

Begleitheft

zum Themenbaukasten
für Lehrerinnen und Lehrer

Inhaltsverzeichnis



Vorwort	5
Einleitung	7
Überblick über Struktur und Inhalt der vorliegenden Unterrichtsmaterialien	7
Übergeordnete (Lern)ziele	7
1. Definition: Was sind Ressourcen?	8
2. Ausgangslage: Wozu verwenden wir wie viele Ressourcen?	11
Ressourcenaufwand – wie ist er zu messen?	11
Rohstoffbedarf am Beispiel eines Smartphones	14
Rohstoffbedarf am Beispiel eines Autos	16
Rohstoffverwendung in Deutschland	16
Rohstoffverwendung weltweit	19
Rohstoffverwendung in der Zukunft	20
3. Konsequenzen: Warum ist intensive Ressourcennutzung ein Problem?	22
Welche Schäden entstehen im Zuge der Ressourcennutzung?	22
Die ökologischen Auswirkungen in Zahlen	26
Soziale und wirtschaftliche Auswirkungen der Ressourcengewinnung	31
4. Lösungsansatz: Wie lässt sich Ressourceneffizienz steigern?	34
Was bedeutet Ressourceneffizienz?	34
Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz	34
5. Herausforderungen: Welche Grenzen und Zielkonflikte hat Ressourceneffizienz?	43
Ressourcennutzung hat immer ökologische Kosten	43
Kein Kreislauf ist perfekt	43
Zielkonflikte im Materialkreislauf	44
Zielkonflikte innerhalb der Nachhaltigkeitsdimensionen	45
6. Beispiele: Wo wird Ressourceneffizienz erprobt?	46
Effizienzsteigerung	46
Substitution	47
Kreislaufführung	47
Glossar	48
Literatur	52
Impressum	55

Vorwort



„Wissen, wie Zukunft geht“: Das brauchen wir als Gesellschaft, insbesondere die jungen Menschen. Für einen nachhaltigeren Weg in die Zukunft gehört dazu unbedingt ein Verständnis der Zusammenhänge und Auswirkungen von Gewinnung und Nutzung von Ressourcen sowie grundlegende Strategien der Ressourcenschonung.

Einordnung und Hintergrund der Entstehung dieser Unterrichtsmaterialien

Spätestens seit dem Schulstreik von Greta Thunberg ab 2018 und der so initiierten Bewegung „Fridays for Future“ ist das Thema Klimakrise und die Notwendigkeit des gesellschaftlichen Wandels hin zu einer nachhaltigeren Zukunft in den Schulen angekommen. Schon 2015 haben sich die Vereinten Nationen mit der Setzung von globalen Zielen für Nachhaltige Entwicklung (engl. Sustainable Development Goals, kurz SDGs) auf einen gemeinsamen Weg in eine nachhaltigere Zukunft begeben (UN DESA 2022). In Deutschland sieht das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF die Bildung als Schlüsselement für die Erreichung dieser Ziele. Mit der Gründung der Nationalen Plattform Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) und der Schaffung des Nationalen Aktionsplans BNE wurde ein starkes Zeichen für das deutsche Engagement zur Erreichung der Ziele gesetzt und das Thema strukturell in allen Bildungsbereichen verankert (BMBF 2017). Menschen aller Alters- und Wissensstufen sollen eine Bildung erhalten, die sie die Wirkungen des eigenen Handelns verstehen lässt und sie somit zu zukunftsfähigem Entscheiden und Handeln befähigt. In anderen Worten: Es geht um die Vermittlung von „Wissen, wie Zukunft geht“.

Dieses Motto gibt das BMBF der Wissenschaft mit ihrer Strategie Forschung Nachhaltige Entwicklung (FONA) mit auf den Weg. Sie soll dieses Wissen mit der Entwicklung von Lösungswegen in den Themenfeldern Klimawandel, Artenvielfalt oder Ressourcenschonung für die deutsche Gesellschaft schaffen. Die Strategie der Ressourceneffizienz adressiert alle drei Felder. Durch möglichst effizienten Umgang mit Ressourcen, also eine Optimierung des Verhältnisses von Ressourceneinsatz

und Nutzen, sollen die natürlichen Ressourcen geschont und die negativen Wirkungen des Ressourcenabbaus minimiert werden, darunter sehr relevante Anteile des menschengemachten Klimawandels und des Verlusts der Artenvielfalt. Im BMBF-Förderprogramm r+Impuls arbeiten daher Industrie und Wissenschaft zusammen daran, innovative Ideen zur Steigerung der Ressourceneffizienz verschiedener Produkte und Prozesse von der Theorie in die Praxis und sogar noch einen Schritt weiter auf den Markt zu bringen.

Im Themenfeld der Ressourceneffizienz gibt es bisher jedoch wenig Transfer zwischen der Forschung, die „Wissen, wie Zukunft geht“ schafft; und der breiten Bevölkerung, insbesondere jungen Menschen, die „Wissen, wie Zukunft geht“ brauchen und umsetzen können. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Transfer- und Begleitprojekts zu r+Impuls, r+TeTra, haben sich daher zum Ziel gesetzt, das Thema der Ressourceneffizienz in seiner Relevanz und mit umsetzbaren Lösungsstrategien für Jugendliche aufzubereiten. Durch einen Themenbaukasten, der neben dem vorliegenden Begleitheft umfangreiche, modular aufgebaute Lehr-Lern-Materialien enthält, sollen die systemischen Zusammenhänge zwischen alltäglicher Nutzung von Produkten, industriellen Produktionsprozessen, Rohstoffabbau in meist fernen Regionen und ökologischen Wirkungen aller drei Phasen auf schulgerechtem Niveau aufgezeigt werden. Die enge Verknüpfung von Forschung und Bildung in diesem Projekt bietet die Chance, zwischen Forscherinnen, Forschern, Schülern und Schülerinnen innovative Lösungsstrategien mit alltagsnahen Ideen zu verknüpfen. Im Austausch soll vermittelt werden, wie Zukunft in einer der drängendsten Nachhaltigkeitsherausforderungen, der Ressourcennutzung und -schonung, gehen kann.

Einleitung

Mit einem Themenbaukasten Ressourceneffizienz wollen wir anregen, diese wichtige Nachhaltigkeitsproblematik in Schulen zu thematisieren, um Jugendliche zu aktiven, bewussten Entscheidungen zu befähigen, und stellen dafür Lehr-Lern-Materialien sowie dieses Themenheft bereit.

Übergeordnete (Lern)ziele

Das BMBF will die Ziele der Vereinten Nationen zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland strukturell in allen Bildungsbereichen verankern. Diese Unterrichtsmaterialien sollen helfen, das Thema Ressourceneffizienz im Rahmen der Nachhaltigkeits- und Kreislaufwirtschaftsdebatte für Schülerinnen und Schüler greifbar zu machen. Gleichzeitig formuliert die OECD für die PISA-Studie die Basis der naturwissenschaftlichen Grundbildung für die Sekundarstufe I als die Fähigkeit, „naturwissenschaftliches Wissen anzuwenden, naturwissenschaftliche Fragen zu erkennen und aus Belegen Schlussfolgerungen zu ziehen, um Entscheidungen zu verstehen und zu treffen, welche die natürliche Welt und die durch menschliches Handeln an ihr vorgenommenen Veränderungen betreffen“ (Deutsches PISA-Konsortium 2001; OECD 1999). Angelehnt an beide ist das Ziel dieser Materialien, den Schülern und Schülerinnen Zusammenhänge zwischen ihrem Handeln und einer der drängendsten Nachhaltigkeitsdebatten, der Ressourcennutzung und -schonung, verständlich zu machen und sie somit zu zukunftsfähigen Entscheidungen zu befähigen. Denn jede Konsumententscheidung im Alltag und der darauffolgende Umgang mit Produkten sowie die richtige Entsorgung sind mit einem Ressourcenaufwand verknüpft. Somit haben auch Jugendliche täglich die Möglichkeit, Ressourcenschonung als Kriterium im Sinne der Nachhaltigkeit in ihre Entscheidungen einzubeziehen. Trotz altersgerechter Aufbereitung soll der Komplexität des Problems Rechnung getragen und Systemverständnis mit verschiedenen Einflussfaktoren und Zieldimensionen vermittelt werden. Das Aufzeigen von grundlegenden Strategien zur Entwicklung konkreter Lösungswege dient dann der Verknüpfung eines umfassenden Problemverständnisses mit strategischem, lösungsorientiertem Denken, um die Schülerinnen und Schüler zum Handeln zu befähigen. Durch praxisnahe Auseinandersetzung – bezogen sowohl auf den aktuellen Forschungskontext als auch auf den Alltag der Jugendlichen – hoffen wir, nachhaltiges Interesse und Sensibilität für die verschiedenen ökologischen, ökonomischen, technologischen und gesellschaftlichen Facetten des Themas zu wecken.

Überblick über Struktur und Inhalt der vorliegenden Unterrichtsmaterialien

Der Themenbaukasten Ressourceneffizienz, bestehend aus diesem inhaltlichen Begleitheft mit Hintergrundwissen und umfangreichen Lehr-Lern-Materialien für die Sekundarstufe I, bemüht sich, alle nötigen Wissensbausteine in aufeinander aufbauenden Modulen zu liefern. Ein Glossar am Ende dieses Heftes enthält kurze Erklärungen der nötigen Fachbegriffe. Die Materialien sind bewusst flexibel gestaltet, sodass Lehrerinnen und Lehrer den Umfang und inhaltlichen Fokus an ihre jeweiligen Rahmenbedingungen oder auch an außerschulische Kontexte anpassen können. Auch das Herausgreifen einzelner Module oder die bewusste Erhöhung der Komplexität für ältere Schülerinnen und Schüler soll möglich sein.

Vier Grundlagenmodule schaffen eine umfassende Wissensbasis: Von der (1) Begriffserklärung Ressource, geht es über die (2) Ressourcenverwendung und die (3) Probleme einer intensiven Ressourcennutzung zum lösungsorientierten Modul der (4) Ressourceneffizienz mit ihren drei Strategien der Steigerung der Materialeffizienz, der Substitution von Materialien sowie der Kreislaufschließung, also des Recyclings. Drei Aufbaumodule setzen dann unterschiedliche Schwerpunkte: Modul (5) Grenzen und Zielkonflikte verstärkt die systemische Herangehensweise an die Problemanalyse, Modul (6) gibt Beispiele aus der aktuellen Forschung im Bereich der Ressourceneffizienz und Modul (7) beschäftigt sich gezielt mit Handlungsoptionen im Alltag der Jugendlichen am Beispiel des Smartphones und der ressourceneffizienten Ernährung. Der Themenbaukasten beinhaltet außerdem die Option (8) eines Praxisprojektes, wobei den Schülern und Schülerinnen zunächst Grundlagen des Projektmanagements an die Hand gegeben werden können, die dann bei der Bearbeitung einer konkreten Problemstellung im Bereich Ressourceneffizienz zum Einsatz kommen. Modul (8) bietet auch die Option, ein konkretes Ressourcenthema aus dem individuellen Schul- oder Ortskontext im Rahmen eines Praxisprojekts mit den Schülerinnen und Schülern anzugehen.

1. Definition: Was sind Ressourcen?

Bevor wir uns dem eigentlichen Thema Ressourceneffizienz zuwenden, soll im folgenden Kapitel eine Begriffsklärung erfolgen: Was genau verstehen wir unter Ressource und wie benutzen wir den Begriff in Abgrenzung zu Rohstoff und Material?

Erhellend bei der Beantwortung dieser Frage ist ein Blick auf die Etymologie des Wortes: der „Ressource“ liegt das lateinische Wort „resurgere“ mit der Bedeutung „wieder entstehen“ zu Grunde. Auch das französische (und englische) Wort „source“, das Quelle bedeutet, verbunden mit der Vorsilbe „re“ für „wieder“ gibt einen schönen Einstieg: Der Begriff Ressource erweckt den Eindruck, dass es sich um einen unerschöpflichen, weil erneuerbaren Vorrat an etwas handelt, aus dem nützliche Dinge hergestellt werden können.

Wenn dem wirklich so ist, warum brauche ich dann Maßnahmen zur Ressourceneffizienz? Ist das denn bei einem immer wieder neu entstehenden Vorrat überhaupt nötig? Die Beantwortung dieser Frage wird uns durch die kommenden Kapitel leiten. Zunächst jedoch wollen wir uns mit der Frage beschäftigen, was genau eine „Ressource“ eigentlich ist.

Laut Wikipedia handelt es sich bei einer Ressource um „Mittel oder Gegebenheiten [...], um Ziele zu verfolgen [...] oder einen Vorgang zielgerecht ablaufen zu lassen. Eine Ressource kann ein materielles oder immaterielles Gut sein. In Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft und Organisationen werden darunter meist Betriebsmittel, Geldmittel, Boden, Rohstoffe, Energie oder Personen und (Arbeits-)Zeit verstanden, in der Psychologie auch Fähigkeiten, persönliche Eigenschaften oder eine geistige Haltung, in der Soziologie auch Bildung, Gesundheit, Prestige und soziale Vernetzung.“ Der Begriff „Ressource“ ist also sehr breit gefasst und kann unterschiedliche Betrachtungsperspektiven (Naturwissenschaften, Psychologie, Soziologie, Wirtschaftswissenschaften) umfassen. Gemeinsam ist diesen Sichtweisen, dass die „Ressource“ eine Voraussetzung dafür ist, dass etwas getan oder eine Entscheidung gefällt werden kann (Wikipedia 2022a).

Im Gegensatz zu dieser breiten Sichtweise geht es im vorliegenden Projekt (+ Impuls) um den nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen, im Besonderen also um materielle Ressourcen, die wir Menschen der natürlichen Umwelt entnehmen, um damit Güter herzustellen. Durch ihre Verwendung wollen wir unser Wohlergehen bzw. unseren Wohlstand aufrechterhalten oder sogar steigern. Gleichzeitig spüren wir zunehmend, dass Entnahme und Verwendung dieser Ressourcen Schäden an der Umwelt und der Gesundheit der Menschen hervorrufen. Sie laufen damit den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen zuwider (vergleiche Kapitel 3) und können damit längerfristig – zum Beispiel für nachfolgende Generationen – zu einer Senkung des Wohlergehens führen. Zu den materiellen Ressourcen zählen im weiteren Sinne die stofflichen Umweltmedien Wasser, Boden und Luft, aus denen wir alle benötigten Stoffe entnehmen, in denen alle natürlichen Prozesse ablaufen und die gleichzeitig als Senken der Aufnahme der Abfälle, Abwässer und Abgase von Produktionsprozessen dienen. Ebenso ist die für die Produktionsanlagen erforderliche Fläche eine Ressource, die als Teil der insgesamt endlichen Erdoberfläche begrenzt ist, sodass mit ihrer Nutzung andere Verwendungsmöglichkeiten eingeschränkt werden.

Wenn wir im weiteren Verlauf den Begriff Ressource benutzen und auch von Ressourceneffizienz sprechen, sind immer Rohstoffe und damit materielle Ressourcen gemeint, die der Umwelt bzw. dem Ökosystem entnommen bzw. in ihr benutzt werden (Abbildung 1). Die beiden Begriffe Ressource und Rohstoffe sind hier also bis zu einem gewissen Grad austauschbar. Sie unterscheiden sich aber vor allem hinsichtlich ihrer Verwendungsperspektive. So nutzen wir den Begriff „Ressource“

vornehmlich dann, wenn es darum geht, den allgemeinen Charakter als Mittel zur Umsetzung unserer Ziele darzustellen; den Begriff „Rohstoff“ hingegen, wenn es um konkrete, zu diesem Zweck aus der Umwelt entnommene Stoffe geht.

Gelegentlich wird auch der Begriff „Material“ verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Werkstoff, der mithilfe von und aus Rohstoffen hergestellt wurde und dazu dient, Produkte herzustellen. Beispiele für Materialien sind Beton oder Glas, die aus Kalkstein, Sand und anderen Rohstoffen zuerst hergestellt werden müssen, bevor sie zu den eigentlichen, von uns verwendeten Produkten verarbeitet werden. Auch wenn Materialien Produkte der Verarbeitung von Rohstoffen sind und deshalb meist ganz andere Eigenschaften als die Rohstoffe aufweisen, aus denen sie hervorgegangen sind, ist der unmittelbare Zusammenhang zwischen Material- und Rohstoffverwendung doch unübersehbar.

Ein wichtiges Kriterium zur Kategorisierung von Rohstoffen ist, ob ein Rohstoff biotischen oder abiotischen Ursprungs ist, also aus lebenden (zum Beispiel pflanzlichen) Materialien gewonnen wird oder der unbelebten Natur entstammt (Abbildung 2). Biotische Rohstoffe können nachwachsen, sodass ihre Nutzung nicht so schnell zur Erschöpfung des Bestandes führt. Nach Entnahme durch den Menschen können sie sich von alleine oder unter Mitwirkung des Menschen wieder auffüllen. Meist geschieht dies auf Basis der sonnengetriebenen Photosynthese. Allerdings ist auch hier zu berücksichtigen, dass das Wachstum von Pflanzen neben der Sonne auch auf Böden, Nährstoffe und Wasser angewiesen ist, deren Verfügbarkeit begrenzt ist. Landwirtschaftliche Produkte, aber auch die Holzgewinnung aus Wäldern und der Fischfang sind typische Beispiele

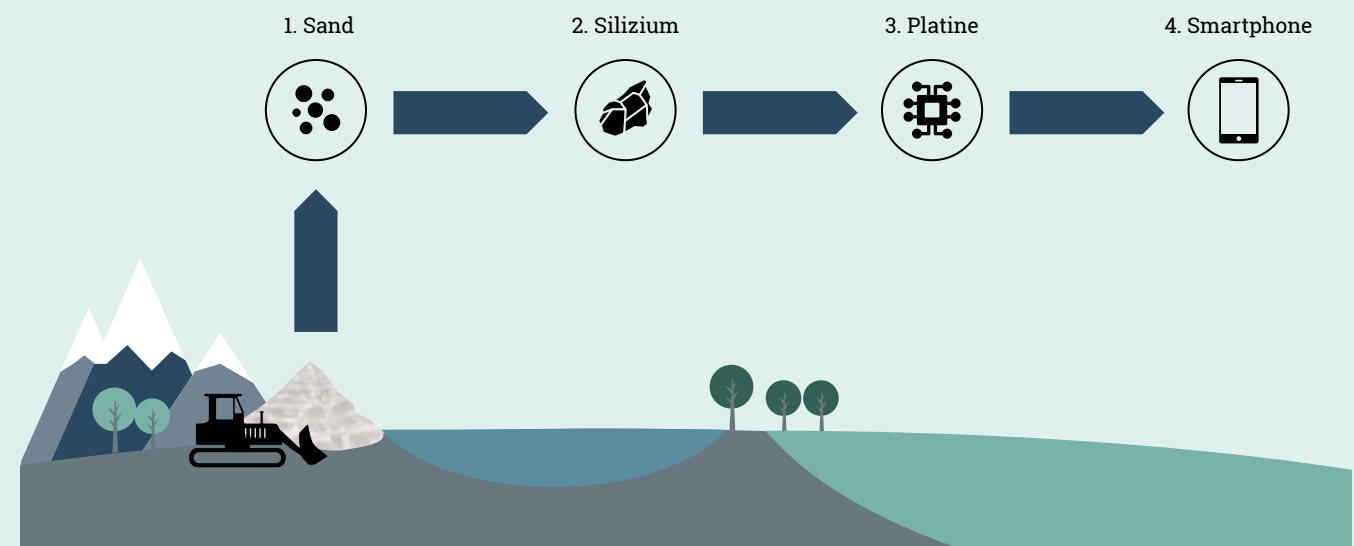


Abbildung 1: Rohstoffe sind materielle Ressourcen, die wir der Umwelt entnehmen oder dort benutzen, um damit Güter herzustellen

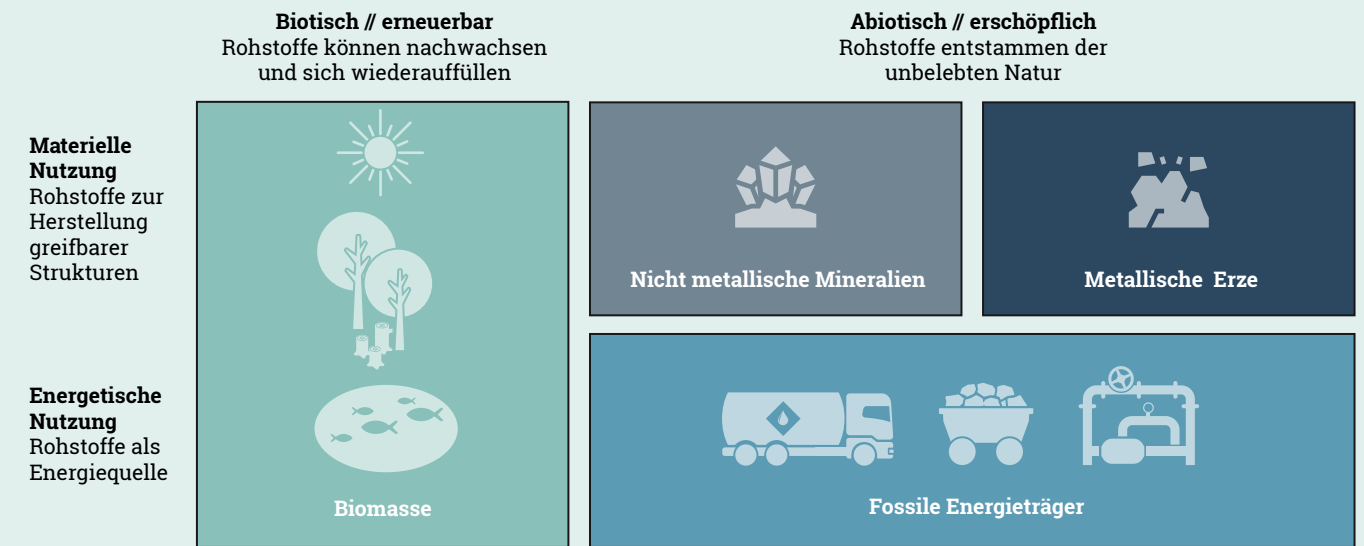


Abbildung 2: Zwei Arten der Kategorisierung von Rohstoffen, nach der Nutzung und nach ihrem Ursprung

für biotische Rohstoffe. Eine andere Art der Kategorisierung von Rohstoffen ist die Art der Nutzung. Sie können entweder materiell, das heißt zur Herstellung greifbarer Strukturen, oder als Energiequelle genutzt werden. Im Falle der biotischen Rohstoffe kann Holz beispielsweise für den Bau von Gebäuden materiell, aber ebenso als Brennstoff energetisch genutzt werden.

Im Gegensatz zu den biotischen werden die abiotischen Rohstoffe im Allgemeinen als nicht erneuerbar angesehen.¹ Auch bei den abiotischen Rohstoffen wird entsprechend der Art ihrer Verwendung unterschieden. Abiotische Rohstoffe, die zur Energiegewinnung genutzt werden, werden als fossile Energieträger bezeichnet. Auf Seiten der materiellen Nutzung wird zwischen Erzen (= metallhaltige Mineralien) und nicht-metallischen Mineralien unterschieden. Nicht-metallische Mineralien können teilweise so verwendet werden, wie sie in der Natur angetroffen werden. Das gilt insbesondere für Sand, Kies und Steine, die in der Bauwirtschaft Verwendung finden. In anderen Fällen müssen nicht-metallische ebenso wie metallhaltige Mineralien aufbereitet und bestimmte Bestandteile herausgelöst werden, bevor sie in die Produktion einfließen können. Ein wichtiges Beispiel dafür ist Eisenerz, aus dem das Eisen im Zuge des Hochofenprozesses gewonnen werden muss, bevor es zu Maschinen oder anderen Produkten verarbeitet werden kann. Schließlich gibt es noch die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas. Wie die Bezeichnung Energieträger andeutet, dienen sie in erster Linie der Gewinnung von elektrischem Strom oder Wärmeenergie. Sie sind somit zwar auch zur Produktion von Gütern notwendig; in ihrer materiellen Form finden sie sich aber nicht in den Produkten wieder und können daher auch nicht aus diesen zurückgewonnen werden. Nur in geringerem Umfang werden Erdöl und Erdgas als materielle Rohstoffe genutzt, beispielsweise zur Herstellung von Kunststoffen. Alle abiotischen Rohstoffe wachsen nicht nach, erneuern sich in historischen Zeiträumen also nicht und gelten

¹ Tatsächlich sind auch abiotische Rohstoffe erneuerbar, allerdings in geologischen Zeiträumen, das heißt innerhalb von vielen Millionen Jahren. Da diese sehr langen Zeiträume für das menschliche Wirtschaften nicht relevant sind, ist es gerechtfertigt, vom Fehlen der Erneuerbarkeit auszugehen.

daher als erschöpfliche Ressourcen. Praktisch jedes einzelne industriell gefertigte Produkt, das in unserer modernen Konsumgesellschaft benutzt wird, besteht aus Rohstoffen, die aus irgendeiner Lagerstätte irgendwo auf der Welt gefördert wurden.

Das Bewusstsein darüber, dass zum Beispiel ein Smartphone schlussendlich aus Gestein hergestellt worden ist, dem mit großem Aufwand einzelne Rohstoffe entzogen wurden, die dann verfahrenstechnisch aufbereitet und dann erst verbaut werden können (siehe Abbildung 1), ist wahrscheinlich nicht bei allen Bürgerinnen und Bürgern – und sicher auch nicht bei allen Schülerinnen und Schülern – vorhanden.

Bergbau hat oftmals das Image überholter, in Bezug auf Arbeitssicherheit bedenklicher und inzwischen überflüssiger Technik. Dieser Eindruck ist in Deutschland sicherlich durch die vielen Schließungen von Kohlezechen zum Beispiel in Nordrhein-Westfalen befördert worden. Noch früher ist bereits der Abbau von metallischen Rohstoffen aus Deutschland und generell großen Teilen Europas verschwunden. Viele der spezielleren, heute benötigten Technologierohstoffe kommen in Deutschland gar nicht vor. Ihr Abbau findet zwangsweise weit entfernt und damit außerhalb unseres Erfahrungshorizonts statt. Dazu kommt die Tatsache, dass viele Bergbauminen massive Umweltschäden hinterlassen haben. Im allgemeinen Bewusstsein herrscht daher teilweise die Meinung vor: Bergbau war gestern, heute ist saubere Industrie 4.0.

Doch leider geht auch saubere Industrie 4.0 nicht ohne die Rohstoffe, die durch Bergbau gewonnen werden – ein Zusammenhang, der nicht immer sofort gesehen wird. Dabei spielen eine unüberschaubare Anzahl an Mineralien und Metallen eine Schlüsselrolle in der Entwicklung neuer Technologien und die Mehrzahl dieser Innovationen steigert letztlich den Bedarf an Rohstoffen.

2. Ausgangslage: Wozu verwenden wir wie viele Ressourcen?

Die Forderung nach einer effizienteren Ressourcennutzung setzt Kenntnis darüber voraus, wie und in welchem Maße Ressourcen bisher genutzt werden.

Im folgenden Kapitel beleuchten wir am Beispiel von alltäglichen Produkten, welche Ressourcen, Rohstoffe und Materialien verbaut sind und abstrahieren dann, um die Ressourcennutzung in Deutschland und der Welt zu quantifizieren. Zuletzt schauen wir in die Zukunft und erklären, warum der Ressourcenbedarf wahrscheinlich weiterhin steigen wird. Den Zusammenhang zwischen den Produkten, die uns alltäglich umgeben, und dem Rohstoffabbau, den wir zumeist nur noch aus fernen Ländern kennen, möchten wir in diesem Kapitel wieder herstellen und dafür unseren Rohstoffbedarf näher beleuchten.

Ressourcenaufwand – wie ist er zu messen?

Die naheliegendste Möglichkeit, die Menge der Ressourcen zu bestimmen, die für die Herstellung von Waren und Dienstleistungen verwendet werden, besteht darin, die Massen der eingesetzten Rohstoffe zu messen und aufzuaddieren. Dabei wird jedoch vernachlässigt, dass es einen bedeutenden Unterschied machen kann, welche Rohstoffe bei einem Produktionsprozess im Einzelnen zum Einsatz kommen und wie aufwendig diese gewonnen werden müssen. Hierzu zwei Beispiele:

Das in einem Baggersee abgebaute Geröll kann in der Bauwirtschaft als Kies fast genauso verwendet werden, wie es der Natur entnommen wird, es muss zuvor lediglich nach der Korngröße klassiert (das heißt sortiert) und gewaschen werden, wobei das verwendete Wasser nach der Reinigung wieder der Natur zugeführt wird. Zusätzlich zum Geröll schlagen also nur der für den Betrieb der Maschinen (Klassierer, Wäscher) erforderliche Treibstoff sowie die für die Herstellung der Maschinen erforderlichen Rohstoffe zu Buche. Insgesamt beträgt der Rohstoffaufwand für die Herstellung von einem Kilogramm Kies 1,04 Kilogramm Rohstoffäquivalente, darin enthalten 1.000 Gramm für das Geröll und 40 Gramm für die Herstellung und den Betrieb der erforderlichen Maschinen. Die 1.040 Gramm werden auch als kumulierter Rohstoffaufwand (KRA, gemessen in Rohstoffäquivalenten), die 40 Gramm als Rohstoffrucksack bezeichnet (Giegrich et al. 2012).

Im Gegensatz dazu ist die Gewinnung von einem Kilogramm Gold viel aufwendiger. Zunächst müssen pro Kilogramm Gold mehrere hundert Tonnen goldhaltigen Gesteins aus einer Mine gebaggert und zu einer Fabrik transportiert werden. Dort wird das Gestein mit meist sehr giftigen Chemikalien wie Quecksilber (Amalgamverfahren) oder Natriumcyanid (Cyanidlaugung) behandelt und damit das Gold herausgelöst. Anschließend werden weitere chemische und physikalische Prozesse angewendet, um das Gold wieder aus dem Amalgam oder der Laugungslösung zurückzugewinnen (Verdampfen des Quecksilbers aus dem Amalgam bzw. Zugabe von Zinkpulver zur Fällung des Goldes aus der Cyanidlauge). Schließlich ist noch ein energieaufwändiger Elektrolyseprozess erforderlich, um verbleibende Verunreinigungen zu entfernen. Zusätzlich zum goldhaltigen Gestein stellt dabei auch die Bereitstellung der Chemikalien und der Energie einen Rohstoffaufwand dar, der zu berücksichtigen ist. Der KRA für die Gewinnung eines Kilogramms reinen (99,9 Prozent) Goldes beträgt schließlich 740.318 Kilogramm, der Rucksack also ganze 740.317 Kilogramm, jeweils in Rohstoffäquivalenten.

Dieses sehr unterschiedliche Verhältnis von eingesetzten und gewonnenen Stoffmengen zwischen Gold und Kies ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Der Materialeinsatz für Anlagen und Energie macht bei beiden nur einen kleinen Teil der Stoffströme aus. Während bei Kies jedoch ein sehr großer Teil des eingesetzten Gerölls zum gewünschten Produkt wird, stößt man für Gold schon an die Grenzen der darstellbaren Größenverhältnisse. Nur ein sehr geringer Anteil des eingesetzten Gesteins landet im Produkt Gold.

