

Energiewende: mehr als ein Austausch der Energiequellen

Marta Rivas

Die Herausforderungen und Implikationen einer Energiewende von fossilen zu erneuerbaren Energien werden oft unterschätzt als wäre ein reiner Austausch der Energiequellen unter Beibehaltung des Wirtschaftssystems möglich. Diese Sichtweise spiegelt gängige Wirtschaftstheorien wider, in denen die Energiefrage ein blinder Fleck ist. Erneuerbare Energien verfügen aber über andere Charakteristiken als die fossilen, namentlich eine niedrigere Energieernte, eine stärkere Ortsgebundenheit sowie eine andere rohstoffliche Basis. Das hat weitreichende Konsequenzen für die gesamte Wirtschaftsweise. Um einen zukunftsfähigen postfossilen Stoffwechsel zwischen Gesellschaft und Natur zu erreichen, ist ein Ressourcen- und Energiemanagement notwendig, das die Energiewende priorisiert und zugleich bei einer Steigerung unserer Lebensqualität unsere Ressourcen und Energieverbrauch reduziert.

1. Einleitung

Im Diskurs über die Energiewende fehlt oft die Berücksichtigung ihrer rohstofflichen Basis. Die Frage, welche Rohstoffe in welcher Menge für die Energiewende erforderlich sind, ist jedoch entscheidend, um die Möglichkeiten für eine Entfossilisierung der Wirtschaft abzuschätzen. Eine Auseinandersetzung mit diesen rohstofflichen Fragen macht die physischen Herausforderungen einer Energiewende sowie ihre Implikationen für die gesamte Wirtschaft deutlich. Die Energiewende bedeutet weit mehr als ein simpler Austausch der Energiequellen. Sie erfordert eine andere rohstoffliche Basis, die unseren Stoffwechsel mit der Natur grundlegend verändern wird. Das wirft wiederum neue Fragen über die Ressourcen- und Energieverteilung sowie über die Gestaltung der Energiewende auf.

In diesem Artikel analysiere ich zuerst die stoffliche und energetische Ebene der Energiewende. Damit zeige ich erstens, warum sich die Energiewende als *Gamechanger* für das ganze Wirtschaftssystem erweist. Zweitens erkläre ich, warum die gängigen politischen Lösungen bestehend aus Technologie und Kreislaufwirtschaft nicht ausreichen werden, um die aktuelle Wirtschaftsweise aufrechtzuerhalten. Schließlich erörtere ich, wie sich unser Stoffwechsel mit der Natur verändern müsste, um zukunftsfähig zu werden. Dieser Stoffwechsel müsste postfossil und regenerativ sein.

Die Energiewende wird von vielen Menschen als ein einfacher Wechsel von fossilen auf erneuerbare Energiequellen betrachtet: Die Energiequelle wird ausgetauscht, das Wirtschaftssystem bleibt unverändert. Diese Vorstellung unterschätzt die Tragweite und die Auswirkungen der Energiewende, weil die Rohstoff- und Energiebasis des bestehenden Wirtschaftssystems nicht mitgedacht werden. Fossile Energiequellen, die über Jahrmillionen von der Natur durch geologischen Druck verdichtet und gespeichert wurden, bieten eine einmalige und sehr konzentrierte Energieform, die den Vorteil hat, dass sie verfügbar, speicherbar und leicht transportierbar ist. Im Gegensatz dazu verfügen erneuerbare Energiequellen über eine niedrigere Energiedichte und sind von Natur aus nicht gespeichert. Sonnen- oder Windenergie müssen also zuerst umgewandelt und dann gespeichert werden, was die Herstellung einer zusätzlichen energetischen Infrastruktur von Gewinnungs- und Speichereinrichtungen erfordert. Dafür sind regenerative Energiequellen, im Unterschied zu fossilen, erneuerbar und, sofern die Sonnenenergie erschlossen werden kann, praktisch unendlich verfügbar. Was diese verschiedenen Charakteristika der Energiequellen für das herrschende Wirtschaftssystem bedeuten, lässt sich am besten mit dem Konzept des Stoffwechsels zwischen Mensch und Natur verstehen.

2. Auswirkungen der Energiewende auf unseren Stoffwechsel mit der Natur

In der Industrieökologie wird der Stoffwechsel zwischen Mensch und Natur, auch sozio-ökonomischer Metabolismus genannt, als die Gesamtheit der Material- und Energieströme definiert, die eine Gesellschaft benötigt, um sich zu reproduzieren (Fischer-Kowalski und Haberl 1998). Während die Mainstream-Ökonomie die Wirtschaft als ein in sich geschlossenes eigenständiges System darstellt, betrachtet die metabolische Perspektive das sozioökonomische System als Teil oder Subsystem der Biosphäre, in dem

eine Aufnahme, Umwandlung, Speicherung, das Recycling und die Entsorgung von Stoffen stattfinden. Aus dieser Perspektive betrachtet ist ein Wirtschaftswachstum in Produktion oder Dienstleistungen immer mit dem Anstieg des Ressourcen- und Energieverbrauchs verbunden. Die neoklassische Darstellung der Ökonomie beschränkt sich dagegen auf die Interaktion der „Wirtschaftssubjekte“ Unternehmen und Haushalte sowie auf die Austauschbarkeit der „Faktoren“ Arbeit, Kapital und Ressourcen. Diese Darstellung berücksichtigt weder die Energieflüsse noch die Komplexität der Natur. Sie kann keine passende Lösung für aktuelle ökologische Probleme wie die Klimaerwärmung oder den Artenschwund bieten, weil sie diese Probleme noch nicht einmal erfasst. Die Natur wird als ausbeutbare Ressource betrachtet. Dabei ist die Natur ein komplexes Reproduktionssystem, das den Stoffwechsel aller Lebensformen – auch die menschliche – einschließt und deren Reproduktion unterstützt (Mahnkopf 2020: 11f).

Jedes wirtschaftliche System ist mit einem spezifischen Stoffwechsel verbunden, der aus der Kombination von Energie- und Stoffströmen besteht. Dabei prägt insbesondere die verwendete Energieform unseren Stoffwechsel mit der Natur. Denn je mehr Energie vorhanden ist, desto mehr Rohstoffe können in Produkte oder Dienstleistungen verwandelt werden. Bisher gab es in der Menschheitsgeschichte zwei große Wendepunkte in unserem Metabolismus mit der Natur. Der erste war die neolithische Revolution, als Menschen sesshaft wurden und die Landwirtschaft entwickelten. Es handelte sich um solare Gesellschaften, die die Sonnenenergie nutzten, um Lebensmittel und andere Produkte aus Biomasse und nur zu einem geringeren Teil aus Metallen herzustellen.

Der zweite Wendepunkt war die industrielle Revolution, die von der Entdeckung der fossilen Energiequellen, zuerst Kohle, dann Erdöl und Erdgas angetrieben wurde. Diese dichteren Energiequellen stellten eine viel größere Menge an Energie bereit, welche die maschinelle und industrielle Herstellung der unterschiedlichsten Produkte ermöglichten. Der Einsatz von Kohle im 19. Jahrhundert trieb die Dampflokomotiven und die industrielle Produktion voran. Im 20. Jahrhundert sorgte der massive Ausbau von Erdöl und Erdgas für eine noch nie dagewesene Steigerung der Produktion. Der Einsatz fossiler Energiequellen bewirkte daher eine ungeheure Beschleunigung unseres Stoffwechsels mit der Natur.

