleich zu fossilen Energietechnologien nicht wesentlich materialintensiver. Daher sind erneuerbare Energien auch nicht der Treiber für die sehr hohen, zum Teil unrealistischen Prognosen beim Materialverbrauch. Bei einem genauen Blick auf weit verbreitete Szenarien und Prognosen fällt auf, dass vor allem die hohen Verbräuche an Lithium, Kobalt und Nickel auf die (Elektro-)Mobilität und dort vor allem auf die individuelle, elektrifizierte Automobilität zurückzuführen sind. In der Präsentation der Studie der Universität Leuven für den europäischen Bergbauverband Eurometaux betont die Autorin Liesbet Gregoir, dass 60 Prozent der prognostizierten Rohstoffverbräuche allein in den Transportsektor fließen.³³ Das ist wenig verwunderlich, wenn man sich etwa ein konkretes Beispiel ansieht. Volkswagen gibt den stofflichen Aufbau einer 400 Kilogramm Batterie wie in Abbildung 10 an.³⁴ Mit 32 Prozent macht Aluminium hier den größten Teil des Gewichts aus.

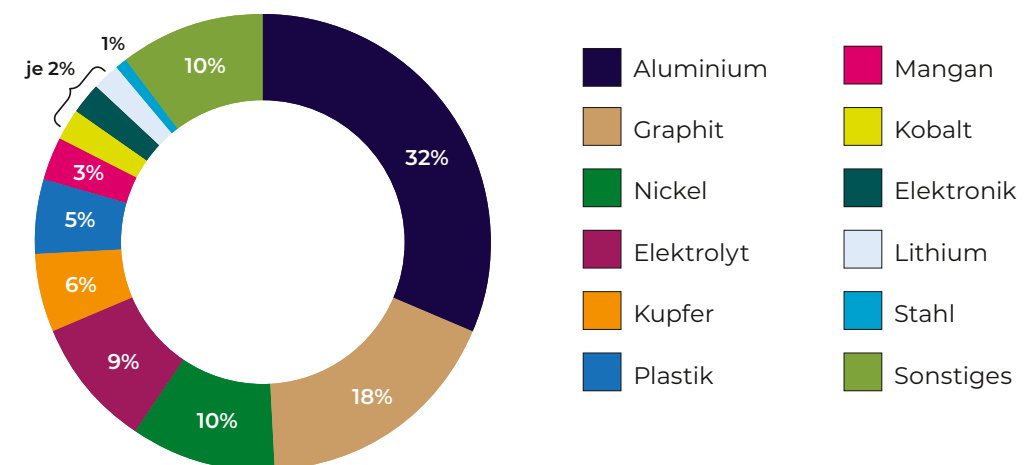
Der Konzern kündigte an, dass bis zum Jahr 2030 70 Prozent seiner verkauften Fahrzeuge mit Batterieantrieb ausgestattet werden sollten. In den Jahren 2020 und 2021 verkaufte VW pro Jahr jeweils neun Millionen Fahrzeuge. Ohne Veränderungen der Verkaufszahlen, der stofflichen Zusammensetzung sowie des Gewichts der Batterien zu beachten, würde das nach heutigem Stand bedeuten, dass

Volkswagen im Jahr 2030 knapp 800.000 Tonnen Aluminium, 250.000 Tonnen Nickel und mehr als 130.000 Tonnen Kupfer alleine für die Batterien benötigen würde. Da ein in Deutschland zugelassenes Auto durchschnittlich aktuell 1,6 Tonnen wiegt, kämen also noch in etwa das Dreifache an weiterem Rohstoffbedarf – vor allem Aluminium, Eisen/Stahl und Kupfer – hinzu.

Im Vergleich zum Materialbedarf der Ausbauziele der Windkraft, wie von der DERA berechnet, bedeutet das, dass allein die Batterien für die elektrischen Volkswagen im Jahr 2030 etwa zehnmal so viel Aluminium und Nickel benötigen könnten, wie der gesamte geplante Zubau an Windkraftanlagen in Deutschland. Auch der Kupferbedarf für die Elektromobilität von VW ist sehr hoch, sie entspricht allein für die Batterien der selben Menge, wie für den Zubau an Windkraft bis 2030.

