

# Rohstoffwende und Energie- wende zusammen denken

Kreislaufführung von Erneuerbaren Energien ausbauen





# Rohstoffwende und Energie- wende zusammen denken

Kreislaufführung von Erneuerbaren Energien ausbauen

## Inhalt

---

- 4 Einleitung
- 8 Kreislaufwirtschaftliche Bestandsaufnahme – Wo stehen wir?
- 10 Kreislaufführung von Metallen
- 12 Einsparpotentiale durch Recycling und Kreislaufführung
- 15 Ressourceneffizienz und Suffizienz – Material sparsam einsetzen und den Gesamtbedarf senken
- 16 EET Branchen unter der Lupe – Wo Potentiale genutzt werden können
- 18 Solar
- 19 Wind
- 22 Innovative Geschäftsmodelle – Im Kreislauf Richtung Rohstoffwende
- 24 Forderungen: Rohstoffwende – jetzt!
  - 24 Rohstoffwende Jetzt
  - 24 Menschenrechtliche und umweltbezogene Sorgfaltspflichten
  - 24 Ausbau der Kreislaufwirtschaft
- 28 Bildnachweise und Quellen
- 29 Endnoten
- 31 Impressum

# Einleitung

---



4

**In Windkraft- und PV-Anlagen sind viele Metalle verarbeitet. Die Produktion von Metallen aus Erzen ist dabei sehr energieintensiv.** Foto: yasin hm, Unsplash

Nachdem in den letzten Jahren die Energiewende in Deutschland politisch ausgebremst wurde, zeigt der russische Angriffskrieg auf die Ukraine und die damit verbundenen geostrategischen Konflikte die Gefahren der großen Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen. Die ausbleibenden Gas-Lieferungen aus Russland haben die deutsche Politik und Industrie schlecht vorbereitet getroffen, große Preisanstiege für Privat- und Industriekunden waren die Folge. Zwar reagierte die Bundesregierung mit schnellem Ausbau von LNG-Terminals (Liquified Natural Gas, Flüssigerdgas) und der Suche nach neuen Rohstoffquellen für Erdöl, Erdgas und Steinkohle, damit drohen aber neue Abhängigkeiten zu entstehen und alte verfestigt zu werden. Gleichzeitig hat Finanzminister Christian Lindner (FDP) die Unterstützung des Ausbaus erneuerbarer Energien betont: „Wir setzen auf Freiheitsenergien.“ Dieser Ausbau von Wind- und Solaranlagen, der nun von Wirtschaftsminister Robert Habeck (Grüne) vorangetrieben wird,

hat einen großen Materialbedarf. Eine Windkraftanlage besteht zum Beispiel aus bis zu 80 Tonnen Stahl und acht bis 30 Tonnen Kupfer. In Photovoltaikanlagen werden 170 Tonnen Eisen und 4,5 Tonnen Kupfer pro MW installierter Leistung verbaut.<sup>1</sup> Einige der benötigten Rohstoffe importiert die deutsche Industrie bisher aus Russland, wie zum Beispiel Kupfer, Eisen, Nickel und Aluminium.<sup>2</sup>

Auch die Europäische Union bemüht sich, sowohl die Dekarbonisierung als auch die Unabhängigkeit von Rohstoffen aus nicht demokratischen Staaten voranzutreiben. Die Umsetzung des europäischen Green Deal,<sup>3</sup> die Einführung von menschenrechtlichen und umweltbezogenen Sorgfaltspflichten<sup>4</sup> sowie der Ausbau der Kreislaufwirtschaft<sup>5</sup> weisen in die richtige Richtung. Gleichzeitig benötigt es, wenn sich die Europäische Union zukunftsfähig aufstellen möchte, Reduktionsziele für den aktuell sehr hohen Metallverbrauch. Gerade der Bergbau und die Verarbeitung von



**Diese Mine fördert Eisen inmitten des brasilianischen Carajás-Nationalparks.**  
Foto: Marcelo Correa, Flickr.com

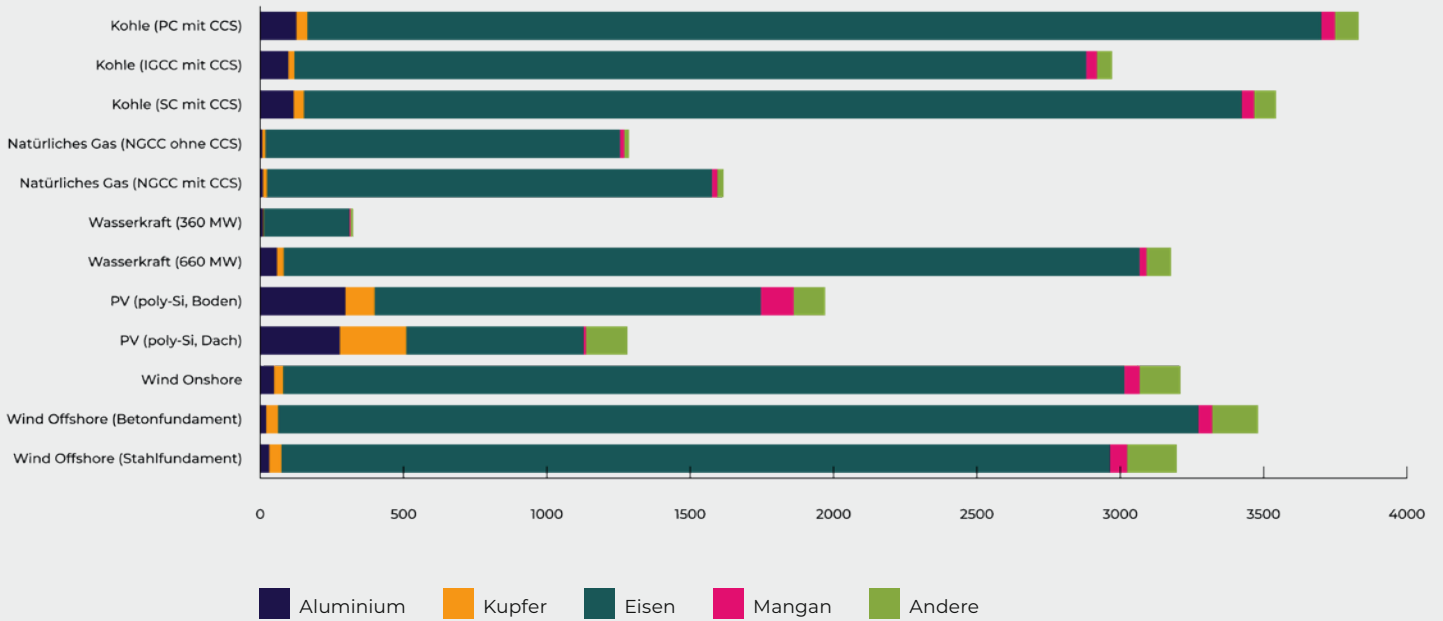
Primärrohstoffen sind häufig verbunden mit menschenrechtlichen, aber auch klima- und umweltpolitischen Risiken.

Beispiele für Menschenrechtsverletzungen und Umweltzerstörungen durch Bergbau lassen sich auf allen Kontinenten finden. So kommen fast alle deutschen Bauxitimporte allein aus Guinea. Eine Mine in der Region Boké wurde mit Unterstützung der Bundesregierung erweitert. 105 Familien wurden dafür inmitten der Corona-Pandemie im Jahr 2021 auf karges Land mit undichten Häusern umgesiedelt. Die Böden wurden vorher nicht ausreichend rekultiviert. Für die Wasserversorgung der umgesiedelten Bevölkerung stehen gerade einmal sechs manuelle Wasserpumpen zur Verfügung. An Landwirtschaft und somit eigenen Erwerb ist nicht zu denken.

Das zivilgesellschaftliche Netzwerk Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL, Beobachterstelle für

Bergbaukonflikte in Lateinamerika) berichtet, dass Bergbauprojekte in Peru der größte Auslöser für soziale Konflikte seien und Kupferminen einen erheblichen Anteil daran hätten.<sup>6</sup> Proteste richten sich zum Teil gegen die Folgen des Abbaus für Mensch und Umwelt, andere gar grundsätzlich gegen Bergbau. Immer wieder werden die Proteste kriminalisiert und zum Teil blutig niedergeschlagen.<sup>7</sup> Ebenso gibt es in den Philippinen Widerstand gegen den Kupferbergbau. Die größte Kupfer-Gold-Lagerstätte Südostasiens steht hier im Mittelpunkt eines blutigen Konflikts.<sup>8</sup> Seit mehr als 30 Jahren versuchen australische, schweizerische und lokale Bergbaukonzerne in Tampakan, Mindanao, eine Mine zu errichten. Doch der massive Protest der indigenen Gemeinschaften, der Zivilgesellschaft und der katholischen Kirche war bisher erfolgreich. Dafür verloren mehr als ein Dutzend Soldaten und Indigene im Konflikt ihr Leben, darunter auch Juvy Cacion und ihre beiden Söhne.<sup>9</sup> Sie kamen im Morgengrauen des 18. Oktober

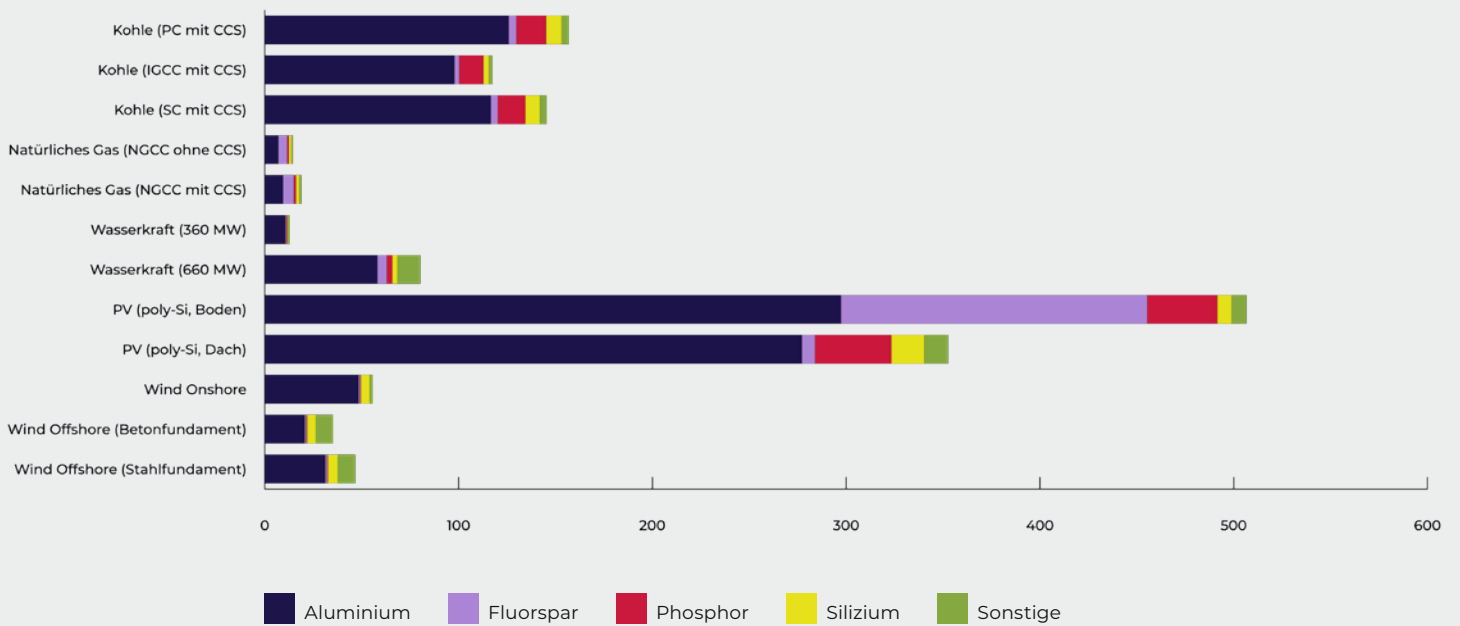
Abbildung 1 – Metallbedarf für ausgewählte Energietechnologien in g pro MWh



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

6

Abbildung 2 – 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

2012 bei einem Angriff des Militärs zu Tode. Ziel des Angriffs war ihr Ehemann und Vater der gemeinsamen Söhne Daguil Capion, denn er ist einer der Anführer der Proteste. Auch ihm wurden Straftaten vorgeworfen, sodass er sich nach dem Tod seiner Frau und der Söhne stellte, aber aus Mangel an Beweisen für die Beteiligung an Angriffen auf Soldaten wieder freigelassen wurde.<sup>10</sup>

Insgesamt wurden in den letzten zehn Jahren 1.733 Umweltschützer\*innen und Landverteidiger\*innen ermordet, wie die britische NGO Global Witness dokumentiert. Bergbau zählt zu den gefährlichsten und risikoreichsten Industriesektoren, wenn man sich gegen ihn stellt.<sup>11</sup> Zudem birgt der Bergbau weitere, ökologische Risiken. Der Wasserverbrauch und Chemikalieneinsatz ist immens, geringere Erzgehalte in zukünftigen Minen erhöhen die Risiken. Zudem ist der Bergbau auch für einen Teil der Entwaldung in vielen Regionen verantwortlich. Dazu kommen noch bis zu 15 Prozent der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Erz-Bergbau und die Verarbeitung der Primärmetalle.<sup>12</sup>