Heute stehen wir vor dem dritten Wendepunkt, der Umstellung des fossilen Energiesystems auf erneuerbare Energien. Diese Energywende muss, um eine Klima- und Umweltkatastrophe zu vermeiden, in einer viel kürzeren Zeitspanne als die vorangegangenen Umwälzungen geschehen. Dabei ist

zu berücksichtigen, dass der Verbrauch fossiler Energie global höchst ungleich ist. Es sind die Industriegesellschaften im globalen Norden, die am meisten Energie direkt und indirekt beanspruchen. Wird die Rohstoff- und Energiebasis unserer Wirtschaft mitgedacht, ist die angestrebte Energiewende also mit einer weitreichenden Umgestaltung unseres sozioökonomischen Stoffwechsels verbunden, die notwendigerweise tiefgreifende soziale, wirtschaftliche und politische Veränderungen mit sich bringen wird (Altwater 2005: 86). Die Umstellung auf regenerative Energien wird zu einem Stoffwechsel führen, der über weniger netto Energie verfügt, weil die Herstellung der Erneuerbaren zusätzliche mineralische Ressourcen und Energie erfordert. Im Folgenden werden die energetischen und rohstofflichen Aspekte der Energiewende sowie ihrer Wechselwirkungen näher analysiert.

Energie

Fossile Energieträger verfügen über eine hohe Energiedichte, weil geologische Prozesse über Millionen von Jahren kohlenstoffhaltige Biomasse verdichtet haben. Was wir heute verbrennen, ist praktisch also konzentrierte Sonnenenergie. Aus 90 Tonnen ehemaliger Biomasse werden gerade mal 3,9 Liter Benzin (Dukes 2003). Diese hohe Energiedichte ermöglicht bei der Energiegewinnung eine entsprechend große Energieernte. Der EROI-Index (*energy return on energy invested*) gibt die Energie an, die investiert werden muss, um eine Einheit an Energie zu gewinnen; er misst somit die netto gewonnene Energie. Während sich im 20. Jahrhundert der Energieverbrauch vervielfacht hat, ist der EROI der fossilen Brennstoffe mit dem Einsatz aufwändigerer Fördertechniken gesunken. Der Grund ist, dass fossile Energieressourcen heute von schlechterer Qualität und teurer in der Gewinnung sind, als in früheren Phasen ihrer Förderung.

Die abnehmende EROI-Rate fossiler Brennstoffe sowie anderer Energiequellen lässt sich in Abbildung 1 erkennen. Die hellere Farbe zeigt die mögliche Bandbreite je nach Förderbedingungen. Der Begriff *domestic oil* bezieht sich auf das nordamerikanische Erdöl. Erneuerbare Energien verfügen ihrerseits über einen viel niedrigeren EROI-Wert als fossile Energieträger, am höchsten ist er für Wasserkraft, gefolgt von Windkraft und Photovoltaik. Agrartreibstoffe haben einen sehr niedrigen EROI-Wert (um 1-2).

Der hohe EROI der fossilen Energiequellen ermöglichte die industrielle Revolution und, getrieben von der expandierenden Kapitalakkumulation, die beschleunigten Wachstumsraten in den 1950er Jahren, die als *the great acceleration* bekannt sind (Steffen et al. 2015). Seitdem ist der EROI

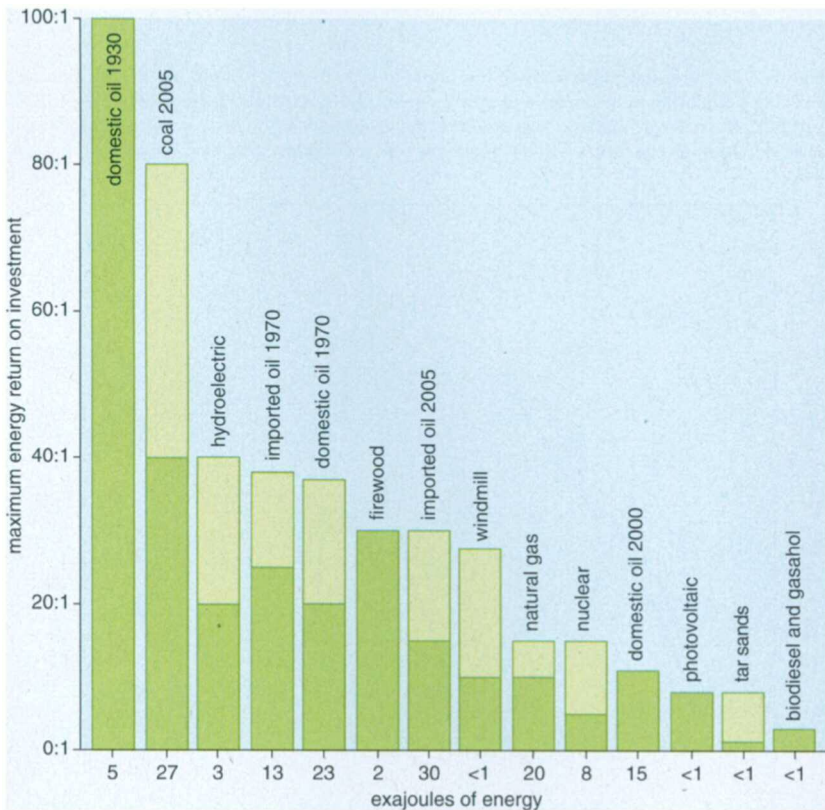


Abbildung 1: Energy return on investment für verschiedenen Energiequellen
(Hall und Day 2009: 236)

der fossilen Energiequellen stetig gesunken und wird voraussichtlich im Laufe dieses Jahrhunderts weiter sinken, denn zuerst werden die ergiebigen Erdöllagerstätten ausgebeutet, mit der Zeit bleiben solche, die weniger produktiv und schwieriger zu extrahieren sind. Die Konsequenz ist, dass der EROI der Ölvorkommen mit zunehmendem Abbau nachlässt, da immer mehr Energie für ihre Gewinnung benötigt wird. Somit steigen sukzessiv die Grenzkosten der Energiegewinnung und mit ihnen die Endpreise fossiler Brennstoffe. Gleichzeitig haben in den letzten Jahren technische Fortschritte die Erschließung erneuerbarer Energiequellen günstiger gemacht.