Unter diesen Voraussetzungen ist zukünftig mit klaffenden Lücken auf dem Metallmarkt zu rechnen. Sollte die Autoindustrie ihr Ziel eines 1:1 Austausches der Verbrenner mit E-Autos forcieren, wird sie mit der Energiewirtschaft in Konkurrenz um die begehrten Metalle stehen. Preise werden in die Höhe schießen und damit die Energiewende deutlich verteuern. Hinzu kommen die sozialen und ökologischen Schäden, die durch verstärkten Bergbau insbesondere im Globalen Süden entstehen.³⁵

Abbildung 10 – Materielle Bestandteile einer 400 Kilogramm schweren Batterie von Volkswagen



Eigene Darstellung,
Daten: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/publications/more/battery-recycling-facts-and-figures-about-the-pilot-plant-in-salzgitter-605>

Fazit und Ausblick

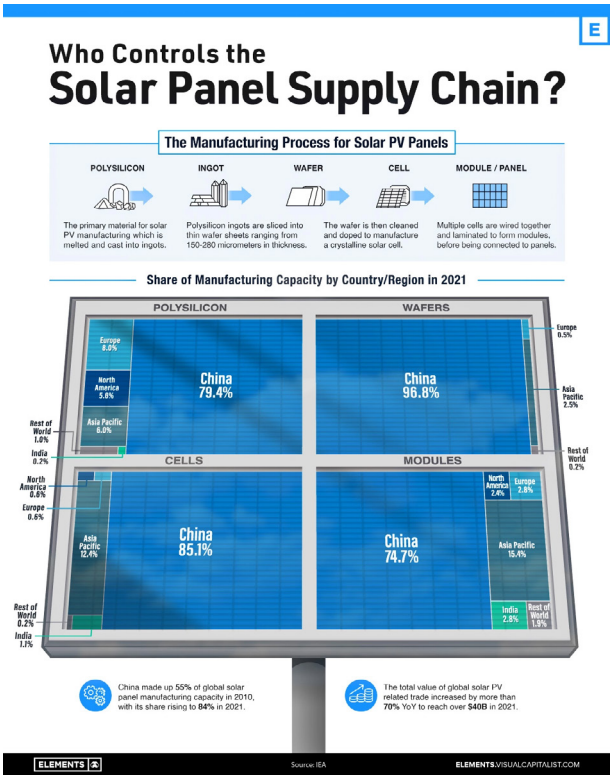


Abbildung 11 – Prozentuale Marktanteile entlang der PV-Lieferkette nach Ländern

Quelle: Visual Capitalist, August 30, 2022 by Niccolo Conte, Graphics/Design Sam Parker, Clayton Wadsworth <https://www.visualcapitalist.com/visualizing-chinas-dominance-in-the-solar-panel-supply-chain/>

Die Energieproduktion, egal ob fossil oder erneuerbar, benötigt große Mengen an Metallen. Um dem Klimawandel effektiv entgegenzuwirken, ist eine Abkehr von fossilen Brennstoffen auf Grund der aufgezeigten Treibhausgasemissionen unumgänglich. Für den Ausbau von erneuerbaren Energien werden wir Metalle benötigen, allerdings sind die Verbräuche im Vergleich zur (elektrischen) Automobilität kein Treiber für neue Bergwerke. Die Versorgung mit Metallen für die Energiewende steht demnach nicht im Widerspruch zu einer grundsätzlichen Debatte um die Reduktion des Primärrohstoffverbrauchs. Im Gegenteil, die prognostizierten, höheren Stromverbräuche würden auch einen Ausbau von fossiler Energieinfrastruktur notwendig machen und in vergleichbarem Maße Metalle benötigen.