Eine sozial-ökologische Transformation der Wirtschaft und eine Rohstoffwende mit klaren Reduktions- und Kreislaufnutzungszielen sind daher notwendig.<sup>13</sup> Auch wenn der Ausbau von Wind- und Solaranlagen, anders als politisch argumentiert, nicht der größte Treiber für den hohen Metallverbrauch ist,<sup>14</sup> muss sich die Erneuerbare-Energien-Industrie mit Rohstoffbeschaffung, Rohstoffnutzung sowie Abfallaufkommen und Kreislaufnutzung der Rohstoffe auseinandersetzen. In unserer vor kurzem veröffentlichten Studie „*Metalle für die Energiewende*“ haben wir untersucht, welche metallischen Rohstoffe für die deutsche Energiewende in welchem Umfang benötigt werden. Dabei sind zwei Dinge deutlich geworden: Erstens unterscheidet sich die Metallintensität von Erneuerbaren Energien nicht wesentlich von der Energiegewinnung mit fossilen Rohstoffen (vgl. Abbildung 1). Im Gegenteil, die Metallintensität von Solaranlagen ist zum Beispiel deutlich geringer als der Metallverbrauch von Kohlekraftwerken. Bei den kritischen Rohstoffen<sup>15</sup> benötigen Windkraftanlagen zum Beispiel deutlich weniger als Kohlekraftwerke (vgl. Abbildung 2). Die Ergebnisse basieren auf einer Lebenszyklusanalyse verschiedener Energieproduktionstechnologien durch das Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) für die UNECE-Studie „*Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources*“. Zweitens sind die Bedarfe für den Ausbau von Windkraft- und Solaranlagen im Vergleich zur Elektromobilität gering. Allein die Batterien für elektrische Volkswagen bräuchten bei gleichbleibenden

PKW-Verkaufszahlen im Jahr 2030 etwa achtmal so viel Aluminium und Nickel wie zum Vergleich der gesamte geplante Zubau an Windkraftanlagen in Deutschland von 2022 bis zum Jahr 2030.<sup>16</sup>

Obwohl die Metallbedarfe von Windkraft- und Solaranlagen geringer sind als die Bedarfe der Elektromobilität, sind sie in Summe dennoch hoch. Zur Elektromobilität gibt es allerdings praktikable Alternativen, zum Beispiel durch den Ausbau des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs oder der Bevorzugung anderer Verkehrsarten, wie zum Beispiel Fahrrad- oder Fußgänger\*innenverkehr. Das ist bei Erneuerbaren anders. Hier werden wir auch zukünftig metallische Rohstoffe nutzen müssen. Umso wichtiger ist es, dass Windkraft- und Solaranlagen ihre Kreislaufpotenziale nutzen, um so den Primärrohstoffverbrauch zu reduzieren. In dieser Studie untersuchen wir die Potenziale und den aktuellen Stand von Rezyklateinsatz im Bereich Erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa. Wie werden Recycling- und Kreislaufführungspotenziale derzeit erforscht und genutzt? Welche wirtschaftlichen, politischen und rechtlichen Hebel gibt es entlang der Produktionsketten, um die Kreislaufführung auszubauen?

# Kreislaufwirtschaftliche Bestandsaufnahme – Wo stehen wir?

8



Ungenutzte Lagerhallen und Maschinen, vergessene Kabel und Röhren, kleine Elektronikgeräte in Schubladen und Regalen – die Liste der nicht mehr genutzten Metalle ist lang. Foto: Peter Herrmann, Unsplash

Unter Kreislaufwirtschaft verstehen wir eine ganzheitliche volkswirtschaftliche Praxis, in der (möglichst) keine Abfälle mehr anfallen. Das bedeutet, alle Materialien werden in geschlossenen Kreisläufen immer wiederverwendet. Metalle bieten auf Grund ihrer Eigenschaften besonders großes Potenzial für eine solche zirkuläre Ökonomie und werden bereits heute verhältnismäßig oft recycelt. Unser Recyclingverständnis beinhaltet, dass die zurückgewonnenen Metalle gleichwertig wieder in zukünftige Produktionsprozesse eingeführt und nicht im Downcycling genutzt werden, also zu einem minderwertigen Produkt werden. Dieser systemische Lösungsrahmen steht im Kontrast zum aktuell bestehenden sogenannten linearen Wirtschaftsmodell, in welchem Produkte von Produktion über Gebrauch direkt zur Entsorgung übergehen. Die Idee Produktion und Lebensende miteinander zu verbinden („cradle to cradle“ Prinzip) stammt aus den 1990er Jahren. Seither wird die Kreislaufführung weiterführend konzipiert und ihre Umsetzung in Industrie und Gesellschaft erprobt.<sup>17</sup>

Die europäische Kommission definiert Circular Economy weitgehender als die deutsche Definition von Kreislaufwirtschaft: „Ziel einer Kreislaufwirtschaft ist es, den Wert von Produkten, Materialien und Ressourcen so lange wie möglich zu erhalten, indem sie am Ende ihrer Nutzungsdauer in den Produktkreislauf zurückgeführt werden, und gleichzeitig möglichst wenig Abfall erzeugt wird.“<sup>18</sup> Das 2012 verabschiedete deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz versteht sich dagegen eher als „Pflicht zur Abfallvermeidung“ und sieht die „Erzeuger oder Besitzer von Abfällen [...]“ zur Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet. Die Verwertung von Abfällen hat Vorrang vor deren Beseitigung.<sup>19</sup> Bisher mangelte es an Verständnis, dass es sich auch um Rohstoffe handelt und diese rohstoffpolitisch flankiert möglichst lange in einer adäquaten Nutzung gehalten werden und nicht nur im Sinne von Abfallvermeidung im System gehalten werden. Daher liegt in dem bisherigen Kreislaufwirtschaftsgesetz der Fokus auf einer Erhöhung der Recyclingquoten, was das Downcycling miteinschließt. Erst mit dem Koalitionsvertrag von SPD, Grünen und FDP von 2021 deutet sich ein ganzheitlicheres



**Nur gut ein Drittel der Elektronikgeräte werden recycelt. Die überwiegende Mehrheit wird illegal exportiert oder landet nicht registriert im Hausmüll und auf Halden.** Foto: Emmet / pexels.com

Verständnis der zirkulären Ökonomie an, die eine grundlegende Veränderung von Produktionsprozessen und Konsumangewohnheiten nach sich ziehen könnte.<sup>20</sup>

Grundsätzlich ist die Kreislaufführung von Metallen nicht verlustfrei. An verschiedenen Stellen in der Kreislaufführung – Sammlung, Sortierung, Trennung, Aufarbeitung, Raffinierung und Schmelze, Vorproduktion, Produktion, Nutzung – gibt es Verluste. Metalle dissipieren, das bedeutet, diese „verlorenen Metalle“ entziehen sich der zukünftigen menschlichen Nutzung, da der Energieaufwand, sie zurückzugewinnen zu hoch oder die Rückgewinnung technisch unmöglich ist. Ein Beispiel dafür sind sich durch Abrieb ablösende Feinpartikel, die sich in der Umwelt verteilen. So werden zum Beispiel Platinpartikel aus Katalysatoren in kleinen Mengen auf Straßen verteilt. Diese Partikel sind aufgrund des riesigen Energieaufwandes, der zu betreiben wäre, nicht zurückgewinnbar und das Platin dissipiert. Ähnliches gilt für Kleinmengen in elektronischen Geräten, zum Beispiel Nanopartikel, die vermischt mit anderen Abfällen auf Mülldeponien landen. Eine auch nur

annähernd hundert-prozentige Kreislaufführung von Materialien ist daher nicht möglich. Daraus resultiert, dass wir weiterhin Primärrohstoffe in das System einpflegen müssen, um den Bestand zu halten.

Nichtsdestotrotz gibt es viele Ansätze und Möglichkeiten, den Primärrohstoffverbrauch deutlich zu reduzieren. Lösungsmöglichkeiten liegen in der längeren Nutzungsdauer, Reparierbarkeit oder in einem auf Materialrückgewinnung ausgelegten Produktdesign. Wichtig ist, dass es nicht eine (!) Lösung gibt und teilweise Zielkonflikte bestehen. Schonende Produktionsverfahren sowie die effiziente Sammlung, Trennung und Wiedergewinnung von Metallen helfen, die Recyclingquote zu erhöhen und dadurch den Primärverbrauch zu reduzieren. Gleichzeitig führt eine längere Nutzung oder einfache Reparierbarkeit neben Ressourceneinsparungen auch dazu, dass weniger Material zum Recycling zur Verfügung steht.

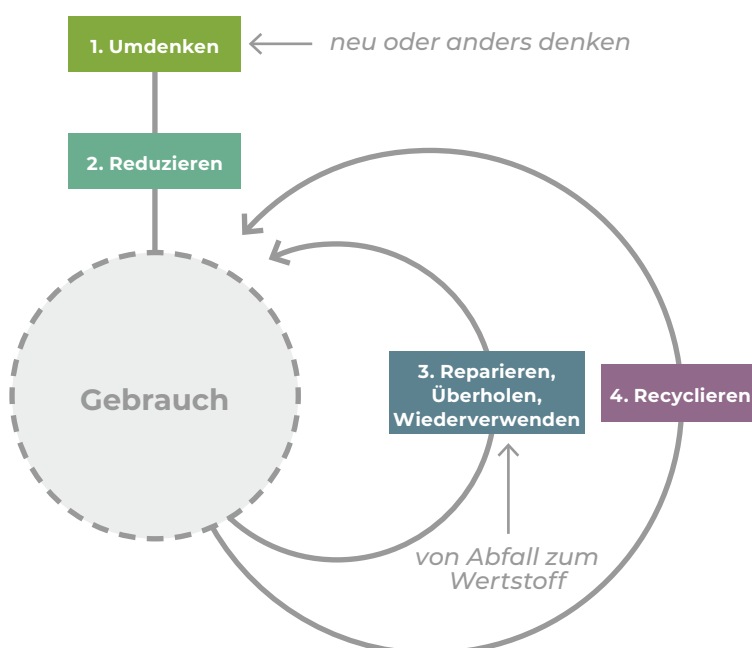
# Kreislaufführung von Metallen

Die Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft lassen sich im Metallbereich besonders gut anwenden. So haben sich einige Forschungsinstitute darunter Metabolic Institute, Copper 8 und die Universität Leiden im Bericht *Towards a circular energy transition* mit vier essenziellen Schritten für Kreislaufführung von Metallen in Erneuerbaren beschäftigt: Umdenken, Reduzieren, Reparieren und Recyceln. Die untenstehende Abbildung 3 illustriert, in welchen Phasen des Lebenszyklus eines Metalls sie greifen.

**Umdenken:** Das erste Prinzip ist die Reduzierung der Metallbedarfe durch die Anwendung von Methoden, die in großem Maßstab Energie einsparen. Die gegebenenfalls notwendige Umgestaltung des Energiesystems reduziert den Bedarf an nachhaltiger Stromerzeugung, Energietransport und -speicherung, was wiederum auch die Metallbedarfe für diese Anwendungen verringert.

**Reduzieren:** Das zweite Prinzip umfasst die Umstellung bestehender auf neue Technologien, die weniger kritische Metalle enthalten. Das lässt sich zum Beispiel in Windturbinen oder Systembatterien umsetzen.

Abbildung 3 – Kreislaufführungshebel entlang des Lebenszyklus von Metallen



Quelle: Metabolic Institute, Copper 8, Polaris Sustainability und Quintel (2021): Exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition.

**Reparieren, aufarbeiten und umfunktionieren:** Das dritte Prinzip ist die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und einzelnen Teilen. Dazu zählt zum Beispiel die Wiederverwendung von Solarzellen, Permanentmagneten in Windkraftanlagen oder Batterien für Elektrofahrzeuge.

**Recyceln:** Das vierte und letzte Prinzip ist die Rückgewinnung von Rohstoffen am Ende des Lebenszyklus eines Produkts.<sup>21</sup>

Für unterschiedliche Energiewende-Metalle kann der Verbrauch über diese Hebel gesenkt werden (siehe Abbildung 4). Die Massemetalle Aluminium, Kupfer und Eisen sind in der Abbildung nicht aufgeführt, haben aber mengenmäßig größere Anteile an der Produktion von erneuerbaren Energietechnologien (EET) und daher sehr hohe Kreislaufführungspotenziale.

In einer Studie stellt die europäische Umweltbehörde (European Environment Agency; EEA) ein Modell für ein kreislaufgeführtes Energiesystem vor. In diesem werden entlang des Lebenszyklus von EET zirkuläre Optimierungen eingesetzt.<sup>22</sup> Bei dieser Optimierung wird an der Produktionsquelle angesetzt, sprich bei den Materialien, bei denen Primärrohstoffnutzung und Extraktion von Rohstoffen reduziert werden sollen. Bei der Konzeption soll stärker zirkuläres Design eingesetzt werden, wodurch Nachhaltigkeit und Recyclingfähigkeit verstärkt und die Verwendung toxischer Substanzen auf ein Minimum reduziert werden soll. Dieses Glied in der Kreislaufführungskette ist grundlegend, denn es setzt die Bedingungen für alle weiteren Schritte.