Wenn der EROI der fossilen Energien sinkt und erneuerbare Energien auch über einen niedrigeren EROI verfügen, bedeutet das, dass wir in der

Zukunft auf Energiequellen mit einem niedrigeren EROI angewiesen sind, dass mehr Energie für ihre Gewinnung verwendet wird und weniger netto Energie bleibt. Wenn die Zeiten billiger Energiequellen vorbei sind, wird insgesamt weniger Energie für die Gewinnung von Rohstoffen und die Herstellung von Produkten übrigbleiben. Eine niedrigere Energieernte wird zu einem „entschleunigten“ Stoffwechsel führen. Dieser ist jedoch nicht kompatibel mit einem auf Wachstum ausgerichteten kapitalistischen System (Altwater, 2005). Nimmt die verfügbare Energiemenge ab, gerät das System in eine Energiekrise, wie wir sie derzeit erleben. Diese kann kurzfristig überbrückt werden, auf Dauer bringt sie systemische Verwerfungen mit sich. Denn die verfügbare Energiemenge ist wesentlich im System, sie bestimmt das Tempo der Produktion sowie den Stoffwechsel mit der Natur. Energie- und Rohstoffgewinnung bedingen einander: Rohstoffe können nur mit Energie gewonnen werden und die Energieproduktion ihrerseits benötigt Rohstoffe. Dazu kommt, dass die Infrastruktur der erneuerbaren Energien ressourcenintensiver ist als die der fossilen. Um Solar- und Windenergie umzuwandeln, werden Solarpanele oder Windturbinen benötigt. Dazu kommt die Speicherinfrastruktur. Die Basis dieser Einrichtungen besteht aus Metallen und Mineralien; der Stoffwechsel der erneuerbaren Energien ist also mit einem erhöhten Bedarf an bestimmten Rohstoffen verbunden.

Rohstoffe

Der Umfang und die Struktur unseres Stoffwechsels lässt sich anhand der Materialflussanalyse darstellen. Das Grundprinzip ist die systematische Erfassung aller Materialflüsse (außer Wasser und Luft), die an der Grenze zwischen zwei Systemen – der natürlichen Umwelt und der Wirtschaft – auftreten (Telega und Telega 2020: 270).

Erstens zeigt die Materialflussanalyse eine exponentielle Zunahme des Umfangs der globalen Stoffströme seit 1950, die beim Fortbestehen unseres aktuellen Wirtschaftssystems bis 2050 weiter steigen würde. Wenn die Materialflüsse in den Industrieländern auf dem derzeitigen Niveau bleiben, gepaart mit der Fortsetzung der bisherigen Effizienzsteigerungen, würde sich die durchschnittliche globale Stoffwechselrate bis 2050 auf 22 t/Kopf/Jahr verdoppeln und die Rohstoffextraktion auf etwa 218 Gt/Jahr ansteigen, wie das Szenario in Abbildung 2 zeigt. Im Hinblick auf die Klimakrise wäre dies riskant, da die Hälfte der gesamten Treibhausgasemissionen, mehr als 90% des Biodiversitätsverlustes und die zunehmende Wasserknappheit auf die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen zurückzuführen ist, (Europäische Kommission 2019: 8). Diese Zahlen führen uns

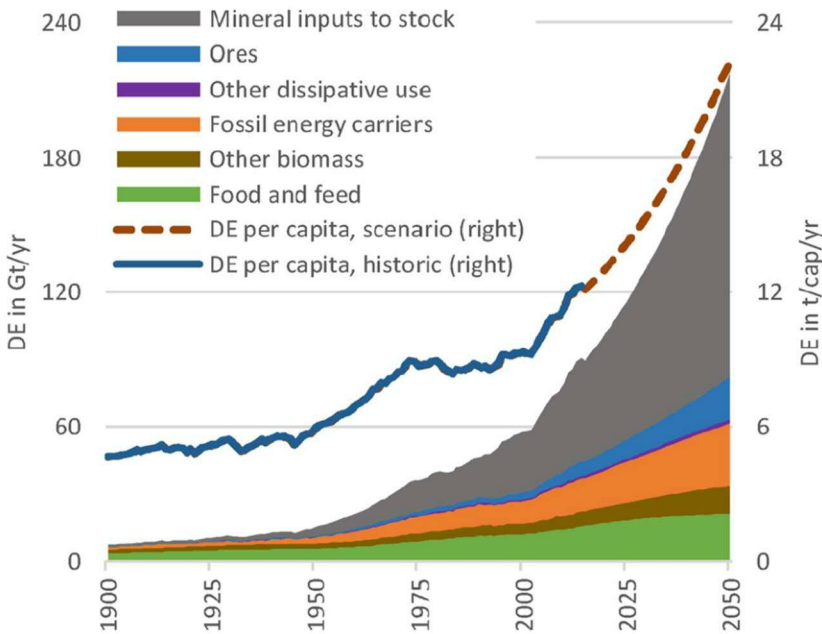


Abbildung 2: Weltweite Rohstoffextraktion 1900-2015. Szenario 2015-2050
(Krausmann et al. 2018: 139)

vor Augen, vor welchen Herausforderungen wir stehen, wenn wir die Rohstoffströme auf ein akzeptables Niveau innerhalb der planetarischen Grenzen reduzieren wollen (Krausmann et al. 2018: 137).

Zweitens zeigt die Materialflussanalyse ab 1950 eine Verschiebung von Biomasse und Energieträgern zu metallischen und nichtmetallischen Mineralien (Zhang et al. 2018: 84). Die daraus resultierende Infrastruktur (Gebäuden, Maschinen etc.) fungiert inzwischen als gigantischer mineralischer Rohstoffspeicher. Der Anteil von Mineralien und Erzen am menschlichen Materialverbrauch ist seit der Industrialisierung stetig überproportional gestiegen. Seit 1990 übertrifft er den Anteil der Biomasse, die bis dahin die größte Kategorie darstellte (Shao et al. 2017: 123). Während der Verbrauch an Biomasse eine relativ stabile Entwicklung parallel zum Bevölkerungswachstum aufweist, ist der Anteil von Mineralen und Erzen überproportional gestiegen und wird laut Prognosen in den nächsten Jahrzehnten weiter stark zunehmen (Krausmann et al. 2018: 139; Europäische Kommission 2021: 10).

Exponentiell gestiegen ist nicht nur die Menge der jährlich verbrauchten Metalle und Minerale; es wird auch eine wachsende Vielfalt dieser Stoffe gefördert. Während im 19. Jahrhundert die Wirtschaft noch auf dem Abbau von weniger als einem Dutzend Metallen beruhte, sind wir heute zu einer Wirtschaft übergegangen, die über 60 Metalle benötigt. Die Sektoren, die dies vorantreiben, sind die Automobilindustrie, die Luftfahrt, die Landwirtschaft, das Bauwesen, die Chemie, die Energiegewinnung und die neuen Technologien (Dedryver und Couric 2020: 7f).

Dieser mineralische Trend wird sich mit dem Übergang zu einer post-fossilen Gesellschaft noch verstärken. Die Energiewende bedeutet auf der Rohstoffebene eine Wende von fossilen Brennstoffen zu Metallen und Mineralien, die sowohl für die Energieumwandlungs- als auch für ihre Speicherung erforderlich sind. Solarmodule zum Beispiel enthalten Silizium und zehn andere Metalle. Windkraftanlagen bestehen aus einem Stahlturm, Kupferkabeln und Magneten, die Kobalt und Neodymium enthalten. Lithium-Ionen-Batterien benötigen nicht nur Lithium, sondern auch Kobalt, Aluminium, Mangan, Nickel, Kupfer, Stahl und Titan (Lord et al. 2019: 5-7). Die Energiewende wird also die Erschließung vieler neuer Bergwerke für Metallerze erforderlich machen.