Um die ökologischen, sozialen und Klimafolgen des Metallverbrauchs mittel- und langfristig zu reduzieren, braucht es eine Rohstoffwende. Ziel der Rohstoffwende ist die Reduktion des Metallbedarfs. Ein wichtiger Hebel sind sektorspezifische Ziele. Hier ist der Energiesektor anders gefordert als zum

Beispiel der Mobilitätssektor: Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist alternativlos und prioritär zu behandeln, während wir im Mobilitätsbereich neben der Umstellung auf E-Antrieb eine schnelle Abkehr vom motorisierten Individualverkehr brauchen. Ein Neuwagen in Deutschland wiegt durchschnittlich knapp 1,6 Tonnen und die Automobilproduktion verbraucht ein Vielfaches an Rohstoffen im Vergleich zu Windkraft- und PV-Anlagen. An der Notwendigkeit, den Metallverbrauch im Mobilitätssektor zu reduzieren, indem Anzahl und Größe der Autos drastisch reduziert werden, führt kein Weg vorbei. Ein erster Schritt wäre, dass Dienstwagenprivilegien, die aktuell große und schwere Autos steuerlich subventionieren, abgeschafft werden.³⁶

Ein weiterer Schritt wäre der Ausbau kreislaufwirtschaftlicher Ansätze mit einem auf Langlebigkeit, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit ausgelegten Produktdesign. Für eine bessere Kreislaufführung braucht es einen Ausbau der Datenerfassungs-, Sammel- und Sortierstrukturen von ausgedienten Anlagen. Hier braucht es auch einen Rahmen für die Produktion von Photovoltaik- und Windkraftanlagen. Die zu erwartenden, hohen Schrottaufkommen in den nächsten Jahren zeigen die Dringlichkeit. Dies betrifft auch die Solar- und Windkraftenergiebranche.

Zu guter Letzt dürfen die Materialbedarfe für erneuerbare Energietechnologien nicht zu Lasten der Menschen in den Rohstoffabbaugebieten gehen. Verpflichtende Regeln für menschenrechtliche und umweltbezogene Sorgfaltspflichten, Verlängerung von Wertschöpfungsketten und Schaffung von Arbeitsplätzen in den rohstoffreichen Regionen und möglichst hohe Menschenrechts-, Arbeitsrechts- und Umweltstandards bei Abbau und Verarbeitung von Rohstoffen sollten für die Grundstoffe unserer Energiewende gelten. Entwicklungspolitische Anliegen sind bei dem Abbau vieler Rohstoffe besonders zu berücksichtigen. Länder wie Indonesien (für Nickel) oder Mexiko und Bolivien (jeweils für Lithium) haben in den letzten Jahren versucht die Wertschöpfungsketten in ihren Ländern zu verlängern und so von dem Rohstoffreichtum zu profitieren. Dies würde auch helfen, die Abhängigkeit von China nicht nur bei den Rohstoffen, sondern auch bei den Vorprodukten und zum Beispiel den Solarzellen zu mindern (vgl. Abbildung 11). Auch könnte diese Wertschöpfungsverlängerung ein wichtiger Baustein sein, die Energiewende auch in Ländern des Globalen Südens voranzutreiben.