Die unterschiedlichen KRA-Werte schlagen sich auch in den Preisen nieder: Ein Kilogramm Kies kostet rund 0,02 Euro, ein Kilogramm Gold hingegen 50.000 Euro. Vor dem Hintergrund der sehr unterschiedlichen Aufwände, die für die Herstellung von Kies und Gold betrieben werden müssen, überrascht der Preisunterschied nicht mehr so sehr.

Kies und Gold stellen Extremfälle für sehr geringen und sehr hohen Aufwand dar, zwischen denen sich die meisten anderen

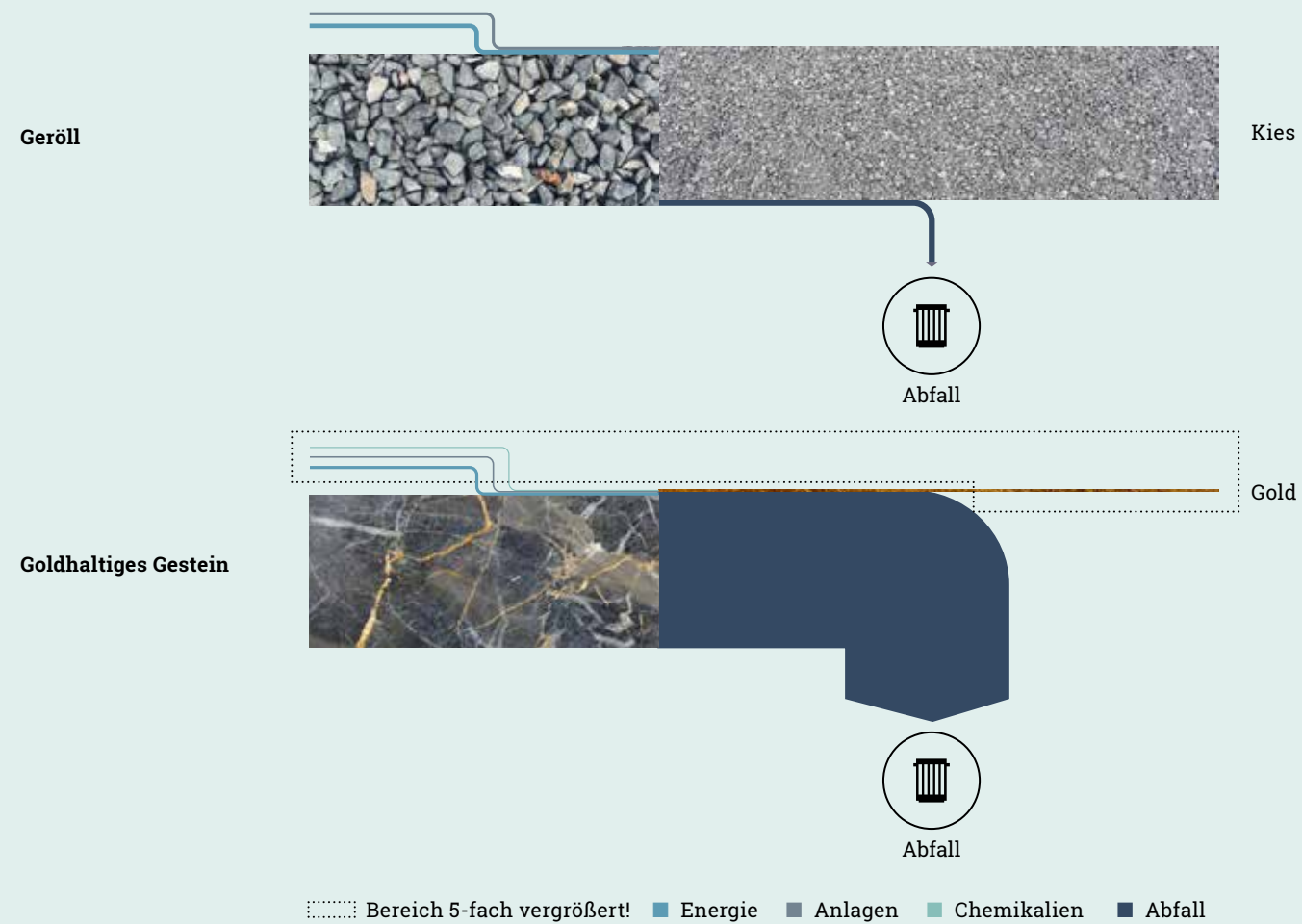


Abbildung 3a: Gewinnung von Gold und Kies im Vergleich bei gleicher Menge erforderlicher Rohstoffe

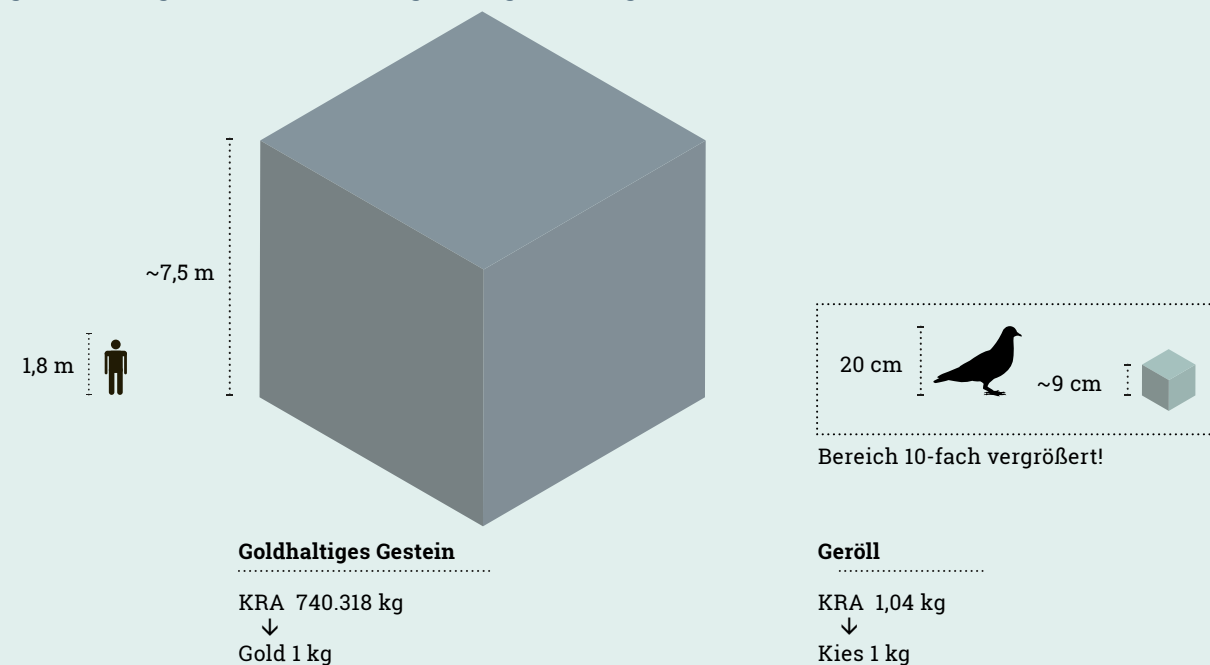


Abbildung 3b: Vergleich des Rohstoffaufwands für die Gewinnung von einem Kilogramm reinem Gold bzw. Kies

Exkurs 1

Kumulierter vs. spezifischer kumulierter Rohstoffaufwand

Wie am Beispiel von Kies und Gold dargestellt, ist es nicht sinnvoll, zur Ermittlung des Rohstoffaufwandes die Massen des verwendeten Kieses und Goldes (das heißt Kilogramm Kies und Kilogramm Gold) direkt miteinander zu vergleichen. Ursache dafür sind die sehr unterschiedlichen Rohstoffrucksäcke. Wird hingegen für beide Stoffe der kumulierte Rohstoffaufwand ermittelt, so geschieht dies unter Berücksichtigung der Rucksäcke auf Basis der Gesamtmasse der Ressourcen, die der Natur bzw. dem Boden unmittelbar entzogen wurden. Das Ergebnis ist der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA). Dieser KRA mag für Kies und Gold hinsichtlich seiner Zusammensetzung nicht identisch sein, er ist aber hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt vergleichbar. Daher können KRA-Werte für verschiedene Rohstoffe einheitlich in Kilogramm Rohstoffäquivalenten (kg RÄ) gemessen, direkt miteinander verglichen und auch aufaddiert werden.

Während es sich beim KRA also um eine Masse (gemessen in kg RÄ) handelt, die unabhängig von der Art des jeweiligen Rohstoffs aufaddiert werden kann, stellt der KRA bestimmter

Stoffe (zum Beispiel Kies oder Gold) eine stoffspezifische Kennzahl dar, die sich je nach Stoff stark unterscheiden kann (siehe Tabelle 1). Deshalb sprechen wir hier von (stoff-)spezifischen KRA-Werten. Gemessen werden diese spezifischen KRA-Werte in kg RÄ pro Kilogramm des jeweiligen Stoffs.

Das Produkt aus spezifischem KRA und der Masse des jeweiligen Stoffs ergibt den KRA für ein bestimmtes Bauteil. Letztere können dann unabhängig von Art und Anzahl der jeweils betrachteten Stoffe aggregiert werden. So kann der KRA eines Produktes bestimmt werden.

Beispiel: Zwei gleichgroße Leitern bestehen aus verschiedenen Materialien: Die Leiter aus Eisen wiegt 20 Kilogramm, die Leiter aus Aluminium 10 Kilogramm. Die spezifischen KRA-Werte für Eisen und Aluminium betragen 4,1 kg RÄ pro kg Eisen bzw. 10,4 kg RÄ pro kg Aluminium. Dementsprechend weist die Alu-Leiter einen KRA von 104 kg RÄ, die Eisenleiter einen KRA von 82 kg RÄ auf. Obwohl die Alu-Leiter hinsichtlich ihrer Masse leichter ist, ist ihr KRA höher.

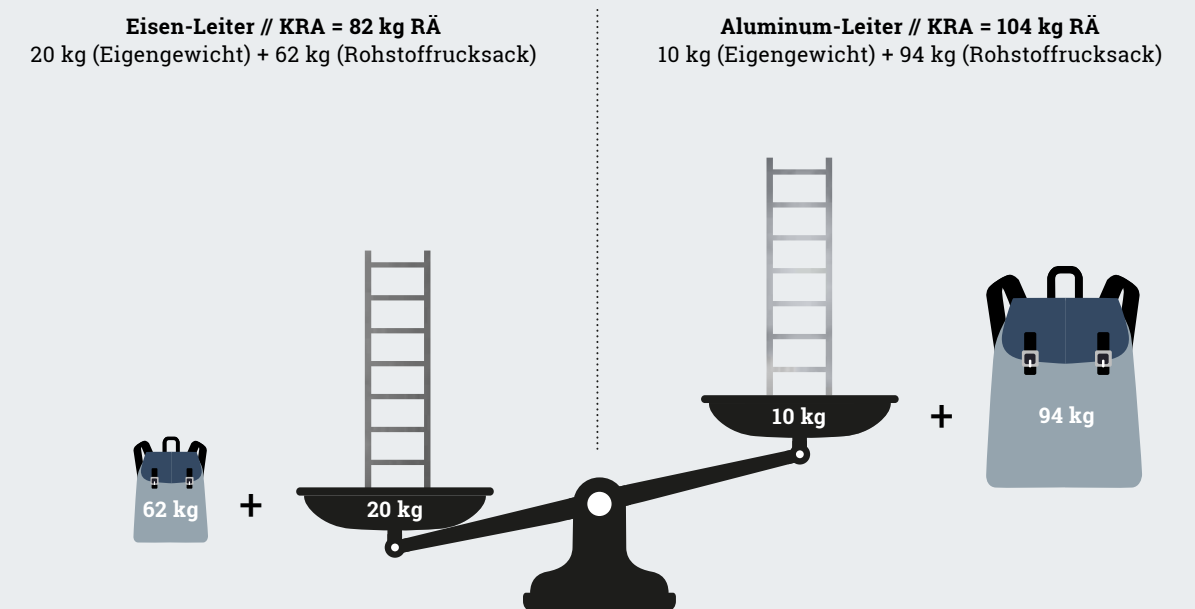


Abbildung 4: Verrechnung des Rohstoffgehaltes mit dem spezifischen kumulierten Rohstoffaufwand liefert den kumulierten Rohstoffaufwand eines Produktes. Die Gewichtsverhältnisse können sich dabei umkehren!

Rohstoffe einordnen. In den meisten Fällen liegen die spezifischen KRA-Werte zwischen einem und zehn Kilogramm Rohstoffäquivalente pro Kilogramm des jeweiligen Rohstoffs. Je nach Metallgehalt können die spezifischen KRA-Werte bei Erzen aber auch deutlich höher sein. In Tabelle 1 sind die spezifischen KRA-Werte für verschiedene, weitverbreitete Rohstoffe beispielhaft aufgeführt.

Metallische Stoffe

	Spez. KRA
Eisen	4,1
Aluminium	10,4
Kupfer	128,1
Silber	6.834,8
Gold	740.317,7

Mineralische Stoffe

	Spez. KRA
Sand / Kies	1,04
Steinsalz	1,10
Kalk	1,42
Kalisalz	7,74

Energierohstoffe

	Spez. KRA
Braunkohle	1,01
Erdöl	1,07
Erdgas	1,37
Steinkohle	1,52

Tabelle 1: Spezifische kumulierte Rohstoffaufwände (in kg RÄ/kg) für beispielhafte Rohstoffe

Rohstoffbedarf am Beispiel eines Smartphones

Gehen wir also zur Betrachtung eines konkreten Produktes aus unserem Alltag. Die Hauptbestandteile eines Smartphones sind Akku, Gehäuse, Display und Leiterplatte. Für die Herstellung dieser Bauteile werden 60 verschiedene Stoffe benötigt (siehe Abbildung 5).

Mehr als die Hälfte des Gewichts eines Smartphones (circa 150 Gramm inklusive Akku) stammt von verschiedenen Kunststoffen, die für Gehäuse, Akku und Display verwendet werden. Glas und Keramik kommen vor allem beim Display und in der Leiterplatte zum Einsatz. Die Metalle spielen in allen vier Komponenten teilweise sehr unterschiedliche Rollen. Im Gehäuse tragen sie zur mechanischen Stabilität des Gerätes bei, im Akku bilden sie die Kathode und in Leiterplatte und Display

übernehmen sie verschiedene Funktionen in der Elektronik (IZMF 2012).

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Verwendung der Metalle zu werfen, da sie besonders hohe kumulierte Rohstoffaufwände einbringen. Im Folgenden werden daher die Verwendungszwecke und Gewichtsanteile der wichtigsten Metalle aufgeführt (IZMF 2012, LANUV 2012):

- **Kupfer:** 15 Prozent, Stromleitung in Kabeln und Leiterplatten
- **Eisen:** 3 Prozent, Schrauben
- **Aluminium:** 3 Prozent, Abschirmblech zwischen Antenne und Elektronik
- **Nickel:** 2 Prozent, Legierungselement (Stahl), Kathode des Akkus
- **Zinn:** 1 Prozent, Lötverbindungen auf der Leiterplatte
- **1% Andere:**
 - **Kobalt/Lithium:** Kathode des Akkus
 - **Silber:** Kontaktbahnen in Tastaturmatte und auf der Leiterplatte
 - **Seltenerdmetalle:** Magnete in den Lautsprechern
 - **Palladium/Gold:** Kontaktflächen zwischen verschiedenen Bauteilen und in Schaltern
 - **Gallium:** Bestandteil der LED für die Hintergrundbeleuchtung des Displays
 - **Tantal:** Kondensatoren auf Leiterplatte
 - **Indium:** Transparentes Kontaktmaterial im Display

Wenngleich ein Smartphone in der Regel nur rund 150 Gramm wiegt, wovon die wertvolleren Metalle (Palladium, Gold, Silber) mit hohen spezifischen KRA-Werten jeweils nur einige zehn bis hundert Milligramm ausmachen, ist aus Ressourcensicht sein ökologischer Rucksack viel größer. Der Rucksack eines Smartphones liegt, wie in Abbildung 6 dargestellt, bei rund 75 Kilogramm Rohstoffäquivalente, also dem 500-fachen seines Eigengewichts! Davon entfallen knapp die Hälfte (35 Kilogramm Rohstoffäquivalente) auf die Rohstoffgewinnung. Die Herstellung trägt nur einen kleinen Anteil, während die Nutzungsphase stark zu Buche schlägt. Dies liegt vor allem an der nötigen Stromversorgung, die abermals Ressourcen benötigt.

Multipliziert man den KRA eines Smartphones mit der Anzahl in Deutschland pro Jahr (2020) verkaufter Smartphones, nämlich 22,1 Mio. (Statista 2021), dann resultiert daraus ein Gesamtrohstoffaufwand in Höhe von 1,66 Millionen Tonnen RÄ. Wie wir später noch erkennen werden, sind das rund 0,6 Promille der gesamten kumulierten Rohstoffinanspruchnahme in Deutschland.

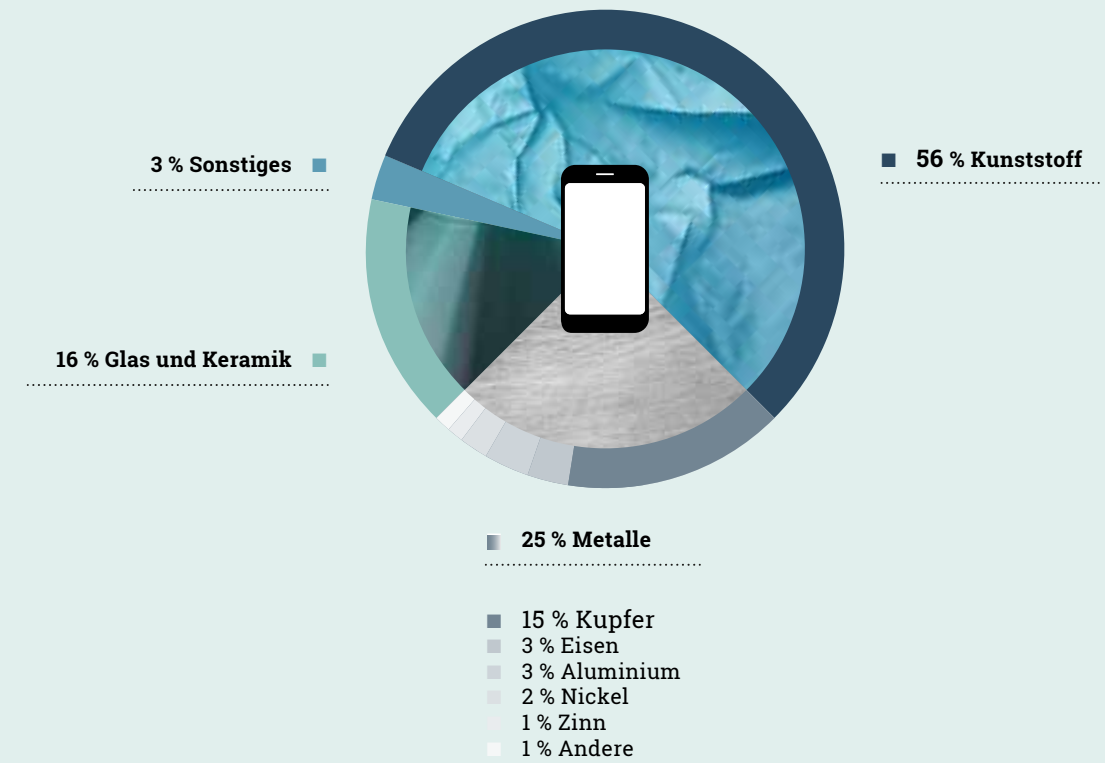


Abbildung 5: Zusammensetzung eines Smartphones nach Gewicht (Buchert et al. 2012)

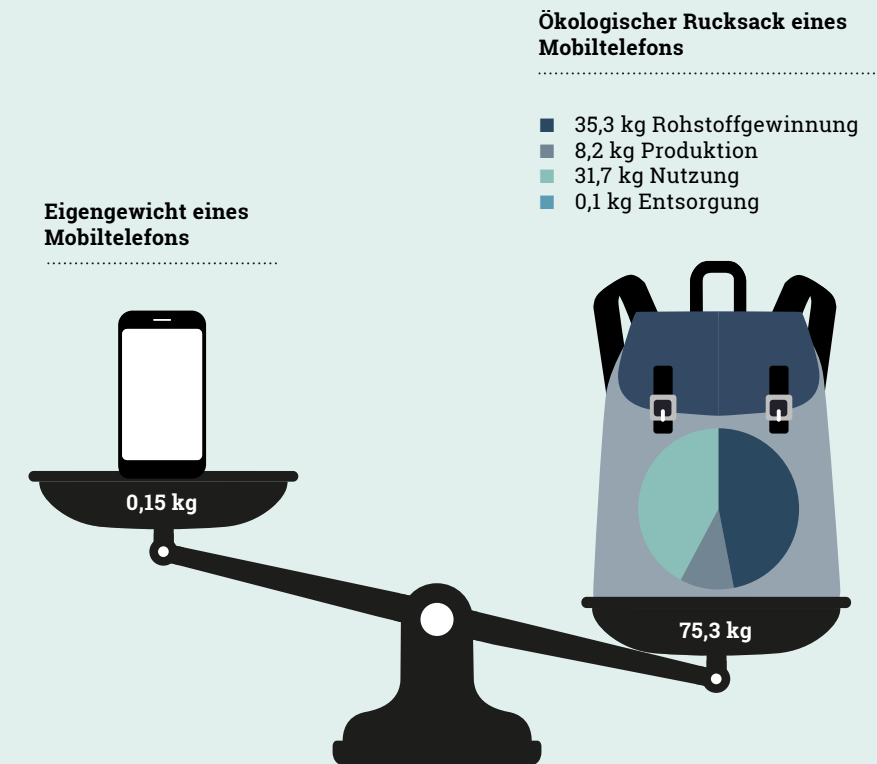


Abbildung 6: Vergleich von Gewicht und kumuliertem Rohstoffaufwand eines Smartphones (WI 2013)

Rohstoffbedarf am Beispiel eines Autos

Ein weiteres Beispiel für ein nicht nur in Deutschland sehr verbreitetes Gebrauchsgut ist der Pkw. Tabelle 2 weist für ein durchschnittliches, mit Verbrennungsmotor angetriebenes Auto eine Einsatzmenge an metallischen Materialien von insgesamt 1.408 Kilogramm aus. Berücksichtigt man, dass alle Materialien zusätzlich einen beachtlichen Rohstoffrucksack aufweisen, summiert sich der kumulierte Rohstoffaufwand für die Herstellung des Fahrzeugs auf 12,6 Tonnen Rohstoffäquivalente. Hinzu kommen für den Betrieb bei einem Verbrauch von 5 Litern pro 100 Kilometern und 15.000 Kilometern jährlicher Fahrleistung sowie 12 Jahren Lebensdauer 9.000 Liter (= 6.750 Kilogramm) Superbenzin mit einem kumulierten Rohstoffaufwand von insgesamt 8,8 Tonnen. Insgesamt hat ein herkömmliches Auto also einen Rucksack von 21,4 Tonnen Rohstoffäquivalenten. Multiplizieren wir auch in diesem Fall den kumulierten Rohstoffaufwand eines Pkws mit der Anzahl jährlich in Deutschland neu zugelassener Pkw, rund 3,2 Millionen, resultiert ein Gesamt-KRA von 68,5 Millionen Tonnen Rohstoffäquivalente – mehr als drei Prozent der gesamten kumulierten Rohstoffanspruchnahme in Deutschland.

Rohstoffe	Material-einsatz (kg)	Spez. KRA (kg RÄ/kg)	KRA (kg RÄ)
Stahl, Eisen	843	10,0	8430
Kupfer	30	67,7	2031
Aluminium	60	7,7	462
Blei	20	1,9	38
andere Metalle	40	22,0	880
LDPE	226	1,7	381
Gummi-EPDM	62	1,9	118
Dämmstoffe	20	1,8	36
Motoröl	70	1,7	120
Glas	37	1,7	63
Insgesamt	1.408		12.559

Tabelle 2: Vergleich des Gewichts und des KRA verschiedener im Pkw verbauter Rohstoffe, Einsatz von Recyclingmaterialien wurden hier positiv im KRA berücksichtigt, Quelle: Pötscher et al. 2014

Rohstoffverwendung in Deutschland

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Rohstoffaufwände für zwei bekannte Gebrauchsgüter, das Smartphone und das Auto, dargestellt. Wir konnten erkennen, aus welcher Vielzahl von Rohstoffen viele, vor allem technisch anspruchsvollere Güter zusammengesetzt sind und wie sich die Gesamtrohstoffanspruchnahme aus den Mengen dieser Rohstoffe zusammensetzt. Tatsächlich nehmen wir im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Gegenständen in Anspruch, deren Herstellung und Betrieb (und Entsorgung) ebenfalls den Einsatz einer großen Zahl von Rohstoffen erfordert. Die Gesamtmenge aller

dieser Rohstoffe ist für die Umweltschäden verantwortlich, die mit ihrer Förderung und Nutzung verbunden sind (vergleiche Kapitel 3). Um diese Gesamtmenge zu ermitteln, müssten wir zunächst herausfinden, welche Güter und Dienstleistungen insgesamt in Anspruch genommen werden; um danach für jedes bzw. jede von ihnen den Rohstoffbedarf für Herstellung und Betrieb abzuschätzen. Das wäre jedoch viel zu aufwändig. Stattdessen werden wir im Folgenden einen einfacheren Weg einschlagen und unser Augenmerk von Beginn an auf die Rohstoffe und ihre Mengen richten, die in Deutschland insgesamt in Anspruch genommen werden.

Die Rohstoffverwendung in Deutschland setzt sich zusammen aus den Rohstoffen, die der Natur in Deutschland entnommen werden, sowie denen, die aus dem Ausland importiert werden.¹ Zunächst scheinen sich nur die Rohstoffentnahmen im Inland über die Auswirkungen auf unsere Umwelt unmittelbar auf unser Wohlergehen auszuwirken. Umweltschäden im Ausland werden hingegen kaum wahrgenommen, weil sie weit entfernt stattfinden. Wie das Beispiel des durch Treibhausgasemissionen herbeigeführten Klimawandels zeigt, wirken sich (indirekt) jedoch auch Umweltschäden im Ausland auf das Wohlergehen der Menschen in Deutschland aus. Außerdem gründet sich damit der in Deutschland geschaffene Wohlstand auf Kosten, die von Menschen in anderen Teilen der Welt getragen werden, ohne dass diese entsprechend davon profitieren. Daher müssen beide Herkunftsteile – In- und Ausland – berücksichtigt werden.

Wie Tabelle 3 zu entnehmen ist, machen die mineralischen Rohstoffe und davon die Baumineralien hinsichtlich ihrer Masse knapp die Hälfte (48 Prozent) aller in Deutschland unmittelbar in Anspruch genommenen Rohstoffe aus. Der Importanteil dieser Rohstoffgruppe ist relativ klein, weil sie im Inland leicht verfügbar sind und ein Transport aus anderen Ländern kostspielig ist. Der Anteil der Energieträger beträgt rund 30 Prozent, wobei Braunkohle fast ausschließlich in Deutschland gewonnen wird. Alle anderen Energieträger werden überwiegend importiert. Letzteres gilt auch für die Erze, deren Beitrag zur Gesamtmenge nicht einmal vier Prozent beträgt. Der Rest, weniger als ein Fünftel (18 Prozent) aller Rohstoffe, ist der Biomasse, also den Erzeugnissen der Land- und Forstwirtschaft, zuzuschreiben.

Zu den eigentlichen Rohstoffen hinzugerechnet werden, wie in Tabelle 4 dargestellt, importierte Halb- und Fertigwaren, weil sie einerseits für die Produktion in Deutschland benötigt werden, andererseits in ihrer Herstellung selbst auf den Einsatz von Rohstoffen angewiesen sind, die zwar nicht bei uns, aber

¹ Rohstoffverwendung einerseits sowie Rohstoffabbau und -importe andererseits können kurzfristig voneinander abweichen, wenn mehr (oder unter Berücksichtigung von Vorräten auch weniger) Rohstoffe gewonnen und importiert als verbraucht werden. Mittelfristig ist jedoch davon auszugehen, dass sie einander entsprechen.

	Inländische Rohstoffentnahme (Mio. t)	Einfuhr der Rohstoffe (Mio. t)	Rohstoffaufkommen, gesamt (Mio. t)
Energieträger, davon	176,1	227,4	403,5
Steinkohle	2,6	45,1	
Braunkohle	166,3	0,1	
Erdöl	2,0	84,8	
Erdgas	5,2	97,4	
Erze (Metalle), davon	0,5	45,2	45,7
Eisenerz	0,5	41,4	
Kupfererz	–	1,2	
Aluminiumerz (Bauxit)	–	2,6	
Mineral. Rohstoffe, davon	613,5	24,2	637,7
Baumineralien, davon	567,9	14,6	
Sand	137,9	1,1	
Kies, Feld-, Natursteine	228,7	2,5	
Industriematerialien	45,6	9,6	
Biomasse, davon	190,4	42,1	232,5
pflanzl. Landwirtschaft	159,5	33,7	
pflanzl. Forstwirtschaft	30,5	6,8	
tierisch	0,4	1,6	
Insgesamt	980,5	338,9	1.319,4

Tabelle 3: Rohstoffaufkommen in Deutschland in 2018, Quelle: Andruleit et al. (2020); Destatis (2021b)

	Inländische Rohstoffentnahme (Mio. t)	Einfuhr der Rohstoffe (Mio. t)	Einfuhr daraus hergestellter Waren (Mio. t)	Rohstoffverwendung, gesamt (Mio. t)
Energieträger, davon	176,1	227,4	86,7	490,2
Erze (Metalle), davon	0,5	45,2	81,7	127,4
Mineral. Rohstoffe, davon	613,5	24,2	29,3	667,0
Biomasse, davon	190,4	42,1	79,5	312,0
Insgesamt	980,5	338,9	277,2	1.596,6

Tabelle 4: Rohstoffverwendung in Deutschland in 2018

4. Ausgangslage: Wozu verwenden wir wie viele Ressourcen?

im Ausland zu Umweltschäden führen. Beispiele sind hier die aus den Erzen produzierten Metalle, die wichtige Grundstoffe für die Industrie darstellen. Bei den Energieträgern dient insbesondere Erdöl nicht nur der Energiegewinnung, sondern ist zentraler Grundstoff für die Herstellung von Kunststoffen, die ihrerseits teilweise importiert werden. Lebensmittel und Möbel sind Beispiele für aus Biomasse hergestellte Güter, die nach Deutschland importiert werden. Ein Weglassen dieser Waren würde den (falschen) Eindruck erwecken, dass die deutsche Wirtschaft für ihre Produktion weniger Rohstoffe in Anspruch genommen und weniger Umweltschäden verursacht hat, als es tatsächlich der Fall ist.