Fossile Rohstoffe lassen sich nicht eins zu eins substituieren. Eine moderne Photovoltaikanlage benötigt mehr als doppelt so viele metallische Rohstoffe als ein Kohlekraftwerk der gleichen Leistung; Onshore-Windkraftanlagen benötigen fast fünfmal so viele Metalle, Offshore-Windkraftanlagen mehr als siebenmal so viele. Wenn dazu weitere Technologien als grün eingestuft und in die Energiewende miteinbezogen werden, wie beispielsweise Elektrofahrzeuge, die siebenmal mehr metallische Rohstoffe enthalten als Verbrennungsmotoren, oder stationäre Stromspeicher und Anlagen für Wasserelektrolyse zur Herstellung von grünem Wasserstoff, wird dies zwangsläufig zu einem höheren Rohstoffverbrauch führen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die ebenfalls ressourcenintensive Digitalisierung und das autonome Fahren mit einem zunehmenden Einsatz an Hightech-Anwendungen forciert wird, die ebenfalls sehr metall- und mineralintensiv sind. Die gleichzeitige Entwicklung all dieser Sektoren wird einen zunehmenden Anteil am globalen mineralischen Rohstoffmarkt beanspruchen (Urban 2022).

Der erneuerbare Energiesektor wird also um Minerale und Energie mit anderen Sektoren konkurrieren, nämlich mit der Elektromobilität, der Digitalisierung und der Rüstungsindustrie. Besonders zuspitzen wird sich die

Konkurrenz um bestimmte mineralische Rohstoffe, die diese Sektoren benötigen und die deshalb von der EU als kritische Rohstoffe klassifiziert werden (Europäische Kommission 2020: 10). Diese sind für den „grünen“ Umbau der Wirtschaft besonders wichtig und ihr Versorgungsrisiko ist hoch, da sie bislang vor allem außerhalb Europas gewonnen werden. Zuerst auf der Liste kritischer Rohstoffe stehen die seltenen Erden, gefolgt von den Rohstoffen, die für die Herstellung von Batterien notwendig sind wie Lithium, Kobalt und Nickel. Seltene Erden sind entgegen ihrem Namen nicht selten. Sie kommen relativ häufig vor, der Begriff „selten“ bezieht sich auf ihre einzigartigen magnetischen und chemischen Eigenschaften sowie auf ihre niedrigen Erzkonzentrationen, weshalb sie aufwändig zu gewinnen sind (Marschall und Holdinghausen 2018).

Weil diese Sektoren ihren Bedarf an Mineralien stark steigern, wird die Nachfrage nach mineralischen kritischen Rohstoffen bis 2050 steil steigen: um mehr als 300 Prozent für Graphit, um mehr als 500 Prozent für Kobalt und um mehr als 900 Prozent für Lithium (Elkind et al. 2020: 6). Dies könnte bald zu Engpässen führen, denn die Nachfrage nach diesen wichtigen Batteriekomponenten könnte das Angebot innerhalb weniger Jahre übertreffen (im Jahr 2030 für Kobalt und im Jahr 2037 für Nickel), wenn es die künftige Entwicklung es nicht erlauben sollte, die Zusammensetzung der Batteriemineralien zu verändern (Turcheniuk et al. 2018). Mehrere Geolog:innen warnen, dass der Europäische Grüne Deal aufgrund der knappen metallischen und mineralischen Rohstoffbasis nicht umsetzbar sei (Michaux 2021; Dedryver und Couric 2020; Eerola et al. 2021). Ebenso warnen US-amerikanische Geolog:innen, dass die derzeitigen mineralischen Reserven für die Energiewende und die Elektrifizierung der Autoflotte in den USA nicht ausreichen werden, da dies einen beispiellosen Anstieg des weltweiten Abbaus der benötigten Mineralien voraussetzen würde (Mills 2020).

Wechselwirkungen zwischen Energie und Rohstoffen

Der globale Wettlauf um fossile Brennstoffe wird in der Energiewende dem Wettlauf um eine Vielzahl von Metallen und Mineralien weichen. Auf die Rohstoffrivalität folgt die selten thematisierte Frage der Energierivalität zwischen den Sektoren. Der Aufbau der gesamten erneuerbaren Infrastruktur wird einen Teil der Energie und des verbleibenden Kohlenstoffbudgets beanspruchen, weil diese Infrastruktur derzeit mit fossiler Energie hergestellt werden muss.

Der Abbau von Mineralien ist ebenfalls mit einem hohen Energieverbrauch verbunden. Bei der Gewinnung einer mineralischen Ressource werden in der Regel zuerst die einfacheren und billigeren Optionen genutzt. Je mehr Metalle und Mineralien abgebaut werden, desto schwieriger und energieintensiver wird ihre Förderung, da weitere Ressourcen entweder tiefer liegen oder in geringer Konzentration vorhanden sind. Die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen hängt daher nicht nur von ihrer absoluten Menge ab, sondern auch von ihrer Qualität und Zugänglichkeit. Da der Metallgehalt mit fortschreitender Ausbeutung tendenziell abnimmt, ist im Laufe der Zeit immer mehr Aufwand und Energie erforderlich, um die gleiche Menge an Material zu extrahieren (Sauter et al. 2021: 1728). Dies wird zu einem Anstieg der Umweltzerstörung pro Einheit der geförderten Ressource führen (Parrique et al. 2019: 25ff).

Um die steigende Nachfrage bei gleichzeitig sinkender Erzqualität zu befriedigen, wurden bisher Technologien und fossile Energien eingesetzt, die es erlaubten, Größenvorteile zu nutzen. Die Produktivität im Bergbau erreichte in den 1990er Jahren ihren Höhepunkt und ist seither um mehr als 30 Prozent gesunken (Berbner et al. 2022: 4). Während die Nachfrage nach Metallen aller Art gestiegen ist, hat die Qualität der verarbeiteten Erze abgenommen, da Erzgehalt und Korngröße mit zunehmendem Abbau sinken. Heutzutage wird daran gearbeitet, in Kupferminen einen Erzgehalt von 0,1% abzubauen. Das würde bedeuten, dass für eine erwartete Nachfrage von 100 Millionen Tonnen im Jahr 2100, jedes Jahr 20 Milliarden Tonnen Abfallgestein verarbeitet werden müssten. Vor einem Jahrhundert hatten die meisten abgebauten Erzminerale eine viel größere Korngröße als heute. Die technische Entwicklung und die Verfügbarkeit günstiger Energie haben den Abbau von Erzen mit immer kleineren Korngrößen rentabler gemacht. Während im Jahr 1980 eine Korngröße von 150 μm der Sulfidminerale als typisch galt, werden heute 4 bis 5 μm abgebaut. Zugleich sind der Energieverbrauch und die Kosten des Bergbaus gestiegen. Heute verbraucht der Bergbau 10% der weltweiten Energie. Dies erklärt die Korrelation des Metall- mit dem Ölpreis (Michaux 2021: 21ff).