Erst danach werden Produktion und Verteilung betrachtet. Dafür hebt die EEA effiziente und ressourcenschonende Produktion sowie innovative Geschäftsmodelle, die beispielsweise auf Leasing statt Eigentum basieren, in den Vordergrund. Im weiteren Verlauf der Publikation gehen wir auch noch auf Kritik am Modell des Leasings ein.

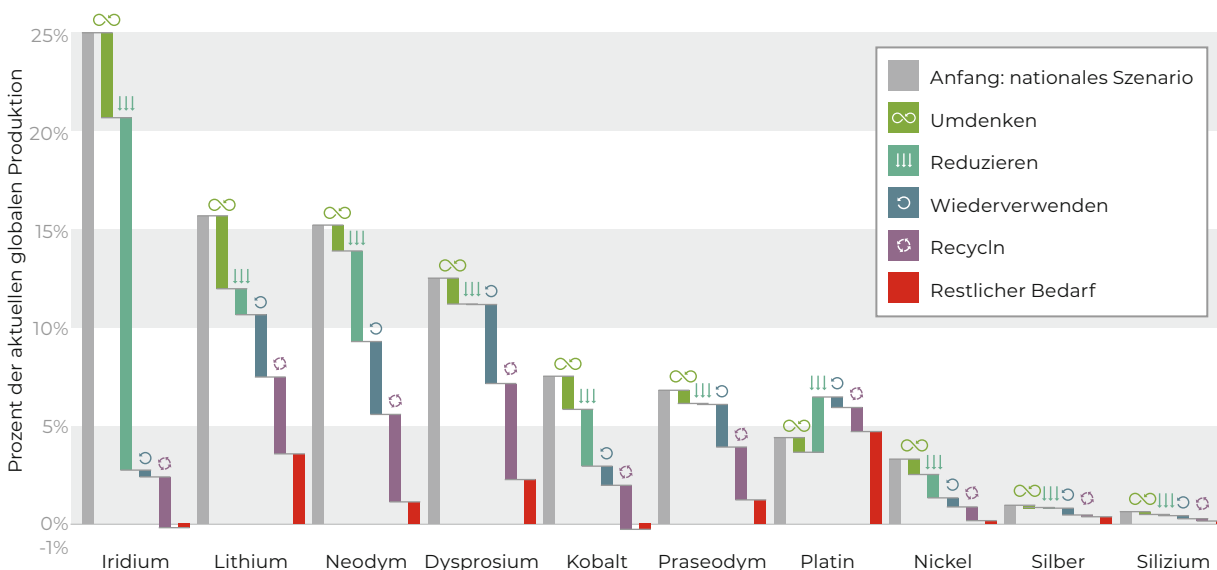
Während der Verwendung sind den Lebenszyklus begleitende Services für Reparatur, Upgrades und Instandhaltung wichtig, um eine möglichst lange Verwendung zu ermöglichen. Wenn das Ende des ersten Lebenszyklus dann erreicht ist, müssen effektive Sammel- und Sortierinfrastruktur, Recycling und Materialaufbereitung sowie Rückführung

in Produktionsprozesse gewährleistet sein, um den Materialkreis zu schließen.<sup>23</sup>

Die EU hat über die letzten Jahre eine Reihe an Kreislaufwirtschaftsgesetzen beschlossen, zuletzt den Circular Economy Action Plan (CEAP) im Jahr 2015. Seit dem Jahr 2022 werden darüber hinaus Kreislaufführungsstandards für unterschiedliche Industriegewerbe ausgearbeitet. Dies umfasst unter anderem Textilien, Chemikalien, elektronische Geräte, Batterien und Fahrzeuge. Demgegenüber liegt die momentane Kreislaufführungsrate von Materialien in der EU bei nur 11,8 Prozent.<sup>24</sup> Das liegt zum Teil auch daran, dass Hersteller über wenig Daten zur Kreislaufführung entlang ihrer Lieferkette verfügen. Verpflichtende Lebenszyklusanalysen könnten helfen, Kreislaufpotentiale zu identifizieren und gleichzeitig einen Überblick über Treibhausgasemissionen zu bekommen, die über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts anfallen. Einige Forschungsprojekte zu Kreislaufführungspotenzialen für Erneuerbare Energietechnologien beziehen sich auf die Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE),<sup>25</sup> die mittlerweile auch für Solarmodule gilt. Seit der Aufnahme in den Anwendungsbereich sind die Solarhersteller den gesetzlichen Anforderungen unterworfen. Das beinhaltet die Verantwortlichkeit für die Registrierung- und Produktrücknahme im Rahmen der nationalen Systeme.

Ein anderes konkretes Beispiel für Kreislaufführungsprinzipien in der EU sind die Öko-design-Richtlinien (Design for Recycling oder D4R), die erläutern, wie Produkte konzipiert werden sollen: Schon bei der Konzeption müssen Designer den Abfallstrom des Produktes bedenken und so planen, dass das Produkt oder einzelne Komponenten gesammelt, sortiert und effektiv unter höchsten Standards recycelt werden können. Auch wenn der Fokus hier momentan noch hauptsächlich auf Plastikprodukten liegt, sollte geprüft werden, inwieweit dieses Konzept auf metallische Produkte übertragbar wäre. Wichtig ist, dass D4R Prinzipien produkt- und materialspezifisch entwickelt werden und gleichzeitig auf die lokalen bzw. regionalen Rahmenbedingungen angepasst sind. Denn um die Richtlinie erfolgreich umsetzen zu können, muss sichergestellt werden, dass das Material bzw. Produkt am Ende des Zyklus im lokalen Abfallmanagement verarbeiten lässt. Seitens nationaler Politik bedeutet das aber auch, dass lückenlose und flächendeckende zugängliche Prozesse für effiziente Sammlung, Trennung und Wiedergewinnung von Materialien gewährleistet und gefördert werden müssen.

Abbildung 4 – Kreislaufführungshebel von unterschiedlichen Metallen



Quelle: Metabolic Institute, Copper 8, Polaris Sustainability und Quintel (2021): Exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition.

# Einsparpotentiale durch Recycling und Kreislaufführung

Für eine nachhaltige Rohstoffnutzung im Einklang mit Klima-, Umweltschutz- und Menschenrechtszielen braucht es eine Rohstoffwende. Diese beinhaltet die deutliche Reduktion des Verbrauchs von Primärrohstoffen. Die Wiederverwendung von metallischen Rohstoffen kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Denn die Ausweitung des industriellen Einsatzes von Rezyklaten und Sekundärmetallen spart enorme Mengen an Primärressourcen. Gleichzeitig sinken der mit der Förderung, Aufbereitung und dem Transport verbundene Energieverbrauch, die Umweltschäden und die menschenrechtlichen Risiken entlang der oft intransparenten bergbaulichen Lieferketten.

Eine Studie der KU Leuven im Auftrag des europäischen Bergbauverbands Eurometalex hat die Einsparungspotenziale von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Rezyklateinsatz verdeutlicht (vgl. Abbildung 5). Vor allem die Einsparung von 96 Prozent bei Aluminium ist bemerkenswert, da sie verdeutlicht wie energieintensiv die Verarbeitung von Bauxit zu Aluminium in der Primärproduktion ist. Obwohl Bauxit und Aluminium nur 1,9 Prozent der im Jahr 2019 bergbaulich gewonnenen Metalle ausmachen,<sup>26</sup> trägt die Verarbeitung mit zwei<sup>27</sup> bis drei<sup>28</sup> Prozent zu den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.

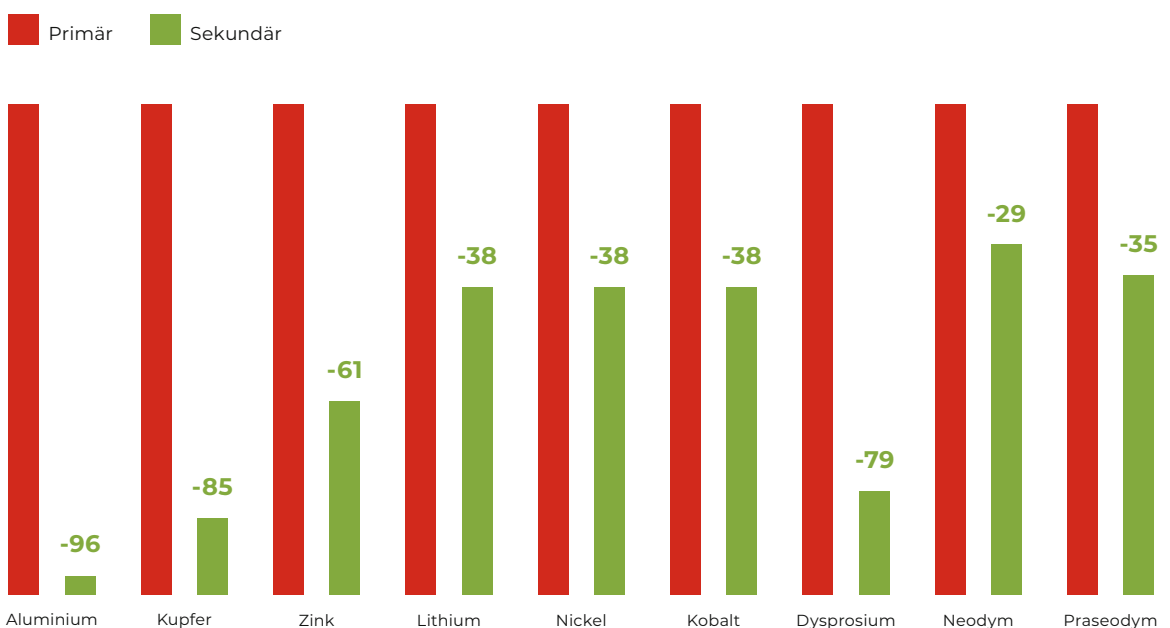
Die Energieeinsparung und daraus resultierende massive Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes durch Verwendung von Sekundärmaterial, würde sowohl das Klima entlasten als auch den Abbaudruck auf einige Bergbauregionen reduzieren.

Auch für die Stahlproduktion bestehen große Einsparpotentiale. Eisenerz, der Grundstoff für Stahl, macht im Jahr 2019 93,6 Prozent der Masse bergbaulich gewonnener Metalle aus.<sup>29</sup> Die Weiterverarbeitung zu Stahl hat einen Anteil von acht<sup>30</sup> bis elf<sup>31</sup> Prozent der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Mit diesen Mengenanteilen ist eine kreislaufwirtschaftliche Transformation gerade im Stahlsektor erstrebenswert. Laut einer Studie von Clare Broadbent würden durch die Verwendung von Stahlschrott anstelle von bergbaulich gewonnenem Eisenerz 73 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen, 64 Prozent der Prozessenergie und 90 Prozent des Rohmaterials eingespart.<sup>32</sup>

Zusammen mit Kupfer (bis zu 85 Prozent CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Recycling),<sup>33</sup> werden diese beiden Metalle für die Energiewende mengenmäßig am meisten gebraucht (vgl. Abbildung 1 auf Seite 6). Eine Erhöhung der Recyclingquoten hätte auf Grund der Mengen einen besonders großen Effekt für Mensch und Klima.

12

Abbildung 5 – CO<sub>2</sub> Einsparungen (in %) von Metallen und ihren Rezyklaten im Vergleich



Eigene Darstellung.