Beispiele Beton, Braunkohle und Eisenerz

Einen bildlichen Eindruck von den in Deutschland verwendeten Mengen kann man sich am Beispiel des Betons machen. Beton wird aus Sand, Kies, Zement und Wasser gemischt und erhärtet dann innerhalb weniger Stunden. Der Zement selbst wird aus Kalk und anderen Mineralien zusammengesetzt und dann gebrannt. Beton wird also überwiegend aus mineralischen Rohstoffen hergestellt. In Deutschland werden pro Jahr rund 140 Millionen Tonnen Beton hergestellt. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Dichte von Beton von 2.200 Kilogramm pro Kubikmeter ist das ein Würfel mit 400 Metern Kantenlänge. Ein weiteres Beispiel: 2018 wurden in Deutschland 166 Millionen Tonnen Braunkohle gefördert, die überwiegend der Stromproduktion dienen. Das entspricht bei einer Dichte (im Gestein) von 1.200 Kilogramm pro Kubikmeter einem Volumen von 138 Millionen Kubikmetern und einem Würfel mit 520 Metern Kantenlänge. Im Vergleich dazu beträgt die 2018 in Deutschland aus zumeist importiertem Eisenerz hergestellte oder nach Deutschland importierte Eisen- und Stahlmenge rund 52 Millionen Tonnen, was einem Würfel

mit 187 Metern Kantenlänge entspricht (Abbildung 7).

Wie in Kapitel 2 dargestellt, ist es jedoch nicht sinnvoll, nur die schieren Rohstoffmengen zu betrachten. Es müssen auch die ökologischen Rucksäcke aus der Gewinnung und Aufbereitung der verschiedenen Rohstoffe mitberücksichtigt werden. Der Unterschied wird in Tabelle 5 deutlich.

	ohne Rucksack (Mio. t)	mit Rucksack (Mio. t)
Energieträger	490	746
Erze (Metalle)	127	988
Mineralische Rohstoffe	667	789
Biomasse	312	492

Tabelle 5: Rohstoffverwendung mit und ohne Rucksack in Deutschland in 2018

Im zeitlichen Verlauf hat die Rohstoffverwendung in Deutschland von 2000 bis 2018 leicht abgenommen, seit 2005 ist sie weitgehend konstant geblieben. Bei Betrachtung der kumulierten Rohstoffaufwände, das heißt inklusive Berücksichtigung der Rohstoffrucksäcke, fällt dagegen ein leichter Anstieg des Gesamtaufwandes ins Auge (siehe Abbildung 8). Ursache für diese Diskrepanz sind erstens die Erze, bei denen bei genauem Hinsehen auch schon bei der Rohstoffverwendung ein ganz leichter Anstieg zu verzeichnen war, der durch den größeren Rucksack dieser Rohstoffgruppe viel stärker zum Tragen kommt. Zweitens sind die biotischen Rohstoffe in ihrer Gesamtmenge zwar unverändert geblieben, ihre Zusammensetzung hat sich aber in Richtung der landwirtschaftlichen Biomasse verschoben, die einen größeren Rucksack als die

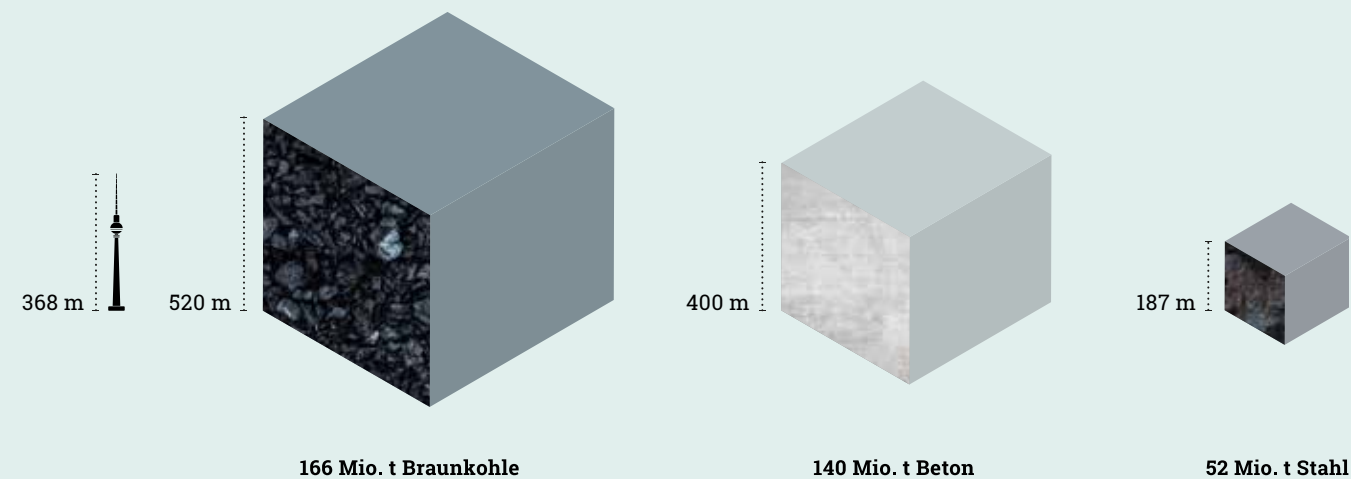


Abbildung 7: Visualisierung der in Deutschland jährlich genutzten Rohstoffmengen

forstwirtschaftliche Biomasse aufweist. Ließen wir die Rucksäcke unberücksichtigt, könnte der falsche Eindruck entstehen, der gesamte (das heißt kumulierte) Rohstoffaufwand in Deutschland hätte in den letzten Jahren nicht mehr zugenommen. Auch in diesem Fall zeigt sich wieder, wie wichtig es ist, Rohstoffgruppen zu unterscheiden, wenn sie verschiedene Rucksäcke aufweisen.

Rohstoffverwendung weltweit

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Rohstoffverwendung in Deutschland betrachtet, weil sie Aufschluss darüber gibt, wie viele und welche Rohstoffe die Unternehmen in Deutschland in Anspruch nehmen, um mit ihrer Hilfe Waren und Dienstleistungen und damit Einkommen für die Bevölkerung zu schaffen. Wie bereits angedeutet wurde und wie in Kapitel 3 noch weiter ausgeführt werden soll, lassen sich die mit der Gewinnung und Verwendung von Rohstoffen verbundenen Schäden an Natur und Umwelt aber meist nicht auf einzelne Länder begrenzen. Daher ist die Betrachtung eines einzelnen Landes und seiner Rohstoffverwendung zur Beurteilung der Auswirkungen auf das Ökosystem Erde nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Perspektive erweitert und ein Blick auf die Rohstoffinanspruchnahme weltweit geworfen.

Da bei der Betrachtung der weltweiten Rohstoffverwendung Ländergrenzen nicht relevant sind und kein Import von außerhalb der Erde erfolgt, können Importe generell vernachlässigt werden. Aus diesem Grund müssen Rohstoffrucksäcke nicht zusätzlich berücksichtigt werden; sie sind in der Gesamtmenge bereits enthalten. Daher können die in Abbildung 9 aufgeführten weltweiten Rohstoffabbauumengen unmittelbar mit den in Tabelle 5 (rechte Spalte) und Abbildung 8b aufgeführten Mengen für Deutschland verglichen werden. Dieser Vergleich zeigt, dass sich der Rohstoffabbau weltweit seit dem Jahr 1970 mehr als verdreifacht hat und seit dem Jahr 2000 immerhin um 70 Prozent angestiegen ist. Dem steht in Deutschland ein Anstieg seit 2000 um lediglich 16 Prozent gegenüber. Ursache für diesen Unterschied ist vor allem die wirtschaftliche Entwicklung in vielen Teilen der Welt, insbesondere in den sogenannten Schwellenländern, in denen die Wirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten deutlich stärker gewachsen ist als in Deutschland. Insgesamt ist die Wirtschaftsleistung laut Weltbank von 2000 bis 2017 global um 80 Prozent angestiegen (Weltbank 2022). Nur ein Teil dieses Anstiegs kann mit dem Bevölkerungswachstum in Zusammenhang gebracht werden, welches im gleichen Zeitraum mit plus 23 Prozent zu Buche schlug.

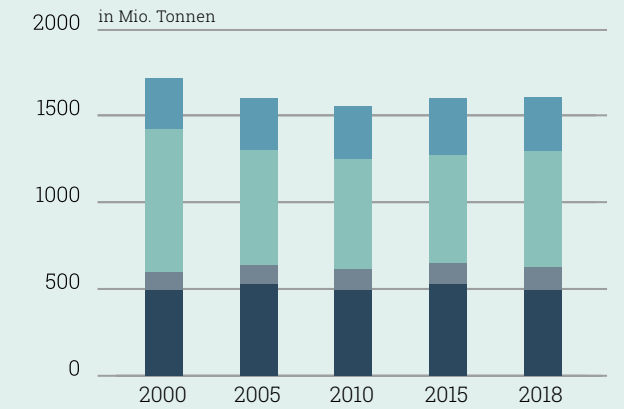


Abbildung 8a: Veränderung der Rohstoffverwendung in Deutschland zwischen 2000 und 2018

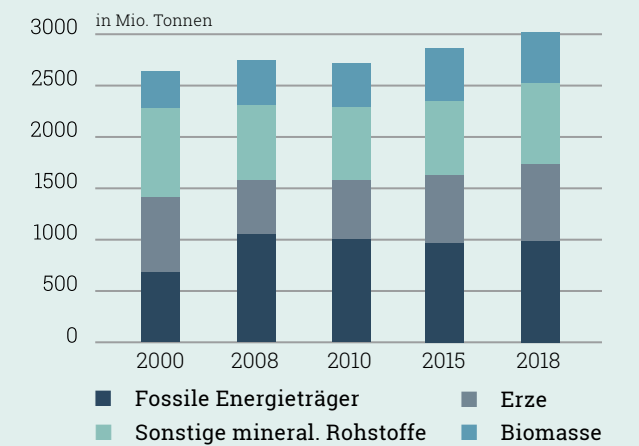


Abbildung 8b: Veränderung des kumulierten Rohstoffaufwands in Deutschland zwischen 2000 und 2018

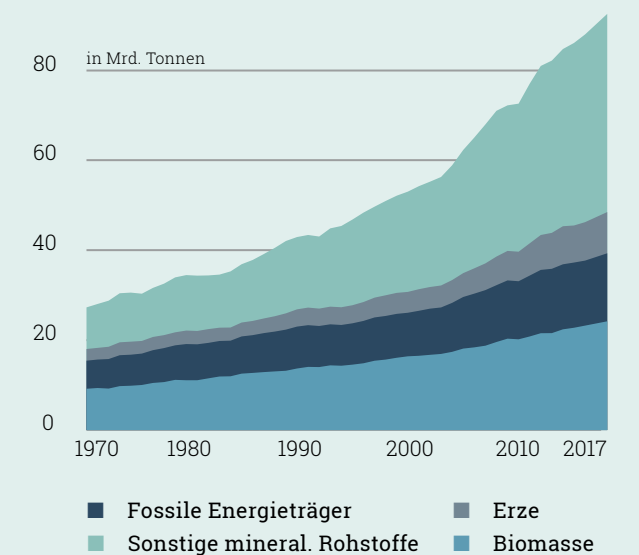


Abbildung 9: Globaler primärer Rohstoffabbau 1970-2017 (IRP 2019b)

Im Jahr 2017 wurden weltweit Rohstoffe im Umfang von 92,1 Milliarden Tonnen abgebaut, das entspricht dem 31-fachen der in Deutschland verwendeten kumulierten Menge von rund 2,95 Milliarden Tonnen RÄ (Destatis 2021b). Die Weltbevölkerung war allerdings im Jahr 2017 mit 7,55 Milliarden Menschen rund 91-mal so groß wie die deutsche Bevölkerung. Das bedeutet, dass die Deutschen im Durchschnitt pro Kopf die etwa dreifache Menge an Rohstoffen in Anspruch genommen haben wie der Rest der Welt. Betrachtet man dagegen die Wirtschaftsleistung, so ist das Bruttoinlandsprodukt der ganzen Welt nur etwa 23-mal so groß wie das Deutschlands. Das bedeutet, dass die Wertschöpfung pro Tonne eingesetzter Rohstoffe in Deutschland im Jahr 2017 um rund 35 Prozent höher war als im globalen Durchschnitt.

Eine genauere Betrachtung der Zusammensetzung der im Jahr 2017 abgebauten und verwendeten Rohstoffe zeigt, dass die Anteile der mineralischen Rohstoffe und der Biomasse weltweit mit 48 bzw. 26 Prozent deutlich höher sind als in Deutschland (26 bzw. 18 Prozent). Das dürfte sich im Fall der mineralischen Rohstoffe auf den größeren Bedarf an Gebäuden und Infrastruktur und im Fall der Biomasse vor allem auf die größere Bedeutung der Landwirtschaft zurückführen lassen. Im Gegensatz dazu sind die Anteile an Erzen und Metallen (32 Prozent) und der fossilen Energieträger (24 Prozent) in Deutschland deutlich höher als weltweit (10 bzw. 16 Prozent). Hierin spiegelt sich der Entwicklungsstand der Wirtschaft und die Wirtschaftsleistung, für die Metalle und Energie als Bausteine und Triebkräfte unverzichtbar sind.

Betrachten wir schließlich noch die Rohstoffanspruchnahme weltweit im Jahr 2017 im Verhältnis zur globalen Bevölkerung zum gleichen Zeitpunkt, so stellen wir fest, dass für jeden Menschen im statistischen Durchschnitt 12,2 Tonnen Rohstoffe gefördert wurden. In Deutschland beträgt die Rohstoffanspruchnahme (einschließlich Rucksack) im Vergleich dazu sogar 35,6 Tonnen. Dieser Wert ist typisch für Industrieländer. In manchen Industrieländern, zum Beispiel den USA, liegt dieser Wert sogar noch deutlich höher. In den Entwicklungsländern liegt die Pro-Kopf-Rohstoffanspruchnahme hingegen weit unter dem Durchschnitt, in Afrika sogar unter fünf Tonnen (IRP 2019b). Genauere Vergleichszahlen für die Rohstoffverbräuche in verschiedenen Weltregionen, allerdings ohne Berücksichtigung der Rucksäcke, sind in Abbildung 10 dargestellt. Diese Zahlen deuten an, welche Mengen an Rohstoffen die Menschen in verschiedenen Teilen der Welt in Anspruch nehmen und damit für die durch ihre Förderung und Aufbereitung verursachten Umweltschäden verantwortlich sind (Abbildung 10).

Rohstoffverwendung in der Zukunft

Mit steigender Weltbevölkerungszahl und dem Ziel von wachsendem und ausgeglichener verteiltem Wohlstand – also verstärktem Wirtschaftswachstum – ist mit einem immer größer werdenden Bedarf an Rohstoffen zu rechnen. Gleichzeitig stellt jede Rohstoffförderung einen Eingriff in die natürliche Umwelt dar, der massive Schäden hinterlassen kann und, was die geologische Verfügbarkeit von Rohstoffen angeht, unumkehrbar ist. Nachhaltigen Rohstoffabbau gibt es nicht. Dazu kommt, dass in unserem aktuell vorherrschenden, linearen Wirtschaftssystem Produkte am Ende ihrer Lebenszeit entsorgt werden, die darin enthaltenen Rohstoffe größtenteils verloren gehen und gleichzeitig als Abfall weitere Umweltschäden verursachen können. Diese zunehmend rohstoffintensive Wirtschaftsweise bei gleichzeitiger Zerstörung der natürlichen Umwelt kann so nicht fortgeführt werden.

Einige Ansätze, dieser Entwicklung entgegenzuwirken, werden unter anderem von der OECD vorgeschlagen. In ihrem „Global Material Resources Outlook to 2060“ sagt die OECD (2018) auf Basis von Prognosen für die wirtschaftliche Entwicklung der verschiedenen Weltregionen bis 2060 einen Anstieg des Welt-Bruttoinlandsproduktes um etwas mehr als den Faktor 3,5 voraus. Würde dabei von einer unveränderten Rohstoffintensität der Produktion ausgegangen, das heißt der Rohstoffbedarf stiege genauso stark an wie die Wirtschaftsleistung, würde die Rohstoffanspruchnahme von 89 Milliarden Tonnen im Jahr 2017 auf 313 Milliarden Tonnen im Jahr 2060 ansteigen (entsprechend dem grauen Balken in Abbildung 11). Gleichzeitig werden jedoch, wie in Abbildung 11 dargestellt, zwei Triebkräfte identifiziert, die die Ressourcenintensität und dadurch bei vorgegebener Wirtschaftsleistung auch den vorhergesagten Rohstoffverbrauch verringern. Diese Triebkräfte sind der strukturelle und der technologische Wandel. Der technologische Wandel (= blauer Balken) ermöglicht es unter anderem, die gleiche Produktmenge unter Einsatz von weniger Rohstoffen, das heißt effizienter und damit auch billiger zu produzieren. In der Prognose der OECD sinkt dadurch der Rohstoffeinsatz im Jahr 2060 um 68 Milliarden Tonnen. Außerdem kommt noch ein struktureller Wandel (= grüner Balken) zum Tragen, der darin besteht, dass der Anteil des Dienstleistungssektors im Vergleich zur industriellen und landwirtschaftlichen Produktion zunimmt. Da der Dienstleistungssektor gleichzeitig eine geringere Rohstoffintensität aufweist, führt diese Veränderung zu einer Reduktion des Rohstoffeinsatzes, die bis 2060 auf 80 Milliarden Tonnen beziffert wird. Insgesamt steigt dadurch der Rohstoffbedarf bis 2060 nicht auf 313, sondern nur auf 167 Milliarden Tonnen pro Jahr – was aber immer noch fast einer Verdoppelung gleichkommt.

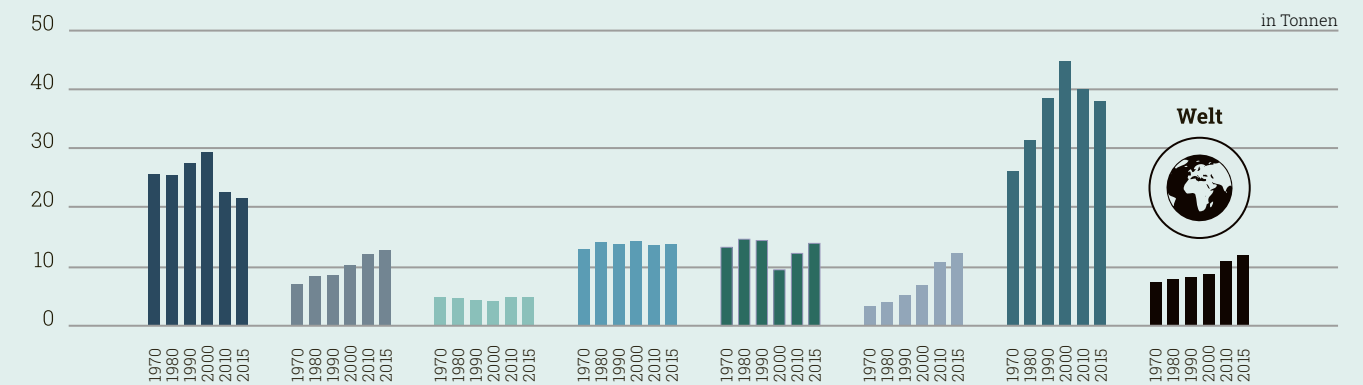


Abbildung 10: Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch (ohne Rucksack) in verschiedenen Weltregionen von 1970 bis 2015

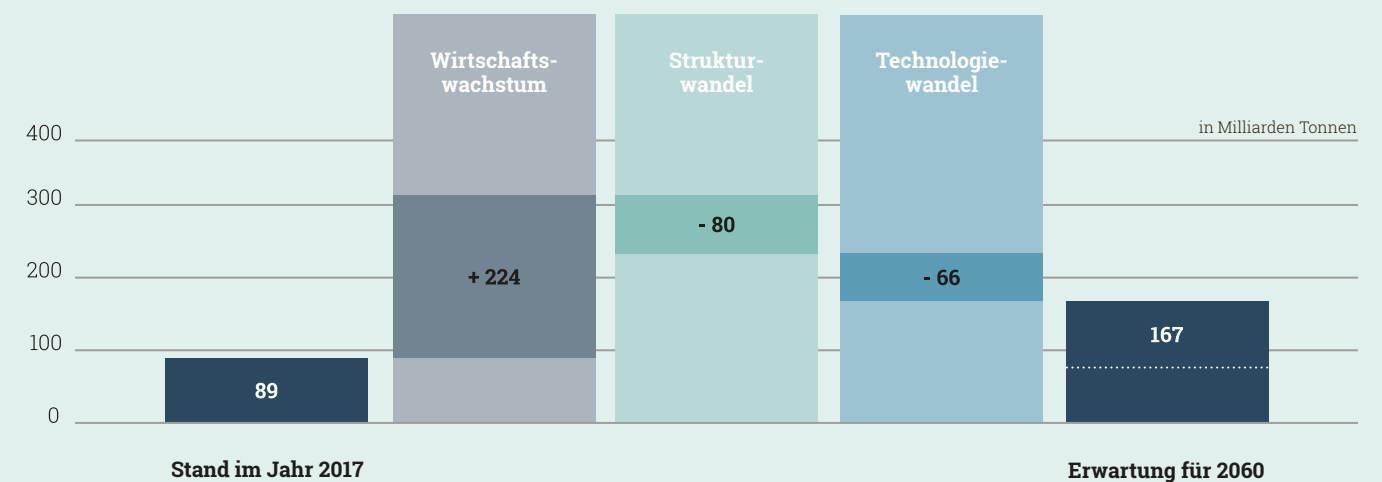


Abbildung 11: Einflussfaktoren auf das prognostizierte Wachstum des weltweiten Rohstoffbedarfs von 2017 bis 2060 (OECD 2018)

3. Konsequenzen: Warum ist intensive Ressourcennutzung ein Problem?

Bisher haben wir definiert, was Ressourcen sind und wie man ihre Nutzung messen kann. Im folgenden Kapitel wollen wir uns der Frage zuwenden, welche Konsequenzen die Nutzung hat.

Die Nutzung von Ressourcen wirkt sich in unterschiedlicher Weise auf unser Wohlergehen aus. Einerseits werden mithilfe der Ressourcen Gegenstände geschaffen oder Tätigkeiten ermöglicht, die unser Leben angenehmer gestalten und damit unseren Wohlstand steigern. Das ist der Grund, warum wir so viele Ressourcen in Anspruch nehmen. Andererseits gehen mit der Gewinnung und Inanspruchnahme materieller Ressourcen auch Wohlstandseinbußen einher, die verschiedene Ursachen haben können. Rohstoffe gehen durch die Verwendung durch die Menschen zwar nicht verloren (siehe Masseerhaltungssatz der Physik), sie liegen aber am Ende ihrer Nutzungsphase, wenn sie „verbraucht“ sind oder als Abfall entsorgt wurden, meist nicht mehr in einem Zustand vor, in dem sie ohne Weiteres erneut genutzt werden können. Deshalb stehen jetzt genutzte Ressourcen zukünftigen Generationen nicht mehr uneingeschränkt zur Verfügung, das zukünftige Nutzungspotenzial für diese Ressourcen wurde gemindert (siehe Info-Box 1). Dabei ist „nachhaltige Entwicklung [...] eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.“ (WCED, Hauff 1987). Unser Wohlstand umfasst also unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit nicht nur unseren aktuellen, sondern auch den zukünftigen Wohlstand von uns und unseren Nachkommen. Vor diesem Hintergrund ist darüber nachzudenken, ob wir unseren aktuellen Rohstoffverbrauch zugunsten zukünftiger Generationen einschränken müssen. Allerdings stellen sich hier einige Fragen, die aktuell kaum beantwortbar sind: Wie groß sind die aktuell verfügbaren Ressourcen und wie können sie gerecht zwischen verschiedenen Generationen aufgeteilt werden?

Eine andere, aus der Ressourcennutzung resultierende Einbuße betrifft den Zustand unserer natürlichen Umwelt (= unsere Lebensgrundlagen). Die Ressourcennutzung hat massive Schäden an Land, im Wasser und in der Luft sowie den darin lebenden Ökosystemen zur Folge. Auch hier kann man von Wohlstandsminderung im Sinne einer gesunden Umwelt sprechen. Wenn wir diese Auswirkungen genauer betrachten wollen, besteht eine Herangehensweise darin, sich die verschiedenen

Stadien des gesamten Nutzungsweges der Ressourcen genauer anzuschauen (siehe Abbildung 12). Wir sprechen hier auch von „Lebenszyklus-Analyse“ oder, im Englischen, von „Life Cycle Analysis“ (Abk.: LCA).

Welche Schäden entstehen im Zuge der Ressourcennutzung?

Wir wollen uns nun im Detail anschauen, welche Auswirkungen die Nutzung von Ressourcen an den verschiedenen Stellen ihres Gebrauchs hat – von der Exploration der Bodenschätze bis zu ihrer Verwendung in Produkten:

Exploration der Ressourcen

Bevor Rohstoffe gefördert werden können, müssen zuerst ihre Lagerstätten ausfindig gemacht werden. In Bergbau und Geologie beschreibt dies der Begriff „Exploration“, also die Suche und Erschließung von Rohstoffvorkommen. Dazu wenden Explorationsgeologen unterschiedlichste geophysikalische Methoden an, um zunächst mögliche Standorte von Lagerstätten zu identifizieren. Dies geschieht bspw. mit Hilfe von Sonar, das heißt von in den Boden ausgesandten Schallwellen, deren Reflektionsmuster Rückschlüsse darauf zulassen, wo und in welcher Tiefe sich die Ressource befinden könnte. Danach müssen Bohrungen durchgeführt werden, um zu untersuchen, ob und in welcher Qualität die gesuchten Rohstoffe tatsächlich vorhanden sind. Erweisen sich die Bedingungen als günstig, kann der eigentliche Bergbau beginnen. Zwischen dem Auffinden einer Lagerstätte und dem Beginn des Abbaus der Ressource können zehn Jahre und mehr vergehen.

Mit der Exploration beginnt der Lebenszyklus einer Ressource. Es liegt auf der Hand, dass sie – und vor allem der nächste Schritt, der Abbau der Rohstoffe – mit teilweise massiven Eingriffen in das Ökosystem einhergeht: Die Erde muss zum Beispiel entweder abgetragen oder angebohrt werden, wodurch Lebensräume verloren gehen oder es zur Verschmutzung von Grund- (oder Meer-) Wasser kommen kann. Durch den Eingriff

Info-Box 1

„Verbrauch“ von Rohstoffen

Im allgemeinen Sprachgebrauch ist oft vom Verbrauch von Rohstoffen die Rede. Tatsächlich durchlaufen Rohstoffe im Zuge der Herstellung und Nutzung von Gütern sowie in der Nachnutzungsphase verschiedene Zustände. Die verwendeten Rohstoffe gehen dabei nicht verloren, sie ändern aber ihren Zustand und sind dadurch für die Menschen von unterschiedlichem Nutzen.

Beispiel: Wir basteln aus Knete unterschiedlicher Farbe einen Erdglobus: das Meer aus blauer Knete, die Kontinente grün, die Wüsten gelb und die Berge braun. Zu Beginn sind die Knetmassen jeweils von einer Farbe und daher sehr nützlich, weil daraus ganz beliebige Gegenstände abgebildet werden können. Auch der fertige Globus ist von großem Nutzen, weil wir ihn so, wie

er hergestellt wurde, haben wollten. Im Laufe der Zeit verliert der (Knet-) Globus an Nutzen, weil er schmutzig oder beschädigt wird, die Farben sich vermischen und keine Länder oder Meere mehr erkennbar sind. Irgendwann ist der Globus so beschädigt, dass wir ihn nicht mehr als nützlich empfinden und entsorgen. Im Müll vermischen sich die verschiedenen Farben weiter und die Knete vermischt sich mit anderem Abfall, sodass sie nicht mehr zur Herstellung weiterer Gegenstände verwendet werden kann. Die Knete ist jetzt im Grunde immer noch vorhanden, aber die Farben sind miteinander vermischt und es lässt sich damit nicht erneut ein Erdglobus herstellen. Verbrauchen bedeutet in diesem Zusammenhang also nicht, dass die Rohstoffe nicht mehr vorhanden sind, sondern dass sie für eine unmittelbare Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen.

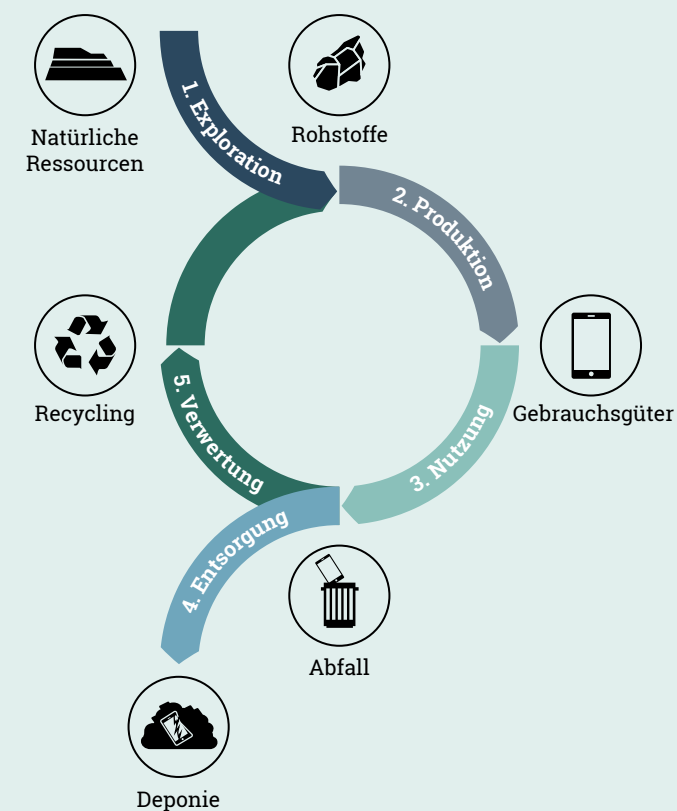


Abbildung 12: Die fünf Phasen des Lebenszyklus von materiellen Ressourcen

können bspw. auch das Heben oder Senken von Erdschichten oder Erdbeben verursacht werden, was Schäden an Gebäuden oder Wasser- und Gasleitungen zur Folge haben kann.