Tabellenanhang zu Abbildung 2

Abbildung 2 – Wichtigste Produzenten ausgewählter Rohstoffe

Metall	Land	Produktionsmenge 2021 (USGS-Schätzung)	%-Gesamtanteil der Länder an globaler Produktion	Erneuerbare Energie-technologie(n) (e.g., Windkraft, PV und/oder kleine Wasserkraftwerke)
Eisenerz (Usable ore)	Australian	900.000	34,6%	EET
	Brasilien	380.000	14,6%	EET
	China	360.000	13,8%	EET
	Indien	240.000	9,2%	EET
Bauxit	Australien	110.000	28,2%	EET
	China	86.000	22,1%	EET
	Guinea	85.000	21,8%	EET
	Brasilien	32.000	8,2%	EET
Kupfer	Chile	5.600	26,7%	EET
	Peru	2.200	10,5%	EET
	Kongo	1.800	8,6%	EET
	China	1.800	8,6%	EET
Silizium	China	6.000	70,6%	Photovoltaik
	Russland	580	6,8%	Photovoltaik
	Brasilien	390	4,6%	Photovoltaik
	Norwegen	350	4,1%	Photovoltaik
Silber	Mexico	5.600	23,3%	Photovoltaik
	China	3.400	14,2%	Photovoltaik
	Peru	3.000	12,5%	Photovoltaik
	Chile	1.600	6,7%	Photovoltaik
Indium	China	530	57,6%	Photovoltaik
	Südkorea	200	21,7%	Photovoltaik
	Japan	60	6,5%	Photovoltaik
	Belgien	60	6,5%	Photovoltaik
Seltene Erden	China	168.000	60,0%	Windkraft
	USA	43.000	15,4%	Windkraft
	Myanmar	26.000	9,3%	Windkraft
	Australien	22.000	7,9%	Windkraft
Kobalt	Kongo	120.000	70,6%	Windkraft
	Russland	7.600	4,5%	Windkraft
	Australien	5.600	3,3%	Windkraft
	Philippinen	4.500	2,6%	Windkraft
Molybdän	China	130.000	43,3%	Windkraft
	Chile	51.000	17,0%	Windkraft
	USA	48.000	16,0%	Windkraft
	Peru	32.000	10,7%	Windkraft

Metall	Land	Produktionsmenge 2021 (USGS-Schätzung)	%-Gesamtanteil der Länder an globaler Produktion	Erneuerbare Energie- technologie(n) (e.g., Wind- kraft, PV und/oder kleine Wasserkraftwerde)
Zink	China	4.200	32,3%	Windkraft
	Peru	1.600	12,3%	Windkraft
	Australien	1.300	10,0%	Windkraft
	Indien	810	6,2%	Windkraft
Nickel	Indonesien	1.000.000	37,0%	Windkraft
	Philippinen	370.000	13,7%	Windkraft
	Russland	250.000	9,3%	Windkraft
	Neukaledonien	190.000	7,0%	Windkraft
Chrom	Südafrika	18.000	43,9%	Windkraft
	Türkei	7.000	17,1%	Windkraft
	Kazakhstan	7.000	17,1%	Windkraft
	Indien	3.000	7,3%	Windkraft
Mangan	Südafrika	7.400	37,0%	Windkraft
	Gabun	3.600	18,0%	Windkraft
	Australien	3.300	16,5%	Windkraft
	China	1.300	6,5%	Windkraft

Bildnachweise und Quellen

Cover: Kindel Media, <https://www.pexels.com/de-de/@kindelmedia/>, Pexels, [Pexels Lizenz](#)

S. 6 „Große Haufen Bauxiterz, das zu Aluminium veredelt wird, befinden sich in einer Lagerzone für Bauxit. Guinea, Afrika“, <https://www.shutterstock.com/de/image-photo/large-piles-bauxite-ore-which-refined-1352489153>, Photo: Igor Grochev, <https://www.shutterstock.com/de/g/igorspb>, Shutterstock

S. 8 „Diese Mine frisst sich in den philippinischen Regenwald“ Photo: Michael Reckordt

S. 9 <https://pixabay.com/de/photos/zement-beton-konstruktion-arbeiter-406822/>, Photo: LEEROY Agency, <https://pixabay.com/de/users/life-of-pix-364018/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)

S. 11 <https://pixabay.com/de/photos/kraftwerk-industrie-schornstein-2411932/>, Photo: Benita Welter, <https://pixabay.com/de/users/benita5-5641102/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)

S. 18 <https://pixabay.com/de/photos/windkraft-land-schaft-windenergie-5116479/>, Photo: Hans-Jürgen Münzer, <https://pixabay.com/de/users/muenzi1958-16311813/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)

S. 19 <https://pixabay.com/de/users/muenzi1958-16311813/>, Photo: S. Hermann/F. Richter, <https://pixabay.com/de/users/pixel2013-2364555/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)

S.7 Abbildung 1

Verbrauchsprognose für Erneuerbare Energietechnologien und E-Mobilität, Bedarfssteigerung in Prozent, Eurometaux 2020 zu 2050, Eigene Darstellung, Daten: <https://eurometaux.eu/media/jsfne00y/final-slides-ku-leuven-study-presentation-25-4.pdf>

S. 8 Abbildung 2

Länderkarte mit den wichtigsten Produzenten ausgewählter Rohstoffe, Eigene Darstellung, Daten: U.S. Geological Survey, 2022, Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 2022 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.