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

## Produktbezogene Vorgaben für Recycling und Rezyklateinsatz – das Beispiel der Batterieverordnung

Die Europäische Union überarbeitet aktuell im Rahmen des European Green Deal die europäische Batterieverordnung. Voraussichtlich bis Ende 2022 werden sich Mitgliedsstaaten, EU-Kommission und EU Parlament auf neue Standards in der Batterieproduktion geeinigt haben. Die Standards sollen als Grundlage für weitere produktbezogene Standards dienen, die im Rahmen des Green Deal entwickelt werden sollen. Dazu könnten auch Vorgaben für Hersteller von Solar- und Windkraftanlagen fallen. Daher lohnt sich ein Blick in den Verordnungsvorschlag der EU-Kommission aus dem Dezember 2020. In ihm schreibt die EU Mindestsammelvorgaben für Gerätealtbatterien für die Mitgliedsstaaten vor. Bis zum 31. Dezember 2025 sollen 65 Prozent, bis zum 31. Dezember 2030 70 Prozent aller

Batterien gesammelt werden. Auch die Verwertungsquoten der Rohstoffe aus diesen Batterien sollen sukzessiv gesteigert werden und im Jahr 2030 auf 95 Prozent für Kobalt, Nickel, Kupfer und Blei angestiegen sein. Für Lithium soll er immerhin 70 Prozent betragen, wobei dieser Wert noch umstritten ist, da vor allem die EU Parlamentarier\*innen diesen Wert für zu niedrig einstufen. Ab dem 1. Januar 2030 gelten auch Rezyklateinsatzbestimmungen. In Batterien soll dann mindestens 4 Prozent des Lithiums und Nickels sowie 12 Prozent des Kobalts und 85 Prozent des Bleis aus zurückgewonnenen Produkten stammen. Dieser Wert soll ab dem 1. Januar 2035 auf 10 Prozent bei Lithium, 12 Prozent bei Nickel, 20 Prozent bei Kobalt und 85 Prozent bei Blei ansteigen.<sup>66</sup>

In der Realität sind die aktuellen Recyclingkapazitäten und -technologien in Europa sowie weltweit deutlich unterentwickelt. Dabei ließ sich laut European Climate Foundation (ECF) zum Beispiel ein Großteil des europäischen Stahlbedarfs durch Sekundärproduktion decken:

*„Unsere Analyse zeigt, dass die sekundäre Stahlproduktion bis 2050 bis zu 85 Prozent des Stahlbedarfs der EU decken könnte, wenn eine Herabstufung von Stahl vermieden wird. (...) Um diese Chance zu nutzen, sind erhebliche Veränderungen erforderlich, um die Mengen- und Qualitätsverluste von einem Verwendungszyklus zum nächsten zu minimieren. Die Verunreinigung von Stahl mit Kupfer könnte eine besondere Herausforderung darstellen. Auch die sekundäre Stahlproduktion in der EU müsste umstrukturiert werden, während die fortgesetzte Primärproduktion stärker auf den Export ausgerichtet werden müsste. Die Branche steht jedoch schon jetzt vor großen Herausforderungen: weltweite Überkapazitäten, nachlassende Rentabilität, hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen und drohende Zölle. Eine Kreislaufwirtschaft für Stahl bietet einen vielversprechenden Weg in die Zukunft indem sie die Produktivität steigert und die EU zum Pionier und Vorreiter bei den Technologien der Zukunft.“<sup>34</sup>*

Dadurch könnten in der Stahlproduktion massiv CO<sub>2</sub>-Emissionen gespart werden. Auch für Aluminium bestätigt die ECF große Emissionsminderungspotentiale durch verstärkte Kreislaufführung.<sup>35</sup>

13



Ein Großteil des Stahlbedarfs könnte aus Recycling kommen und würde Mensch, Umwelt und Klima entlasten. Foto: yasin hm, Unsplash



Recycler Schrott reduziert CO<sub>2</sub>-Emissionen und Bergbau.  
Foto: PowerShift e.V.

## Ressourceneffizienz und Suffizienz – Material sparsam einsetzen und den Gesamtbedarf senken

---



Notwendige Maßarbeit, das Aufbauen von PV-Anlagen.  
Foto: Newpowa, Unsplash

Über die letzten Jahrzehnte haben Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien von zahlreichen Investitionen und gezielten Subventionen profitiert. Die jungen Technologien haben in den Bereichen Effizienz, Flächen- und Ressourcensparsamkeit große Fortschritte gemacht.

Derzeit haben die meisten im Handel erhältlichen PV-Paneele einen Wirkungsgrad von etwa 20 bis 22 Prozent bei der Umwandlung von Sonnenlicht in Strom. Prototyp-Solarzellen aus dem Labor haben bei nicht konzentriertem Sonnenlicht einen Wirkungsgrad von 39 Prozent und bei konzentriertem Sonnenlicht von 47 Prozent erreicht. Bei kommerziellen Solarzellen besteht also noch erheblicher Spielraum für Verbesserungen.<sup>36</sup>

Außerdem lassen sich durch die Herstellung von Photovoltaik Modulen innerhalb Europas CO<sub>2</sub>-Emissionen von EET stark reduzieren, nicht zuletzt wegen geringeren Ausstößen durch Transport. Durch die Reduktion von Importen aus Ländern wie China, in denen die Anlageproduktion von stark fossilen Energiemärkten abhängig ist, können nach Berechnungen des Fraunhofer Instituts abermals bis zu 40 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Solaranlagenproduktion eingespart werden.<sup>37</sup>

Die Weiterentwicklung von Windkraftanlagen erlaubt mittlerweile ebenfalls, dass weniger Turbinen die gleiche Menge Strom erzeugen. In ihrem kürzlich erschienenen Artikel *Deutschland braucht nicht mehr Windräder* erklären die beiden Experten für erneuerbare Energien, Hans-Josef Fell und Thure Traber, dass für den Zubau von 64 GW an Windkapazitäten bis 2030, durch den Einsatz neuer und modernisierter Anlagen deutlich weniger Windräder in Auftrag gegeben werden müssen als zuvor. Laut ihrer Berechnung bräuchte es „bei einer durchschnittlichen Anschlussleistung von 5MW pro Anlage insgesamt 11.140 neue und erneuerte Windkraftanlagen. In Summe müssten demnach bei einer Versorgung von ganz Deutschland mit 100 Prozent erneuerbaren Energien in allen Energiesektoren – Strom, Wärme, Verkehr, Industrie – bis 2030 etwa 24.000 Windkraftanlagen installiert sein, wesentlich weniger als die heute installierten 30.000 Anlagen.“ Die beiden Forscher ermitteln, dass dadurch die von der Bundesregierung angestrebte Ausweitung der Landesfläche von zwei Prozent für den Ausbau von Erneuerbaren für die aktuell benötigten 24.000 Windkraftanlagen ausreichen würde. Damit, so schreiben sie, könnten die für 2030 gesetzten Ziele von 80 Prozent Ökostrom überholt und sogar 100 Prozent erneuerbare Energieversorgung erreicht werden.<sup>38</sup>

## EET Branchen unter der Lupe – Wo Potentiale genutzt werden können

16



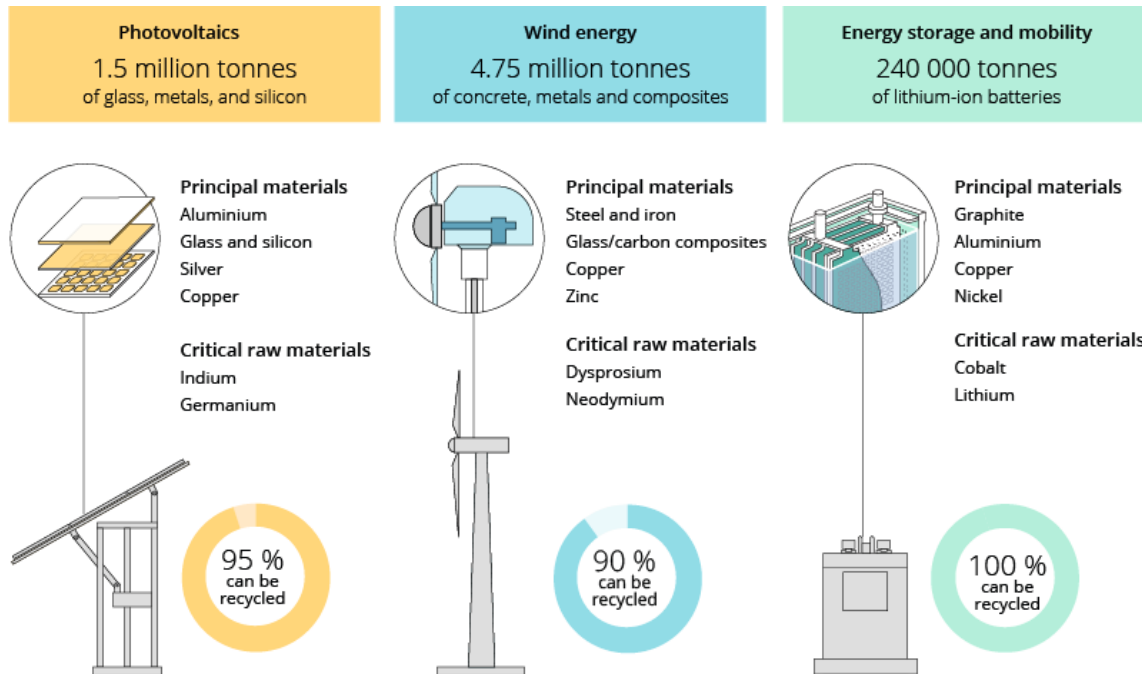
Für PV- und Windkraftanlagen hoffentlich kein Zukunftsszenario: Schrotberge. Besser wäre reparieren, austauschen, wiederverwenden und im Kreislauf führen. Foto: Eveline de Bruin, Pixabay

In Europa und insbesondere Deutschland erreichen in den nächsten Jahren viele ältere Solar- und Windkraftanlagen das Ende ihrer Laufzeit. Sie könnten dann recycelt und für den Bau neuer Anlagen wiederverwendet werden. Die Europäische Umweltagentur erwartet in diesem Bereich einen starken Anstieg der Abfallströme bis 2030. So soll die Solarkraftbranche jährlich bis zu 1,5 Millionen Tonnen Abfall, zusammengesetzt aus Glas, Metallen und Silizium, produzieren. Bei Windenergie seien es knapp fünf Millionen Tonnen Zement, Metalle und Verbundwerkstoffe im Jahr. Diese Sekundärrohstoffe dürfen nicht verloren gehen. Umso mehr, da in EET verwendete (metallische) Rohstoffe hohe Recyclingpotenziale haben. Die wirtschaftlich umsetzbaren Recyclingquoten liegen laut europäischer Umweltagentur bei 95 Prozent für Solaranlagen, 90 Prozent für Windturbinen und sogar 100 Prozent für Batterien (Abbildung 6).<sup>39</sup> Natürlich obliegt es einer politischen Steuerung, ob und ab welcher Summe sich die Kreislaufnutzung ökonomisch rentiert. Gesetzliche Vorschriften, DIN-Normen bei Design, die WEEE und die europäische Abfallverbringungsverordnung, Kreislaufwirtschaftsgesetzgebung,

Berichterstattungspflichten und gegebenenfalls Subventionen haben einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Gerade viele ökologische und soziale Folgekosten sind beim Bergbau nicht eingepreist, sodass der Preis von Primärmaterialien nicht die realen Kosten abbildet.

Bedenkt man, wie einfach sich Menschenrechte, Umwelt und Klima mit Wirtschaftlichkeit vereinen ließen, müsste Recycling die erste Wahl für metallische Rohstoffe im EET-Sektor sein. Was steht der Rückgewinnung dieser wertvollen Rohstoffe also im Weg? Warum gibt es bisher so wenig Unterstützung für die Kreislaufführung von strategisch wichtigen Produkten und deren ebenfalls strategisch bedeutenden Rohstoffen? Die EEA schätzt, dass dies zu großen Teilen daran liegt, dass weder die Technologien noch die Märkte im EET-Sektor für eine Weiterverwendung nach ihrer ersten Lebensdauer konzipiert sind. Die Kreislaufführung scheitert an der Verwendung von nicht recyclingfähigen Verbundwerkstoffen zum Beispiel in Rotorblättern, der Verwendung gefährlicher Stoffe und geringen Konzentrationen wertvoller

Abbildung 6 – Jährliche Wertschöpfungspotentiale von Materialien im Erneuerbaren Energie Sektor bis 2030



Quelle: European Environmental Agency (2021): Emerging waste streams. Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective.

Elemente innerhalb einzelner Baukomponenten. Außerdem entstehen logistische Probleme aufgrund der abgelegenen Standorte, der Größe und der Sicherheitsanforderungen im Zusammenhang mit der lokalen Energieinfrastruktur.<sup>40</sup> Dies macht zum Beispiel die Reparatur und den Austausch von kleineren Komponenten teuer und unrentabel.

Für Solaranlagen sind die Herausforderungen der Recyclingprozesse einerseits an ihre Zusammensetzung und Materialkomposition, andererseits an die Wartung bei der Installation in großen Höhen gebunden. Industrievertreter\*innen betonen, dass Recycling noch keinen hohen Wirtschaftlichkeitsgrad erreicht hat und deshalb ökonomisch „uninteressant“ sei.<sup>41</sup>

Bei Windanlagen ist es laut EEA wahrscheinlich, dass die steigenden Preise für Seltene Erden zukünftig das Recycling von Permanentmagnet-Generatoren der Windturbinen lohnenswert machen. Die Magnetproduktion und die Gewinnung der darin enthaltenen Seltenen Erden finden zum größten Teil in China statt. Da Recycling am ehesten in bereits

bestehenden Produktionsanlagen stattfinden könnte, ist eine Wiederaufbereitung innerhalb der EU vorerst unwahrscheinlich. Jedoch ist es auf Grund ihrer Größe und Haltbarkeit relativ unkompliziert möglich, die großen Permanentmagneten aus den Windkraftanlagen wiederzuverwenden.

Eine weitere Herausforderung stellen die Rotorblätter dar. Bisher ist es nicht möglich, die Glas- und Kohlefaserverbünde am Ende des Lebenszyklus wieder zu trennen und zu recyceln. Einige Windkraftanlagenhersteller planen, sie deshalb als Brennstoff in der Zementproduktion zu verwerten, andere forschen an einem kreislauffähigen Produktdesign. Ein Zielkonflikt besteht darin, das Gewicht möglichst niedrig zu halten, um Transportkosten und -emissionen zu sparen, aber gleichzeitig möglichst sortenreine Stoffe in der Konstruktion zu verwenden, die danach leicht in den Kreislauf zurückgeführt werden können. Der Aufbau einer regionalen Reparatur- und Recyclinginfrastruktur mit kurzen Transportwegen für Windradkomponenten könnte dieses Problem lösen.