Das Zusammentreffen dieser beiden Trends: des abnehmenden EROI-Wertes fossiler Brennstoffe und des zunehmenden Energiebedarfs im Metall- und Mineralabbau aufgrund abnehmender Erzgehalt lässt sich anhand der Ressourcenpyramide in Abbildung 3 beschreiben. Im Laufe der Zeit zeigt die linke Pyramide der Energieressourcen, dass die verfügbare fossile Energie netto abnimmt, während gleichzeitig immer mehr Energie benötigt wird, um den Mineralienbedarf zu decken, weil der Erzgehalt abnimmt (rechte Pyramide). Wenn die beiden Trends zusammenfallen, werden die

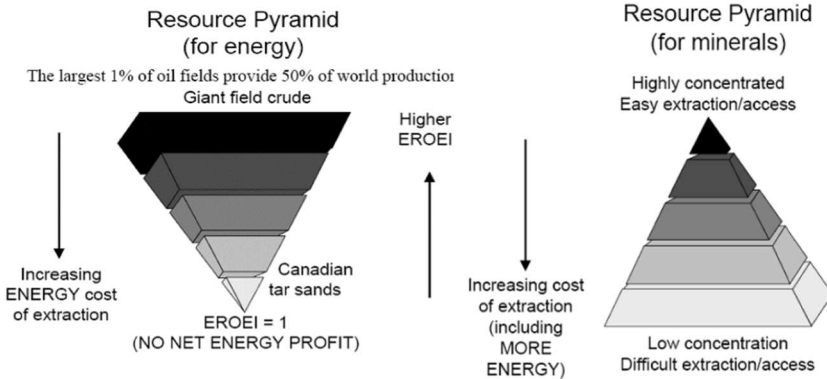


Abbildung 3: Ressourcenpyramide für Energie und Mineralien

(Michaux 2021: 40)

Abbauraten ihren Höhepunkt, den *peak mineral*, erreichen und dann zurückgehen, und zwar in Abhängigkeit von der verfügbaren Energie, nicht von den verfügbaren Mineralien. Daraus ergeben sich besondere Herausforderungen für die Bergbauindustrie: Wenn die für den Abbau von Mineralien benötigte Energie noch teuer und deren Bereitstellung wird, müsste die Bergbauindustrie ihre Produktionskapazität verringern (Michaux 2021: 39).

Aus energetischer Sicht wird die Gewinnung von Bodenschätzen ohne eine billige, reichlich vorhandene Energiequelle immer teurer werden, und es wird mit der Zeit immer schwieriger, sinkende Produktionsraten zu verhindern. Der industrielle Bergbau stützt sich auf ein Modell der technologischen Entwicklung, das auf der Annahme beruht, es gebe keine Grenzen für den Rohstoffabbau. Die Fortsetzung dieses Wachstumsparadigmas wird jedoch zunehmend ineffektiv, da für die gleiche Menge immer mehr Energie und Rohstoffe eingesetzt werden müssen. Es wird ein Punkt kommen, an dem diese Art des Bergbaus logistisch schwierig, wirtschaftlich unrentabel oder ökologisch unverantwortlich wird (Michaux 2021: 17-51).

Die physischen Grenzen der Mineralextraktion mögen sich zwar weiter in andere Regionen verschieben: Erze können aus anderen Erdregionen, aus dem maritimen Untergrund oder tiefer aus der Erde gewonnen werden. Gegenwärtig wird bis zu einem Kilometer tief abgebaut; es wird jedoch geschätzt, dass es mit neuen Technologien in Zukunft möglich sein wird, bis zu drei Kilometer tief unter der Erde abzubauen. Aber eine Ausweitung des Bergbaus im Meer würde die marinen Ökosysteme gefährden und auf dem

Prozess, der im Durchschnitt 16 Jahre dauert. Das Recycling wird diese Lücke nicht schließen können, weil die erneuerbare Infrastruktur erst produziert und verwendet werden muss, bevor sie recycelt werden kann (Boer 2022). Sinkende mineralische Abbauraten werden also eine Priorisierung von Rohstoffen und Energie notwendig machen. Je knapper Energie und Mineralressourcen werden, desto zielgerichteter muss ihr Einsatz sein.

In der aktuellen Politik fehlt jedoch ein Bewusstsein für diese rohstofflichen Aspekte der Energiewende sowie um die Gefahr einer Verengung der Entwicklungsrichtung auf bestimmte Ressourcen, also eines Lock-in. Die Verteilung und Nutzung der mineralischen Ressourcen werden weiterhin dem Markt überlassen und zugleich nur unter dem Aspekt der nationale Versorgungssicherheit adressiert. Die herrschende Politik antwortet auf die zunehmende Energie- und Ressourcenknappheit mit dem Einsatz von mehr Technologie und dem Diskurs über eine Kreislaufwirtschaft, aber biophysikalische Grenzen, lassen sich weder mit Technologie noch mit Kreislaufwirtschaft überwinden.

3. Weder Technologie noch Kreislaufwirtschaft werden Wunder wirken

Mit neuen Technologien und einer Kreislaufwirtschaft will man Effizienzgewinne erzielen. Es hat sich jedoch schon wiederholt gezeigt, dass aufgrund von Rebound-Effekten Effektivitätsgewinne zu mehr Produktion führen. Sowohl Technologie wie Kreislaufwirtschaft könnten in der Tat helfen, den Energie- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren, wenn sie gezielt und zusammen mit einem Suffizienzansatz eingesetzt würden. Sie werden aber keine Wunder wirken und kein „grünes“ Wachstum ermöglichen, weil Wachstum in der Regel mit einer Zunahme des Ressourcenverbrauchs einhergeht. Zudem sind ausgerechnet die sogenannten „grünen Sektoren“ wie erneuerbare Energie oder Elektromobilität sehr schmutzig und ressourcenintensiv.

Die Fixierung auf Technologien

Die Vorstellung, dass die anstehenden Probleme durch Technologien – von der Digitalisierung über Carbon Capture and Storage bis zu Geoengineering – zu meistern seien, weckt falsche Hoffnungen und geht Wetten auf bestimmte Innovationsprozesse ein. Technologien allein werden die ökologischen und gesellschaftlichen Probleme nicht lösen. Diese lassen sich nur im Zusammenspiel mit Änderungen unserer Produktions- und Lebensweise

lösen. Sie bedürfen einer bewussten Gestaltung in eine ökologischere und sozialere Richtung, dabei kann Technologie als Werkzeug hilfreich sein. Genauso wenig zielführend, wie ein unkritischer technologischer Optimismus wäre Technikfeindlichkeit, denn es wäre unverantwortlich, hilfreiche Technologien nicht anzuwenden. Beispielsweise ist die technische Entwicklung von Batterien oder anderen Energiespeichermöglichkeiten wie Wasserstoff zu fördern. Technologien sind jedoch nie neutral, denn sie dienen den Interessen jener, die sie entwickeln lassen. Gegenwärtig sind das zumeist private Unternehmen. Technologie wird derzeit verwendet, um das aktuelle System zu optimieren und wirtschaftliches Wachstum zu fördern, nicht um eine sozial-ökologische Transformation voranzutreiben (Lange und Santarius 2018: 13). Die technologische Gestaltung und deren Organisation sollte daher der demokratischen Bestimmung durch die Gesellschaft unterworfen werden. Der Markt ist ein Instrument, der dafür sorgt, die Ressourcen im unternehmerischen Sinne profitabel zu allozieren. Solange also die Gewinnspanne der fossilen Energiequellen viel größer als die von Erneuerbaren bleibt, werden die Energiekonzerne weiter ihre fossilen Reserven ausbeuten.