S. 10 Abbildung 3

Materialbedarf für EE-Zubau im Vergleich zum Gesamtjahresverbrauch 2020 in Deutschland in Tonnen, Eigene Darstellung, Quellen: BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2021): Deutschland - Rohstoffsituation 2020. Hannover., DERA (2022a): Chart des Monats, März 2022. Rohstoffe für Windkraftanlagen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA (2022b): Chart des Monats, April 2022. Rohstoffe für Photovoltaikanlagen., <https://www.bvqlas.de/zahlen-fakten/>, Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland., <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022.pdf>, <https://www.wvmetalle.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=282762&token=b83d45f6a5de8ba60c9bfde1e17e91a0851da87a>, https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ-Zementindustrie_im_Ueberblick_2021_2022.pdf, <https://elements.visualcapitalist.com/all-the-metals-we-mined-in-one-visualization/>

S. 12/13 Abbildung 4

Metallbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh, Eigene Darstellung, Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021): Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

S. 12/13 Abbildung 5

Massenmetallbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh, Eigene Darstellung, Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021): Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

S. 14/15 Abbildung 6

Bedarf an kritischen Rohstoffen für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh, Eigene Darstellung, Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021): Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

S. 14/15 Abbildung 7

Gesamtrohstoffbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh, Eigene Darstellung, Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021): Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

S. 16/17 Abbildung 8

Treibhausgasemissionen ausgewählter Energietechnologien mit regionaler Variation in g CO₂ Äquivalenten/kWh, Eigene Darstellung, Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021): Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

S. 20/21 Abbildung 9

Kumulierter Lebenszyklus-Energiebedarf, in MJ/kWh, Eigene Darstellung, Daten des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) im Auftrag von UNECE (2021): Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe

S. 21 Abbildung 10

Materielle Bestandteile einer 400 Kilogramm schweren Batterie von Volkswagen, Eigene Darstellung, Daten: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/publications/more/battery-recycling-facts-and-figures-about-the-pilot-plant-in-salzgitter-605>

S. 22 Abbildung 11

Visual Capitalist Solarzellen, Quelle: Visual Capitalist, August 30, 2022 by Niccolo Conte, Graphics/Design Sam Parker, Clayton Wadsworth <https://www.visualcapitalist.com/visualizing-chinas-dominance-in-the-solar-panel-supply-chain/>

Endnoten

1 <http://www.vale.com/EN/sustainability/Pages/prote-tores-da-floresta.aspx>

2 Letícia Soares Peixoto Aleixo (2021): Zwei Jahre nach Brumadinho: die Bergbau-Verbrechen gehen weiter. Verfügbar unter: <https://blog.misereor.de/2021/01/21/zwei-jahre-nach-brumadinho-die-bergbau-verbrechen-gehen-weiter/>

3 <https://www.riotinto.com/sustainability/our-approach>

4 Reckordt, Michael (2019) Landraub für deutsche Autos. Verfügbar unter: <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2020/02/Landraub-f%C3%BCr-deutsche-Autos-web-18022020.pdf>

5 <https://www.bhp.com/about/our-future>

6 Barbesgaard, Mads; Whitmore, Andy (2021) Smoke and Minerals: How the mining industry plans to profit from the energy transition. Verfügbar unter: https://www.tni.org/files/publication-downloads/smoke_and_minerals_web.pdf

7 International Energy Agency (2021) The role of critical minerals in clean energy transition. Verfügbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>; Gregoir, Liesbet (2022): Metals for Clean Energy. Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven. Verfügbar unter: <https://euro-metalex.eu/media/jsfne00v/final-slides-ku-leuven-study-presentation-25-4.pdf>