Jede Schraube muss sitzen, aber Kreislaufführung schon im Design geplant werden. Foto: Los Muertos Crew, Pexels

## Solar

Im Solarsektor wurden wirtschaftliche Vorteile durch den Einsatz von Recycling dokumentiert. Das Recycling von Rohstoffen aus PV-Modulen wie Silizium, Indium, Gallium, Glas, Aluminium, Kupfer, Silber oder Germanium birgt Chancen, die knappen Rohstoffe länger zu nutzen. Laut dem wissenschaftlichen Dienst der Europäischen Kommission (JRC) lässt sich heute schon mehr als 95 Prozent des Materials recyceln und dadurch Kosten und Zeit einsparen. Neumodule aus Primärsilizium benötigen nämlich die dreifache Produktionszeit wie Module gleicher Leistung, die aus recycelten Materialien hergestellt wurden, was letztere kostengünstiger macht. Allerdings ist der Recyclingmarkt für Solarmodule derzeit noch nicht vollständig aufgebaut. Ein Grund dafür war bisher die lange Lebensdauer – 25 Jahre und mehr – dank der die Solarbranche, die als junge Technologie gilt, bisher nur wenig Abfall erzeugt hat. Laut JRC seien 2017 erst ein Prozent der recycelbaren Paneele am Ende ihres Lebenszyklus angelangt, weswegen das Recycling noch nicht wirtschaftlich rentabel war.<sup>42</sup>

Das bestätigt eine Forscher\*innengruppe, die anhand einer Lebenszyklusanalyse von PV-Modulen und ihrer korrespondierenden Recyclingverfahren deren Ressourceneffizienz untersucht hat. Die Gruppe um Fulvio Ardente schreibt, dass viele Solarzellen eine längere Lebensdauer haben als vorhergesehen. Auf Grund mangelnder Recyclingvolumina sowie schlechterer Qualität der recycelten Materialien ist die Rentabilität des Recyclingsektors derzeit begrenzt. Rechtliche Verpflichtungen, verändertes Konsumverhalten und vor allem ein optimiertes Management von

Abfallströmen aus Solaranlagen sind essenziell, um negative Auswirkungen auf Klima und Umwelt zu verhindern und Materialverluste kostbarer und seltener Rohstoffe zu minimieren: „Die unsachgemäße Sammlung und/oder Entsorgung von PV-Abfällen führt zum Verlust wertvoller Ressourcen und zur Verbreitung potenziell gefährlicher Stoffe, die in den Modulen enthalten sind.“<sup>43</sup> Auch Unternehmen bemängeln die Intransparenz in der deutschen Entsorgung von Solaranlagen. Die Gründerin eines französischen PV-Recyclingunternehmens erklärte, dass für sie nur schwer nachvollziehbar sei, was mit den Modulen am Ende ihres Lebenszyklus geschieht. Sie vermute nach einem Vergleich der Installations- und Entsorgungszahlen, dass ein großer Teil illegal ins Ausland exportiert und nicht wiederverwertet werde.<sup>44</sup>

Laut EEA soll die Solarkraftbranche jährlich bis zu 1.500.000 Tonnen und Windkraft knapp 5.000.000 Tonnen Abfall produzieren (Abbildung 6 auf Seite 17).<sup>45</sup> Zum Vergleich, im Jahr 2016 waren es nur 100.000 Tonnen Abfälle.<sup>46</sup> Bis zum Jahr 2050 soll die Anzahl wieder- und weiterverwertbarer Solarmodule noch deutlich ansteigen und zwischen 60 und 75 Millionen Tonnen erreichen. Im Hinblick auf die damit verbundenen negativen Umweltauswirkungen sowie dem potenziellen Verlust wertvoller Ressourcen, wird erwartet, dass die Industrie sich entsprechend dieser neuen Marktbedingungen zukunftsfähig aufstellt: „Das Recycling solcher Mengen erfordert, dass die Unternehmen darauf vorbereitet sind, indem sie einen Standard für die Branche festlegen.“<sup>47</sup>

Die Forscher\*innengruppe um Ardente stellt zudem den europäischen FRELP (Full Recovery End of Life Photovoltaic) Recyclingprozess den Standardprozessen in unterschiedlichen Mitgliedstaaten gegenüber und untersucht zwei Optimierungsansätze, um die durch Transport, Verbrennung sowie weitere Prozessschritte entstehenden Klima-, Umwelt- und sozialen Auswirkungen zu minimieren. Dabei wird deutlich, dass FRELP komplexer und vielphasiger als konventionelle Recyclingprozesse ist und daher mit höherem Energie-, Zeit- und Transportaufwand einhergeht. Allerdings sind die damit verbundenen Umweltauswirkungen des FRELP Recyclings im Vergleich zu Produktions- und Nutzungsphasen der Solarmodule marginal. Effizientes Recycling durch politische, regulatorische und wirtschaftliche Maßnahmen zu ermöglichen, bleibt essenziell, denn wie die Forscher\*innen schreiben: „Trotz der geringen Recyclingeffizienz zeichnet sich der Basisprozess durch einen hohen Umweltnutzen aus, insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel.“<sup>48</sup>

PowerShift gegenüber äußerten die Forscher\*innen des FRELP Projekts, dass der Mangel an zerlegten Solarmodulen mitunter das größte Hindernis für sie sei. Während sie in ihrem Pilot-Projekt „FRELP BY SUN“ gerade eine neue Versuchsanlage testen würden, welche 30 PV-Paneele pro Stunde verarbeitet, um Aluminiumprofile (16 Prozent), Silizium (vier Prozent) und Weißglas (65 Prozent) in erster Qualität rückzugewinnen,<sup>49</sup> sei der Einsatz dieser Technologie am Markt noch nicht garantiert.

FRELP wird von Recyclern weltweit angewendet, teilweise abgewandelt oder mit zusätzlichen Prozessschritten auch von bestimmten Anlageherstellern eingesetzt, wie beispielsweise von der VCT Group in Kanada. Die Forscher\*innengruppe um Ardente hat Ansätze zu Verbesserungen vorgeschlagen, die Synergien miteinander ermöglichen. Einerseits die dezentrale Behandlung von PV-Abfällen, das heißt die Vorbehandlung von entsorgten Solarmodulen, welche es ermöglicht, Materialien auszusortieren und gegebenenfalls vor Ort zu behandeln. Dies vermeidet Transport und reduziert dadurch die negativen Klima-, Umwelt- und sozialen Auswirkungen um bis zu 32 Prozent. Pyrolysebehandlung ist in kleineren Anlagen anwendbar und kann die Effizienz der Recyclingprozesse erheblich steigern, da die Behandlung kleinerer Mengen auch geringere Materialverluste mit sich bringt. Außerdem sind die negativen Effekte auf Umwelt und Klima durch Pyrolyse geringer als bei konventionellen und dem FRELP Recyclingprozess. Für die Pyrolysebehandlung ist allerdings die Verwendung von fluorfreien Rückseitenfolien notwendig. Bei der Ausarbeitung fördernder Rahmenbedingungen sollte laut den Forschenden beachtet werden, dass material- und produktspezifische Ziele definiert werden, Gesetze gemeinsam mit Produktdesign gedacht und Informationen zu Solarmodulkompositionen transparent und offen verfügbar sind.<sup>50</sup>

## Wind

Um einen Überblick über die Anwendung von kreislaufwirtschaftlichen Konzepten in der Windkraftbranche zu erhalten, haben wir die Geschäftsberichte (2020/21) der in Deutschland führenden Windkraftunternehmen (Vestas, Enercon, Nordex, Siemens Gamesa, GE Renewable Energy) analysiert. Aus den verschiedenen Berichten geht hervor, dass kreislaufwirtschaftliche Ansätze in den Unternehmen eng verzahnt mit wissenschaftsbasierten Zielen (Science Based Targets, oder kurz: SBT), dem Umweltmanagement nach ISO 14001, Ökobilanzen nach 14040 und Sorgfaltspflichten entlang der Lieferketten sind.



**Hoch hinaus: Die Bundesregierung hat umfangreiche Ausbauziele, nur bei Fragen der eigenen Nachhaltigkeit sind Bestrebungen der Industrie bisher zu gering.**  
Foto: Hans Linde, Pixabay

Im Rahmen des Umweltmanagements wurden bei allen Unternehmen wichtige Kennzahlen identifiziert und erhoben, bzw. neue Erhebungsmechanismen für die Bereiche geplant, in denen bisher Daten fehlen. Alle Hersteller bis auf den amerikanischen Konzern GE Renewable Energy nutzen bereits Lebenszyklusanalysen, um unter anderem Recyclingpotentiale zu identifizieren, auszuschöpfen und dauerhaft zu kontrollieren. Teilweise erlegen die Hersteller ihren Zulieferern Datenerhebungs- und Berichterstattungspflichten sowie die Formulierung wissenschaftsbasierter Ziele auf oder planen dies zukünftig zu tun, um Rohstoffverbrauch und Recyclingpotentiale zu identifizieren und Wissenslücken zu schließen. Sowohl Datenerhebungen als auch Berichterstattungspflichten zu Abfall- und Recyclingkennzahlen entlang der Lieferkette sind notwendig, um eine ganzheitliche Kreislaufführung zu ermöglichen und Synergien sowie Lieferkettenübergreifende Stoffkreisläufe aufzubauen. Allerdings geben die Unternehmen nur sehr bedingt Auskunft über ihre Lieferketten und nicht alle setzen quantifizierte Ziele fest.<sup>51</sup>

Hier zeigt sich die Gestaltungsmacht der großen, international aufgestellten Konzerne über ihre Lieferkette. Insbesondere Vestas und in geringerem Maße Siemens Gamesa beweisen das mit zahlenmäßigen Vorgaben und Berichterstattungspflichten für Zulieferunternehmen. Eine besondere Macht- und Verantwortungsposition kommt hier den metallproduzierenden Konzernen zu, da sie mit ihren Unternehmensgruppen einen umfassenden Teil der Wertschöpfungskette von der Mine, über die Verhüttung bis zur Weiterverarbeitung und Veredelung kontrollieren.<sup>52</sup>



**Wohin mit den alten Windflügeln? Bisher hat sich die Industrie hierzu zu wenige Gedanken gemacht.**

Foto: Photoholiday, Pixabay

**20**

Metalle spielen in den Berichten der Windkraftunternehmen eine untergeordnete Rolle. Das liegt möglicherweise daran, dass Unternehmen anders als bei den Rotorblättern davon ausgehen, dass ausreichend Recyclingkapazitäten für Metalle in Aussicht sind. Zudem ist die Wiederverwertung im Hinblick auf die Preisentwicklung von metallischen Rohstoffen bereits heute ökonomisch sinnvoll. Nichtsdestotrotz lässt sich anhand der Berichte zukünftig erweiterbares Recyclingpotential für Metalle im Bereich der kleineren Baukomponenten im Elektronikbereich innerhalb der Gondel ausmachen. Mit verbesserten Reparaturkapazitäten, Trenn- und Sortierverfahren und einem auf Kreislaufführung ausgelegtem Produktdesign werden sich zukünftig auch kleine Bauteile, in denen mehrere Metalle verarbeitet sind, effizient und verlustärmer recyceln lassen. Seltene Erden werden in den Berichten zum Großteil ausgeklammert. Wenn überhaupt, gibt es lediglich nicht quantifizierte Absichtserklärungen zur Minderung des Verbrauchs. Bisher gibt es für Seltene Erden keine Recyclinginfrastruktur, obwohl Forschungsprojekte bereits erfolgsversprechende Recyclingpotentiale und -methoden untersucht haben.<sup>53</sup>

Aus dem Bericht von Nordex ist zudem ein wichtiger Unterschied zwischen dem Recycling eigener Baukomponenten am Ende des Lebenszyklus und dem Recyclinganteil in zugekauften Komponenten in neuen Anlagen

deutlich geworden. Das Problem besteht laut Nordex in der bisher lückenhaften Datenlage zu Primär- und Sekundäranteilen entlang der Lieferkette. Nordex plant diese Lücken durch eigene Lebenszyklusanalysen zu schließen. Gesetzliche Regulierungen und Berichtserstattungspflichten entlang der Lieferkette würden die Datenlage hier branchenübergreifend verbessern. Bisher geben die Unternehmen, wenn überhaupt, nur Auskunft darüber, welche Anteile ihres Abfalls dem Recycling zugeführt werden. Den Anteil an Sekundärmaterial, der in den Anlagen verbaut wird, gibt kein Unternehmen an, weil dafür bisher verlässliche Daten fehlen.