Die technologische Entwicklung wäre mit einem Suffizienzansatz zu verbinden. Dazu gehört auch eine gesellschaftliche Diskussion darüber, welche Technologien in welchen Sektoren und auf welcher Weise eingesetzt werden sollen. Denn die stoffliche Seite der Technologie wird oft ausgeblendet. Dennoch beruht jede Technologie auf Ressourcen und Energie, die unseren Stoffwechsel mit der Natur beeinflussen. Je komplexer die Technologie ist, desto mehr erfordert sie von beiden. Ein Beispiel ist die Digitalisierung, von der eine „Entmaterialisierung“ der Wirtschaft erhofft wird. Doch sie benötigt eine breite Palette an Metallen und Mineralien sowie beträchtliche Mengen an Energie. Die derzeitige forcierte Digitalisierung aller Sektoren führt zu gefährlichen Pfadabhängigkeiten, da Rohstoffe und Energie, die in einem Sektor eingesetzt werden, in anderen dringend benötigten Bereichen wie der Energiewende fehlen. Statt einer undifferenzierten und unhinterfragten Digitalisierung aller Sektoren wäre daher eine gezielte Digitalisierung jener Bereiche sinnvoller, die die Energiewende unterstützen.

Rohstoffknappheit ist die Kehrseite und unvermeidliche Folge eines Systems mit unstillbaren Ressourcenhunger in einer endlichen Welt. Trotz technischer Effizienzgewinne können die realen Wachstumsraten nur gesteigert werden, wenn auch der Verbrauch von Energie und Rohstoffen steigt. Das setzt voraus, dass genügend Energie und Rohstoffe zur Verfügung stehen. Nach der derzeitigen Wachstumslogik und dem Verständnis

von materiellem Wohlstand scheint jedes vorhandene Problem ein Problem des Mangels und nicht des Zuviels – es ist nur von Ressourcenmangel und nicht von Überproduktion und Überkonsum die Rede. In der Folge bestehen die Lösungen aus immer mehr Technologieeinsatz, während eine Reduktion oder Unterlassung der Produktion in gewissen Sektoren nicht einmal erwogen wird. Die Lösungen des „grünen Wachstumsdiskurses“ beschränken sich auf den Einsatz von Technologie zur Realisierung von Effizienzverbesserungen, klammern aber die sozialen und politischen Transformationen von Produktion und Lebensstil aus, die für eine Energiewende notwendig wären (Altvater und Mahnkopf 2019: 254f). So betrachtet haben wir vor allem einen Mangel an Vorstellungskraft, um aufgrund von Markthegeemonie und ökonomischen Interessen sich ein anderes System vorzustellen, das nicht auf Kapitalakkumulation beruht. Eine derart tiefgreifende Transformation setzt einen emanzipatorischen Prozess voraus, der nur durch kollektive Interessen angestoßen wird, nicht durch Technologie. Technik kann – sinnvoll eingesetzt – diese Transformationsprozesse ergänzen, um demokratisch beschlossene gesellschaftliche Ziele zu erreichen. Sinnvollerweise sind soziale Innovationen und alternative Ansätze zu wagen, die nicht Profitmaximierung und Wachstum, sondern die Produktion von Gebrauchswerten und die Bedürfnisbefriedigung zum Ziel allen Wirtschaftens haben (Segebart et al. 2014: 32).

Kreislaufwirtschaft

Auf die steigende Ressourcennachfrage antwortet die EU mit dem Vorschlag einer Kreislaufwirtschaft. Die größtmögliche Integration von Rohstoffen in einer Kreislaufwirtschaft ist zweifelsohne erstrebenswert; das Problem eines steigenden Ressourcen- und Energieverbrauchs wird dadurch jedoch nicht gelöst. Aktuell stößt eine Kreislaufwirtschaft darüber hinaus auf stoffliche, wirtschaftliche und systemische Hürden.

Stofflich betrachtet verlieren die meisten Rohstoffe (wie Plastik oder Papier) mit jeder Nutzung an Qualität. Sie werden mit jeder Wiederverwertung zu minderwertigen Produkten downcyclt, bis sie irgendwann aus dem Recyclingkreislauf ausscheiden. Somit werden am Anfang der Wertschöpfungskette ständig neue Rohstoffe gebraucht. Der Recyclingprozess selbst benötigt in der Regel viel Energie und neue Rohstoffe, um die alten Rohstoffe zu verarbeiten (Parrique et al. 2019: 46ff). Auch hier ist die Energiefrage zentral: Schließlich muss es am Ende der Produktionskette genau so viel Energie und Materie wie am Anfang geben, nur die Qualität ist eine andere (Altvater 2005: 98). Metalle haben das größte Potential recycelt oder wiederverwendet zu werden. Sie können zwar ohne Qualitätsverlust

unendlich oft recycelt werden, der Mangel an Reinheit stellt jedoch eine Herausforderung für die Schaffung eines echten Kreislaufsystems dar (Kasulaitis et al. 2019: 126f). Dieses müsste die ganze Wertschöpfungskette umfassen, sodass das gesamte Produktdesign für diesen Zweck angepasst und standardisiert würde. Das derzeitige Problem ist, dass etliche Metalle in Legierungen und Schredderrückständen verloren gehen wie beispielsweise in Elektronikgeräten. Legierungen erschweren den Recycling-Prozess und machen ihn technisch aufwändig, denn die Rohstofftrennung erfordert den Einsatz von Chemikalien und Energie.

Wirtschaftlich gesehen ist das Recycling nicht rentabel, wenn es an einer geeigneten Infrastruktur fehlt oder die Primärrohstoffe billiger als die recycelten sind. Recycling ist überdies eine sehr arbeitsintensive Tätigkeit. Neben Arbeit und Infrastruktur erfordert Recycling auch Energie und Schutzmaßnahmen für Menschen und Umwelt. Diese Faktoren sind in Europa teurer als in anderen Ländern, in denen es an Schutzmaßnahmen mangelt. Solange das Recycling den Marktgesetzen unterworfen ist, werden billige Rohstoffe aus anderen Ländern importiert, anstatt sie zu recyceln. Und solange es für Unternehmen profitabler ist, den Boden als billige Rohstoffquelle und Mülldeponie zu nutzen, wird die kurze Lebensdauer von rohstoffintensiven Produkten oft profitabler sein, als die umweltschonende Produktion hochwertiger und recycelbarer Güter (Brand 2015: 5f).

Systemisch gesehen ist die vollständige Wiederverwertung von Rohstoffen im Rahmen eines stetig wachsenden Wirtschaftssystems unmöglich. Wird immer mehr produziert, hinkt das Recycling immer der Produktion hinterher. Das Problem der Ressourcenknappheit wird durch das Recycling also nicht gelöst, sondern nur zeitlich verschoben. Selbst wenn es gelänge, das Metallrecycling stark zu steigern, müsste die verbleibende Primärnachfrage weiterhin gedeckt werden. Eine weitere Herausforderung bei der Deckung des größten Teils der Nachfrage aus dem Recycling besteht darin, dass es nicht genügend Materialien gibt, die für das Recycling und die Wiederverwertung geeignet sind (Hund et al. 2020: 14).