8 European Commission (2022): Critical Raw Materials. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en

9 Reckordt, Michael (2021) Heißes Eisen – Für kaltes Klima? PowerShift e.V. Verfügbar unter: <https://power-shift.de/heisses-eisen-fuer-kaltes-klima/>

10 Levin-Nally, Estelle; Whitaker, Samir; Racionero-Gomez, Blanca; Pennes, Sebastien; Ranieri, Bernardo; Guimarães, João; Cauldwell, Andrew (2020): How to bring about forest-smart mining. strategic entry points for institutional donors. Levin Sources; Fauna & Flora International.

11 CAN Europe (2022): CAN Europe's transformation pathway recommendations for the steel industry. Verfügbar unter: https://caneurope.org/content/uploads/2022/06/CAN-Europe_2022_Recommendations_Steel_Transforming-the-sector.pdf

12 Hasanbeigi, Ali (2022): Global Steel Industry's GHG Emissions. Verfügbar unter: <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2021/global-steel-industrys-ghg-emissions>

13 HRW (2022): European Union: Rules for Batteries Should Cover Bauxite, Copper, Iron. Verfügbar unter: <https://www.hrw.org/news/2022/04/28/european-union-rules-batteries-should-cover-bauxite-copper-iron>

14 International Aluminium (2022): <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/>

15 Takuma Watari, Stephen Northey, Damien Giurco, Sho Hata, Ryosuke Yokoi, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima (2022) Global copper cycles and greenhouse gas emissions in a 1.5 °C world, Resources, Conservation and Recycling, Volume 179, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106118>. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921007266>

16 <https://nickelinstitute.org/en/blog/2022/may/how-to-calculate-ghg-emissions-from-nickel-production/>

17 Durgo, Mariana (2021): Most Miners are falling short of carbon cuts needed for UN goal. Verfügbar unter: <https://www.bloomberq.com/news/articles/2021-08-17/most-miners-are-falling-short-of-carbon-cuts-needed-for-un-goal?srnd=premium-europe>

18 Tokimatsu, Koji; Höök, Mikael; McLellan, Benjamin; Wachtmeister, Henrik; Murakami, Shinsuke; Yasuoka, Rieko; Nishio, Masahiro (2018): Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: Exploring metal requirements and the well-below 2 °C target with 100 percent renewable energy. In: Applied Energy 225, S. 1158–1175. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.047.

rements and the well-below 2 °C target with 100 percent renewable energy. In: Applied Energy 225, S. 1158–1175. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.047.

19 Stephan Singer et al. (2011): The Energy Report. 100% Renewable Energy by 2050. WWF International. Verfügbar unter: https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/part1_energy_report.pdf

20 Schiffer, Hans Wilhelm; Kienitz, Burkhard von (2020): Globale Szenarien und Prognosen zur Energieversorgung im Vergleich. Hg. v. Weltenergierrat – Deutschland e.V.

21 Fell, Hans Josef; Traber, Thure (2022): Deutschland braucht nicht mehr Windräder. In: Klimareporter, 11.02.2022. Online verfügbar unter <https://www.klimareporter.de/strom/deutschland-braucht-nicht-mehr-windraeder>

22 DERA (2022): Chart des Monats, März 2022. Rohstoffe für Windkraftanlagen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%202022_cdm_03_Energiewende_in_Deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=5

23 DERA (2022b): Chart des Monats, April 2022. Rohstoffe für Photovoltaikanlagen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%202022_cdm_04_Energiewende_in_Deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=2

24 Vestas (2022) Sustainability Report 2021. Verfügbar unter: https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/investor/reports-and-presentations/financial/2021/Sustainability_Report_2021.pdf.coredownload.inline.pdf

25 Öko-Institut (2021): Green technologies and critical raw materials. Strategies for a Circular Economy. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Green-technologies-and-critical-raw-materials.pdf>

26 UNECE (2021): Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe. Verfügbar unter: <https://unece.org/sed/documents/2021/10/reports/life-cycle-assessment-electricity-generation-options>

27 Ibid.

28 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022-strommix_2022_fin_bf.pdf

29 Gilsbach, Lucas (2020): Kupfer – Informationen zur Nachhaltigkeit. Hg. v. BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.