Mehr als metallische Rohstoffe spielen Rotorblätter eine zentrale Rolle bei allen Windkraftunternehmen. Das liegt am anstehenden Ende des Lebenszyklus der ersten Windradgeneration nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von 2000. Mit dem anstehenden Rückbau, bzw. Repowering am Ende des 20-jährigen EEG-Förderzeitraums sehen sich in den nächsten Jahren alle Unternehmen vor einem Entsorgungsproblem der zwar leichten, aber sehr großen Rotorblätter aus schwer trennbaren Verbundwerkstoffen. Auch die energetische Verwertung in der Betonproduktion ist nur für Glasfasermodelle möglich, da die Karbonfasern einiger Rotorblätter die Luftfilter der Verbrennungsanlagen verstopfen oder auf Grund ihrer elektrischen Leitfähigkeit Kurzschlüsse auslösen könnten. Hier

wird der Sinn und Zweck von kreislauffähigem Produktdesign besonders deutlich: Es braucht eine Abkehr von immer komplexeren Werkstoffen, die sich nur schwer voneinander trennen lassen, hin zu sortenreineren und leicht wiederverwertbaren Materialien. Modellprojekte und Forschungsvorhaben gibt es dazu bereits.<sup>54</sup>

Der Branchenverband Wind Europe hat für das Rotorblatt Recycling eine *Dismantling und Decommissioning Task Force* gegründet, in der mehrere Windkraftanlagenhersteller mitwirken.<sup>55</sup> Vestas hat in einem Pilotprojekt in den USA die ersten 285 Rotorblätter recycelt und ist, ebenso wie Siemens Gamesa Teil der Forschungsprojekte CETEC (Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites)<sup>56</sup> und DecomBlades<sup>57</sup>, die zu Recyclingmethoden und kreislauffähigem Produktdesign forschen.

Sowohl Vestas als auch Nordex planen ihre regionalen Reparaturkapazitäten auszubauen, um Transportkosten und -emissionen zu verringern und auch kleinere Baukomponenten länger in Nutzung zu halten, anstatt sie durch neue zu ersetzen. Nordex thematisiert im Bericht die Zerlegung und Trennung von Komponenten als Herausforderung. Das Unternehmen bezieht sich dabei auf Rotorblätter und kleine elektronische Komponenten innerhalb der Turbine. Anders als im bereits sehr gut funktionierenden Recycling von sortenreinen Industrieschrotten oder großen Baukomponenten stecken hier noch Ausbaupotentiale.

Auffallend in den Berichten ist, dass viele der ergriffenen Maßnahmen auf Freiwilligkeit beruhen. Die Teilnahme an Zertifizierungsverfahren ist nicht verpflichtend und Unternehmen können sich im Umwelt- und Energiemanagement eigene Ziele setzen. Die im Bericht beschriebene Stakeholderbefragung von Nordex zeigt, dass in der Branche ein großes Interesse an messbar steigender Klima- und Umweltverträglichkeit sowie verantwortungsvollen Lieferketten und Transparenz besteht. Trotzdem führt die Freiwilligkeit der Maßnahmen und Zielsetzungen selbst innerhalb der Windkraftindustrie zu einem Gefälle der unternommenen Anstrengungen. Während Vestas zum Beispiel eine umfassende, die gesamte Lieferkette einbeziehende Kreislaufwirtschaftsstrategie mit quantifizierbaren Zielen vorgelegt hat, geht die Berichterstattung von General Electric kaum über Absichtsbekundungen und Angestellten-schulungen zur Abfallvermeidung hinaus. Hier sind verpflichtende trans- oder internationale Regulierungen dringend notwendig, um das oft angeführte Level-playing-field, das heißt



**Hohe Kreislaufwirtschaftsziele würden auch die Rohstoffabhängigkeiten reduzieren.** Photo: Hans Linde, Pixabay

fairen Wettbewerb in einem sozial und ökologisch verträglichen Rahmen, herzustellen.

In den Bereichen des Repowering und des industrieweiten Rückbaustandards (Enercon, Siemens Gamesa, Nordex) ist die Windkraftindustrie dem Gesetzgebungsprozess teilweise sogar voraus und hat bereits selbst brancheneigene Nachhaltigkeitszertifizierungen entwickelt. So lobenswert solche Initiativen auf den ersten Blick erscheinen, so kritisch ist die Tatsache, dass sich Unternehmen, bzw. Unternehmensverbände dadurch selbst zertifizieren, anstatt dies von demokratisch kontrollierten, staatlichen Stellen tun zu lassen. Hier braucht es zeitnah klare gesetzliche Regelungen und Kontrollinstanzen, die diese durchsetzen können.<sup>58</sup>

# Innovative Geschäftsmodelle – Im Kreislauf Richtung Rohstoffwende

Nicht nur Politik und Forschung, sondern auch immer mehr Unternehmen erkennen die Relevanz von Rezyklateinsatz und Kreislaufführung von Metallen und erproben ihre wirtschaftliche Umsetzung in innovativen Geschäftsmodellen. Wir haben verschiedene Ansätze untersucht und mit Branchenexpert\*innen über Potentiale und Herausforderungen gesprochen.

Ein Großteil der Verantwortung für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft im Bereich Erneuerbarer Energie liegt bei den Herstellern von Solar- und Windkraftanlagen. Einige Hersteller achten auf kreislauffähiges Produktdesign und berücksichtigen dabei zunehmend Rohstoffkomposition, Trenn- und Sortierbarkeit für das anschließende Recycling.

## ■ Geschäftsmodell Mieten statt Kaufen:

In Deutschland gibt es schon einige Anbieter,<sup>59</sup> die Solaranlagen vermieten, statt zu verkaufen. Die Verantwortung und das langfristige Management der Anlagen verbleiben in diesem Fall beim Vertreiber. Dadurch sind Anbieter stärker dazu angehalten, möglichst langlebige, reparier- und recycelbare Solaranlagen zu entwickeln und diese durch regelmäßige Wartung möglichst lange in Stand zu halten. Anbieter könnten so ihre Kosten reduzieren und ihre Versorgungssicherheit über eigenes Sekundärmaterial erhöhen. Allerdings besteht die Gefahr, dass Leasinganbieter auf Grund ihres Servicemonopols überhöhte Wartungs- und Reparaturkosten verlangen. Hier braucht es gesetzliche Vorschriften, um zum Beispiel Wettbewerb zwischen lokalen Wartungs- und Reparaturdienstleistern zu schaffen und ein Reparaturlizenzmodell zu Gunsten einzelner Unternehmen zu verhindern.

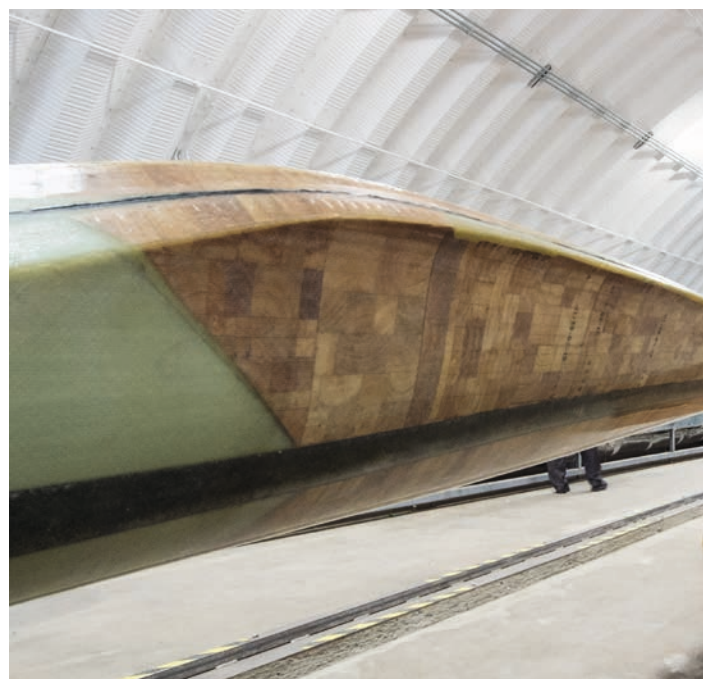
## ■ Ein zweites Leben bei RINOVASOL, Deutschland:

RINOVASOL saniert und recycelt ausgemusterte PV-Module. Um deren Kreislaufführung zu ermöglichen, braucht es allerdings laut Unternehmensführung mehr Sammelstellen, denn bisher mangelt es der Branche vor allem an wiederverwertbaren Modulen. Außerdem werden gebrauchte Solarpaneele oft verschrottet und dem stofflichen Recycling zugeführt, anstatt sie wieder instand zu setzen. Wiederbelebte Industriemodule könnten von Privatpersonen mit geringeren Produktivitätsansprüchen weit über ihre offizielle Lebensdauer genutzt werden. Daneben

forscht das Unternehmen zu organischen PV Modulen. Einzelne Bauteile könnten zukünftig mit lokalen kohlenstoffbindenden Materialien wie zum Beispiel Hanf hergestellt werden. Aktuell betreibt Rinovasol 40 Anlagen in verschiedenen Ländern.

## ■ Recycling bei VCT Group, Kanada:

„Wir verfolgen die Entwicklung von Recyclingoptionen genau und freuen uns auf eine Zukunft, in der die Solarindustrie eine echte Kreislaufwirtschaft erreicht“, schreibt die VCT Group auf ihrer Website. Allerdings seien die Möglichkeiten zum Plattenrecycling bisher stark begrenzt. Bei Großanlagen kommt es, laut Unternehmen, nur zu versehentlichen Verlusten von ein bis zwei Platten pro Projekt, zumeist während der Bauphase. Da es sich um neue Projekte handelt, sei die erwartete massenhafte Ausmusterung von Platten noch Jahrzehnte entfernt. Module werden hauptsächlich wegen Schäden durch ungünstige Witterungseinflüsse ausgemustert. Bis die Industrie ihre Kapazitäten in Kanada ausbaut, nutzt die VCT zwei Ansätze: Kaputte Module werden vorerst gelagert, um sie von der Mülldeponie fernzuhalten, oder Hobbybastler\*innen in der Region zur Verfügung gestellt.<sup>60</sup>



- **Mobiles Recycling bei FLAXRES:** Die hohen Kosten und Emissionen des Transports von ausgemusterten Modulen sind ein Problem. Das Unternehmen versucht durch mobile Recyclinganlagen Abhilfe zu schaffen. Hier werden Glas und Aluminiumrahmen, die den größten Gewichtsanteil haben, vor Ort getrennt und in lokalen Recyclinganlagen verwertet. Die schwer trennbaren Stoffe, wie Silizium, die nur einen kleinen Teil des Gesamtgewichts ausmachen, werden danach zu speziellen Recyclinganlagen transportiert, wo sie durch kurze hochintensive Lichtimpulse getrennt werden. Diese Form der Wiedergewinnung ist erst ab einer größeren Skalierung wirtschaftlich tragbar und deshalb, anders als das Glas und Aluminiumrecycling nicht dezentral umsetzbar.<sup>61</sup>
- **Weiter oben in der Recyclingkette ansetzen bei ROSI Solar, Frankreich:** Angesichts der Tatsache, dass zehn bis 13 Prozent der globalen Jahresproduktion von Silber in Solaranlagen fließt, aber nicht recycelt wird, hat sich das Ingenieurs-Start Up aus Grenoble entschieden, neue Re- und Upcyclingverfahren für ausgemusterte Solarpaneele zu entwickeln. Neben Silber gehen bei der Verschrottung im Schredder auch Stoffe wie Silizium und Kupfer verloren, erklärte uns die Gründerin. Bei Rosi Solar sollen Materialien durch thermische und sanfte chemische Verfahren getrennt werden, um auch das enthaltene Silizium und Silber sortenrein und kosteneffizient wiederzugewinnen.
- **PV Cycle Europe:** In Deutschland, Frankreich und Italien wurden eigenständige Unternehmen gegründet, die zum Ziel haben, das regionale Recyclingnetzwerk auf- und auszubauen. So ermöglicht PV Cycle Germany Herstellern und Importeuren von E-Produkten und Batterien einen einfachen Umgang mit Abfall, in dem es WEEE-konforme Sammelstellen anbietet und ihnen administrative und operative Aufgaben abnimmt. Gleichzeitig berät PV Cycle Ministerien und Behörden zur Verbesserung der gesetzlichen Vorgaben und unterstützt Marktplattformen für Second Hand Module.
- **Rotorblätter aus Holz von Voodin Blade und Stora Enso:** Als Alternative zu den kaum recycelbaren Rotorenblättern aus Kohle- und Glasfaserverbunden hat das finnische Unternehmen Stora Enso mit dem deutschen Start-up Voodin Blade Windradflügel aus Furnierholz entwickelt. Ein Prototyp mit 20 Meter langen Blättern ist derzeit im Bau und soll sowohl recyclingfähiger als auch leichter als die Konkurrenz aus Verbundmaterial sein.<sup>62</sup>



Windkraftflügel aus Holz könnten Windkraftanlagen nachhaltiger werden lassen. Foto: Dennis Schroeder, NREL

# Forderungen: Rohstoffwende – jetzt!

## Rohstoffwende Jetzt

Der Ausbau von Windkraft- und Solaranlagen wird in den nächsten Jahren massiv zunehmen. Dies wird eine Veränderung von Materialströmen nach sich ziehen. Fossile Rohstoffe, wie Kohle, Erdöl oder Erdgas, werden in wesentlich geringeren Mengen benötigt, bei Metallen und anderen Rohstoffen wird es zur Verschiebung von Bedarfen kommen. Einige Rohstoffe werden in größeren Mengen benötigt werden als heute in der fossilen Infrastruktur. Die Bedarfsveränderungen sind mit zwei großen Herausforderungen verbunden. Zum einen muss die nachhaltige Versorgung mit den Metallen gewährleistet sein. Zum anderen wird mittelfristig auch die Menge an Elektroschrott massiv steigen. Die möglichst lange Nutzung und Wiederverwendung in zukünftigen PV- und Windkraftanlagen von metallischen Rohstoffen ist daher ökologische und soziale Notwendigkeit, aber auch die große Chance beide Herausforderungen gleichzeitig anzugehen. Das setzt aber voraus, dass schon heute dafür Sorge getragen wird, dass das Design, die Funktionalität, die Produktion, die Nutzung und die Kreislaufführung von PV- und Windkraftanlagen zukunftsfähig aufgestellt wird.