Die propagierte Kreislaufwirtschaft wird daher kurz- und mittelfristig die rohstoffliche Nachfrage nicht decken können. Auch wenn sich Metalle gut für die Wiederverwendung eignen, müssten die politischen Entscheidungsträger die aktuellen Hindernisse für eine Kreislaufwirtschaft proaktiver beseitigen, um eine größtmögliche Wiederverwendung von Ressourcen zu gewährleisten. Es gäbe noch viel Verbesserungspotential, um Produkte und Verpackungen auf Recycling sowie auf Langlebigkeit und Reparierbarkeit zu konzipieren. Eine Kreislaufwirtschaft wäre also nur Teil einer umfassenden Lösung.

4. Postfossiler regenerativer Stoffwechsel

Der derzeitige fossile Stoffwechsel sorgt für einen beschleunigten, zerstörerischen und nicht zukunftsfähigen Stoffwechsel mit der Natur, denn er droht planetarische Grenzen (Rockström et al. 2009) zu überschreiten und Kippunkte mit sich selbst verstärkenden Wirkungen im Erdsystem auszulösen (Armstrong McKay et al. 2022; Lenton et al. 2019). Der Mensch ist heutzutage der größte Einflussfaktor auf dem Planeten geworden, sodass die Auswirkungen des gesellschaftlichen Stoffwechsels mit der Natur das Erdsystem weg vom stabileren Holozän in das instabile Zeitalter des Anthropozäns katapultiert haben (Crutzen 2002). Die kapitalistische Gesellschaft setzt immer mehr Energie ein, um eine immer größere Menge an Ressourcen zu extrahieren und verarbeiten. Nicht alle Menschen und nicht alle Gesellschaften haben den gleichen Anteil daran; manche Produktions- und Konsumweisen sind zerstörerischer als andere. Das oberste Fünftel der Weltbevölkerung verbraucht vier Fünftel der natürlichen Ressourcen der Welt. Vor allem der Ressourcenverbrauch von OECD-Ländern und der Eliten weltweit muss reduziert werden, um die Grundbedürfnisse der Menschen auf der ganzen Welt gerecht zu gestalten (Heiskanen et al. 2001: 8). Eine Reduktion des Stoffumsatzes würde strukturelle und systemische Veränderungen vieler Bereiche der Gesellschaft erfordern. Wir müssten unseren Stoffwechsel mit der Natur quantitativ und qualitativ durch eine Verlagerung vom produktiven zum reproduktiven Sektor verändern. Anstatt immer mehr Zeit und Energie in die Produktion von immer mehr Gütern zu investieren, müssten wir reproduktive Bereiche wie Pflege, Bildung, Sport, Kultur oder Freizeit ausbauen. Eine Überwindung des Produktivismus und eine Veränderung des Arbeitsverhältnisses durch eine Priorisierung gesellschaftlich reproduktiver Sorgearbeit und eine massive Arbeitszeitreduktion würden den Wohlstand weniger materiell denn in gewonnener Zeit ausdrücken. Um einen derartigen Stoffwechsel mit der Natur zu erreichen, sind jedoch tiefgreifende gesellschaftliche Veränderungsprozesse notwendig. Das wäre eine soziale und ökologische Transformation von einer wettbewerbs-, wachstums- und produktionsorientierten hin zu einer auf Suffizienz und Gerechtigkeit ausgerichteten Wirtschaft und Gesellschaft, die explizit auf Vorsorge und die Sicherung der sozialen und natürlichen Ressourcen setzt (Segebart et al. 2014: 11).

Die aktuelle Energiekrise führt uns die Abhängigkeit unserer Wirtschaft von fossilen Energiequellen schmerzlich vor Augen. Die Energiekrise wird andauern, denn wir werden nicht mehr dieselben Mengen an billiger Energie zu Verfügung haben. Das wird uns zu einem anderen entschleunigten Stoffwechsel mit der Natur zwingen. Dieser ist so zu gestalten, um ein qualitativ

gutes Leben zu ermöglichen, ohne unsere Lebensgrundlagen zu untergraben. Das Maß, an das sich Metabolismus zu halten hat, ist die Regenerationsfähigkeit der Natur. Im Gegensatz zur Unersättlichkeit und Maßlosigkeit des aktuellen kapitalistischen Systems, das immer mehr Energie und Ressourcen braucht, um zu wachsen und zu bestehen, beruht ein regenerativer Stoffwechsel auf Suffizienz und Integration unserer Wirtschaftsweise in den natürlichen Kreisläufen der Erdsysteme, und zwar in einem Maß, in der sie sich regenerieren können. Dafür sind die klassischen und neoklassischen Wirtschaftstheorien nicht geeignet.

Die vorherrschenden Theorien des ökonomischen Mainstreams blenden die Verwobenheit unserer Wirtschaftsweise mit der stofflichen Seite der jeweiligen Energiequelle aus. Entstanden im England des 18. und 19. Jahrhunderts, sind sie ein Kind ihrer Zeit und widerspiegeln daher die damalige Vision des Menschen als Herrscher über der Natur, und der Natur als „Selbstbedienungsladen“. Diese Theorien sind im buchstäblichen Sinne „weltfremd“ und daher nicht imstande die aktuellen ökologischen und sozialen Probleme zu erklären, geschweige denn Lösungen anzubieten.

Denn ein maßloses Wirtschaftssystem, das auf unendliches Wachstum angewiesen ist, kollidiert mit den verschiedenen Kreisläufen der Biosphäre, auf denen alles Leben beruht. Alle diese Kreisläufe sind, wie die Räder eines Uhrwerks, ineinander verzahnt. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht einen Kurzschluss im Kohlenstoffkreislauf, denn der uralte über Jahrmillionen gespeicherte Kohlenstoff kommt in kurzer Zeit in die Atmosphäre. Das verändert den Kohlenstoffkreislauf und dieser das Klima, das Klima wiederum den Wasserkreislauf, dieser die Kreisläufe im Boden, usw. Die Forschung und Technologieentwicklung sollten daher den Fokus auf die Regenerationsfähigkeit komplexer Erd- und Ökosysteme sowie ihre Wechselwirkungen setzen. Das erfordert andere Wirtschaftswissenschaften, die Arbeit und Ressourcen nicht als gewinnmaximierend auszubehutende Faktoren betrachtet, sondern als gesellschaftlichen Zusammenhang von Menschen, die durch ihre Arbeit einen Stoffwechsel mit der Natur pflegen. Die Wirtschaft darf nicht isoliert, sondern muss in ihrer Gesamtheit als sozioökonomischer Metabolismus einschließlich aller Energie- und Rohstoffströme betrachtet werden. In diesem Sinne sollten die planetaren Grenzen, die von der Regenerationsfähigkeit der Erd- und Ökosysteme abhängen, die absoluten physiologischen Grenzen aufzeigen, innerhalb derer die Lebensqualität der Menschen so weit wie möglich verbessert werden soll.