Förderung und Aufbereitung der Ressourcen

Ressourcen werden in den meisten Fällen aus der Erde gefördert, teilweise aber auch aus Gewässern (zum Beispiel Manganknollen am Boden der Ozeane) oder der Luft (Gewinnung von Gasen wie Sauerstoff oder Edelgasen wie Helium). Bei der Förderung aus der Erde sind die Schäden am offensichtlichsten. Da der Anteil der gesuchten Ressourcen in den identifizierten Lagerstätten in der Regel nur einen Bruchteil der abzutragenden Erdmassen ausmacht oder sozusagen unter unerwünschtem Gestein versteckt ist, ist ein massiver Eingriff in das Ökosystem beim Bergbau in der Regel unvermeidbar. Die bekanntesten Beispiele hierzulande kommen aus dem Kohlebergbau. Braunkohle kommt oft oberflächennah vor und wird deshalb im Tagebau gewonnen. Da die Kohle in dünnen Schichten, den „Flözen“, unter der Erde liegt, werden von riesigen Baggern zunächst die Deckschichten (aus „taubem“ Gestein) abgetragen und als Abraum zur Seite gelegt, bevor das Flöz abgebagert werden kann (siehe Abbildung 13). Aber auch Metallerze mit beispielsweise Gold, Kupfer oder Uran und Industriemineralien wie Kies und Sand werden im Tagebau abgebaut. Tagebaugebiete können Flächen von vielen Quadratkilometern in Anspruch nehmen, auf denen die ursprünglichen natürlichen Lebensräume zerstört sind und die ohne Weiteres (das heißt ohne aufwändige Rekultivierung) auch nicht wieder landwirtschaftlich oder zu Freizeit Zwecken genutzt werden können. „Flächenverlust“ ist also die Folge. Außerdem sammelt sich in den Tagebaugruben Grund- und Oberflächenwasser, das durch den Bergbau verschmutzt wird. Besonders wirkt sich hier aus, dass das zuvor feste Deckgestein

auseinandergerissen und darin gebundene Schadstoffe wie Schwermetalle durch den Einfluss der Witterung herausgelöst werden können. Wird dieses Wasser nicht gereinigt, kommt es zu Schäden an der Umwelt (Ökotoxizität) und der menschlichen Gesundheit (Humantoxizität).

Im Vergleich zum Tagebau tritt Untertagebergbau weniger in Erscheinung, weil er unter der Erdoberfläche geschieht. Der Flächenverlust ist dadurch geringer, aber auch hier werden große Mengen Abraum produziert, die teilweise auf der Erdoberfläche abgelagert werden. Die schädigende Wirkung auf Grund- und andere Gewässer ist beim Untertagebergbau ebenso vorhanden wie beim Tagebau.

Noch zerstörerischer ist die Gewinnung von wertvollen Metallerzen (zum Beispiel für Smartphones erforderliches Coltan) oder Edelmetallen (zum Beispiel Gold), die in dem sie umgebenden Gestein nur in geringen Mengen (wenige Prozent bei Kupfer bis Promille bei Gold) enthalten sind. Hier müssen üblicherweise große Mengen von Gestein zerkleinert und mit verschiedenen physikalischen und chemischen Verfahren behandelt werden, um die Wertmetalle herauszulösen. Dazu werden große Mengen an Energie benötigt und es kommt vor allem im Einzugsbereich der Förder- und Aufbereitungsanlagen zu Wasser- und Luftverschmutzung (siehe Abbildung 14), die sich auf Natur und Menschen auswirken.

Auch die Gewinnung und Aufbereitung von Biomasse, also nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, Baumwolle, Nahrungsmitteln und Tierfutter, kann mit Umweltschäden verbunden sein. Dazu gehören massive Landnutzungsänderungen und der zusammenhängende Lebensraumverlust für Tier- und Pflanzenarten, Nährstoffüberschüsse und chemische Belastung von Wasser



Abbildung 13: Braunkohletagebau Garzweiler in Nordrhein-Westfalen



Abbildung 14: Minenabwässer in einem Fluss

und Boden sowie Erosion. Das gilt umso mehr, wenn Biomasse im industriellen Maßstab, das heißt großflächig und unter Einsatz von Maschinen, Düngern und Pestiziden erzeugt wird. Vorsichtig zu beobachten ist daher auch der Ersatz nicht erneuerbarer Rohstoffarten durch Biomasse im großen Stil. Beispiele sind der Einsatz von Holz als Konstruktionsmaterial beim Bau von Gebäuden oder von Getreide oder Mais für die Herstellung von klimafreundlichen Biokraftstoffen oder Biokunststoffen.

Laut dem Internationalen Ressourcenausschuss der Vereinten Nationen (IRP 2019b, Kap. 3.2.1) sind die Förderung und Aufbereitung von Ressourcen (Metalle, Mineralien, fossile Energieträger und Biomasse) Ursache von mehr als 90 Prozent des weltweiten Wasserstresses und Verlusts an Artenvielfalt und ungefähr der Hälfte der Wirkung auf den Klimawandel. Der Beitrag von Staub zur Schädigung der menschlichen Gesundheit ist mit 30 Prozent global gesehen etwas geringer, kann aber lokal (das heißt am Ort der Förderung und Aufbereitung) auch deutlich größer sein.

Verwendung für die Herstellung von Gütern

Auf die Gewinnung der Ressourcen folgt deren Verwendung. Meist können Ressourcen nicht direkt verwendet werden (eine Ausnahme: Wasser), sondern müssen erst zu Gegenständen verarbeitet werden, die von Menschen genutzt werden können. Die Herstellung dieser Güter erfordert verschiedene Arten der Verarbeitung, die jeweils typische Umweltschäden nach sich ziehen können. Viele Materialien, die für die Herstellung von Waren verwendet werden, müssen bspw. zunächst durch chemische Reaktionen aus verschiedenen Ressourcen hergestellt werden. So müssen aus raffiniertem Erdöl zunächst Chemikalien hergestellt werden, die zu Kunststoffen umgesetzt werden, welche wiederum zu Bauteilen für konkrete

Produkte (bspw. eine Handyhülle) verarbeitet werden. Ähnlich muss aus dem Kupferbarren zunächst ein Draht gezogen werden, der nach Kunststoffummantelung und Anbringen von Steckern als Ladekabel dienen kann. In diesen Verarbeitungsprozessen entstehen unerwünschte Nebenprodukte – Abgase und Abfälle –, die bei unsachgemäßer Entsorgung Menschen und Umwelt vergiften können. Für den Betrieb vieler industrieller Prozesse wird viel Energie benötigt, deren Bereitstellung häufig durch die Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) erfolgt. Diese Verbrennung führt nicht nur zur Emission großer Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid, wodurch der Klimawandel vorangetrieben wird. Dabei werden auch Schwefel- und Stickoxide in die Luft abgegeben, die zur Versauerung von Boden und Wasser führen (siehe Abbildung 15).

Für die landwirtschaftliche Produktion sind die Rohstoffe Stickstoff und Phosphor als Nährstoffe in Form von Düngern unentbehrliche Ressourcen. Werden sie unsachgemäß angewendet, kann nur ein Teil der Nährstoffe von den Pflanzen für ihr Wachstum verwendet werden. Das hat zur Folge, dass der ungenutzte Teil durch Regen in Oberflächengewässern gespült wird und dort zu Algenblüten führt oder ins Grundwasser versickert und damit unsere Wasserressourcen schädigt.

Verwendung der Güter (Nutzungsphase)

Werden die aus den Ressourcen hergestellten Produkte nach ihrer Herstellung von den Menschen verwendet, so nutzen sich viele bzw. Teile davon nach und nach ab. Dadurch gelangen die entsprechenden Materialien bzw. die Ressourcen, aus denen sie hergestellt wurden, wieder in die Umwelt. Dies geschieht allerdings in einer Form, in der sie nicht nur kaum mehr nutzbar, sondern für die Umwelt sogar schädlich sind. Beispiele sind Autoreifen oder Bremsbeläge, deren Abnutzung zur



Abbildung 15: Luftverschmutzung durch die Industrie



Abbildung 16: Verwertung von Elektronikabfall

Freisetzung von Mikroplastik und Kupfer (früher sogar Asbest) führt. Bei anderen Produkten wie Pflege- und Reinigungsmitteln ist zwar davon auszugehen, dass sie in der Regel nach der Nutzung dem Abwasser und dessen Reinigung im Klärwerk zugeführt werden, dennoch gelangt ein großer Teil davon in die Umwelt und erzeugt Schäden in Böden und Gewässern. Sehr viele Güter bspw. aus der Unterhaltungselektronik (zum Beispiel Handys, Laptops, TV-Geräte) oder für die Fortbewegung (zum Beispiel Autos) benötigen außerdem für ihren Betrieb Energie, deren Bereitstellung ebenso und zum Teil noch mehr zum Ausstoß von Treibhausgasen und damit zum Klimawandel beiträgt als die Herstellung dieser Güter (siehe bspw. den ökologischen Rucksack eines Mobiltelefons in Abbildung 6).

Abfallentsorgung oder Verwertung (Nachnutzungsphase)

Gebrauchsgüter werden in der Regel dann als Abfall entsorgt, wenn sie ihre Funktion nicht mehr erfüllen. Sie sind dann zunächst einmal wertlos. Um an Wert zu gewinnen, müssten sie in ihre Bestandteile zerlegt und nach Materialien sortiert werden. Je nach Konstruktion ist das sehr aufwendig, insbesondere, wenn Verbunde aus verschiedenen Materialien (zum Beispiel faserverstärkte Kunststoffe oder Leiterplatten von Elektronikgeräten) verwendet wurden. Die verschiedenen Bestandteile, also Fasern und Kunststoff im ersten Beispiel sowie Kupfer, Kunststoff, Edelmetalle und viele andere bei den Leiterplatten, lassen sich nur mit großem Aufwand trennen. Im günstigsten Fall geschieht diese Trennung mit Technologien, die zwar ihrerseits Energie und andere Ressourcen verbrauchen, sich aber wenig schädlich auf die Umwelt auswirken, weil bspw. anfallende Abgase gereinigt werden. Im schlechteren Fall werden diese Abfälle in Entwicklungsländer geschickt, wo die Zerlegung und Sortierung in Handarbeit mit geringem technischen Aufwand und daher sehr kostengünstig geschieht. Der Nachteil dabei ist, dass in großem Umfang schädliche Abgase entstehen, die die Umwelt und vor allem die Gesundheit der Menschen schädigen (siehe Abbildung 16).

Noch gravierender ist das Problem, wenn verschiedene Abfälle nicht getrennt gesammelt werden, sondern vor der Aufbereitung vermischt wurden. Dann müssen zusätzlich zu den Bestandteilen der einzelnen Abfälle auch noch die Abfälle selbst sortiert werden. Der Aufwand dafür steigt und macht eine Verwertung schwieriger. Ein Beispiel dafür sind Smartphones, die wie in Kapitel 2 gezeigt einerseits aus einer Vielzahl von Komponenten bestehen, andererseits in einer Mülltonne aber nur einen kleinen Teil des Mülls ausmachen. Das Aussortieren von Smartphones aus dem Restmüll erfordert einen hohen technischen und Energieaufwand mit entsprechenden Folgen für Klima und Umwelt.

Letztlich müssen die Umweltwirkungen der Wiederverwertung von Rohstoffen jedoch im Vergleich zur Neugewinnung von Ressourcen gesehen werden. Die Sammlung, Sortierung und

Aufbereitung von Abfällen ist aufwendig und nicht völlig ohne Schäden auf die Umwelt durchführbar. Solange die Schäden jedoch geringer sind als die durch die gleiche Menge im Bergbau gewonnener Rohstoffe, gilt das Recycling als ökologisch sinnvoll. Nicht für alle Rohstoffe und Produkte ist dies mit den heutigen technischen Mitteln der Fall. So verursacht bspw. die Rückgewinnung von Indium aus seiner Hauptanwendung in Displays noch ein Vielfaches der CO₂-Emissionen der Gewinnung von Indium im Bergbau und wird daher nicht durchgeführt. Gerade für die in großen Massen eingesetzten Rohstoffe wie Stahl, Aluminium und Kupfer stehen hingegen hochentwickelte Verfahren zur Verfügung, die recyceltes, also sekundäres, Material mit deutlich geringeren Umweltwirkungen bereitstellen können, als dies für Primärmaterial aus dem Bergbau der Fall ist.

Im aus Rohstoffsicht ungünstigsten Fall werden Abfälle nicht aufbereitet, sondern deponiert. Je nach Gefährlichkeit der abgelagerten Materialien müssen Deponien sorgfältig abgedichtet werden, um für Mensch und Ökosystem gefährliche Emissionen in Luft, Wasser und Erde zu vermeiden. In vielen Ländern wird dies nicht gemacht. Von entsprechenden Umweltproblemen wie bspw. dem Eintrag von Plastik ins Meer oder giftigen Chemikalien in Gewässer ist immer wieder die Rede. Doch selbst bei Deponien, die nach dem Stand der Technik versiegelt wurden, bleibt die Landinanspruchnahme sowie das Gefährdungspotenzial bestehen. Ein Extrembeispiel aus der aktuellen Diskussion ist die Endlagerung von radioaktiven Abfällen.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde eine Vielzahl von Umweltschäden aufgeführt, die mittelbar oder unmittelbar auf die Gewinnung oder Verwendung von Ressourcen zurückzuführen sind. Wie groß diese Schäden sind, zeigt der folgende Abschnitt.

Die ökologischen Auswirkungen in Zahlen

Einen ersten Überblick darüber, wie groß die ökologischen Schäden sind, die durch die Gewinnung und Aufbereitung verschiedener Arten von Rohstoffen hervorgerufen werden, gibt Abbildung 17. Dabei werden vier Schadenskategorien unterschieden:

- Verstärkung des Klimawandels,
- Ausstoß von gesundheitsschädlichem Staub,
- Herbeiführung von Wasserstress² und
- Verlust von biologischer Vielfalt (Biodiversität)

² Wasserstress bedeutet, dass in einer Region von den Menschen mehr Wasser verbraucht wird, als durch Regen und andere natürliche Quellen wieder hinzukommt. Auf Dauer wird dadurch die Natur geschädigt, weil für die Pflanzen und Tiere (und letztlich auch für die Menschen) nicht mehr genug Wasser vorhanden ist.

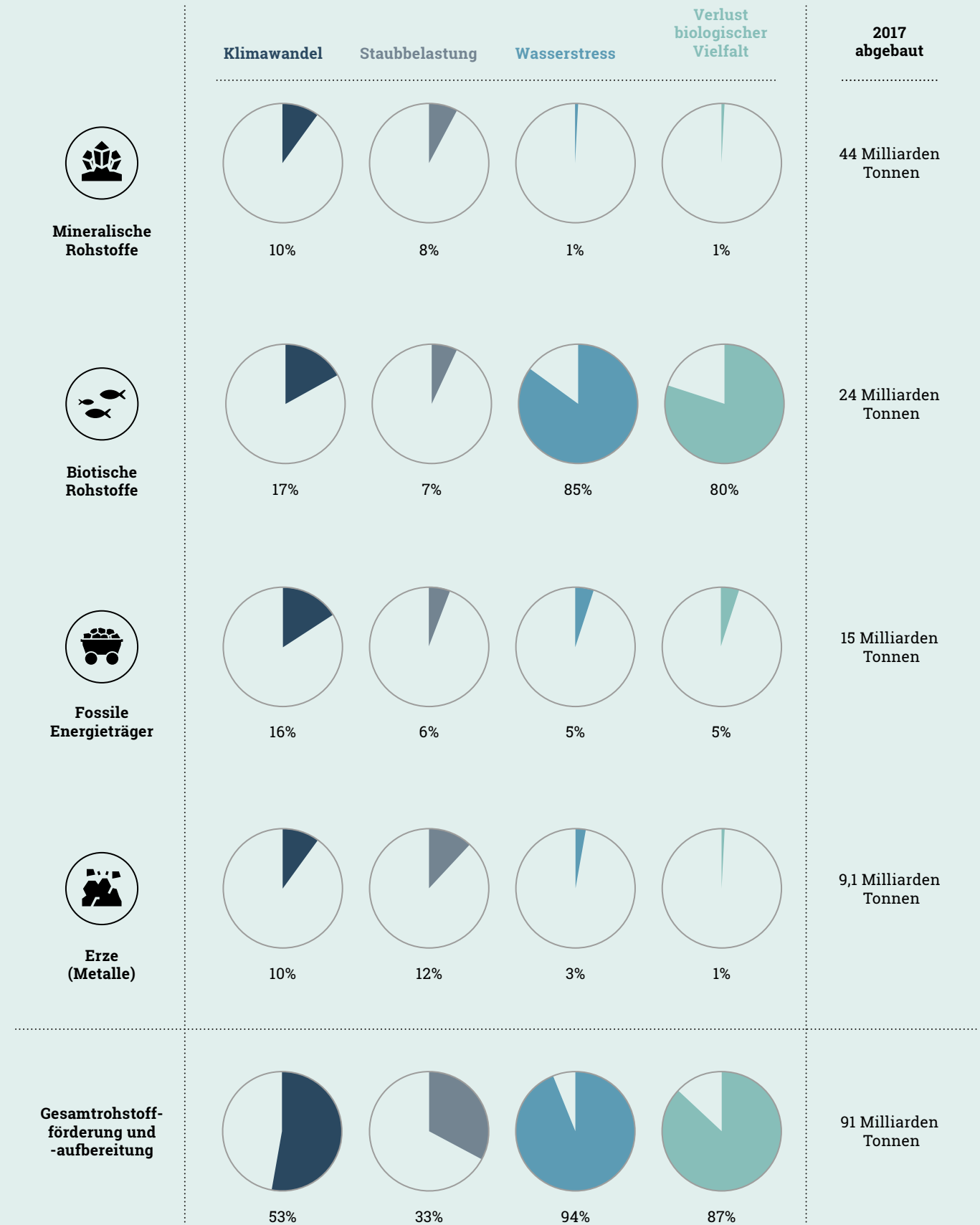


Abbildung 17: Ökologische Auswirkungen der Förderung und Aufbereitung der verschiedenen Rohstoffgruppen als Anteil der im Jahr 2017 insgesamt global verursachten Schäden in den vier Schadenskategorien Klimawandel, Staubbelastung, Wasserstress und Verlust biologischer Vielfalt (IRP 2019a)

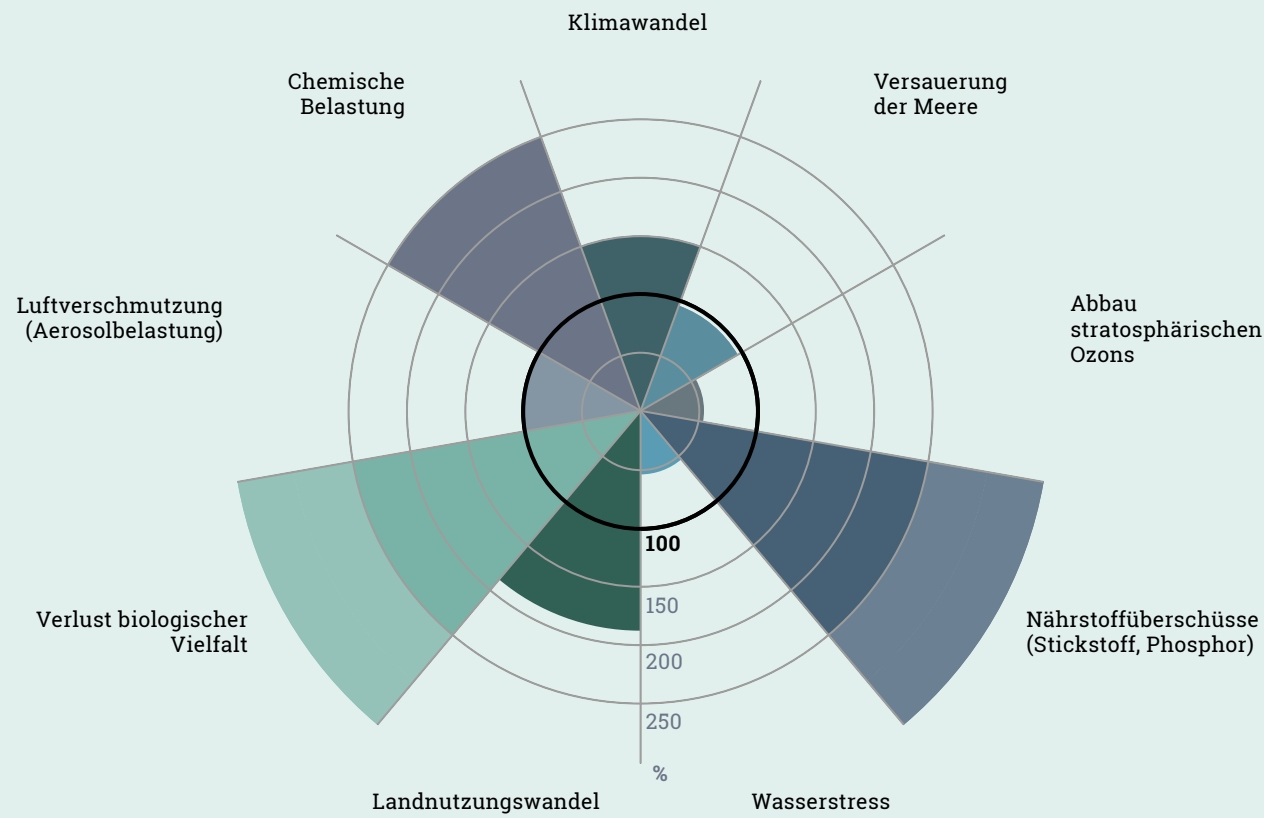
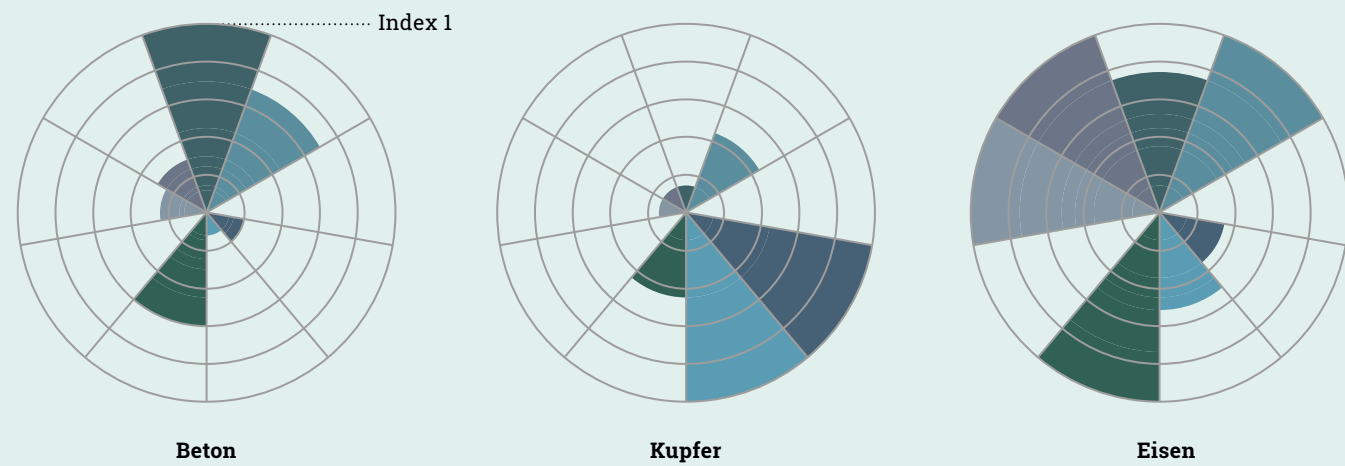


Abbildung 18: Planetare Leitplanken und ihre Ausschöpfung: Unter 100% Ausschöpfung (dicker Ring) befindet sich der sichere Bereich. Mit zunehmender Überschreitung dieser Leitplanke steigt das Risiko einer Destabilisierung oder sogar des Zusammenbruchs von Ökosystemen. (Rockström et al. 2009; Steffen et al. 2015)



Von Mitte oben im Uhrzeigersinn:
 ■ Klimawandel ■ Versauerung der Meere □ Abbau stratosphärischen Ozons (keine Daten) ■ Nährstoffüberschüsse (Stickstoff, Phosphor)
 ■ Wasserstress ■ Landnutzungswandel □ Verlust biologischer Vielfalt (keine Daten) ■ Luftverschmutzung (Aerosolbelastung)
 ■ Chemische Belastung

Bemerkung: Die Farben kennzeichnen die gleichen Schadenskategorien wie in Abbildung 17 und 18. Der äußere Rand der Kreise (Index = 1) entspricht jeweils dem größten der durch einen der drei Rohstoffe hervorgerufenen Schäden. Die Schäden der anderen sind jeweils entsprechend der Größe der Sektoren kleiner.

Abbildung 19: Umweltauswirkungen der Förderung und Aufbereitung verschiedener Rohstoffe in den Dimensionen der planetaren Leitplanken (OECD 2018, Fig. 1.6)

Für das Ausmaß der von der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung ausgehenden Schäden werden keine absoluten Zahlen aufgeführt, sondern der anteilige Beitrag der jeweiligen Rohstoffgruppe zu den insgesamt herbeigeführten Schäden. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass gerade die Produktion von Biomasse (das heißt insbesondere Land- und Forstwirtschaft) Verursacher von mehr als 80 Prozent des Verlustes an biologischer Vielfalt und 85 Prozent des Wasserstresses ist. Der Beitrag aller Rohstoffgruppen zusammen zum Wasserstress beträgt sogar 94 Prozent. Beim Klimawandel sind es insgesamt 53 Prozent und bei den Staubemissionen 32 Prozent.

Die Zahlen in Abbildung 17 vermitteln einen Eindruck, wie hoch der Beitrag der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung zu den Umweltschäden ist, die im Jahr 2017 in den genannten Schadenskategorien weltweit insgesamt verursacht wurden. Sie geben aber noch keinen Hinweis darauf, wie hoch die verursachten Schäden tatsächlich sind. Das heißt, wir erfahren zwar, dass die Rohstoffgewinnung und -aufbereitung zu mehr als der Hälfte zum menschengemachten Klimawandel beiträgt. Wir erfahren aber nicht, wie viel Spielraum für den Ausstoß von Klimagasen noch besteht – wie dringend die Situation in der jeweiligen Schadenskategorie also ist.

Um hier eine Einschätzung vornehmen zu können, wurde das Konzept der „planetaren Leitplanken“ entwickelt (Rockström et al. 2009), das von vielen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern anerkannt wird. Ausgangspunkt für die planetaren Leitplanken ist die Idee, dass zunächst möglichst alle Schadenskategorien erfasst werden, die für das Funktionieren der weltweiten natürlichen Ökosysteme relevant sind. Für jede dieser Kategorien wird dann ein Ausmaß an Schäden bestimmt, das für den Bestand der planetaren Ökosysteme gerade noch akzeptabel ist. Dieses Ausmaß stellt eine planetare Leitplanke dar, deren Einhaltung voraussichtlich den Bestand sicherstellt; deren Überschreitung hingegen früher oder später zu einem Zusammenbruch führen wird.

Wie in folgender Aufzählung erkennbar handelt es sich um neun Kategorien, unter denen sich auch die oben aufgeführten befinden:

- Klimawandel, durch die Emission von Treibhausgasen verursachte Aufheizung der Atmosphäre
- Versauerung der Meere, hervorgerufen durch die vermehrte Speicherung des Treibhausgases Kohlendioxid im Meerwasser
- Ozonabbau in der Stratosphäre (auch bekannt als „Ozonloch“), ausgelöst vor allem durch fluorhaltige Gase, die bspw. aus defekten, alten Kühlgeräten freigesetzt werden.
- Nährstoffüberschüsse (betrifft Stickstoff und Phosphor), die in Gewässern zu Algenblüten (sogenannte Eutrophierung) führen und damit die natürlichen Lebensgemeinschaften beeinträchtigen.

- Wasserstress, verursacht durch eine Inanspruchnahme natürlicher Wasserquellen (Grund-, Oberflächenwasser, Niederschläge) für menschliche Aktivitäten, die über die laufende Erneuerungsrate hinausgehen.
- Landnutzungswandel, soweit dadurch natürliche Funktionen wie Bodenfruchtbarkeit, Speicherung von Kohlenstoff oder Beherbergung von Ökosystemen beeinträchtigt werden.
- Verlust der biologischen Vielfalt, gleichbedeutend mit einer Reduktion der Funktionsfähigkeit vieler Ökosysteme, auf deren Leistungen wir angewiesen sind.
- Aerosolbelastung der Atmosphäre, die sich schädlich auf die menschliche Gesundheit auswirkt.
- Chemische Belastung der menschlichen Gesundheit und der natürlichen Ökosysteme, soweit diese über die natürlichen Ausmaße hinausgeht.

In dem Spinnennetz in Abbildung 18 entspricht jeder Sektor einer Schadenskategorie und in jedem Sektor entsprechen die Größen der farbigen Flächen dem aktuellen Ausmaß der Schadenswirkungen. Unterhalb von 100%, also innerhalb des schwarzen Ringes, sind die Schadenswirkungen unproblematisch. Erst beim Überschreiten der dicken schwarzen Linie (= planetare Leitplanke) wird der Bestand der weltweiten Ökosysteme als gefährdet angesehen. Es ist offensichtlich, dass in den fünf Bereichen, Klimawandel, Nährstoffüberschuss, Landnutzungswandel, Verlust der biologischen Vielfalt und chemische Belastung, die planetaren Grenzen derzeit deutlich überschritten werden. In drei Bereichen sind die Leitplanken noch nicht erreicht (Versauerung der Meere, Ozonabbau, Wasserstress) und in einem ist die Leitplanke gerade erreicht (Luftverschmutzung).

Innerhalb unserer Wirtschaft wird der Klimawandel vor allem durch die Industrieprozesse und den Konsum hervorgerufen, wogegen vorwiegend die Landwirtschaft für die Eutrophierung der Gewässer verantwortlich ist. Der Verlust der Artenvielfalt geht auf viele verschiedene Ursachen zurück und kann nicht einzelnen (zum Beispiel industriellen) Prozessen zugerechnet werden.

Betrachten wir zunächst die Auswirkungen verschiedener Rohstoffe auf die planetaren Leitplanken, dann wird offensichtlich, dass ihre Beiträge zu den Schadenskategorien sehr unterschiedlich sind (siehe Abbildung 19). Beton, beziehungsweise vor allem der darin enthaltene Zement, leistet bspw. aufgrund des energieintensiven Aufbereitungsprozesses vor allem einen großen Beitrag zum Klimawandel. Die Aufbereitung des Kupfererzes und das dafür erforderliche Wasser haben dagegen vor allem eine Belastung der Gewässer und deren Eutrophierung zur Folge. Dass die Eisenherstellung Spitzenreiter der Belastungen in allen anderen Kategorien ist, ist schließlich auf die im Vergleich zum Kupfer viel größere Menge an Eisen zurückzuführen, die weltweit produziert wird.