## Menschenrechtliche und umweltbezogene Sorgfaltspflichten

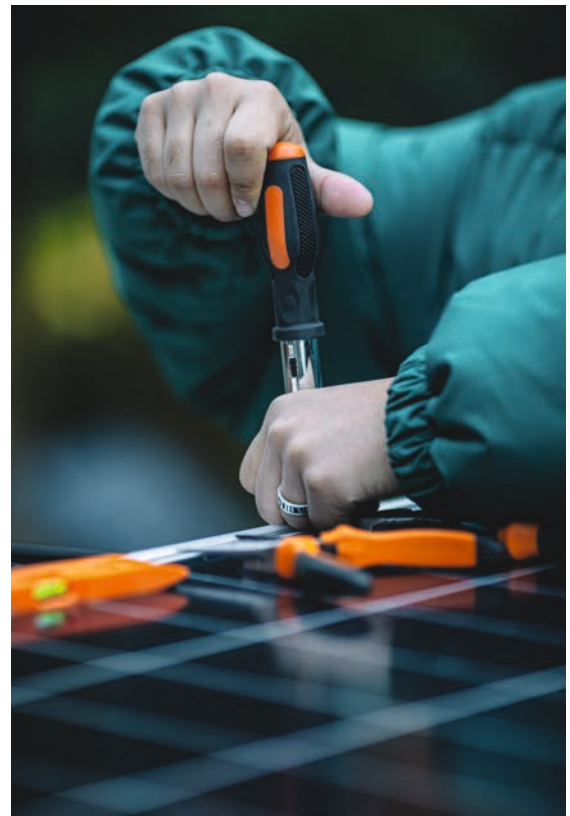
In PV- und Windkraftanlagen werden metallische Rohstoffe eingesetzt, die unter Umständen beim Abbau die Menschenrechte und Umweltstandards verletzen. Um diese Risiken zu minimieren, wurden in den letzten Jahren auf europäischer und deutscher Ebene verschiedene Regeln und Gesetze verabschiedet. Sowohl das deutsche Lieferkettengesetz von 2021 als auch die EU-Konfliktmineralienverordnung von 2016 gelten schon heute für einige Branchenteilnehmer. Auch die EU-Batterieverordnung und die europäischen Sorgfaltspflichtenregeln – beide voraussichtlich im Jahr 2023 bzw. 2024 verabschiedet – ergänzen diese Regeln. Die Konfliktmineralien- und Batterieverordnung definieren dabei sehr spezifische Anforderungen an die Unternehmen, die für den Einsatz bestimmter Rohstoffe gelten.<sup>63</sup> Die Batterieverordnung legt darüber hinaus auch Recycling- und Rezyklateinsatzquoten fest und ist im Rahmen des europäischen Green Deal die erste produktspezifische Gesetzgebung. Sie soll als Blaupause für andere Produkte dienen. Unternehmen aus der Produktion von PV- und Windkraftanlagen täten

gut, schon heute entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Denn, wie die Bundesregierung als Antwort auf eine Kleine Anfrage der CDU/CSU betont: „Bei Importeuren, die ihren Sorgfaltspflichten gesetzeskonform nachkommen, lässt sich, besonders bei derzeit krisenbedingt reduzierter Versorgungssicherheit, erhöhte Resilienz aufgrund besserer Kenntnisse der Risiken in der Lieferkette erkennen.“<sup>64</sup>

Die Risiken sind bei bergbaulich gewonnenen Rohstoffen dabei deutlich höher als bei Sekundärrohstoffen. Das bedeutet, umso mehr im Kreislauf genutzte Rohstoffe in den Produkten enthalten sind, desto einfacher können Risikoanalysen angefertigt werden.

## Ausbau der Kreislaufwirtschaft

Bisher scheitert die intensivere Kreislaufführung, wie die EEA schreibt, an der Verwendung von nicht recyclingfähigen Verbundwerkstoffen, der Verwendung gefährlicher Stoffe und geringen Konzentrationen wertvoller Elemente innerhalb einzelner Baukomponenten. Zudem existieren logistische Probleme aufgrund der abgelegenen Standorte, der Größe und der Sicherheitsanforderungen. Politische



Reparierfähigkeit erhöht die Nachhaltigkeit und sichert Arbeitsplätze im Handwerk. Foto: Newpowa, Unsplash

Entschlossenheit und eine zeitnahe Anpassung relevanter Gesetzgebungen zum Ausbau der Kreislaufwirtschaft sind notwendig, um sowohl die Versorgungssicherheit als auch Klima-, Umwelt- und Menschenrechtsschutz voranzutreiben. Während bei PV-Anlagen durchaus eine bessere Sammlung und Sortierung helfen würden, bräuchte es bei Windkraftanlagen unter Umständen dezentrale Möglichkeiten der Wiederaufbereitung. So sollte überlegt werden an den Orten Recyclingmöglichkeiten zu schaffen, an denen die Windkraftanlagen in der Verwendung sind. Das hätte zudem Beschäftigungsimpulse und eine höhere Wertschöpfung in den Regionen zur Folge. Darüber hinaus wäre eine Förderung umweltfreundlicher Recyclingmethoden hilfreich.

In der Batterieverordnung gibt es auf europäischer Ebene sowohl festgelegte Recyclingquoten als auch Rezyklateinsatzquoten. Die Bundesregierung und die Europäische Kommission sollten prüfen, inwieweit vergleichbare Quoten für das Recycling von PV- und Windkraftanlagen angewendet werden können. Die Quoten der Batterieverordnung gelten darüber hinaus zudem für Unternehmen, die Batterien auf den europäischen Markt einführen, sprich im Ausland produzieren lassen. Diese Art von Regelung könnte durchaus auch Effekte den europäischen Markt haben.

Gleichzeitig müssen Ökodesignvorgaben erweitert und gestärkt werden. Zum einen müssen Produkte für die Verwertung am Ende ihres Lebenszyklus möglichst wenig verschiedene Stoffe enthalten, auf komplexe und schwer trennbare Gemische und Legierungen verzichtet und leicht in ihre Einzelteile zerlegt werden können. Zum anderen muss Substitutionsforschung und der Einsatz von ökologischeren Materialien gefördert werden, um gefährliche und schlecht wiederverwertbare Stoffe zu ersetzen.

Bisher ist eines der größten Hindernisse zur besseren Kreislaufführung von PV- und Windkraftanlagen die mangelnde Sammelinfrastruktur. Ohne ausreichenden Materialinput kann keine funktionierende Recycling- und Wiederinstandsetzungsinfrastruktur entstehen. Um illegale Exporte und nicht fachgerechte Entsorgung zu verhindern, müssen Produkte bei Inverkehrbringung registriert und ihr Verbleib nach dem Ende ihres Lebenszyklus überwacht werden.

Es braucht sowohl mehr öffentliche Sammelstellen als auch ausreichend Information über die fachgerechte Entsorgung für private wie gewerbliche Betreiber von Solar- und Windkraftanlagen. Sammlung und Recycling müssen möglichst dezentral organisiert sein, um Transportkosten und -emissionen

zu minimieren, und – wo auf Grund von Skalierungseffekten ökologisch sinnvoll – durch zentrale Strukturen ergänzt werden. Neben öffentlichen Sammelstellen müssen zusätzlich die Hersteller stärker in die Pflicht genommen werden, ihre Produkte am Ende des Lebenszyklus zurückzunehmen und entweder aufzubereiten oder zu recyceln. Bei den erwartbaren Preisanstiegen kritischer Rohstoffe würden Hersteller sogar davon profitieren, sich über die Rücknahme eine konstante Quelle wertvoller Sekundärmaterialien zu schaffen. In Frankreich zum Beispiel hat die staatlich anerkannte Sammelstelle (Soren) aus Solarmodulen zwischen 2015 und 2021 bereits 18.000 Tonnen Altschrotte gesammelt und diese mittels Ausschreibungsverfahren an Recycling-Unternehmen weiterverteilt.<sup>65</sup>

Neben dem Recycling müssen Lebenszyklen von Produkten verlängert werden. Dazu bedarf es verbesserter Wartung, mehr Sanierung statt Verschrottung sowie Kaskadennutzung zum Beispiel von Solarmodulen.

## **Um all diese Anforderungen in der knappen Zeit umsetzen zu können, müssen Politik, Forschung, Zivilgesellschaft und Industrie zusammenwirken.**

Wir brauchen klare politische und rechtliche Rahmenbedingungen, die sichtbare Weichen stellen, Orientierung bieten, über den neuesten Stand der Technik informieren und kohärent sowie EU-weit möglichst einheitlich sind. Branchenübergreifende strukturierende Richtlinien für effiziente Sammel-, Trennungs- und Wertschöpfungsprozesse müssen umgesetzt werden.

Allerdings muss auch klar sein, dass wir uns nicht aus der Krise recyceln können, um den Herausforderungen des Klimawandels und der anstehenden Rohstoffknappheit zu begegnen. Neben verbesserter Kreislaufführung müssen wir gesamtgesellschaftlich unseren Materialfußabdruck und somit den absoluten Verbrauch von Rohstoffen reduzieren.





# Bildnachweise und Quellen

28

- Cov** <https://pixabay.com/de/photos/windr%c3%a4der-windrad-baustelle-2759650/>, Foto: Hans Linde, <https://pixabay.com/de/users/hanslinde-3418194/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- <https://pixabay.com/de/photos/metall-recycling-abfall-schrott-3331407/>, Foto: Michael Gaida, <https://pixabay.com/de/users/652234-652234/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- S.2** <https://pixabay.com/de/photos/metall-recycling-abfall-schrott-3331407/>, Foto: Michael Gaida, <https://pixabay.com/de/users/652234-652234/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- <https://pixabay.com/de/photos/windr%c3%a4der-windrad-baustelle-2759579/>, Foto: Hans Linde, <https://pixabay.com/de/users/hanslinde-3418194/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- S.4** [https://unsplash.com/photos/zHK\\_\\_gTTTds](https://unsplash.com/photos/zHK__gTTTds), Foto: yasin hm, <https://unsplash.com/@vasinb3da>, Unsplash, [Unsplash Lizenz](#)
- S.5** <https://flic.kr/p/7BN7WF>, Foto: Marcelo Correa, <https://www.flickr.com/photos/15745331@N04/>, Flickr, [Lizenz CC BY-NC 2.0](#)
- S.8** <https://unsplash.com/photos/z6DJJZ1-1Cg>, Foto: Peter Herrmann, <https://unsplash.com/@tama66>, Unsplash, [Unsplash Lizenz](#)
- S.9** <https://www.pexels.com/photo/dumpsite-under-clear-sky-128421/>, Foto: Emmet, <https://www.pexels.com/@emmet-35167/>, Pexels, [Pexels Lizenz](#)
- S.13** <https://unsplash.com/photos/4wObEZY0H8g>, Foto: yasin hm, <https://unsplash.com/@vasinb3da>, Unsplash, [Unsplash Lizenz](#)
- S.14** Foto: PowerShift e.V.
- S.15** <https://unsplash.com/photos/fmAKVLYlhkg>, Foto: Newpowa, <https://unsplash.com/@newpowa>, Unsplash, [Unsplash Lizenz](#)
- S.16** <https://pixabay.com/de/photos/eisen-alte-metall-abfall-2526913/>, Foto: Eveline de Bruin, <https://pixabay.com/de/users/mrsbrown-692504/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- S.18** <https://www.pexels.com/photo/selective-focus-of-installing-on-solar-panels-8853499/>, Foto: Los Muertos Crew, <https://www.pexels.com/@cristian-rojas/>, Pexels, [Pexels Lizenz](#)
- S.19** <https://pixabay.com/de/photos/windr%c3%a4der-windrad-baustelle-2759650/>, Foto: Hans Linde, <https://pixabay.com/de/users/hanslinde-3418194/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- S.20** <https://pixabay.com/de/photos/windrad-bau-aufbau-kran-1649778/>, Foto: Photoholiday, <https://pixabay.com/de/users/photoholiday-3094908/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- S.21** <https://pixabay.com/de/photos/windr%c3%a4der-windrad-baustelle-2759579/>, Foto: Hans Linde, <https://pixabay.com/de/users/hanslinde-3418194/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- S.23** <https://www.flickr.com/photos/nrel/32652139265/>, Foto: Dennis Schroeder/NREL, <https://www.flickr.com/photos/nrel/>, Flickr, [Lizenz CC BY-NC-ND 2.0](#)
- S.24** [https://unsplash.com/photos/NT\\_E4K4-0IM](https://unsplash.com/photos/NT_E4K4-0IM), Foto: Newpowa, <https://unsplash.com/@newpowa>, Unsplash, [Unsplash Lizenz](#)
- S.26** <https://pixabay.com/de/photos/metall-recycling-abfall-schrott-3331407/>, Foto: Michael Gaida, <https://pixabay.com/de/users/652234-652234/>, Pixabay, [Pixabay Lizenz](#)
- S.6 Abbildung 1**  
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 2**  
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.10 Abbildung 3**  
Kreislaufführungshebel entlang des Lebenszyklus von Metallen, Quelle: Metabolic Institute, Copper 8, Polaris Sustainability und Quintel (2021): Exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition. Online: [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/metaboliccopper8\\_report\\_towardsacircularenergytranstion\\_en\\_v04\\_su-lr.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/metaboliccopper8_report_towardsacircularenergytranstion_en_v04_su-lr.pdf)
- S.11 Abbildung 4**  
Kreislaufführungshebel von unterschiedlichen Metallen, Quelle: Metabolic Institute, Copper 8, Polaris Sustainability und Quintel (2021): Exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition. Online: [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/metaboliccopper8\\_report\\_towardsacircularenergytranstion\\_en\\_v04\\_su-lr.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/metaboliccopper8_report_towardsacircularenergytranstion_en_v04_su-lr.pdf)
- S.12 Abbildung 5**  
CO<sub>2</sub> Einsparungen (in %) von Metallen und ihren Rezyklaten im Vergleich, Eigene Darstellung. Quelle: Gregoir, Liesbet (2022): Metals for Clean Energy. Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven.
- S.17 Abbildung 6**  
Jährliche Wertschöpfungspotentiale von Materialien im Erneuerbaren Energie Sektor bis 2030, Quelle: European Environmental Agency (2021): Emerging waste streams. Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. Online: <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and>