30 Loria, Patricia; Bright, Matthew B.H. (2021): Lessons captured from 50 years of CCS projects. In: The Electricity Journal 34 (7), S. 106998. DOI: 10.1016/j.tej.2021.106998.

31 Ullrich, Sven (2021): CO2-Emissionen von Photovoltaik und Windkraft sind gering. Verfügbar unter <https://www.erneuerbarenergien.de/energierecht/co2-emissionen-von-photovoltaik-und-windkraft-sind-gering>.

32 Hengstler, Jasmin; Russ, Manfred; Stoffregen, Alexander; Hendrich, Aline; Held, Michael; Briem, Ann-Kathrin (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Umweltbundesamt.

33 Gregoir, Liesbet (2022): Metals for Clean Energy. Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven.

34 Volkswagen Group Components (2021): Battery recycling: Facts and figures about the pilot plant in Salzgitter. Verfügbar unter: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/publications/more-battery-recycling-facts-and-figures-about-the-pilot-plant-in-salzgitter-605/download>

35 Groneweg, Merle (2021): Weniger Autos, mehr globale Gerechtigkeit. PowerShift e.V., Verfügbar unter: <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2021/09/Weniger-Autos-mehr-globale-Gerechtigkeit-2021-web02.pdf>

36 Ibid.

Impressum

Metalle für die Energiewende – Warum wir die Rohstoffwende und die Energiewende zusammendenken sollten

Herausgeber

PowerShift – Verein für eine ökologisch-solidarische Energie- & Weltwirtschaft e.V.
Greifswalder Str. 4, 10405 Berlin
Tel.: +49 30 420 85 295
E-Mail: info@power-shift.de
Web: <https://power-shift.de>

Autor*innen: Tshin Ilya Chardayre, Michael Reckordt, Hendrik Schnittker
Redaktion: Vanessa Fischer, Julia Albrecht
Layout, Satz/Reinzeichnung: Tilla Balzer I buk.design

Berlin, November 2022
© PowerShift e. V.

Alle Links in den End- und Fußnoten wurden am 31.10.2022 auf Gültigkeit überprüft.

PowerShift – Verein für eine ökologisch-solidarische Energie- & Weltwirtschaft e. V.
Unser Ziel ist eine ökologisch und sozial gerechtere Weltwirtschaft. Dafür setzen wir unsere Expertise in Handels-, Rohstoff- und Klimapolitik ein: Mit umfassenden Recherchen durchleuchten wir politische Prozesse, benennen die Probleme eines ungerechten globalen Wirtschaftssystems und entwickeln Handlungsalternativen. Um unsere Ziele zu erreichen, formulieren wir politische Forderungen, betreiben Informations- und Bildungsarbeit und schmieden starke Bündnisse – mit anderen Organisationen, sozialen Bewegungen und Bürger*innen. Gemeinsam mischen wir uns ein!

Wenn Sie über unsere Arbeit auf dem Laufenden bleiben wollen, dann abonnieren Sie unseren Newsletter: <https://power-shift.de/newsletter-bestellen>

Gefördert durch ENGAGEMENT GLOBAL mit Mitteln des



Für den Inhalt dieser Publikation ist allein PowerShift e.V. verantwortlich; die hier dargestellten Positionen geben nicht den Standpunkt von Engagement Global gGmbH und dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung wieder.

Diese Studie wurde von der European Climate Foundation unterstützt. Die Verantwortung für die in dieser Studie dargelegten Informationen und Ansichten liegt bei den Autor*innen. Die European Climate Foundation kann nicht für die Verwendung der darin enthaltenen oder ausgedrückten Informationen verantwortlich gemacht werden.