Zement, Kupfer und Eisen sind Beispiele wichtiger Rohstoffe, die die großen Gruppen der mineralischen und metallhaltigen Ressourcen repräsentieren und gleichzeitig Unterschiede in der Schädigung deutlich machen. Sie stellen insgesamt aber nur einen Teil aller geförderten und verwendeten Rohstoffe dar. Für die Betrachtung der Umweltwirkungen der Rohstoffgewinnung und -nutzung insgesamt richten wir daher unseren Blick wieder auf die großen Rohstoffgruppen: Biomasse, fossile Energieträger, metallhaltige Gesteine und Erze sowie mineralische Rohstoffe. Außerdem fokussieren wir uns auf die ökologische Schadenskategorie, die wegen Überschreitung der planetaren Leitplanken relevant ist und für die in ausreichendem Umfang konkrete Zahlen vorliegen: den Klimawandel. Laut Abbildung 17 waren im Jahr 2017 mit 53 Prozent mehr als die Hälfte der weltweiten Treibhausgasemissionen auf die Förderung und Aufbereitung, das heißt auf die Bereitstellung von Rohstoffen, zurückzuführen (zum spezifischen Beitrag von Beton bzw. Zement sowie Eisen und Stahl (siehe Info-Box 2). Werden mit der Herstellung und Nutzung von Produkten die nächsten zwei Lebenszyklusphasen der Rohstoffe mit einbezogen, steigt der Anteil weiter. Laut Angaben der OECD (2018) können sogar 30 von 45 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalente, die im Jahr 2017 emittiert wurden, auf die Gewinnung, Verarbeitung und Nutzung von Rohstoffen zurückgeführt werden. Der Anteil beträgt also knapp 67 Prozent. Die restlichen 33 Prozent und damit der deutlich kleinere Teil wird durch die im Zuge der Klimawandeldebatte häufig genannten Bereiche von Strom- und Wärmegewinnung sowie Personenverkehr (sowie nicht klar zuweisbare Sektoren) verursacht.

Aufgrund des Bevölkerungswachstums und der wirtschaftlichen Entwicklung wird von der OECD (2018) bis zum Jahr 2060 ein Anstieg der weltweiten, jährlichen Treibhausgasemissionen auf 75 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalente vorhergesagt, von denen dann 50 Milliarden Tonnen der Rohstoffgewinnung und -nutzung zuzuschreiben sind. Dabei sind die im Kapitel 2 „Rohstoffverwendung in der Zukunft“ aufgeführten strukturellen und technischen Fortschritte bereits berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Treibhausgasemissionen nicht zuletzt aufgrund der intensiveren Rohstoffnutzung bis 2060 voraussichtlich noch um zwei Drittel zunehmen könnten, obwohl die planetare Leitplanke für den Klimawandel schon um die Hälfte überschritten ist (siehe Abbildung 18). Um die Leitplanke nicht zu überschreiten und auf der sicheren Seite zu bleiben, müsste der Ressourcenverbrauch eher um ein Drittel reduziert werden statt ihn noch um weitere zwei Drittel auszuweiten.

Soll diese Bedingung erfüllt werden, ist es also notwendig, für die Weiterentwicklung der Wirtschaft und die Steigerung des weltweiten Wohlstandes nicht immer mehr, sondern deutlich weniger Rohstoffe aufzuwenden. Man spricht hier von einer absoluten Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Rohstoffverwendung. Um diese Entkoppelung zu erreichen, müssen zunächst noch mehr technische Anstrengungen unternommen werden, bei Herstellung und Nutzung von Waren und Dienstleistungen Rohstoffe einzusparen. Wie dies geschehen kann, erläutert das nachfolgende Kapitel 4. Längerfristig kann es zur Erreichung des Entkoppelungsziels außerdem erforderlich sein,

unseren Wohlstand selbst zunehmend unabhängig von materiellen Gütern zu machen. Das ist eher eine Herausforderung für uns selbst und die Gesellschaft, in der wir leben.

Soziale und wirtschaftliche Auswirkungen der Ressourcengewinnung

Die Fokussierung allein auf ökologische Auswirkungen der Ressourcengewinnung und -nutzung greift jedoch zu kurz. Im Folgenden soll die Perspektive gewechselt und beleuchtet werden, welche sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen mit der Ressourcengewinnung einhergehen.

Kleinbergbau und Konfliktrohstoffe

Aus Sicht der sozialen Auswirkungen ist der Ressourcenabbau im Kleinbergbau besonders relevant. Im Gegensatz zu den riesigen Minen, die durch große Unternehmen betrieben werden, werden hier Rohstoffe durch Einzelpersonen, Familien oder kleinere Kooperativen und meist ohne die Hilfe größerer Maschinen abgebaut. Für die Arbeiter bedeutet das schwere körperliche Arbeit mit geringer Effizienz in der Rohstoffgewinnung bei sehr geringem Einkommen. Schutzausrüstung und -maßnahmen gibt es in den Schächten, an den Berghängen und beim Tauchen im Meer meist keine. Verletzungen und Todesfälle durch einstürzende Konstruktionen oder Steinschlag, aber auch beim Umgang mit giftigen Substanzen, sind häufig. Im Kleinbergbau arbeiten Menschen in extremer Armut, die keine Alternative haben. Teilweise sind landwirtschaftliche Einnahmen zu gering oder werden saisonweise durch die Arbeit im Bergbau ergänzt. Der Verlust von

Landnutzungsrechten oder -möglichkeiten durch kriegerische Konflikte oder Umweltschäden kann ebenfalls eine Rolle spielen. Damit zusammenhängend ist der Kleinbergbau eng mit ländlicher Migration verknüpft. Auch Kinder sind betroffen. Sie müssen mitverdienen und haben zudem kleinere Körper, die in engeren Schächten zum Einsatz kommen können. Menschenhandel, Zwangsarbeit und Zwangsprostitution in den zugehörigen Dörfern spielen außerdem eine große Rolle. Die Siedlungen sind häufig nicht an das öffentliche Versorgungsnetz angeschlossen. Sanitäre Einrichtungen fehlen, wodurch die hygienischen Bedingungen sehr schlecht sind, was je nach Region zur Verbreitung von Malaria, HIV, Lepra und anderen Infektionskrankheiten führt (Bodenheimer 2014, Rüttinger et al. 2014 und 2015).

Kleinbergbau spielt sich häufig im informellen oder sogar illegalen Sektor ab. Dennoch macht der Kleinbergbau etwa 11 Prozent der globalen Wertschöpfung im Abbau von Metallen und nicht-metallischen Rohstoffen aus. Gewonnen werden vor allem hochwertige Minerale und Metalle aus Vorkommen, die für den Großbergbau aufgrund von Größe, Lage oder Bedingungen nicht attraktiv sind. Besonders betroffen sind die Metalle Tantal und Kobalt, die mit einem Anteil von 61 Prozent bzw. 19 Prozent im Kleinbergbau vor allem im Kongo abgebaut werden, sowie Zinn, das zu 45 Prozent aus dem Kleinbergbau, insbesondere aus Indonesien stammt. Aber auch für Chrom (18 Prozent), Silber (15 Prozent), Mangan (10 Prozent), Gold (8 Prozent), Kupfer (4 Prozent), Wolfram (4 Prozent) und Zink (3 Prozent) spielt der Kleinbergbau noch eine relevante Rolle (Franken 2016). Zu finden ist der Kleinbergbau in fast allen Ländern Lateinamerikas, Afrikas und Asiens, wo meist 1–10 Prozent, teilweise aber sogar bis zu 30 Prozent oder mehr der Bevölkerung von diesem Wirtschaftszweig abhängig sind. Für 2015 schätzt man die Anzahl an direkt abhängigen Menschen auf 110 Millionen Menschen weltweit (Bodenheimer 2014, Franken 2016).

Eng verknüpft mit dem Kleinbergbau ist das Problem der Konfliktrohstoffe. Diese sind definiert als „natürliche Ressourcen, deren systematische Ausbeutung und Handel im Kontext eines Konfliktes zu schwersten Menschenrechtsverletzungen, Verletzungen des humanitären Völkerrechts oder Verwirklichung völkerstrafrechtlicher Tatbestände führen kann“ (BICC 2010). Der Rohstoffabbau dient den Konfliktparteien als Geldquelle, was die Konflikte häufig verlängert oder intensiviert. Während vor einigen Jahren noch sogenannte Blutdiamanten aus Sierra Leone oder Angola und Gold aus Kolumbien im Zentrum des Problems standen, sind es heute Rohstoffe, die in der Region der Großen Afrikanischen Seen (DR Kongo, Ruanda, Burundi und Uganda) abgebaut werden. Dies sind Zinn, Tantal, Wolfram und Gold, häufig als 3TGs nach den englischen Bezeichnungen (tin, tantal, tungsten, gold) abgekürzt. Mittlerweile wird auch Kobalt oft zu den Konfliktrohstoffen gezählt (bpb et al., bpb et al. 2012).

Info-Box 2

Klimawirkung der weltweiten Bereitstellung von Zement (Beton) und Stahl

Im Jahr 2020 wurden weltweit 4,1 Milliarden Tonnen Zement produziert (Statista 2021). Der wichtigste Bestandteil ist gebrannter Kalk (CaO), der durch Brennen von Kalkstein gewonnen wird. Dabei entstehen 2,8 Milliarden Tonnen CO₂, acht Prozent der gesamten weltweiten Emissionen.

Bei der Produktion von Eisen und Stahl entsteht CO₂ sowohl bei der Reduktion des im Erz enthaltenen Eisenoxids als auch bei der Erzeugung der für den Prozess erforderlichen Hitze. Weltweit ist die Eisen- und Stahlherstellung Verursacher von sieben Prozent aller CO₂-Emissionen (Fraunhofer IKTS 2020).

Effektive Möglichkeiten zur Senkung der CO₂-Emissionen bestehen bei der Zementherstellung bspw. darin, für das Brennen des Kalks auf Sekundärrohstoffe wie Altschlack zurückzugreifen. Bei der Eisen- und Stahlherstellung wird aktuell diskutiert, die Treibhausgasemissionen dadurch zu reduzieren, dass für die Reduktion des Eisens und die Energiebereitstellung (erneuerbarer) Wasserstoff anstelle von Steinkohlekoks verwendet wird.



Abbildung 20: Abbau von Coltan zur Tantalgewinnung im Kleinbergbau in Mosambik

Exkurs 2

Lieferkettenverantwortung

Auch wenn wir das Thema des Kleinbergbaus und seiner verknüpften massiven sozialen Probleme hier unter dem Aspekt der Ressourceneffizienz vorstellen, möchten wir darauf hinweisen, dass sich alleine durch Reduktion der Rohstoffnachfrage noch nicht alles zum Besseren wendet. Sicherlich sollten wir Rohstoffe, die unter solchen negativen Auswirkungen gewonnen wurden, möglichst effizient nutzen und lange im Kreislauf halten. Darüber hinaus ist es jedoch üblich, den Kleinbergbau bei der Beschaffung nötiger Rohstoffe möglichst zu umgehen. Was als Vermeidung der Förderung von bestehenden Zuständen im Kleinbergbau gedacht ist, führt zu keiner Verbesserung der Situation der Menschen vor Ort. Unter Umständen führt

dies sogar zu einer Verschlechterung durch wegfallende Einkommensoptionen. Für die Menschen hilfreicher sind Unternehmen, die weiter aus diesen Regionen Rohstoffe beziehen und sich dabei Schritt für Schritt für eine Verbesserung der Abbaubedingungen einsetzen. Auf Unternehmensseite ist dies nicht immer einfach. Im Rahmen der zunehmenden Forderung nach Lieferkettentransparenz stehen sie unter Druck, nachzuweisen, dass ihre Rohstoffe ausschließlich aus sauberen Quellen stammen. Unter dem Argument, dass es in der Diskussion nicht lediglich um Transparenz, sondern um Übernahme von Verantwortung innerhalb der Lieferkette gehen sollte, würden wir zu Engagement statt Vermeidung aufrufen.

Kritische Rohstoffe

Wirtschaftliche Herausforderungen bei der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen ergeben sich aber nicht nur aus sozialer Sicht, durch die Ausbeutung bestimmter Bevölkerungsgruppen und die Ausbreitung dafür förderlicher Strukturen wie dem Kleinbergbau. Herausforderungen gibt es auch im Verhältnis ganzer Staaten, vor allem den Liefer- und den Abnehmerländern von Rohstoffen. Das können sowohl Industrie- als auch weniger entwickelte Länder sein. Insbesondere relativ rohstoffarme Industrieländer wie Deutschland sind für ihre Produktion auf den Import von Rohstoffen angewiesen. Vor allem High-Tech-Produkte wie Smartphones, Computer oder Maschinen benötigen eine Vielzahl verschiedener Rohstoffe. Wie im Abschnitt „Rohstoffbedarf am Beispiel eines Smartphones“ gezeigt wurde, erfüllt jeder dieser Rohstoffe eine bestimmte Funktion, für die er oft unersetzbar ist. Stockt innerhalb der Wirtschaft eines Landes die Versorgung mit diesem Rohstoff, muss unter Umständen die Produktion unterbrochen werden, mit entsprechenden negativen Konsequenzen für die Unternehmen und ihre Beschäftigten sowie die Bereitstellung dieser Güter für die Gesellschaft. In manchen für die Zukunft besonders relevanten High-Tech-Bereichen wie den erneuerbaren Energien, den batteriebasierten Fahrzeugen oder der Mikroelektronik kommt hinzu, dass sie nicht nur auf ganz bestimmte Rohstoffe angewiesen sind, sondern der Bedarf aufgrund der vorhersehbar steigenden Bedeutung der Technologien in der Zukunft sogar noch stark steigen wird.

Auf der anderen Seite gibt es für bestimmte Rohstoffe teilweise nur eine kleine Zahl von Lieferländern. Ursachen dafür sind die Begrenztheit der geologischen Vorkommen, wirtschaftliche Umstände sowie politische Konstellationen. Manche Rohstoffe wie Coltan und Diamanten kommen tatsächlich nur in wenigen Regionen der Welt vor, sodass nur diese Länder als Anbieter auftreten können. Andere Rohstoffe wie die Seltenen Erden, die unter anderem für die Herstellung von Magneten für Elektromotoren verwendet werden, kommen zwar an verschiedenen Stellen auf der Erde vor, werden aber aktuell nur in China gewonnen, weil mögliche Produzenten in anderen Ländern sich nicht in der Lage sehen, eine wettbewerbsfähige Produktion auf die Beine zu stellen. Als mögliche Wettbewerbsvorteile Chinas werden dabei die niedrigeren ökologischen und sozialen Standards angesehen, die es ermöglichen, auf Kosten der Umwelt, der Beschäftigten und der Anwohner billiger zu produzieren. Außerdem können staatliche Subventionen zum Wettbewerbsvorteil beitragen.

Die Kombination von dringendem Bedarf (= ökonomische Bedeutung) und eingeschränkter Verfügbarkeit (= Versorgungsrisiko) eines Rohstoffs wird auch als Kritikalität bezeichnet. Welche Rohstoffe als kritische Rohstoffe angesehen werden und wie diese Eigenschaft definiert ist, ist in Info-Box 3 dargestellt.

Info-Box 3

Kritische Rohstoffe

Eine andere Blickrichtung auf wirtschaftliche Zusammenhänge im Bereich Rohstoffe ist die des Ressourcenbedarfs, also des Käufers der Rohstoffe. Um unseren Lebensstandard in Deutschland aufrechtzuerhalten, benötigen wir Gebäude, Infrastruktur wie Strom-, Bahn- und Straßennetze und viele weitere Produkte des alltäglichen Lebens. Zur Herstellung dieser Güter benötigt die Industrie entsprechende Rohstoffe und schafft im Gegenzug Wertschöpfung und Arbeitsplätze. Die sichere Versorgung mit Rohstoffen ist also ein zentrales Element für die Funktion der Wirtschaft eines Staates oder einer Region. In den letzten 15 Jahren ist dies zunehmend in den Fokus der Regierungen gekommen. Verschiedene Methoden zur Einschätzung der Risiken der Rohstoffversorgung sind entstanden, beispielsweise vonseiten Deutschlands oder der EU (DERA 2021, European Commission 2020).

Die sogenannte Kritikalität der Rohstoffe wird eingeschätzt durch die Kombination von wirtschaftlicher Bedeutung eines Rohstoffs und der Wahrscheinlichkeit von Versorgungsengpässen. Ersteres ist abhängig von den nachfragenden Sektoren, der Wichtigkeit der Produkte, der Nachfragemenge oder der Substituierbarkeit des Rohstoffs in den Produkten. Die Versorgungssicherheit wird bestimmt durch die Anzahl der produzierenden Länder und der politischen Verlässlichkeit dieser Länder. Rohstoffe, die nach einer solchen Analyse als mit erhöhtem Risiko behaftet eingestuft werden, gelten als kritische Rohstoffe.

Für die EU gehören dazu beispielsweise Lithium und Kobalt, die durch ihre Anwendung in Lithiumionenakkus für Laptops, Handys sowie Elektroautos und -fahräder eine große Bedeutung erlangt haben, oder auch die Seltenen Erden Neodymium und Dysprosium, aus denen Magnete für Windkraftanlagen, Elektromotoren und Lautsprecher gemacht werden. Seltene Erden werden derzeit fast ausschließlich in China gewonnen. Das Land gilt nicht als zuverlässiger Rohstoffpartner und hat in der Vergangenheit Rohstoffabhängigkeiten immer wieder gezielt als politisches Druckmittel genutzt. Lithium wird zwar in zuverlässigen Partnerländern wie Australien, Chile und Portugal gewonnen, doch die Verarbeitung zu Chemikalien für die Batterieherstellung findet wiederum zu einem Großteil in China statt. Kobalt wird zu großen Teilen im Kongo gewonnen, wo der jahrelange Bürgerkrieg und die Korruption Handelsbeziehungen stark erschweren.

Die Kritikalität ist eine wirtschaftlich-politische Einschätzung. Ökologische und soziale Bedenken der Rohstoffnutzung spielen kaum eine Rolle, wobei es zunehmende Überlegungen gibt, solche Aspekte einzubeziehen. Dennoch kann die Versorgungssicherheit ein wichtiger Treiber für Staaten und Unternehmen sein, sich für mehr Ressourceneffizienz einzusetzen. Je effizienter sie Nutzen aus der vorhandenen Menge an Rohstoff schlagen können, je eher sie durch unkritische Rohstoffe ersetzen können, je mehr Rohstoff im Land recycelt werden kann, desto unabhängiger werden sie von Rohstoffimporten und verbundenen Risiken aus dem Ausland.

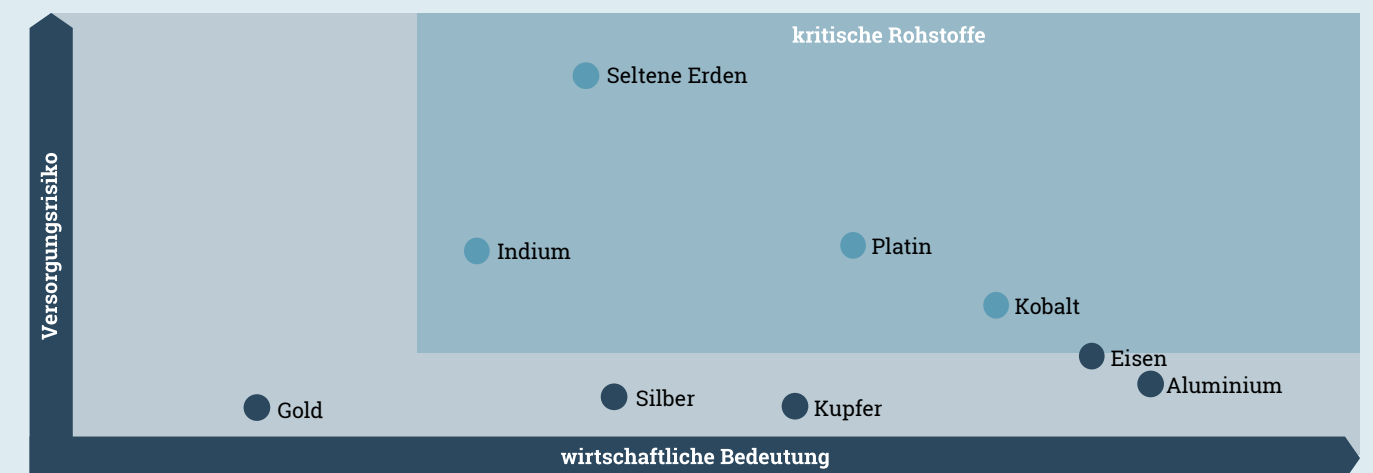


Abbildung 21: Kritische Rohstoffe

4. Lösungsansatz: Wie lässt sich Ressourceneffizienz steigern?

Nach der ausführlichen Beschreibung der durchaus massiven Probleme aus ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Perspektive wollen wir uns jetzt dem Ausarbeiten von Lösungen zuwenden.

Was bedeutet Ressourceneffizienz?

Insbesondere unsere Wirtschaft ist darauf angelegt, Ressourcen möglichst effizient zu nutzen. Ursache dafür ist, dass die Bereitstellung der Ressourcen mit Kosten verbunden ist und dass der mit ihrer Hilfe geschaffene Nutzen diese Kosten überwiegen sollte. Was jedoch bedeutet Effizienz in diesem Zusammenhang genau? Ressourceneffizienz ist als das Verhältnis eines bestimmten Nutzens zu dem dafür erforderlichen Einsatz an natürlichen Ressourcen definiert (VDI-Fachbereich Energie und Umwelt 2016). Der Nutzen kann in Form eines Produktes oder einer Dienstleistung erbracht werden. Je geringer der dafür nötige Input an natürlichen Ressourcen oder je höher der Nutzen des Produktes bzw. der Dienstleistung, desto höher ist die Ressourceneffizienz. Entsprechend bedeutet eine Steigerung der Ressourceneffizienz, dass die gleiche Menge von Produkten und Dienstleistungen mit weniger Ressourcen und weniger Schäden an der natürlichen Umwelt hergestellt werden – oder mit der gleichen Menge an Ressourcen (und Umweltschäden) mehr Produkte und Dienstleistungen. Ressourceneffizienz wird oft auch in Form der folgenden Gleichung dargestellt:

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Geschaffener Nutzen}}{\text{Ressourcenaufwand}}$$

In der Regel wird zur Messung des Ressourcenaufwandes die Menge der verwendeten Ressourcen und zur Messung des Nutzens der Wert der mithilfe der Ressourcen hergestellten Güter und Dienstleistungen verwendet. Wie jedoch wird der Ressourcenaufwand genau gemessen?

Im Hinblick auf das Konzept der Ressourceneffizienz ist zu beachten, dass im Nenner der Gleichung nicht der einfache Rohstoffaufwand, das heißt das Kilogramm Kies oder Gold, sondern, um dem ökologischen Rucksack Rechnung zu tragen, der kumulierte Rohstoffaufwand zu berücksichtigen ist. Damit lautet die Gleichung richtigerweise:

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Geschaffener Nutzen}}{\text{Kumulierter Rohstoffaufwand}}$$

Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Wie in Kapitel 3 dargestellt, ist die Gewinnung und Nutzung von Rohstoffen oft mit großen ökologischen Schäden verbunden. Zur Vermeidung dieser Schäden gibt es verschiedene grundlegende Ansätze:

Erstens kann versucht werden, schon die Gewinnung der Rohstoffe so zu gestalten, dass die Umwelt dabei weniger geschädigt wird. So könnte bspw. auf besonders umweltschädliche Verfahren wie das Fracking bei der Gewinnung von Erdgas oder auf die Gewinnung von Rohstoffen in besonders empfindlichen Ökosystemen verzichtet werden. Auch könnten zusätzliche Verfahren zum Einsatz kommen, mithilfe derer die mit der Gewinnung einhergehende Verschmutzung von Wasser und Luft reduziert wird. Da in Deutschland bei der Gewinnung von Rohstoffen bereits hohe Umweltstandards angelegt (das heißt Umweltschäden in Grenzen gehalten) und der Großteil der Rohstoffe sowieso aus anderen Ländern importiert werden, wo unser Einfluss auf die Abbaubedingungen begrenzt ist³, werden wir uns mit diesem Ansatz nicht weiter beschäftigen.

³ Ein gewisser Einfluss besteht darin, nur solche Rohstoffe zu verwenden, bei denen durch eine Zertifizierung sichergestellt ist, dass bei der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung im Ausland keine umweltschädlichen oder sozial unerwünschten Verfahren (zum Beispiel Kinderarbeit) zum Einsatz kommen.

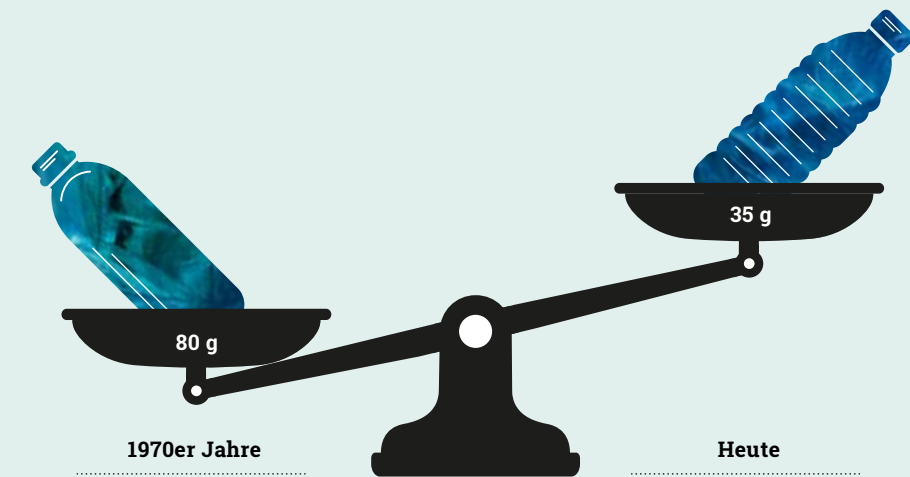


Abbildung 22: Materialmenge einer 2-Liter-PET-Flasche in den 1970er Jahren und heute

Ein zweiter Ansatz kann darin bestehen, dass wir generell weniger Güter kaufen und weniger Dienstleistungen in Anspruch nehmen, sodass davon weniger hergestellt und für die Herstellung weniger Rohstoffe verbraucht werden müssen. Für dieses Ziel müsste jeder und jede Einzelne von uns oder, besser noch, alle zusammen ihr Konsumverhalten ändern. Dieser Ansatz ist sehr wichtig, kann aber auf breiter Ebene nicht kurzfristig auf Basis der hier diskutierten technisch-organisatorischen Mittel umgesetzt werden. Daher bleibt auch er im Folgenden unberücksichtigt.

Damit bleibt als dritter Ansatz der Versuch, die Rohstoffgewinnung selbst und den Konsum von Gütern und Dienstleistungen als vorgegeben (das heißt unveränderbar) anzusehen, den Hebel jedoch in dem dazwischenliegenden Prozess der Herstellung der Güter und Dienstleistungen aus den Rohstoffen anzusetzen.

Wenn wir davon ausgehen, dass eine bestimmte Menge einer Ware oder Dienstleistung erstellt werden soll, dann lässt sich die Ressourceneffizienz bei dem Erstellungsprozess dadurch steigern, dass der erforderliche kumulierte Rohstoffaufwand reduziert wird. Um dieses Ziel zu erreichen, gibt es drei grundlegende Strategien: die Steigerung der Materialeffizienz, die Substitution und die Schließung von Rohstoffkreisläufen.

Materialeffizienz

Bei der Materialeffizienz geht es um die Reduktion der Menge des eingesetzten Materials. Ob das tatsächliche (eingesparte) Gewicht eines Materials gemessen wird oder der kumulierte Rohstoffaufwand, spielt hier keine Rolle, da es sich in jedem Fall um ein und dasselbe Material handelt und die relative Effizienzsteigerung mit oder ohne Rohstoffrucksack dieselbe ist.

Ein Beispiel ist die PET-Getränkeflasche, die üblicherweise in Volumina von 0,5 bis 2 Litern gehandelt wird und seit Ende der 1970er Jahre von den USA ausgehend ihren Siegeszug um die Welt angetreten hat. Zu Beginn hatten diese Flaschen ein Gewicht von je nach Größe 50 bis 80 Gramm. Diese Materialmengen waren erforderlich, damit die Flaschen beim Transport nicht zerbrechen und so standfest waren, dass sie alleinstehend nicht umfielen. Seit den Anfangszeiten haben die Flaschenhersteller gelernt, das Material so zu verarbeiten und die Wandstärken so genau einzuhalten, dass die Reißfestigkeit auch bei deutlich dünneren Wandstärken gewährleistet werden konnte. Auch die Standfestigkeit konnte durch konstruktive Veränderungen und ihre technische Umsetzung trotz geringerem Materialeinsatz verbessert werden. Deshalb wiegen PET-Flaschen heutzutage bei gleicher Leistungsfähigkeit nur noch 12 bis 35 Gramm, also weniger als die Hälfte früherer Flaschen (Wikipedia 2022b). Die Ressourceneffizienz hat sich dementsprechend mehr als verdoppelt.

Ein weiteres Beispiel ist das sogenannte Precision Farming. Das ist eine Technologie in der Landwirtschaft, bei der beim Düngen der Kulturpflanzen (zum Beispiel Mais oder Getreide) die ausgebrachte Düngemittelmenge genau auf den Bedarf der Pflanzen abgestimmt wird. Die aktuelle Düngemittelversorgung kann dabei mit Hilfe von optischen Sensoren anhand der Farbe der Blätter ermittelt werden. Pflanzen an einer Stelle des Feldes mit guter Düngemittelversorgung bekommen dann weniger zusätzlichen Dünger als Pflanzen an einer weniger gut versorgten Stelle. Ohne Precision Farming werden alle Pflanzen mit der gleichen zusätzlichen Düngemittelmenge versorgt, und zwar mit der höheren Menge, die nur für die schlechter versorgten Pflanzen nötig ist. Die Düngemittelmenge, die die Pflanzen auf guten Böden dann zu viel erhalten, ist verschwendet und trägt in ungünstigen Fällen außerdem zur Belastung der Gewässer

bei. Durch Precision Farming können beim Düngen bis zu 20 Prozent Düngemittel eingespart werden. Das entspricht einem Ressourceneffizienzgewinn von $(1/0,8-1) = 25$ Prozent.

Wie die Beispiele zeigen, ist es bei Verwendung des Materialeffizienzansatzes zur Einsparung von Ressourcen vor allen Dingen wichtig, vorab die Funktionen festzulegen, die erfüllt werden sollen, also bspw. eine ausreichend stabile, standfeste Flasche. Die Effizienzsteigerung ergibt sich dann unmittelbar aus der erzielten Massenreduktion.

Substitution

Der mögliche Beitrag der Substitution zur Steigerung der Ressourceneffizienz besteht darin, ein schwereres Material durch ein leichteres zu ersetzen. Ein bekanntes Beispiel ist der Ersatz von Stahl durch Aluminium im Automobilbau. Stahl hat eine Dichte von 7,86 Gramm pro Kubikzentimeter, Aluminium hingegen von 2,71 Gramm pro Kubikzentimeter. Würden alle Karosserieteile in identischen Abmessungen aus Aluminium anstelle von Stahl hergestellt, würde die Karosserie um $(1-2,71/7,86) = 65$ Prozent leichter. Tatsächlich hat Aluminium aber eine geringere Festigkeit, weshalb Bleche und Profile stärker dimensioniert werden müssen. Dadurch beträgt der verbleibende Gewichtsvorteil nur noch circa 30 Prozent. Dieser Gewichtsvorteil ist bspw. dafür relevant, wie viel Energie für die Beschleunigung und den Vortrieb des Autos aufgewendet werden muss, wie viel Kraftstoff dafür verbraucht und, je nach Kraftstoffart, wie viel Treibhausgas dabei emittiert wird.