# Endnoten

- 1 Müller, Axel (2018): Rohstoffe für die Energiewende. Misereor e.V.
- 2 PowerShift (2022): Heißes Eisen. Online: <https://power-shift.de/heisses-eisen/>
- 3 [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de)
- 4 [https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/doing-business-eu/corporate-sustainability-due-diligence\\_de](https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/doing-business-eu/corporate-sustainability-due-diligence_de)
- 5 [https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en)
- 6 Kampagne Bergwerk Peru (2019): Kupfer-Abbau in Peru. Perus Minen als Rohstofflieferant für den weltweiten Elektronik-Konsum. Online: [https://www.kampagne-bergbau-peru.de/wp-content/uploads/Factsheet-03-2019\\_Kupferabbau-Peru.pdf](https://www.kampagne-bergbau-peru.de/wp-content/uploads/Factsheet-03-2019_Kupferabbau-Peru.pdf)
- 7 Global Witness (2015): Deaths of four anti-mining protesters a catastrophic consequence of Peru's weakened environmental safeguards, warns Global Witness. Press Release. 05.10.2015. Online: <https://www.globalwitness.org/en/press-releases/deaths-four-anti-mining-protesters/>
- 8 Breiniger L, Reckordt M (Hrsg.) (2011): Rohstoffrausch. Die Auswirkungen von Bergbau in den Philippinen. Essen: philippinenbüro.
- 9 Reckordt M, Werning R (2012): Philippinen und Xstrata. Mord im Morgengrauen. WOZ – die Wochenzeitung. 25.10.2012. Online: <https://www.woz.ch/1243/philippinen-und-xstrata/mord-im-morgengrauen>
- 10 Sarmiento, Bong S. (2022): Indigenous opposition to Philippine mine project falters. 02.03.2022. Online: <https://www.eco-business.com/news/indigenous-opposition-to-philippine-mine-project-falters/>
- 11 <https://www.globalwitness.org/en/campaigns/environmental-activists/decade-defiance/>
- 12 PowerShift (2022): Metalle für die Energiewende. Online: <https://power-shift.de/metalle-fuer-die-energiewende>
- 13 Ibid. / PowerShift (2022): Heißes Eisen. / PowerShift et. Al. (2020): 12 Argumente für eine Rohstoffstrategie.
- 14 PowerShift (2022): Metalle für die Energiewende.
- 15 Unter kritische Rohstoffe versteht die Europäische Union Rohstoffe, die auf der einen Seite wirtschaftlich bedeutend und auf der anderen Seite ein hohes Versorgungsrisiko haben. Das Versorgungsrisiko berechnet sich vor allem durch die Zuverlässigkeit beim Export dieser Rohstoffe. Ökologische oder menschenrechtliche Risiken spielen in der Definition eine stark untergeordnete Rolle. Die Liste kritischer Rohstoffe wird von der EU alle drei Jahre überarbeitet.
- 16 PowerShift (2022): Metalle für die Energiewende.
- 17 Ellen MacArthur Foundation (2022): Circular Economy Introduction. Online: <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- 18 European Commission (2022): Circular Economy. European Commission. Online: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/circular-economy>
- 19 Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 20 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist
- 20 Vgl. AK Rohstoffe (2022): <https://ak-rohstoffe.de/wp-content/uploads/2022/02/Analyse-AK-Rohstoffe-KV-2021.pdf>
- 21 Metabolic Institute, Copper 8, Polaris Sustainability und Quintel (2021): Exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition. Online: [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/metaboliccopper8\\_report\\_towardsacircularenergytransition\\_en\\_v04\\_su-lr.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/metaboliccopper8_report_towardsacircularenergytransition_en_v04_su-lr.pdf)
- 22 European Environmental Agency (2021): Emerging waste streams. Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. Online: <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and>
- 23 Ibid.
- 24 [https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy\\_de](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_de)
- 25 DIR 2012/19/EU, bekannt im englischen als WEEE für Waste of Electric and Electronic Equipment
- 26 <https://www.visualcapitalist.com/all-the-metals-we-mined-in-one-visualization/>
- 27 HRW (2022): European Union: Rules for Batteries should Cover Bauxite, Copper, Iron. Online: <https://www.hrw.org/news/2022/04/28/european-union-rules-batteries-should-cover-bauxite-copper-iron>
- 28 International Aluminium (2022): Greenhouse Gas Emissions – Aluminium Sector. Online: <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/>
- 29 <https://www.visualcapitalist.com/all-the-metals-we-mined-in-one-visualization/>
- 30 CAN Europe (2022): CAN Europe's transformation pathway recommendations for the steel industry. Online: [https://caneurope.org/content/uploads/2022/06/CAN-Europe\\_2022\\_Recommendations\\_Steel\\_Transforming-the-sector.pdf](https://caneurope.org/content/uploads/2022/06/CAN-Europe_2022_Recommendations_Steel_Transforming-the-sector.pdf)
- 31 Hasanbeigi, Ali (2022): Global Steel Industry's GHG Emissions. Online: <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2021/global-steel-industrys-ghg-emissions>
- 32 Broadbent, Clare (2016): Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. In: Int J Life Cycle Assess 21 (11), S. 1658–1665. DOI: 10.1007/s11367-016-1081-1.
- 33 Gregoir, Liesbet (2022): Metals for Clean Energy. Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven.
- 34 Material Economics (2018): The circular economy, a powerful force for climate mitigation. Online: <https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2019/12/25-09-19-the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-full-report.pdf>
- 35 Ibid.
- 36 VCT Group (2022): Recycling Solar. Online: <https://vctgroup.com/recycling-solar/>
- 37 Storch (2021): Wie umweltschädlich sind Solarzellen? Tagesschau. Online: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/photovoltaik-recycling-101.html>
- 38 Fell & Traber (2022): Deutschland braucht nicht mehr Windräder. Online: <https://www.klimareporter.de/strom/deutschland-braucht-nicht-mehr-windraeder>
- 39 European Environmental Agency (2021): Emerging waste streams. Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. Online: <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and>
- 40 Ibid.
- 41 PowerShift Kommunikation mit ROSI Solar und Rinovasol
- 42 Mathieu F. et al. (2017): Critical Raw Materials and the Circular Economy. Background report. JRC Science-for-policy report, EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-74282-8 doi:10.2760/378123 JRC108710.

- 43 "Nevertheless, improper management of PV waste can cause the loss of valuable resources and the dispersion of potentially hazardous substances contained in the panels." Ardente et al. (2019): Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. Online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19302909>
- 44 PowerShift Kommunikation mit ROSI Solar
- 45 European Environmental Agency (2021): Emerging waste streams. Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. Online: <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and>
- 46 Ardente et al. (2019): Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. Online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19302909>
- 47 Mathieu F. et al. (2017): Critical Raw Materials and the Circular Economy. Background report. JRC Science-for-policy report, EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-74282-8 doi:10.2760/378123 JRC108710.
- 48 „Despite low recycling efficiency, the baseline process is still characterised by high environmental benefits, especially for climate change." Ardente et al. (2019)
- 49 Cf.: Email Austausch PowerShift e.V. und FRELPAU/ TIALPI (27/5/2022)
- 50 Ardente et al. (2019): Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. Online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19302909>
- 51 Enercon GmbH. (2021): Sustainability Report 2020. Aurich.; General Electric Company. (2021): Sustainability Report 2020.; Nordex SE. (2021): Nachhaltigkeitsbericht 2021. Hamburg.; Siemens Gamesa Renewable Energy S.A. (2021): Consolidated non financial statement 2021.; Vestas Wind Systems A/S. (2021). Sustainability Report 2021. Aarhus.
- 52 Aurubis AG. (2021): Geschäftsbericht 2020-21. Hamburg. ; Norsk Hydro ASA. (2021): Annual Report 2021. Oslo. , Thyssenkrupp AG. (2021): Lagebericht 2020-2021. Essen.
- 53 Diehl, Oliver; Schönfeldt, Mario; Brouwer, Eva; Dirks, Almut; Rachut, Karsten; Gassmann, Jürgen et al. (2018): Towards an Alloy Recycling of Nd-Fe-B Permanent Magnets in a Circular Economy. In: J. Sustain. Metall. 4 (2), S. 163–175. DOI: 10.1007/s40831-018-0171-7.
- Lapko, Yulia; Trianni, Andrea; Nuur, Cali; Masi, Donato (2019): In Pursuit of Closed-Loop Supply Chains for Critical Materials: An Exploratory Study in the Green Energy Sector. In: Journal of Industrial Ecology 23 (1), S. 182–196. DOI: 10.1111/jiec.12741.
- Watanabe, Yasushi (2016): Innovationen in Abbau und Verarbeitung von Seltenen Erden. In: Peter Kausch, Jörg Matschullat, Martin Bertau und Helmut Mischo (Hg.): Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 19–27.
- 54 Gallagher, John; Basu, Biswajit; Browne, Maria; Kenna, Alan; McCormack, Sarah; Pilla, Francesco; Styles, David (2019): Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. In: Journal of Industrial Ecology 23 (1), S. 133–140. DOI: 10.1111/jiec.12703.
- Krauklis, Andrey E.; Karl, Christian W.; Gagani, Abedin I.; Jørgensen, Jens K. (2021): Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. In: J. Compos. Sci. 5 (1), S. 28. DOI: 10.3390/jcs5010028.
- Rentizelas, Athanasios; Trivyza, Nikoletta; Oswald, Sarah; Siegl, Stefan (2022): Reverse supply network design for circular economy pathways of wind turbine blades in Europe. In: International Journal of Production Research 60 (6), S. 1795–1814. DOI: 10.1080/00207543.2020.1870016.
- 55 <https://windeurope.org/newsroom/news/working-towards-a-european-standard-for-decommissioning-wind-turbines/>
- 56 <https://www.project-cetec.dk/uk/about/>
- 57 <https://decomblades.dk/>
- 58 Heinz, Rebecca; Sydow, Johanna; Ulrich, Florian (2022) Industriestandards im Rohstoffsektor auf dem Prüfstand. Online: <https://www.germanwatch.org/de/85063>
- 59 <https://www.energieheld.de/solaranlage/mieten#anbieter-preisvergleich>
- 60 VCT Group (2022): Recycling Solar; <https://vctgroup.com/recycling-solar>
- 61 <https://www.flaxres.com/en/technology/>
- 62 <https://www.basictinking.de/blog/2022/11/17/windrad-aus-holz/>
- 63 Unter die jeweilige Verordnung fallen Coltan / Tantal, Gold, Wolfram und Zinn (Konfliktrohstoffe) bzw. Graphit, Kobalt, Lithium und Nickel (Batterierohstoffe).
- 64 <https://dserver.bundestag.de/btd/20/032/2003243.pdf>
- 65 <https://www.soren.eco/>
- 66 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020PC0798&from=DE>

# Impressum

---

## Rohstoffwende und Energiewende zusammen denken – Kreislaufführung von Erneuerbaren Energien ausbauen

### 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](mailto:info@power-shift.de)

Web: <https://power-shift.de>

**Autor\*innen:** Tshin Ilya Chardayre, Michael Reckordt, Hendrik Schnittker

**Redaktion:** Vanessa Fischer, Julia Albrecht

**Layout / Reinzeichnung:** Chris Freeman | [conductdesign.com](http://conductdesign.com)

Berlin, Januar 2023

© 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>**

Dieses Projekt wurde gefördert durch das Umweltbundesamt und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Die Mittelbereitstellung erfolgt auf Beschluss des Deutschen Bundestages.



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit  
und Verbraucherschutz



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

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.



European  
Climate  
Foundation