Für den Vergleich der Umweltwirkungen, die unmittelbar von den Materialien ausgehen, ist der Vergleich der Massen der Werkstoffe nicht ausreichend. Wie in Kapitel 2 ausgeführt, müssen hier zusätzlich die kumulierten Rohstoffaufwände berücksichtigt werden. Diese betragen für Stahl 10,0 und für Aluminium 10,4 Kilogramm Rohstoffäquivalente pro Kilogramm Material. Der Gewichtsvorteil von Aluminium gegenüber Stahl von circa 30 Prozent verschlechtert sich damit nur unwesentlich um rund einen Prozentpunkt auf circa 29 Prozent.

Wesentlich deutlicher werden die Unterschiede in einem anderen Beispiel. Wegen seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit wird in vielen elektrischen Geräten und Installationen Kupfer als Leitermaterial verwendet. Vor allem wenn es um gewichtskritische Anwendungen wie Hochspannungsüberlandleitungen geht, stellt Aluminium auch hier eine interessante Alternative zu Kupfer dar, weil die Leitungen deutlich leichter werden. Wird allein der Dichteunterschied zwischen Kupfer mit 8,94 Gramm pro Kubikzentimeter und Aluminium mit 2,71 Gramm pro Kubikzentimeter zugrunde gelegt, wären Aluminiumkabel um $(1-2,71/8,94) = 70$ Prozent leichter. Wie im Beispiel der Fahrzeugkarosserie muss jedoch außerdem berücksichtigt

werden, dass Aluminiumkabel eine um 36 Prozent geringere Leitfähigkeit aufweisen. Um die gleiche Leitfähigkeit zu erreichen, muss daher der Kabelquerschnitt um $(1/(1-0,36)-1) = 56$ Prozent vergrößert werden. Obwohl das Gewicht dadurch ebenfalls um 56 Prozent ansteigt, ist das Aluminiumkabel dann bei gleicher Länge und Leitfähigkeit immer noch um über 50 Prozent leichter als das Kupferkabel.

Im Gebäudebereich spielt das Gewicht keine Rolle. Da Aluminiumkabel außerdem schwieriger zu installieren sind, werden hier bisher ausschließlich Kupferkabel verwendet. Mit Blick auf die Umweltwirkungen könnten Aluminiumleitungen jedoch auch hier eine sinnvolle Alternative darstellen. Wie Tabelle 1 zeigt, weist Kupfer nämlich mit 128,1 kg RÄ/kg einen mehr als zwölfmal so hohen kumulierten Rohstoffaufwand auf wie Aluminium (10,4 kg RÄ/kg). Selbst bei Berücksichtigung der geringeren Leitfähigkeit und der erforderlichen, größeren Querschnitte könnte der kumulierte Rohstoffaufwand für eine elektrische Gebäudeinstallation durch den Einsatz von Aluminiumkabeln um mehr als 87 Prozent reduziert werden. Erste Schritte in diese Richtung werden mittlerweile zum Beispiel durch den Einsatz von Kupfer-umhüllten Aluminiumkabeln beobachtet.

Im Hinblick auf die Steigerung der Ressourceneffizienz spielt auch bei Nutzung des Substitutionsansatzes die zu erfüllende Funktion eine wichtige Rolle. In den Beispielen stellt sich daher die Frage, ob nur die Leitfähigkeit oder auch die Dichte des verwendeten Materials relevant ist. Zusätzlich ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich um verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Funktionsparametern (zum Beispiel Leitfähigkeit, Gewicht, Stabilität, spezifischer KRA) handelt, die ebenfalls in den Vergleich der Ressourcenaufwände einbezogen werden müssen.

In der Praxis (vergleiche das Forschungsprojekt EKALGU in Kapitel 6 im Abschnitt „Substitution“) ist die Ressourceneinsparung nicht immer das primäre Ziel der Substitution. In vielen Fällen geht es vorrangig darum, einen kritischen Rohstoff (mit unsicherer Verfügbarkeit) durch einen unkritischeren zu ersetzen. In diesem Fall kann es zusätzlich zu einer Ressourceneinsparung kommen, muss es aber nicht.

Kreislaufschließung

Bisher wurde davon ausgegangen, dass für die Herstellung einer Ware oder Dienstleistung Primärrohstoffe verwendet werden, das heißt Rohstoffe, die der natürlichen Umwelt entnommen wurden. Stattdessen können auch Materialien zur Herstellung von Produkten verwendet werden, die sich bereits in der menschlichen Sphäre befinden, aber keinen Nutzen mehr haben. In anderen Worten ausgedrückt: Aus Abfällen können Rohstoffe gewonnen werden. Diese Rohstoffe werden als Sekundärrohstoffe bezeichnet und ersetzen

Primärrohstoffe. Das heißt, in dem Umfang, in dem Sekundärrohstoffe verwendet werden, kann auf die Gewinnung von Primärrohstoffen verzichtet werden. Am bekanntesten ist das Recycling sogenannter Post-Consumer-Abfälle, das heißt von Abfällen, die während oder nach Abschluss der Nutzung durch die Verbraucherinnen und Verbraucher entstehen. Recycling kann aber auch aus Abfällen in der Produktion, wie bspw. Schnittresten, Nebenprodukten oder Mängelware stattfinden. Das Recycling von Rohstoffen schließt die Materialflüsse in unserer Wirtschaft zu einem Kreislauf: Von der Rohstoffgewinnung in die Produktion von Gütern geht das Material in Form von Produkten in die Nutzungsphase, wird entsorgt und landet durch Recycling wieder in der Rohstoffgewinnung.

Vor allem im Bereich der Metalle, aber auch bei mineralischen Rohstoffen (zum Beispiel Bau, Glas) und einigen Kunststoffen und Papier wird Recycling bereits in großem Umfang praktiziert. Ebenso wie die Gewinnung von Primärrohstoffen ist auch das Recycling mit einem Aufwand an Rohstoffen verbunden. Es müssen Maschinen gebaut und betrieben und mit Energie versorgt werden, mit denen die Abfälle getrennt und sortiert werden. Gegebenenfalls müssen zusätzliche Chemikalien und Energie eingesetzt werden, um diese Trennung durchzuführen und letztlich saubere Sekundärrohstoffe zu erzeugen, die anstelle der Primärrohstoffe in der Industrie eingesetzt werden können. Das bedeutet: Auch Sekundärrohstoffe besitzen einen Rohstoffrucksack (siehe Tabelle 6). Ihr spezifischer kumulierter

Rohstoffaufwand kann sogar kleiner als ein Kilogramm Rohstoffäquivalente pro Kilogramm Sekundärrohstoff sein, da Abfälle aus ökologischer Sicht als kostenloser Input zu haben sind und nicht in die Rechnung mit eingehen. In der Praxis ist er aber oft größer, in der Regel jedoch kleiner als der entsprechende Primärrohstoffe.⁴ Ein Beispiel ist Aluminium, bei dem der KRA für das Primärmetall 10,4 kg RÄ/kg beträgt. Bei der Herstellung von Sekundäraluminium aus Prozessschrotten und Altschrott schlagen der Schmelz-, Legierungs- und Gussprozess sowie die Sammlung und der Transport mit 1,3 kg RÄ/kg zu Buche. Der ressourcenintensivste Prozess, die energieintensive Gewinnung des Metalls aus dem Mineral Bauxit, fällt dagegen weg, woraus sich der große Unterschied ergibt. Sehr ähnlich ist die Argumentation im Fall von Eisen, wo infolge des Recyclings der energieintensive erste Schritt der Gewinnung von Roheisen aus Eisenerz im Hochofen entfällt. Dadurch reduziert sich der KRA von Roheisen (4,3 kg RÄ/kg) aufgrund des Recyclings auf 0,4 kg RÄ/kg. Noch größer ist der Unterschied bei Kupfer, weil die zur Herstellung von Primärkupfer verwendeten Erze einen

⁴ Muss für das Recycling ein sehr hoher Aufwand betrieben werden, weil der Anteil des Rohstoffs im entsprechenden Abfallstrom sehr gering ist, kann der KRA des Sekundärrohstoffs auch größer als derjenige des entsprechenden Primärrohstoffs sein. Das Recycling wäre in diesem Fall aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll. Das Recycling könnte aber auch in diesem Fall aus wirtschaftspolitischen Gründen sinnvoll sein, weil es sich um einen „kritischen“ Rohstoff handelt, dessen Versorgung auf alle Fälle sichergestellt werden soll – auch auf Kosten der Umwelt.



Abbildung 23: Anstelle von natürlichen Rohstoffquellen (Biosphäre) können auch Abfälle aus der menschlichen Sphäre (Antroposphäre) als Ausgangsmaterial zur Rohstoffgewinnung dienen. So werden Materialflüsse zu einem Kreislauf geschlossen.

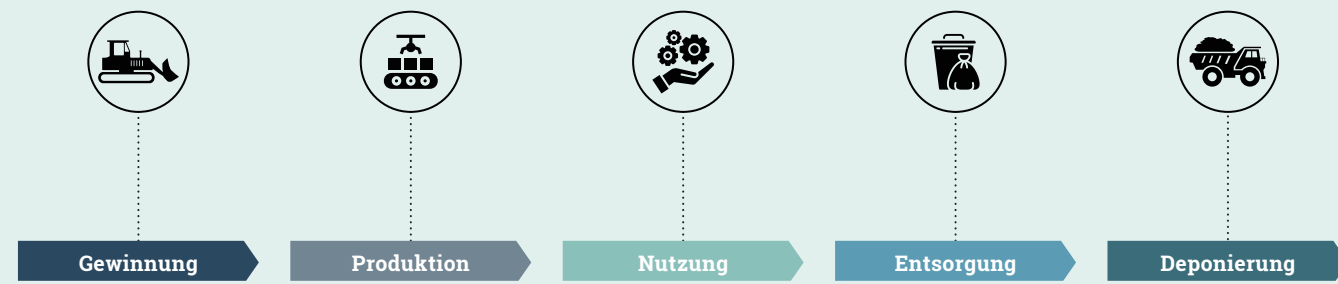


Abbildung 24: Prozessabfolge in einer linearen Wirtschaft

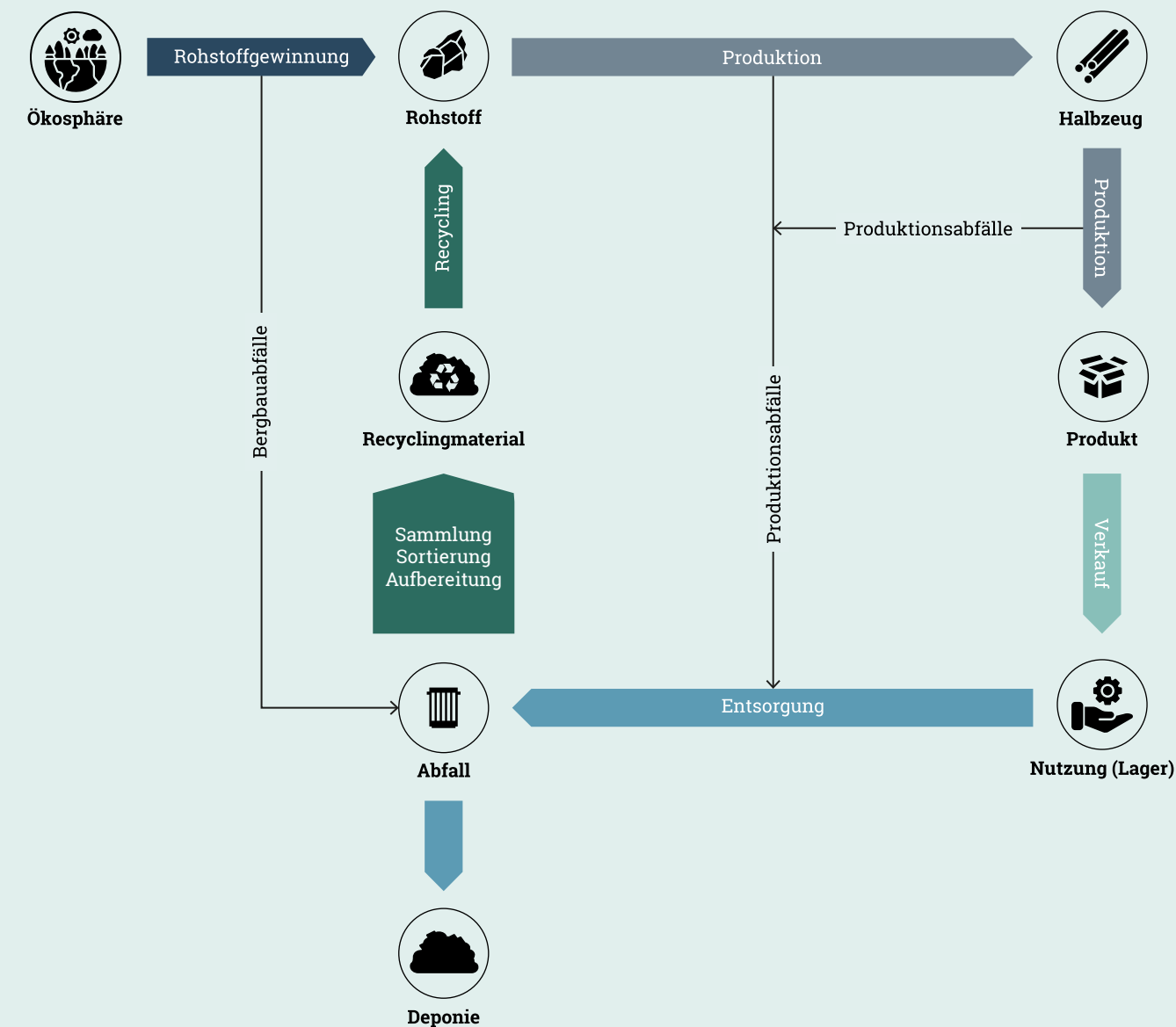


Abbildung 25: Recyclingkreislauf

niedrigeren Kupfergehalt aufweisen als die zur Eisenherstellung verwendeten Eisenerze. Der KRA beträgt für Primärkupfer 128,1 kg RÄ/kg im Vergleich zu 7,3 kg RÄ/kg für Sekundärkupfer. Der Gesamteffekt, der insgesamt eingesparte KRA, ergibt sich in allen Fällen aus der Differenz der KRA-Werte von Primär- und Sekundärrohstoff, multipliziert mit der jeweiligen eingesparten Primärrohstoffmenge.

Rohstoff	Primärgewinnung (RÄ/kg)	Sekundärgewinnung (RÄ/kg)
Roheisen	4,3 kg	0,4 kg
Aluminium	10,4 kg	1,3 kg
Kupfer	128,1 kg	7,3 kg

Tabelle 6: Kumulierte Rohstoffaufwände im Vergleich aus Primär- und Sekundärgewinnung

Da die Schließung von Rohstoffkreisläufen ein viel diskutiertes und politisch hoch bewertetes Ziel ist, möchten wir diesen Punkt im Folgenden ausweiten und die Hintergründe für ein Grundverständnis der Kreislaufwirtschaftsdebatte liefern.

Lineare Wirtschaft

Jedes Material, das wir heute benutzen, wurde irgendwann einmal aus den natürlichen Ressourcen der Erde gewonnen. Am Anfang des Lebenslaufs unserer Materialien steht daher bspw. für Metalle immer der Bergbau. Aus den gewonnenen Erzen muss das gewünschte Metall von vielen Nebenprodukten und dem Gestein abgetrennt, dann in mehreren Schritten aufgereinigt und schließlich zum reinen Rohstoff umgesetzt werden. Diesen Vorgang nennt man Raffination. Je nach Metall gehören dazu verschiedene Prozesse des Schmelzens (Pyrometallurgie) oder Auflörens (Hydrometallurgie) des Materials, damit dieses dann physikalisch (bspw. durch Filtration oder Flotation), chemisch (bspw. durch Oxidation mit Sauerstoff) oder elektrolytisch von Verunreinigungen getrennt werden kann. Das Raffinadeprodukt, der sehr reine Rohstoff, wird anschließend in eine passende Form gegossen, gezogen oder gepresst. Dies können beispielsweise Pulver, Barren, Bleche, Drähte oder Rohre sein. Man nennt diese Zwischenprodukte Halbzeuge. Noch ist kein fertiges Endprodukt entstanden, der Rohstoff wurde aber schon in eine Form gebracht, die den Transport und die Herstellung eines Endproduktes wie einer PET-Flasche aus Kunststoffgranulat, einer Regenrinne aus Zinkblechen oder einem Stromkabel aus Kupferdraht erleichtert. Als Halbzeuge gehen die verschiedenen Rohstoffe also in die unterschiedlichsten Industrien, wo sie mit vielen weiteren Materialien zusammen zu einem Endprodukt verarbeitet werden. Diese Endprodukte werden verkauft und gehen damit in die Nutzungsphase. Je nach Art des Produktes kann die Nutzung unterschiedlich lange dauern. Eine Getränkedose aus Aluminium wird geöffnet, in wenigen Minuten leer getrunken und dann entsorgt. Produkte wie Elektrogeräte, Autos oder

Möbelstücke sind einige Jahre in Benutzung. Für manche Anwendungen kann die Lebensdauer sogar Jahrzehnte oder Jahrhunderte dauern. Dies ist beispielsweise bei Gebäuden und Infrastruktur wie Brücken und Straßen der Fall. Verlassene Produkte und Materialien schließlich die Nutzungsphase, spricht man vom Lebensende. Sie werden entsorgt.

Wenn der Umgang mit Materialien in den gerade beschriebenen Dimensionen zwischen Materialgewinnung und -entsorgung gedacht und organisiert wird, spricht man von einer linearen Wirtschaft (Abbildung 24). Da auf die Entsorgung der Produkte in einer linearen Wirtschaft nur die Deponierung, also die Lagerung auf großen Müllhalden, folgt, geht der Wert, der auch nach dem Lebensende noch in den Produkten oder Materialien steckt, verloren. Um von einer Ressource, die aus der Erde gewonnen wurde, zu einem funktionsfähigen Produkt zu kommen, wurde in vielen Prozessen und Arbeitsschritten Energie und Arbeitsaufwand in das Material gesteckt. Der hierdurch generierte Wert geht am Lebensende meist nicht vollständig verloren. Auch ein nicht mehr funktionsfähiges Auto hat möglicherweise noch Bauteile wie die Batterie, die weiterverwendet werden können und beispielsweise als Ersatzteile dienen können. Selbst, wenn dies nicht mehr der Fall ist, hat das Material an sich einen Wert. Die Stahlkarosserie besteht immer noch aus fertigem Stahl. Müsste das Material neu hergestellt werden, müsste zunächst wieder Eisenerz abgebaut und in vielen Schritten zum Stahl aufbereitet werden. Neben dem Wertverlust einer Deponierung solcher Produkte und Materialien spielen auch die Umweltwirkungen eines solchen Vorgehens eine Rolle. Durch die Lagerung verschiedenster Materialien auf großen Halden können giftige und umweltschädliche Chemikalien in Erde, Luft und Wasser gelangen und so Menschen und Ökosysteme in Gefahr bringen. Des Weiteren spielt auch der Flächenverbrauch eine Rolle, gerade in dicht besiedelten Gegenden wie Deutschland oder Japan (siehe auch Abschnitt „Welche Schäden entstehen im Zuge der Ressourcennutzung?“).

Der Königsweg der nachhaltigen Ressourcennutzung: Die Kreislaufwirtschaft

Als Gegenkonzept zur linearen Handhabung von Material zwischen Gewinnung und Deponierung hat sich daher die Kreislaufwirtschaft entwickelt. Hier geht es darum, den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen so lange wie möglich innerhalb der Wirtschaft zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen (European Commission 2015). Dies bedeutet, dass Lebensende und Entsorgung keine Endstation sein dürfen. Stattdessen muss das Material in frühere Lebensphasen zurückgeführt werden, wodurch ein Kreislauf entsteht (Abbildung 25). Hierfür müssen die Produkte am Lebensende gesammelt und aufbereitet werden. Durch das Zerlegen in kleinere Teile von Hand (Demontage) oder mit Hilfe von Maschinen (Schreddern) werden die oft kompliziert zusammengesetzten Produkte vereinfacht, sodass sie nach Material sortiert

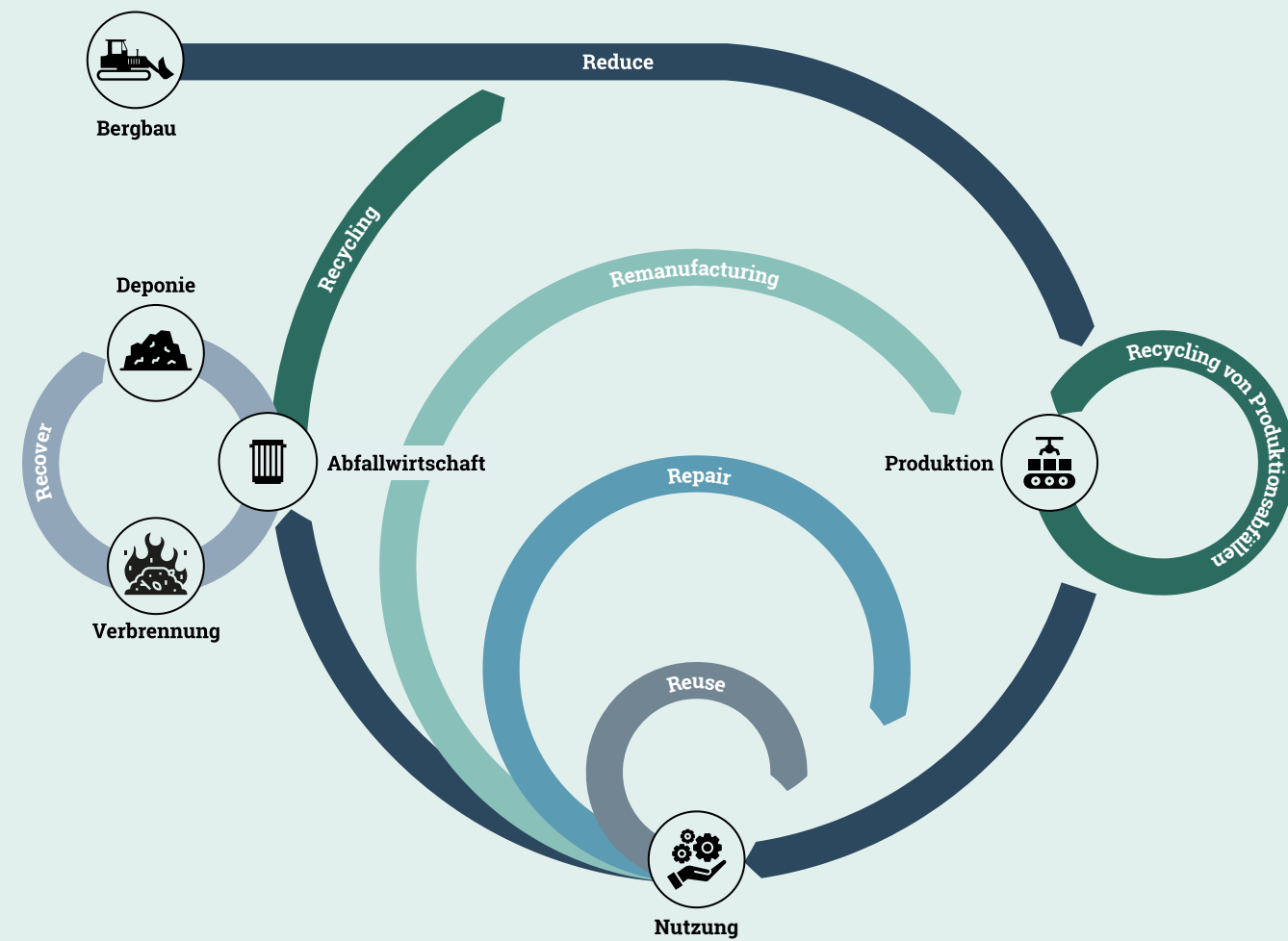


Abbildung 26: Die als 6Rs bezeichneten Strategien der Kreislaufwirtschaft

werden können. In verschiedenen Fraktionen werden so beispielsweise Kunststoff, Glas und Metall getrennt. Jede Fraktion kann wiederum weiter sortiert und aufgetrennt werden. Je sauberer und einheitlicher diese Trennung geschieht, desto besser kann das Material wiederverwendet werden, das heißt desto besser wurde der Wert erhalten. So werden Kunststoffe nach chemischer Zusammensetzung, Glas nach Farbe und Metalle nach den Elementen und manchmal Legierungen getrennt. Durch einen anschließenden Recyclingprozess wird das sortierte Material weiter aufgereinigt, wodurch es eine Qualität erhält, die eine Nutzung des Materials in Produktionsprozessen erlaubt. Je nach Materialeigenschaften und Qualitätsansprüchen kann dies unterschiedlich aufwendig sein. Elektrokabel können sehr einfach in den inneren Kupferleiter und die Kunststoffhülle zerlegt und dann sehr sauber in die zwei Fraktionen sortiert werden. Das gewonnene Kupfer muss daher nur geschmolzen und in eine neue Form, ein Halbzeug,

gegossen werden. Das Gleiche gilt für PET-Flaschen. Diese werden bereits im Supermarkt getrennt von anderem Plastik gesammelt und können daher mit wenig Reinigungsaufwand direkt geschmolzen und beispielsweise in Fäden zur Herstellung von Stoffen gezogen werden. Für komplexe Produkte wie Autos oder Computer ist dies deutlich schwieriger. Sie werden in einem Schredder in kleine Teile zerhackt. Hieraus werden die verschiedenen Fraktionen sortiert. Diese enthalten dann jedoch oftmals eine Vielzahl anderer Materialien in kleinen oder sogar größeren Mengen, weswegen deutlich mehr und aufwendigere Aufreinigungsschritte im Recyclingprozess nötig sind. Die Metallfraktionen gehen beispielsweise durch einen Raffinationsprozess ähnlich oder sogar identisch mit dem von Erzen aus dem Bergbau.

Neben diesem großen Recyclingkreislauf, der Produkte wieder in Materialien zerlegt und diese in die Produktion zurückführt,

gibt es in der Kreislaufwirtschaft weitere kleinere Kreisläufe. So können funktionierende Bauteile aus Produkten am Lebensende entnommen und in neue Produkte eingebaut werden. Defekte Produkte können repariert statt entsorgt und in die Nutzungsphase zurückgebracht werden. Der vierte und kleinste Kreis ist die Wiederverwendung statt der Entsorgung, indem defekte oder nicht mehr gebrauchte Produkte einen neuen Zweck bekommen und so ohne Umweg direkt wieder in die Nutzung gehen können. Auf Englisch werden diese vier Kreisläufe als Recycling, Remanufacturing, Repair und Reuse bezeichnet. Zusammen mit den allgemeineren Konzepten Reduce und Recovery bilden sie die Grundsäulen der Circular Economy oder Kreislaufwirtschaft⁵, oftmals als die 6Rs bezeichnet (Abbildung 26). Recovery bezeichnet dabei die Energierückgewinnung, wenn eine Materialrückgewinnung nicht mehr sinnvoll oder möglich ist. Statt Deponierung bedeutet das Müllverbrennung zur Energiegewinnung. Reduce bezieht sich schließlich auf die Reduktion von Stoffströmen. Je weniger Material insgesamt im Kreislauf nötig ist, desto besser aus Umweltsicht.

Diese sechs Konzepte oder 6R werden oft in einer hierarchischen Darstellung gezeigt: von Reduce über Reuse, Repair, Remanufacture zu Recycling und schließlich Recovery. Nicht immer ist die Rangfolge aber so eindeutig. Sie muss für jedes Produkt oder jeden Stoffstrom individuell überprüft und bewertet werden. Dennoch gibt diese Reihenfolge eine sinnvolle, wenn auch grobe Orientierung. Die Vermeidung von Materialbedarf ist aus Umweltperspektive meist am besten. Von Reuse über Repair und Remanufacturing bis zu Recycling nehmen der Aufwand und damit die verknüpften finanziellen und ökologischen Belastungen im Allgemeinen zu. Recovery akzeptiert schließlich den Materialverlust und zielt lediglich auf die Rückgewinnung der enthaltenen Energie ab.

Primär- und Sekundärrohstoffe und das Problem der Qualität

Jedes im Kreislauf befindliche Material ist ursprünglich aus natürlichen Quellen (Primärquellen) gewonnen worden. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft zeigt jedoch auf, dass auch Haushalts- und Industrieabfälle gute oder sogar bessere Quellen für die Rohstoffgewinnung sein können. So lassen sich Edelmetalle wie Gold und Platin effizient aus Elektroaltgeräten gewinnen, Altpapier lässt sich zu neuem Recyclingpapier aufarbeiten und der im gelben Sack gesammelte Kunststoff

⁵ Obwohl Circular Economy die direkte Übersetzung des Begriffs der Kreislaufwirtschaft ins Englische ist, werden die Begriffe auf Grund der geschichtlichen Entwicklung besonders im politischen Kontext unterschiedlich verwendet. Im Deutschen ist der Begriff durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz stark an die Abfallwirtschaft und damit die Strategien des Recyclings und der Energierückgewinnung geknüpft. Circular Economy ist durch die neuere und international geführte Debatte ein recht offener Sammelbegriff für eine Vielzahl von Ideen und Strategien zur Werterhaltung von Ressourcen. Hier werden wir auf die unterschiedlichen Perspektiven jedoch nicht weiter eingehen und die Begriffe synonym verwenden.

kann zu Blumentöpfen verarbeitet werden. Abfallströme wie Elektroaltgeräte, Altpapier und der gelbe Sack aber ebenso Bauschutt, Altglas oder Altautos sind Rohstoffquellen für Recyclingprozesse und können daher als sekundäre Quellen gesehen werden. Das gewonnene Material wird entsprechend als Recycling- oder Sekundärrohstoff bezeichnet.

Nicht immer wird Sekundärmaterial mit der gleichen Qualität zurückgewonnen, wie es ursprünglich in Produkten eingesetzt wurde. Erhöht sich die Materialqualität mit dem Recyclingprozess, spricht man von Upcycling, verringert sie sich, entsprechend von Downcycling. Bei der Verwendung dieser Begriffe muss man Vorsicht walten lassen: Oft werden sie falsch gebraucht. Eine alte Zinkgießkanne, die durch ein sogenanntes Upcyclingprojekt als Pflanzgefäß im Garten verwendet wird, erfährt keine Wertsteigerung des Materials. Möglicherweise verliert sie sogar durch Korrosion an Materialwert. Im Grunde handelt es sich bei vielen Upcycling-Ideen um Wiederverwendung (Reuse) und nicht um Recycling, weswegen streng genommen nicht von Upcycling gesprochen werden kann. Obwohl die Wiederverwendung in der Kreislaufwirtschaftshierarchie über dem Recycling steht, muss der Sinn solcher Upcycling-Vorschläge zudem aus der Nachhaltigkeitsperspektive kritisch hinterfragt werden. Das Zink der Gießkanne könnte über Recycling einer deutlich höherwertigen Anwendung zugeführt werden als bei der Verwendung als Blumentopfsatz.

Auch die tendenziell sehr negative Bewertung von Downcycling muss infrage gestellt werden. Sie wird oft im Zusammenhang mit dem Kunststoffrecycling gebraucht. Kunststoffe verlieren mit jedem Zyklus, den sie durchlaufen, sehr deutlich an Qualität. Zum einen reichern sich Verunreinigungen wie Farbstoffe oder andere Chemikalien im Material an und können im Recyclingprozess nur schwer oder gar nicht entfernt werden. Zum anderen degradiert auch das Material selber. Eine Getränkeflasche aus Polyethylenterephthalat (PET) kann möglicherweise ein weiteres Mal als Flasche oder andere Lebensmittelverpackung umgearbeitet werden (Abbildung 27). Danach entspricht das Material den hohen Anforderungen der Lebensmittelsicherheit nicht mehr. Möglicherweise ist das Material nicht mehr absolut klar und farblos, dann entsteht vielleicht eine gefärbte Shampooflasche daraus. Gefärbte Kunststoffe müssten im nächsten Zyklus nach Farben getrennt sortiert werden, um eine ansprechende Wiederverwertung möglich zu machen. Sehr schnell ist auch das nicht mehr möglich. Es kann aus der Mischung lediglich ein schwarzes Produkt mit sehr niedrigen Anforderungen entstehen. Typisch wären hier schwarze Blumentöpfe. Erreichen auch diese ihr Lebensende, können sie meist nur noch verbrannt und zur Energiegewinnung genutzt werden. Der Kunststoff erfährt mit jedem durchlaufenen Lebenszyklus einen Qualitätsverlust. Es handelt sich klar um Downcycling. Dennoch kann mit jedem Zyklus Primärmaterial eingespart werden. Das Material wird

zwar minderwertiger, doch es findet in jedem Zyklus einen sinnvollen Einsatz, für den die hohe Qualität von Primärmaterial nicht nötig ist. Das Durchbrechen dieser Downcycling-Kaskade gestaltet sich für Kunststoffe bisher als sehr schwierig. Dennoch wird gerade viel an einem entsprechenden Upcycling-Prozess für Kunststoffe geforscht. Kunststoff geht derzeit am Ende der Spirale verloren. Von einem Prozess, der das Material von einem tiefen Punkt der Spirale wieder zum Anfangspunkt und zur Ursprungsqualität zurückführen könnte, verspricht man sich einen großen Schritt in Richtung nachhaltigerer Kunststoffnutzung. Das chemische Recycling ist hier ein Ansatzpunkt der Wissenschaftler.

Andere Materialien wie einige (aber nicht alle) Metalle lassen sich dagegen unbegrenzt recyceln, was letztlich bedeutet, dass sie durch Recyclingprozesse dasselbe Qualitätslevel erreichen können wie das ursprüngliche Primärmaterial. Doch auch hier kann Downcycling sinnvoll sein. Ein Beispiel ist Kupfer. Sowohl aus primären Erzen wie auch sekundären Abfällen kann es durch Feuerraffination und anschließender Elektrolyse zu Kupfer sehr hoher Qualität und Reinheit umgesetzt werden. Primär- und Sekundärkupfer können dann nicht unterschieden werden. Diese Aufreinigungsprozesse sind jedoch sehr arbeits- und energieintensiv. Im Recycling macht es unter Umständen Sinn, diesen Schritt zunächst zu vermeiden. Stattdessen wird Kupferschrott, der sauber getrennt gesammelt und sortiert werden konnte, zunächst zu einem neuen Produkt umgeschmolzen. Aus einem für die Leitfähigkeit hochreinen Elektrokabel wird vielleicht ein Kupferblech für ein Dach oder eine

Heizwendel. Auch dieses kann noch umgeschmolzen werden. Im nächsten Lebenszyklus wird daraus vielleicht eine Kupferlegierung für einen Messingwasserhahn. Die Toleranz für andere Elemente ist in Legierungen höher. Auch Messing wird häufig noch umgeschmolzen zu neuem Legierungsmaterial. Erst wenn keine Anwendung mehr gefunden wird, die die Zusammensetzung des Kupfers toleriert, geht das Material in die Kupferhütte zurück. Dort entsteht durch Feuerraffination und Elektrolyse auch aus stark verunreinigten und vermischten Schrotten wieder Kupfer von höchster Qualität. Die Abwärtsspirale der Materialqualität mit den durchlebten Zyklen kann von neuem beginnen. Mit jedem Zyklus des Downcyclings wurde jedoch eine große Menge Energie und Kosten im Recycling gespart.

Die Abwärtsspirale von hintereinander gehängten Lebenszyklen mit abnehmender Qualität nennt man Kaskadennutzung. Die vorausgehenden Beispiele zeigen, dass der Prozess des Downcyclings in diesen Kaskaden seine Berechtigung hat. Zum einen verhindert er Primär Materialeinsatz in minderwertigeren Produkten, zum anderen verhindert er unnötigen Energieeinsatz und Aufwand im Recycling. Dennoch ist auch klar, dass der Qualitätsverlust mit jedem Lebenszyklus möglichst gering gehalten werden sollte. Je geringer der Qualitätsverlust, desto mehr Lebenszyklen können hintereinander gehängt werden und desto länger kann die Kaskade aufrecht gehalten werden, bevor das Material entweder verloren geht oder aufwendig behandelt werden muss.

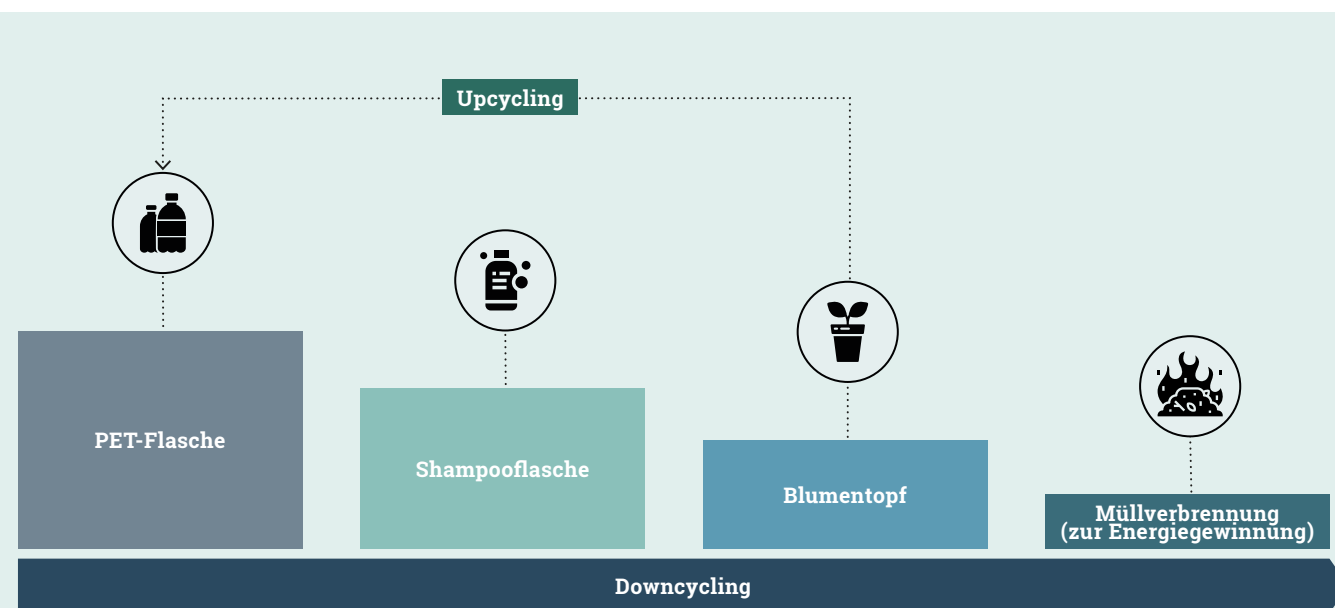


Abbildung 27: Beispiele für eine Kaskadennutzung von Kunststoffen. Jeder Recyclingzyklus geht mit einem Qualitätsverlust des Materials einher, daher werden sie als Downcycling bezeichnet. Wünschenswert aber derzeit noch nicht machbar wäre ein Upcycling des Materials am Ende der Kaskade zurück zur Ursprungsqualität.

5. Herausforderungen: Welche Grenzen und Zielkonflikte hat Ressourceneffizienz?

In diesem letzten Theoriekapitel möchten wir Verständnis dafür wecken, dass es in der vielschichtigen Nachhaltigkeitsdebatte mit einfachen Antworten meist nicht getan ist. Stattdessen wollen wir Anreize und Grundlagen für ein systemisches Nachdenken zur Lösungsentwicklung geben.

Ressourcennutzung hat immer ökologische Kosten

Jedes Produkt, jedes Material, das wir nutzen, hat Umweltwirkungen. Wir können besonders auf die Herstellungsbedingungen achten. Wir können Recyclingmaterial verwenden. Wir können das benötigte Material minimieren und das Produkt besonders lange verwenden. Es bedarf dennoch Energie und Rohstoffen für Herstellung und Betrieb des Produktes. Diese kommen immer mit ökologischen und ökonomischen Kosten daher. Die oberste Regel des nachhaltigen Konsums genauso wie der Ressourceneffizienz und der Kreislaufwirtschaft ist daher die Reduktion. Die erste Frage ist: Brauchen wir dieses Produkt, ist der Ressourcenverbrauch und damit die verknüpften Umweltwirkungen gerechtfertigt? Erst auf der nächsten Ebene kommt die Frage der Effizienz: Wie kann der Ressourcenverbrauch und die verknüpften Umweltwirkungen möglichst gering bei möglichst großem Nutzen für den Konsumenten gestaltet werden?

Kein Kreislauf ist perfekt

Die Kreislaufführung von Rohstoffen, also ihre Rückführung von der Nutzungsphase zurück in Produktionsprozesse durch Recycling, ist in den letzten Jahrzehnten zur großen Hoffnung als Strategie für eine nachhaltigere Ressourcennutzung geworden. Kreislaufwirtschaft oder Circular Economy sind Stichworte in aller Munde. Dies ist grundsätzlich berechtigt. In vielen Fällen haben Sekundärrohstoffe einen deutlich geringeren Fußabdruck als primär abgebaute Rohstoffe. Dennoch hat die Kreislaufwirtschaft Grenzen, die es zu bedenken gilt.

Zum einen ist kein Prozess perfekt. Jeder Schritt im Lebenszyklus verursacht Materialverluste. Manche Verluste sind nicht dauerhaft. Sie können gesammelt und in den Kreislauf zurückgeführt werden. Dazu gehören beispielsweise Ausschussware, die den geforderten Qualitätsansprüchen nicht genügt, Verschnittmaterial, das bei der Herstellung von Produkten anfällt, oder während der Nutzung zunächst verloren gegangene

Produkte. Andere Verluste müssen als permanent angesehen werden, weil das Material nicht mehr zugänglich ist oder zugänglich gemacht werden kann. So geht Material zum Beispiel als Dampf oder Staub verloren, löst sich im Abwasser oder zersetzt sich langsam durch Witterung und UV-Einfluss (Bsp. Entstehung von Mikroplastik). Es verteilt sich also fein in der Umwelt. Dies nennt man Dissipation. Daneben gibt es Anwendungen, die inhärent dissipativ sind. Hierzu gehören Nahrung und Medikamente für Mensch und Tier oder Dünge- und Pflanzenschutzmittel, aber auch Reifen, die sich durch die Verwendung langsam abreiben. Neben der Dissipation gibt es Anwendungen, die das Material außerhalb unseres Zugriffs bringen. So werden Kabel und Rohre im Meer verlegt, um Länder und Kontinente für Elektrizität, Gas und Telekommunikation zu verbinden. Satelliten werden sogar ins All geschossen. Dem Kreislauf geht also ständig Rohstoff verloren. In den letzten Jahren wurden viele Anstrengungen unternommen, um diese Verluste zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu erhöhen. Völlig vermeiden können wir diese Verluste allerdings nicht. Soll die Menge an Rohstoff im Kreislauf auch nur konstant bleiben, müssen wir die Verluste durch Primärmaterial ersetzen.

Dazu kommt ein derzeit und aller Voraussicht nach auch in Zukunft steigender Ressourcenbedarf, denn die Weltbevölkerung wächst: Immer mehr Menschen fragen Produkte nach. Zusätzlich möchten wir als Weltgemeinschaft Armut bekämpfen und für einen wachsenden Wohlstand sorgen. Dies bedeutet mehr und komfortableren Wohnraum, mehr Infrastruktur wie Strom- und Verkehrsnetze, Bildungs- und Gesundheits- und Gemeinschaftseinrichtungen oder Verwaltungsstrukturen. Auch dies sorgt für einen steigenden Ressourcenbedarf, der nie vollständig aus dem Kreislauf gedeckt werden kann, denn so viel Rohstoff ist im System ja noch gar nicht vorhanden. Er muss daher ebenfalls aus primären Quellen gewonnen werden.

Ein dritter Punkt, der hier zu bedenken wäre, ist die ständige Änderung unserer Bedarfe. Der technologische Fortschritt bringt immer wieder neue Produkte hervor und verdrängt alte Technologien. Die benötigten Rohstoffe ändern sich

entsprechend. Die Energiewende bringt beispielsweise den Umstieg von fossilen Energietechnologien wie Atom- und Kohlekraftwerken auf erneuerbare Energiegewinnung mittels Windkraftanlagen und Photovoltaikzellen. Diese brauchen Rohstoffe wie Seltene Erden, Indium und Gallium, die in den alten Technologien nicht vorkamen. Sie sind daher noch nicht im Kreislauf vorhanden und müssen zunächst aus dem Bergbau gewonnen werden. Erst wenn die ersten Anlagen das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, können auch diese Rohstoffe aus Recycling gewonnen werden.

Alle drei Aspekte zeigen uns, dass wir auch bei sehr großen Bemühungen um eine gut funktionierende Kreislaufwirtschaft nicht auf die primäre Gewinnung von Rohstoffen verzichten können. Neben den Bemühungen, die Kreislaufwirtschaft soweit sinnvoll möglich auszubauen, gehören Überlegungen zur primären Rohstoffgewinnung im Bergbau immer zu einer ökologisch und sozial nachhaltigen Ressourcennutzung. Wo werden unsere Rohstoffe abgebaut? Unter welchen Bedingungen geschieht dies? Und wie lässt sich auch die Nachhaltigkeit des Bergbaus verbessern?

Zielkonflikte im Materialkreislauf

In den vorangegangenen Kapiteln wird deutlich, dass die Gewinnung, Nutzung und Entsorgung oder Wiedergewinnung von Rohstoffen in einem komplexen Netzwerk von Materialflüssen durch Wirtschaftszweige, Herstellungsprozesse, Produktkategorien, Rohstoffkompositionen und Nutzungsarten rund um die Welt organisiert ist. Auch wenn wir zur vereinfachten Darstellung des Lebenszyklus eines Produktes oder Rohstoffes zurückgehen, zeigt das Symbol des Kreislaufs, dass alle Stufen des Lebens miteinander verbunden sind (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 25). Sie beeinflussen sich gegenseitig. Änderungen im Herstellungsprozess eines Produktes haben Einfluss auf die Demontage, die Materialzusammensetzung beeinflusst den Rückgewinnungsprozess, die Nutzungsdauer bestimmt auch die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen. Ebenso können Änderungen in späteren Phasen des Zyklus Effekte haben. Die Gestaltung der Nutzungsphase eines Produktes bestimmt, wie gesammelt und recycelt werden kann. Die Durchführung des Recyclingprozesses kann die Materialzusammensetzung und somit die Eigenschaften und die Wiedereinsetzbarkeit in neuen Produkten bestimmen. Die Optimierung eines bestimmten Problems im Sinne der Ressourceneffizienz wird sich daher über die Stoffflüsse an die unterschiedlichsten Stellen des Kreislaufs

fortpflanzen und kann dort Auswirkungen haben, positive wie negative. Entstehen durch Verbesserungen an einer Stelle Probleme an anderer Stelle, spricht man von Zielkonflikten. Diese gilt es, im Auge zu behalten.

Ein gutes Beispiel hierfür ist die zunehmende Miniaturisierung im Elektronikbereich. Unsere Smartphones mögen in den letzten Jahren wieder etwas größer geworden sein (siehe Abbildung 28). Gleichzeitig ist die Leistung der Geräte deutlich gestiegen. Vor 20 Jahren konnte man mit einem Mobiltelefon telefonieren und Kurznachrichten verschicken, möglicherweise auch ein sehr einfaches, schwarz-weiß gestaltetes Spiel spielen. Heute leisten Mobiltelefone mehr als damals Standcomputer. Dies konnte durch die Verwendung von immer komplexeren und vor allem immer kleineren Bauteilen erreicht werden. Die Leistung wurde stark erhöht, während der Materialeinsatz verringert wurde, insgesamt wurde durch diesen Veränderungsprozess also eine höhere Materialeffizienz erzielt. Derselbe Prozess führte jedoch auch zu einer Verminderung der Rückführbarkeit der Materialien durch Recycling. Eine Verminderung des Materialeinsatzes beim Bau eines Gerätes bedeutet ein geringeren Materialwert, der im Recyclingprozess zurückgewonnen werden kann. Die kleineren und komplexeren Bauteile sind außerdem deutlich schwieriger in ihre Materialbestandteile aufzuteilen. Insgesamt leidet also die Wirtschaftlichkeit und technische Durchführbarkeit des Recyclingprozesses unter der Steigerung der Materialeffizienz. Im Falle der Smartphones führte dies dazu, dass meist mit Ausnahme der Herausnahme des Akkus keinerlei Zerlegung in Einzelbauteile mehr durchgeführt wird. Eine gezielte Demontage ist zu aufwendig. Durch maschinelles Schreddern gehen zu viel Edelmetalle als Staub verloren. Sie werden also im Ganzen in die Kupferschmelze einer Hütte gegeben. Die Leiterplatte aus Kupfer mit aufgetragenen Edelmetallen wie Gold, Silber, Platin und Palladium stellt den größten Wert eines Smartphones dar und kann so effizient recycelt werden. Die Kunststoffteile verbrennen in der Schmelze und dienen höchstens noch der Energiegewinnung. Viele weitere Materialien wie das Indium aus den Displays, eventuell verbaute Stahl- oder Aluminiumteile beispielsweise aus dem Gehäuse oder auch die Batteriebestandteile Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan, falls der Akku nicht entfernt wurde, oxidieren in der Schmelze und gehen in der abgetrennten Schlacke verloren.

in diese drei Nachhaltigkeitsdimensionen fallen. Zur ökologischen Bewertung gehört beispielsweise der Ausstoß von Treibhausgasen, die Toxizität auf Mensch und Gewässer, die Versauerung und Eutrophierung von Böden und Gewässern oder die Landnutzung, aber auch der Ressourcenverbrauch. Nicht immer sind diese verschiedenen Dimensionen in Einklang zu bringen. So kann die Steigerung der Ressourceneffizienz – eigentlich ein klares Ziel des nachhaltigen Handelns – manchmal im Widerspruch zu anderen Nachhaltigkeitszielen wie dem Kampf gegen den Klimawandel stehen.

Ein Beispiel hierfür ist das Recycling von Displays. Nicht nur unsere Smartphones und Laptops, sondern eine zunehmende Zahl von Geräten unseres täglichen Lebens von der Waschmaschine bis zur Küchenmaschine hat heute Displays. Diese enthalten Indium, ein Metall, das durch die Anwendung in Zukunftstechnologien wie Displays, Solarzellen und Computerchips immer mehr gebraucht wird und dennoch bisher kaum aus Sekundärquellen zurückgewonnen wird. Aus Produktionsabfällen wird Indium zwar recycelt, aus Post-Consumer-Abfällen findet bisher aber keine Rückgewinnung statt. Zur Rückgewinnung des Indiums aus Displays an ihrem Lebensende sind immer wieder Verfahren entwickelt worden. Im Sinne der Ressourceneffizienz wären solche Ansätze wichtig. Die Verfahren sind jedoch so energieaufwändig, dass durch die Herstellung von 1 kg Recyclingindium ein Vielfaches des Treibhausgasausstoßes der gleichen Menge Indium aus dem Bergbau verursacht wird. Das Recycling als ressourceneffizientes Handeln steht hier im Konflikt mit dem Kampf gegen den Klimawandel und wird in diesem Fall daher nicht angewandt (Schmidt et al., 2020).

Diese Aspekte zeigen deutlich, dass das Ziel einer Verbesserung der Ressourceneffizienz unserer menschengemachten Lebenswelt im Angesicht des komplexen Netzwerks von Produktions-, Nutzungs- und Recyclingprozessen und des ebenso komplexen Ziels der Nachhaltigkeit eine große Herausforderung sein kann. Wir sind gezwungen, nicht in eindimensionalen, sondern vielfältigen Zusammenhängen zu denken. Gleichzeitig sind wir alle Teil des Systems. Das gibt uns Macht. Durch Systemverständnis können wir ressourcenbewusste Entscheidungen treffen. Im Alltag mögen dies kleine Dinge sein, wie die Entscheidung, ein altes Smartphone noch ein halbes Jahr länger zu nutzen (Erhöhung der Materialeffizienz) oder Aluminiumdeckel, Kartonhülle und Plastikkörper eines Joghurtbechers voneinander zu trennen (Verbesserung der Kreislaufführung aller drei Rohstoffe). Letztlich hat jedoch fast alles, was wir tun, mit Gegenständen und damit Rohstoffen zu tun. Daher ist es wichtig und in der Summe unserer Handlungen auch einflussreich, die Ressourceneffizienz neben weiteren Aspekten des nachhaltigen Handelns als Kategorie in unserem Denken zu etablieren.

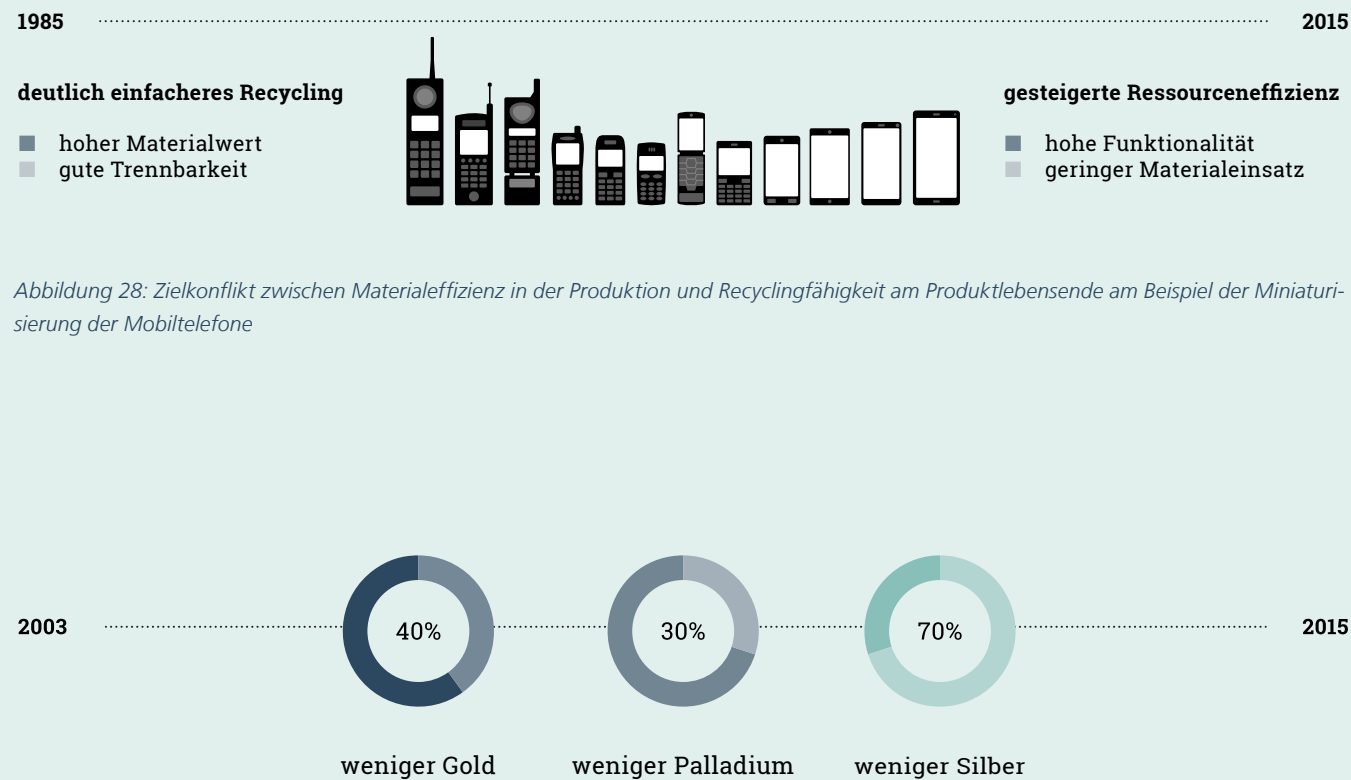


Abbildung 28: Zielkonflikt zwischen Materialeffizienz in der Produktion und Recyclingfähigkeit am Produktlebensende am Beispiel der Miniaturisierung der Mobiltelefone

Abbildung 29: Entwicklung der Ressourceneffizienz bei Leiterplatten

Zielkonflikte innerhalb der Nachhaltigkeitsdimensionen

Ein Produkt oder eine Handlung auf ihre Nachhaltigkeit hin zu bewerten ist keine eindimensionale Frage. Schon bei einer ganz groben Betrachtung der Nachhaltigkeit unterscheidet man zwischen wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit. In den vorangegangenen Kapiteln sind viele verschiedene Aspekte genannt worden, die wiederum alle

6. Beispiele: Wo wird Ressourceneffizienz erprobt?

Die Ressourceneffizienz hat seit Jahren ihren festen Platz in der Forschungsförderung des BMBF. Die folgenden Beispielprojekte wurden im Rahmen des Ressourceneffizienzprogramms r+Impuls gefördert und zeigen, wie die Industrie die Grundstrategien der Ressourceneffizienz nutzen kann, um Einsparungen zu erreichen.

Effizienzsteigerung

ecoFluor – Innovative und umweltfreundliche, auf Fluor (F₂) basierte Reinigungsprozesse in der Halbleiterindustrie

Die Herstellung von Mikrochips für Handys, Laptops oder Taschenrechner stellt höchste Anforderungen an die Sauberkeit eingesetzter Materialien und Fertigungsschritte. Die für diese kleinen Elektronikbauteile benötigten Schichten und Strukturen sind zum Teil nur wenige Nanometer groß. Daher werden viele der Produktionsanlagen der Halbleiterindustrie nach jedem Arbeitsschritt gründlich gereinigt. Bisher geschieht dies mit perfluorierten Kohlenwasserstoffen (PFC) oder Stickstofftrifluorid (NF₃) und damit Gasen, die für das Klima bis zu 17.000-fach schädlicher sind als Kohlendioxid, da sie besonders stabil sind und deshalb lange in der Atmosphäre verbleiben. Das Team des Projekts „ecoFluor“ setzt auf einen innovativen Gasmix, der mit bis zu 20 Prozent weniger Fluor auskommt und vollständig auf die umweltschädlichen PFC und NF₃ verzichtet. Das Treibhauspotenzial der verwendeten Gasmischung ist null und damit geringer als das von Kohlenstoffdioxid. Durch den zusätzlichen Einsatz von Mikrowellen-Technik verkürzt der innovative Gasmix die Reinigungszeit der Produktionsanlagen zusätzlich und spart so Kosten ein. Der einzige Nachteil: Wegen des Einsatzes von elementarem Fluor müssen die Geräte entsprechend angepasst und das Bedienungspersonal geschult werden, damit es nicht zu Schäden kommt. Die weltweite Produktion von Mikrochips und Sensoren durch die Halbleiterindustrie wächst stetig und hat 2016 die Zahl von einer Billion Stück überschritten, was auf einen signifikanten Vorteil der neuen Technologie für die Umwelt hindeutet. Der Vorteil ist zweierlei. Einerseits werden weniger fluorhaltige Rohstoffe verbraucht: Andererseits und aus Umweltsicht wichtiger: Fluorhaltige Reinigungsgase (NF₃ und PFC) werden ersetzt und dadurch Klimaschäden vermieden.

IVAN – Herstellung von Kontaktwerkstoffen der Niederspannungstechnik mit reduziertem Silbergehalt

Silber ist als Werkstoffbasis für die Kontakte in elektrischen Schaltgeräten aufgrund seiner technischen Kontakteigenschaften unersetzbar. Allein in Deutschland werden jährlich 400 Tonnen des Edelmetalls für Schaltgeräte der industriellen Niederspannungselektronik gebraucht – und die Nachfrage wird voraussichtlich zunehmen. Im Projekt IVAN wurde erfolgreich eine industrielle Anlage zur Fertigung von stabilen Mehrschichtverbundkontakten entwickelt. Durch die Mehrschichtverbunde kann ein Teil des Silbers bspw. durch Zinn ersetzt werden. Lebensdauertests zeigen das Potenzial der neuen Technologie: Die gefertigten Kontakte enthalten weniger Silber und zeichnen sich durch hohe Verbundfestigkeit und damit hohe Abbrandfestigkeit aus. In Fällen, in denen der Einsatz der Verbunde nicht möglich ist, zielt eine weitere Entwicklung darauf ab, den Zuschnitt der Kontakte effizienter und verlustärmer zu gestalten. Dadurch können die Materialabmessungen flexibel und mit wenig Ausschuss bis hin zu Mikroprofilen skaliert werden. Somit können aus der gleichen Menge Silber mehr Kontakte hergestellt werden. In beiden Fällen, den Verbundkontakten und den effizienter hergestellten Kontakten, konnte außerdem durch eine signifikante Steigerung der Haftfestigkeit die Lebensdauer von silberhaltigen Kontakten in Schaltgeräten erhöht werden. Dadurch lässt sich der Bedarf des Edelmetalls um bis zu 40 Prozent reduzieren. Hier werden auf anschauliche Weise gleich drei Ansätze zur Einsparung des wertvollen Rohstoffs Silber kombiniert: Die Stromkontakte werden kompakter und verlustärmer produziert, ein Teil des Silbers wird durch einen anderen, weniger wertvollen Rohstoff ersetzt (Substitution) und die Nutzungsdauer der Kontakte wird verlängert, wodurch längerfristig weniger Kontakte hergestellt werden müssen.

Substitution

EcoPumpDrive – Entwicklung innovativer rohstoff- und energieschonender Umwälzpumpen für Heizungs-, Klimatisierungs-, Trinkwasser- und Solar-Kreisläufe

In Europa sind rund 140 Millionen Umwälzpumpen im Einsatz, die Heizungs-, Trinkwasser- und Solaranlagen am Laufen halten und im Durchschnitt alle zehn Jahre ersetzt werden müssen. Damit liegt die Zahl der Pumpen, die jedes Jahr neu gebraucht werden, bei rund 14 Millionen Stück. Diese Allroundpumpen werden von Motoren betrieben, deren Permanentmagnete aus Neodym-Eisen-Bor oder Samarium-Cobalt bestehen. Die Seltenen Erden in diesen Verbindungen sind weltweit nur begrenzt verfügbar. Das Projekt „Eco-Pump-Drive“ entwickelt neue elektrische Antriebskonzepte für Umwälzpumpen, die komplett frei von Seltenen Erden sind. Sie sind zudem ebenso leistungsfähig und energieeffizient wie die Permanentmagnetmotoren. Der Schlüssel zur neuen ressourcenschonenden Technologie: das Prinzip des Synchron-Reluktanzmotors. In einem höheren Leistungsbereich ist dieser Motor bereits etabliert. Die Projektpartner im Projekt „EcoPumpDrive“ arbeiten nun daran, das Reluktanz-Prinzip auf die Ansprüche von kleineren Umwälzpumpen für den Hausgebrauch – und für Gewerbeanlagen – anzupassen. Grundlage für das Verständnis dieses Projektes ist die Physik verschiedener Arten von Elektromotoren. Durch den Ersatz der Seltenen Erdmetalle kommt es neben dem Verzicht auf kritische Rohstoffe auch zu einer Senkung der Rohstoffanspruchnahme.

EKALGU – Automatisierte Einblasanlage zur kalkbasierten Entschwefelung und Legierungseinstellung von Gusseisen

Im Automobil- und Maschinenbau spielen hochwertige Gusseisenprodukte mit Kugel- oder Vermikulargraphit eine wichtige Rolle. Nahezu 40 Prozent der deutschlandweiten Gusseisenproduktion – rund 1,5 Millionen Tonnen – entfallen jährlich auf diese Produkte, die spezifische Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit vereinen. Bevor sich der Graphit kugelförmig oder würmchenförmig (vermikular) ausbilden kann, muss das flüssige Gusseisen entschwefelt werden. Das geschieht mit Magnesium, welches nach der Behandlung nicht zurückgewonnen werden kann. Das Projekt „EKALGU“ will den wertvollen Rohstoff durch Kalk ersetzen, der besser verfügbar und kostengünstiger ist. Die Entschwefelung geschieht mit einer Anlage, die kalkhaltige Entschwefelungsmittel direkt in die Schmelze der Gusseisenproduktion einbläst. Der Ersatz von Magnesium durch Kalk ist aus strategischen und wirtschaftlichen Gründen interessant, weil es für Magnesium weltweit nur wenige Lieferanten (meist China) gibt. Der Vorteil hinsichtlich der Rohstoffeinsparung ist weniger deutlich, da Kalk zwar einen kleineren Rucksack als Magnesium aufweist, aber bei der Entschwefelung weniger effektiv ist, das heißt es muss mehr Kalk eingesetzt werden und der Ertrag an entschwefeltem Gusseisen ist etwas geringer, weil mehr Schlacke entsteht.

Kreislaufführung

Circular Packaging – Recycling von post-consumer-Verpackungs- und Verbundabfällen zu gereinigten Rohstoffen für hochwertige Packstoffe

Lebensmittel- und Konsumgüterverpackungen müssen vielseitigen Anforderungen entsprechen, die beispielsweise durch mehrschichtige Kunststofflamine erfüllt werden. Da viele Aufbereitungsanlagen nur Verpackungen aus Monomaterialien recyceln können, werden Mehrschichtlamine aus Haushaltsabfällen meist verbrannt statt wiederverwendet. Das neue Verpackungsgesetz steckt aber anspruchsvolle Ziele: Die Recyclingquote für Kunststoffverpackungen soll von 36 Prozent im Jahr 2018 auf 63 Prozent im Jahr 2022 anwachsen. Innovative Verfahren wie „CreaSolv“[®] ermöglichen die Trennung von Mehrschichtlaminen, indem sie die Kunststofffraktionen zunächst auflösen, um sie anschließend vom Rest abzufiltrieren und gereinigt zurückzugewinnen. Das Projekt „Circular Packaging“ soll die Wirtschaftlichkeit und das Potenzial dieser Technologie aufzeigen. Dazu wird eine Pilotanlage mit einer Verarbeitungskapazität von etwa fünf Kubikmeter Kunststoffabfall pro Tag gebaut.

PLUS – Pilotanlage zur lasergestützten Sortierung von Sonderlegierungen

Sekundärrohstoffe aus dem Metallrecycling sind eine nachhaltige Alternative zu Primärrohstoffen. Auch seltene Metalle wie Wolfram, Kobalt, Niob, Chrom und Titan können recycelt werden. Die Metallschrotte, die diese Elemente enthalten, sind jedoch häufig vermischt, weil unterschiedliche Metalle in verschiedenen Legierungen, Größen und Formen vorliegen. Werden diese Metalle als Mischungen recycelt, haben die Recyclingprodukte oft einen geringen Wert. Für viele Schmelzwerke ist das Aufbereiten dieser Schrotte dann unwirtschaftlich. Derzeit können Metallschrotte nur manuell unter Zuhilfenahme von Klassifiziergeräten auf Basis der optischen Emissionsspektroskopie oder Röntgenfluoreszenzanalyse sortiert werden. Das „PLUS“-Verfahren will den Sortierprozess mittels neuer Technologie wirtschaftlicher gestalten. Innerhalb der Materialgruppen Schnellarbeitsstahl, Hartmetall und Titan sollen mehr als 20 verschiedene Legierungen berührungslos unterschieden und automatisch mittels Robotik-basierter Greifarm sortiert werden.

Beide Verfahren unterstützen das Recycling in besonders relevanten Abfallbereichen.

Weitere im Rahmen von r+Impuls geförderte Forschungsvorhaben sind auf folgender Webseite aufgeführt:

<https://www.r-plus-impuls.de/rplus-de/verbundprojekte/>

Glossar



Abiotische Rohstoffe:

Rohstoffe, die der unbelebten Natur entstammen, zum Beispiel Mineralien, Erze und fossile Energieträger. In für Menschen relevanten Zeiträumen erneuern sich ihre Bestände nicht.

Altschrott:

Material, das nach der Nutzungsphase, also am Lebensende des Produktes, entsorgt wird. Aus dem Englischen sind dafür auch die Begriffe Post-Consumer- oder End-of-Life-Schrott ins Deutsche übernommen worden.

Biotische Rohstoffe:

Rohstoffe, die aus lebenden (zum Beispiel pflanzlichen) Materialien gewonnen werden. Im Gegensatz zu abiotischen Rohstoffen können sie nachwachsen, sodass ihre Nutzung nicht (so schnell) zur Erschöpfung des Bestandes führt.

Dissipation:

In der Werkstofftechnik bezeichnet Dissipation (lateinisch für „Zerstreuung“) den Verbrauch von Rohstoffen durch zum Beispiel Korrosion und Abrieb. Die Rohstoffe werden dabei in der Umwelt so fein verteilt, dass eine Rückgewinnung in der Regel nicht mehr möglich ist.

Downcycling:

Wird im Rahmen eines Recyclingprozesses Sekundärmaterial gewonnen, dessen Qualität geringer als die des ursprünglich in der Produktion eingesetzten Materials ist, spricht man von Downcycling. Dies kann im Sinne der Kaskadennutzung durchaus sinnvoll sein (siehe Seite 41/42).

Entkopplung:

Wächst eine Wirtschaft unter Beibehaltung aller vorhandenen Strukturen, dann ist davon auszugehen, dass die Rohstoffverwendung im gleichen Umfang wächst. Gelingt es bspw. durch Innovationen zur Steigerung der Ressourceneffizienz, die Rohstoffverwendung weniger stark ansteigen zu lassen als die Wirtschaftsleistung, dann spricht man von Entkopplung. Die Entkopplung wird als relativ bezeichnet, wenn die Rohstoffverwendung weniger schnell wächst als die Wirtschaft. Von absoluter Entkopplung ist die Rede, wenn die Rohstoffverwendung bei wachsender Wirtschaft nicht mehr steigt oder sogar sinkt.

Erze:

Erze sind Mischungen von Mineralien, die aus der Erdkruste zum Zweck der Metallgewinnung abgebaut werden. Erst die wirtschaftliche und technologische Machbarkeit des Abbaus macht ein Gestein zum Erz. Das Erz besteht aus dem eigentlich anvisierten Zielmineral mit dem gewünschten Metallgehalt und der nicht verwertbaren Gangart. Neben den metallhaltigen Erzen wird der Begriff heute teilweise auch für abgebaute Mineralien zu Gewinnung von Nichtmetallen wie Schwefel verwendet.

Eutrophierung:

Eutrophierung bezeichnet die Anreicherung von Nährstoffen in einem ursprünglich weniger nährstoffreichen Gewässer. Sie kann zu einer Algenblüte und, nach deren Absterben, zur Schädigung des im Gewässer angesiedelten Ökosystems führen. Meist sind menschliche Aktivitäten (zum Beispiel über-schüssige Düngung) für die Eutrophierung verantwortlich.

Exploration:

Exploration beschreibt die Suche und Erschließung von Rohstoffvorkommen. Dazu werden zunächst unterschiedliche geophysikalische Methoden angewendet, um mögliche Standorte von Lagerstätten zu identifizieren. Danach müssen Bohrungen durchgeführt werden, um zu untersuchen, ob und in welcher Qualität die gesuchten Rohstoffe tatsächlich vorhanden sind. Erst nach einem positiven Befund kann der eigentliche Bergbau beginnen.

Fossile Energieträger:

Fossile Energieträger sind Rohstoffe, die im Zuge geologischer Prozesse entstanden sind und aus denen sich mittels physikalisch-chemischer Prozesse nutzbare Energie gewinnen lässt. Beispiele sind Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran.

Humantoxizität:

Humantoxizität beschreibt das Ausmaß der gesundheitsschädigenden Wirkung einer Substanz oder der Gesamtheit aller auf einen oder mehrere Menschen einwirkenden Substanzen. Die Wirkung verläuft im ökologischen Kontext in der Regel über eines der Umweltmedien Luft, Wasser und Boden.

Industriemineralien:

Anteil der mineralischen Rohstoffe, die in der Industrie (und nicht in der Bauwirtschaft) Verwendung finden.

Kleinbergbau:

Im Gegensatz zu den durch große Unternehmen betriebenen Minen werden im Kleinbergbau Rohstoffe durch Einzelpersonen, Familien oder kleinere Kooperativen und meist ohne Zuhilfenahme größerer Maschinen oder ausreichende Schutzmaßnahmen abgebaut. Für die Arbeiter bedeutet das schwere und gefährliche, körperliche Arbeit bei sehr geringem Einkommen.

Klimawandel:

Als Klimawandel werden allgemein weltweite Änderungen des Klimas der Erde bezeichnet. Derzeit häufig gemeint ist der durch den Menschen verursachte Klimawandel aufgrund ansteigender Treibhausgasemissionen. Gemessen wird er häufig als Temperaturanstieg, umfasst jedoch auch weitere klimatische Veränderungen wie Niederschlagsmengen und -häufigkeiten.

Konfliktrohstoff:

Rohstoffe, die unter kriegerischen Bedingungen gewonnen werden. Teilweise sind die Rohstoffe und damit erzielbaren Gewinne die Ursache der Konflikte, teilweise finanzieren sich Kriegsparteien mit solchen Gewinnen. Leidtragende sind in jedem Fall die Bergleute, deren Arbeitsbedingungen in kriegerischen Konflikten besonders schlecht sind.

Kreislaufwirtschaft:

Im weiteren Sinn ist Kreislaufwirtschaft mit Circular Economy gleichzusetzen. Diese versucht, Materialien möglichst lange nutzbar innerhalb der Wirtschaft zu halten und Abfälle so weit wie möglich zu vermeiden. Wichtige Ansätze für die Wiederverwertung sind die 6 R: Recover, Recycle, Reduce, Remanufacture, Repair, Reuse (siehe unten). Im Vergleich dazu umfasst das Konzept der Kreislaufwirtschaft im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz vor allem die Aspekte Recycling und Recovery explizit, die Aspekte Remanufacture, Repair und Reuse hingegen nur indirekt und Reduce gar nicht.

Kritische Rohstoffe:

Ein Rohstoff wird als kritisch eingestuft, wenn die Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung des Rohstoffs und der Wahrscheinlichkeit von Versorgungsengpässen auf ein erhöhtes Risiko schließen lässt. Die Bedeutung ergibt sich aus den nachfragenden Sektoren, der Wichtigkeit der Produkte, der Nachfragemenge oder der Substituierbarkeit des Rohstoffs in den Produkten. Die Versorgungssicherheit wird bestimmt durch die Anzahl der produzierenden Länder und der politischen Verlässlichkeit dieser Länder.

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA):

Die kumulierten Massen aller Rohstoffe, die benötigt werden, um eine bestimmte Menge eines Rohstoffs, Materials oder Gegenstandes zu erzeugen, wird als kumulierter Rohstoffaufwand (Abkürzung: KRA) bezeichnet. Zwischenprodukte des Herstellungsprozesses gehen dabei jeweils mit ihrem eigenen KRA ein – deswegen: kumuliert. Der KRA ist auch ein Indikator für die mit dem Rohstoffaufwand einhergehenden ökologischen Kosten (siehe Rohstoffrucksack).

Landnutzungswandel:

Eine Kategorie in der Bewertung von Umweltwirkungen, die versucht, die zunehmende Landinanspruchnahme durch den Menschen abzubilden. Zunächst wurde die weltweite Agrarfläche gemessen, heute verfolgt man die Abnahme von Waldfläche von dem vorindustriellen Stand von 75 Prozent Waldbedeckung, um nicht nur agrarbedingte Flächennutzungsänderung abzubilden. Der Landnutzungswandel ist neben dem Klimawandel einer der maßgeblichen Treiber des fortschreitenden Verlusts der Artenvielfalt.

Lebenszyklusanalyse (LCA):

Sollen die ökologischen Auswirkungen verschiedener von uns genutzter Produkte oder Dienstleistungen bspw. im Rahmen einer Öko-Bilanz miteinander verglichen werden, dann ist es erforderlich, dass in diese Analyse alle Phasen ihres Lebenszyklus von der Exploration und Gewinnung der Rohstoffe über die Herstellung und Verarbeitung der Güter, ihre Nutzung bis hin zur Verwertung und Entsorgung berücksichtigt werden. Diese Form der Bewertung heißt daher auch Lebenszyklusanalyse (engl.: life cycle analysis, kurz: LCA).

Lineare Wirtschaft:

Form des Wirtschaftens, in der sowohl Rohstoffe als auch Entsorgungsmöglichkeiten für Abfälle unbegrenzt verfügbar sind (oder scheinen), und daher keine Notwendigkeit zur Schließung von Kreisläufen besteht. Materialien durchlaufen darin eine offene Kette von Lebensphasen von der Gewinnung über Verarbeitung und Nutzung hin zur Entsorgung, die schließlich zur ihrer Deponierung als Abfälle führt.

Luftverschmutzung (Aerosolbelastung):

Diese Umweltwirkungskategorie versucht, negative Effekte auf die Luftqualität abzubilden. Aerosole, feste oder flüssige Schwebeteilchen in der Luft, können die Gesundheit von Menschen und anderen Lebewesen (Bsp. Feinstaubbelastung in Städten) aber auch das Klima (Bsp. Wolkenbildung) beeinflussen.

Masseerhaltungssatz:

Er besagt, dass sich bei chemischen Reaktionen die Masse der beteiligten Reaktanten nicht merklich ändert. Das bedeutet implizit auch, dass unabhängig von der Art der Reaktion alle beteiligten Elemente nach Art und Menge unverändert erhalten bleiben.

Nachhaltige Entwicklung:

Nachhaltige Entwicklung ist der Brundtland-Kommission zufolge eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der jetzigen Generation dient, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre Bedürfnisse zu befriedigen. Dabei werden neben den ökologischen Grundlagen auch die wirtschaftliche Entwicklung und der soziale Ausgleich als tragende Pfeiler der Nachhaltigkeit angesehen. Ihren konkreten Niederschlag finden diese Ziele in den Nachhaltigkeitszielen (engl.: sustainable development goals; Abkürzung: SDGs) der Vereinten Nationen.

Neuschrott:

Materialverluste (Ausschussware, Schnittreste, Späne etc.) aus Produktionsprozessen in der Industrie können gesammelt und als Neuschrott dem Recycling zugeführt werden. Das Material ist nicht durch die Nutzungsphase gegangen, ist also neu, und meist von bekannter und sauberer Zusammensetzung. Es ist daher für die Recyclingprozesse hochwertiges und begehrtes Ausgangsmaterial.

Nicht-metallische Mineralien:

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Anwendungsbereiche in der Industrie ist es zweckmäßig, die nicht-metallischen Mineralien von einer anderen Gruppe von Mineralien, den Erzen, zu unterscheiden, aus denen metallische Rohstoffe hergestellt werden. Dazu gehören bspw. Gips, Kaolin, Graphit oder Quarz.

Ökotoxizität:

Ökotoxizität beschreibt das Ausmaß der umweltschädigenden Wirkung einer Substanz oder der Gesamtheit aller auf die Umwelt und ihre Ökosysteme einwirkenden Substanzen. Die Wirkung äußert sich in der Regel in einer Änderung der Artenzusammensetzung und der ökologischen Vielfalt.

Planetare Leitplanken:

Da es schwierig ist, verschiedene Umweltschäden miteinander zu vergleichen und deren gemeinsame Wirkung abzuschätzen, hat eine Forschendengruppe um Johan Rockström das Konzept der „planetaren Leitplanken“ entwickelt, bei dem zunächst möglichst alle Schadenskategorien erfasst werden, die für das Funktionieren der weltweiten natürlichen Ökosysteme relevant sind. Für jede dieser Kategorien wird dann ein Ausmaß an Schäden bestimmt, das für den Bestand der planetaren Ökosysteme gerade noch akzeptabel ist. Dieses Ausmaß stellt eine planetare Leitplanke dar, deren Überschreitung wahrscheinlich früher oder später zu einem Zusammenbruch führen wird.

Precision Farming:

Eine Technologie in der Landwirtschaft, bei der bspw. beim Düngen der Kulturpflanzen (zum Beispiel Mais oder Getreide) die ausgebrachte Düngemittelmenge genau auf den Bedarf der Pflanzen abgestimmt wird. Die aktuelle Düngemittelversorgung kann dabei mit Hilfe von optischen Sensoren bspw. anhand der Farbe der Blätter ermittelt werden. Pflanzen an einer Stelle des Feldes mit guter Düngemittelversorgung bekommen dann weniger zusätzlichen Dünger als Pflanzen an einer weniger gut versorgten Stelle. Dadurch können überflüssige Düngergaben vermieden werden.

Prozessschrott:

Prozessschrott sind Metallabfälle aus Produktionsprozessen. Wie Neuschrotte besitzen sie in der Regel eine bekannte Zusammensetzung, sie müssen aber nicht neuwertig sein und können daher nur bedingt wiederverwertet werden.

Recover:

Als Bestandteil der sogenannten 6 R im Rahmen der Circular Economy bezeichnet Recover die Möglichkeit, dass nicht das Material, aber zumindest die enthaltene Energie durch Müllverbrennung zurückgewonnen wird.

Recycle:

Als Bestandteil der sogenannten 6 R im Rahmen der Circular Economy bezeichnet Recycle die Möglichkeit, dass Produkte am Ende ihrer Nutzungsphase wieder in Materialien zerlegt und diese in die Produktion zurückführt werden.

Reduce:

Als Bestandteil der sogenannten 6 R im Rahmen der Circular Economy bezeichnet Reduce die Möglichkeit, weniger Waren und Dienstleistungen in Anspruch zu nehmen und dadurch von vornherein weniger Rohstoffe in den Wirtschaftskreislauf einzubringen.

Remanufacture:

Als Bestandteil der sogenannten 6 R im Rahmen der Circular Economy bezeichnet Remanufacture die Möglichkeit, dass funktionierende Bauteile am Ende der Nutzungsphase aus Produkten entnommen und in neue Produkte eingebaut werden.

Repair:

Als Bestandteil der sogenannten 6 R im Rahmen der Circular Economy bezeichnet Repair die Möglichkeit, dass defekte Produkte nicht entsorgt, sondern repariert und damit in die Nutzungsphase zurückgeführt werden.

Reuse:

Als Bestandteil der sogenannten 6 R im Rahmen der Circular Economy bezeichnet Reuse die Möglichkeit, dass defekte oder nicht mehr gebrauchte Produkte einem neuen Zweck zugeführt werden und so ohne Umweg direkt wieder in die Nutzung gehen können.

Rohstoffäquivalente:

Da sich der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) aus allen (unterschiedlichen) Rohstoffen zusammensetzt, die zur Herstellung eines bestimmten Rohstoffs erforderlich waren, wird deren kumulierte Masse „auf einen Nenner gebracht“: die Rohstoffäquivalente.

Rohstoffintensität:

Die Rohstoffintensität bezeichnet den (kumulierten) Rohstoffaufwand für die Erzeugung eines Produktes, einer Dienstleistung oder einer bestimmten Wirtschaftsleistung (zum Beispiel Wertschöpfung in Euro).

Rohstoffrucksack:

Teil des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) eines Rohstoffs oder Materials, der über die (Eigen-)Masse dieses Rohstoffs oder Materials hinausgeht.

Tagebau:

Der Tagebau ist eine Form des Bergbaus. Die Ressourcen werden dabei an der Erdoberfläche durch Baggern, Fräsen, Sprengen oder Bohren abgetragen. Gewonnen werden können so sowohl Erze zur Metallgewinnung und Industriemineralien als auch Braun- und Steinkohle, aber natürlich auch Sand, Kies, Stein und Lehm. Derzeit prominentes Beispiel aus Deutschland ist der Kohleabbau im Tagebau Hambach.

Treibhausgas:

Kohlendioxid (CO₂) ist das bekannteste Treibhausgas. Weitere Treibhausgase sind Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase): wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), und Schwefelhexafluorid (SF₆). Gemeinsam sorgen sie dafür, dass weniger Wärmeenergie in den Weltraum abgestrahlt wird. Übersteigt ihre Konzentration in der Erdatmosphäre ein gewisses Maß, steigt die Durchschnittstemperatur an, was zum Klimawandel führt.

Untertagebau:

Der Untertagebau bezeichnet eine Form des Bergbaus, bei der tieferliegende Lagerstätten durch die Grabung von Schächten und Stollen zugänglich gemacht und abgebaut werden. Hierdurch wird viel sogenannter Abraum bewegt, der nicht gebraucht und daher in Halden aufgeschüttet wird. Untertagebau wird bereits seit der Steinzeit betrieben und dient der Gewinnung von Erzen zur Metallherstellung, Kohle und Salzen, aber auch Tonmineralen.

Upcycling:

Wird im Rahmen eines Recyclingprozesses Sekundärmaterial gewonnen, dessen Qualität höher als die des ursprünglich in der Produktion eingesetzten Materials ist, spricht man von Upcycling.

Versauerung:

Eine Kategorie zur Abschätzung von Umweltwirkungen in der Lebenszyklusanalyse. Durch die Freisetzung von Säuren kann der pH-Wert von Böden oder Gewässern sinken mit negativen Auswirkungen auf das Ökosystem. Bspw. versauern die Meere durch die vermehrte Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft in Form von Kohlensäure.

Wasserstress:

Zur Beurteilung des Wasserstress wird die Wasserentnahme durch den Menschen ins Verhältnis mit der Menge an erneuerbaren Wasserressourcen gesetzt. Je höher der Anteil, desto größer das Stresslevel für das Ökosystem.

Weltbruttoinlandsprodukt:

Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist ein Maß für die Wirtschaftsleistung einer Volkswirtschaft, das heißt eines Landes. Es misst die Produktion von Waren und Dienstleistungen im Inland nach Abzug aller Vorleistungen – die Bruttowertschöpfung – für alle Wirtschaftsbereiche. Das Weltbruttoinlandsprodukt ist die Summe der Wirtschaftsleistungen aller Länder weltweit.

Zielkonflikt:

Konflikt, der entsteht, wenn im Hinblick auf einen angestrebten Zustand mehrere unterschiedliche Ziele erreicht werden müssen, die sich zumindest bis zu einem gewissen Grad gegenseitig ausschließen. Im Kontext der Ressourceneffizienz kann ein Zielkonflikt bspw. darin bestehen, einerseits möglichst leichte (zum Beispiel Verbund-)Materialien zu verwenden, die andererseits möglichst einfach zu recyceln sein sollen.

Literatur



Andrleit, H.; Elsner, H.; Henning, S.; Homberg-Heumann, D.; Kreuz, A.; Kuhn, K.; Moldauer, K.; Pein, M.; Schauer, M.; Schmidt, S.; Schmitz, M.; Sievers, H.; Szurli, M.; Wilken, H. (2020): Deutschland – Rohstoffsituation 2019. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

BICC (2010): Armer reicher Kontinent. Konfliktressourcen in Afrika. Bonn: Bonn International Center for Conversion.

BMBF (2017): Nationaler Aktionsplan Bildung für nachhaltige Entwicklung. Der deutsche Beitrag zum UNESCO-Weltaktionsprogramm. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Bodenheimer, M. (2014): Certifying Improvement, Improving Certification: An Analysis based on the Artisanal and Small-Scale Mining Sector. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

bbp; BICC: Themenmodul Rohstoffe und Konflikte. Online verfügbar unter: <https://sicherheitspolitik.bpb.de/de/m4>, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

bbp; BICC (2012): Fallstudie Demokratische Republik Kongo: Rohstoffreichtum, Armut und Konflikte. Online verfügbar unter: <https://sicherheitspolitik.bpb.de/de/m4/articles/case-study-democratic-republic-of-the-congo>, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

Buchert, M.; Manhardt, A.; Bleher, D.; Pingel, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen.

DERA (2021): DERA-Rohstoffliste 2021. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Destatis (2021a): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten 2000–2018. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffmaterialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/rohstoffaequivalente-5853101189004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Destatis (2021b): Verwertete inländische Rohstoffentnahme, Ein- und Ausfuhr von Gütern (Inländerkonzept): Deutschland, Jahre, Materialgrad und Rohstoffarten. Genesis-Online Code 85131-0004. Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=statistic&levelindex=0&levelid=1637790027519&code=85131#abreadcrumb>, zuletzt geprüft am 24.11.2021.

Deutsches PISA-Konsortium (2001): PISA 2000. Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

European Commission (2015): Den Kreislauf schließen. Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Brüssel.

European Commission (2020): Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020). Final Report. Luxembourg.

Franken, G. (2016): Mineralien aus fairem Handel? Möglichkeiten und Grenzen der Zertifizierung von Rohstoffen. Goslar: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/vortrag_fairer_handel_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

Fraunhofer IKTS (Hrsg.) (2020): CO₂-Emissionen bei der Stahlproduktion: Von 100 auf 5 Prozent! Online verfügbar unter: <https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/29-9-2020-co2-emissionen-bei-der-stahlproduktion--von-100-auf-5-.html>.

Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Hauff, V. (Hrsg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Grevén: Eggenkamp.

IRP (2019a): Global resources outlook 2019. Natural resources for the future we want. Fact Sheet. Nairobi, Kenya: International Resource Panel.

IRP (2019b): Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future We Want. Nairobi, Kenya: International Resource Panel; United Nations Environment Programme.

IZMF (2014): Factsheet „Rohstoffe und Lebenszyklus eines Mobiltelefons“. Online verfügbar unter: https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/sites/default/files/medien/IZMF_Factsheet_Lebenszyklus_2015.pdf, zuletzt geprüft am 24.05.2022.

OECD (1999): Measuring Student Knowledge and Skills. A New Framework for Assessment. Paris: OECD Publishing.

OECD (2018): Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris: OECD Publishing.

Pötscher, F.; Winter, R.; Pölz, W.; Lichtblau, G.; Schreiber, H.; Kutschera, U. (2014): Ökobilanz Alternative Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich. Wien.

Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å.; Chapin, F. S., III; Lambin, E.; Lenton, T. M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; Wit, C. A. de; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. (2009): Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. In: *Ecology and Society*, 14 (2).

Rüttinger, L.; Treimer, R.; Tiess, G.; Griestop, L. (2014): Fallstudie zu Umwelt- und Sozialauswirkungen der Zinnförderung in Bangka-Belitung, Indonesien. Berlin: adelphi; Montan Universität Loeben.

Rüttinger, L.; Treimer, R.; Tiess, G.; Griestop, L. (2015): Fallstudien zu Umwelt- und Sozialauswirkungen der Goldgewinnung in Madre de Dios, Peru. Berlin: adelphi; Montan Universität Loeben.

Schmidt, M.; Schäfer, P.; Rötzer, N. (2020): Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz. In: Holm, O.; Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D.; Friedrich, B. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 156-170.

Statista (2021): Absatz von Smartphones in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2021. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/77637/umfrage/absatzmenge-fuer-smartphones-in-deutschland-seit-2008/>, zuletzt geprüft am 04.02.2022.

Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S. E.; Fetzer, I.; Bennett, E. M.; Biggs, R.; Carpenter, S. R.; Vries, W. de; Wit, C. A. de; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G. M.; Persson, L. M.; Ramanathan, V.; Rayers, B.; Sörlin, S. (2015): Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. In: *Science*, 347 (6223), S. 1259855.

UN DESA (2022): Sustainable Development Goals. History – Implementation Progress – The 17 Goals. Online verfügbar unter <https://sdgs.un.org/goals>, zuletzt geprüft am 23.08.2022.

VDI-Fachbereich Energie und Umwelt (2016): VDI 4800 Blatt 1: Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Verein Deutscher Ingenieure.

Weltbank (2022): International Comparison Program, World Development Indicators. GDP, PPP (constant 2017 international \$) 1990–2020. Online verfügbar unter: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.PP.KD>, zuletzt geprüft am 20.02.2022.

Wikipedia (2022a): Ressource. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ressource>, zuletzt geprüft am 04.02.2022.

Wikipedia (2022b): PET-Flasche. Geschichte. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/PET-Flasche>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

WCED (1987): Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford: World Commission on Environment and Development.

WI (2013): 18 Factsheets zum Thema Mobiltelefone und Nachhaltigkeit. Ressourcenverbrauch / ökologischer Rucksack; nachhaltige Produktion, Nutzung und Entsorgung. Wuppertal.

Impressum



Herausgeber

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Stand

September 2022

Text

Beate Brede
Dr. Antonia Loibl
Dr. Dr. Christian Sartorius

Redaktion

Anne-Catherine Jung
Julia Weller

Satz und Grafik

Jeanette Braun
Alice Rensland
Sabine Wurst

Bildnachweise

alamy.de

Classic Collection
Erberto Zani

shutterstock.com

4zevar
Anna Komeleva
Alex Oakenman
Alex Tihonovs
kosmofish
Mikadun
PradeepGaur
Prokopenko Oleg
Pyty
robuart
Telnov Oleksii
Vladyslav Horoshevych
Zelimir Zarkovic

flaticon.com

stock.adobe.com

Diese Broschüre ist im Rahmen des Begleit- und Transferprojektes r+TeTra der Fördermaßnahme r+Impuls des Bundesministeriums für Bildung und Forschung entstanden (Förderkennzeichen 033R160). Das Team des Fraunhofer ISI wurde unterstützt durch die Mitarbeit von Beate Brede vom Fraunhofer IFAM.

GEFÖRDERT VOM