Um einen regenerativen Stoffwechsel mit der Natur zu erreichen, ist unser Stoffumsatz nicht nur gezielt zu reduzieren, sondern es muss zusätzlich

viel Arbeit in die Renaturierung zerstörter Ökosysteme fließen, um ihre Regenerationsfähigkeit zu unterstützen. Auch die gerechtere Verteilung von Energie und Ressourcen durch demokratische Prozesse wird Zeit und Aufwand erfordern.

Dabei spielt die Entwicklung einer regenerativen und ökologischen Landwirtschaft eine zentrale Rolle. Die Agrarwirtschaft beeinflusst das Klima und wird gleichzeitig von ihm betroffen. Die Klimaerwärmung bringt nicht nur erhöhte Temperaturen, sondern auch unregelmäßige und extreme klimatische Bedingungen, die Ernteausfälle verursachen. Die Landwirtschaft ist nicht nur ein zentraler Bereich unseres Stoffwechsels mit der Natur, sondern als Schnittstelle in Kreisläufe wie Wasser-, Boden- oder Kohlenstoffkreislauf eingebettet. Anstatt eine industrielle Landwirtschaft, die als Kohlenstoffquelle fungiert, könnte eine ökologische Landwirtschaft durch ihren Humusaufbau als Kohlenstoffsенке dienen. Sie wäre nicht nur viel weniger ressourcen- und energieintensiv, sondern auch resilienter. Was, wie und wo landwirtschaftlich produziert wird, bestimmt nicht nur die Landnutzung auf zwei Dritteln der Erdoberfläche, sondern auch die Ernährungssouveränität der Gesellschaften.

5. Fazit

Ein postfossiler Stoffwechsel mit der Natur muss weniger energieintensiv und in der Folge auch weniger ressourcenintensiv sein. Dafür ist eine Reduktion unseres Energie- und Ressourcenverbrauchs unausweichlich. Es handelt sich nicht um eine pauschale Reduktion in allen Sektoren, sondern um eine gezielte Reduktion der überflüssigen und besonders schädlichen Sektoren. Das wird oft einseitig und pauschal mit Verzicht gleichgesetzt. Es geht aber vor allem darum, Überproduktion und Überkonsum zu reduzieren, um eine nachhaltige und bessere Lebensqualität für mehr Menschen zu erreichen. Dies würde eine grundlegende Umgestaltung unserer Produktions-, Verteilungs- und Konsumweise sowie der Finanz- und Arbeitswelt voraussetzen. Das Ziel muss sein, das gesellschaftliche Verhältnis zur Natur und die Verhältnisse zwischen den Menschen nachhaltig abzuändern, um eine Wirtschaftsweise innerhalb der vorhandenen biophysikalischen Grenzen anzustreben.

Der Stoffwechsel mit der Natur in Bezug auf die Energiewende ist durch weniger netto verfügbare Energie und eine stärkere mineralische Basis gekennzeichnet. Die derzeit politisch propagierten Lösungen bestehen aus mehr Technologieeinsatz und vagen Versprechungen in Richtung einer Kreislaufwirtschaft. Beides wird jedoch nicht zu einer deutlichen Senkung

des Energie- und Ressourcenverbrauchs beitragen. Die Energiewende ist eine notwendige Voraussetzung, um zu einem postfossilen, regenerativen Stoffwechsel zu gelangen, aber nicht ausreichend. Sie muss von einem grundlegenden Umbau in anderen Bereichen begleitet werden: einer Agrar-, Mobilitäts-, Industrie-, Bau-, Finanz- und Arbeitswende. Das erfordert andere Wirtschaftsziele als Wachstum und andere Allokationsmechanismen als der Markt.

Die Gesellschaft muss hierbei Prioritäten setzen, um ein Lock-in im Bereich der Ressourcen zu vermeiden. Das bedeutet allerdings, dass die Energiewende zunächst gegenüber anderen Industriesektoren zu priorisieren ist. Das erfordert andere Wirtschaftsziele als Wachstum und andere Allokationsmechanismen als der Markt. Die Implementierung der Energiewende darf nicht den Preisen und dem Markt überlassen werden. Hierfür brauchen wir konkrete politischen Strategien zu deren Durchsetzung sowie ein gezieltes Energie- und Ressourcenmanagement, um den Aufbau der regenerativen Energien zeitgleich mit dem Abbau der fossilen Rohstoffe zu bewerkstelligen.

Literatur

- Altwater, Elmar (2005): *Das Ende des Kapitalismus wie wir ihn kennen. Eine radikale Kapitalismuskritik*. Münster: Westfälisches Dampfboot, 240 S.
- Altwater, Elmar und Mahnkopf, Birgit (2019): The Capitalocene: Permanent Capitalist Counter-Revolution. *Socialist Register* 55, S. 79-99.
- Armstrong McKay, David; Staal, Arie; Abrams, Jesse F.; Winkelmann, Ricarda; Sakschewski, Boris; Loriani, Sina; Fetzer, Ingo; Cornell, Sarah E.; Rockström, Johan und Lenton, Timothy M. (2022): Exceeding 1.5° C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* 377 (6611), S. 1-80.
- Berbner, Jochen; Lath, Vivek und Maksimainen, Jukka (2022): *Navigating a decade of challenges: Five winning initiatives for mining CEOs*: McKinsey. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/navigating-a-decade-of-challenges-five-winning-initiatives-for-mining-ceos?cid=other-eml-alt-mip-mck&hdpid=66a58233-ae83-4b4c-bebe-4d810bb3bdd6&hctky=13228992&hlkid=ca41e886e5074a129eb03b032430b933>. Zugriff 02.07.2022.
- Boer, Lukas (2022): Steigende Metallpreise als mögliches Hindernis der Energiewende. *DIW Wochenbericht* 89 (4), S. 47-55.
- Brand, Ulrich (2015): *Schöne Grüne Welt. Über die Mythen der Green Economy*, 4. Auflage. Berlin: Rosa Luxemburg Stiftung, 57 S.
- Crutzen, Paul J (2002): Geology of mankind - The Anthropocene. *Nature* 415, S. 23.
- Dedryver, Liliane und Couric, Vincent (2020): La consommation de métaux du numérique: un secteur loin d'être dématérialisé; *France stratégie*. <https://www.strategie.gouv.fr/publications/consommation-de-metaux-numerique-un-secteur-loin-detre-dematerialise> Zugriff: 03.05.2022.
- Dukes, Jeffrey S. (2003): Burning buried sunshine: human consumption of ancient solar energy. *Climatic change* 61 (1), S. 31-44.
- Eerola, Toni (ed.); Eilu, Pasi (ed.); Hanski, Jyri; Horn, Susanna.; Judl, Jachym; Karhu, Marjaana; Kivikytö-Reponen, Päivi; Lintinen, Panu und Långbacka, Bo (2021): Digitalization and natural resources; Open File Research Report 50/2021, Geological Survey of Finland: Espoo, 95 S. <https://cris.vtt.fi/en/publications/digitalization-and-natural-resources> Zugriff: 25.04.2022.
- Elkind, Ethan; Heller, Patrick und Lamm, Ted (2020): Building a sustainable electric vehicle battery supply chain: Frequently asked questions, Center for Law, Energy & the Environment Berkeley, 18 S. <https://resourcegovernance.org/analysis-tools/publications/building-sustainable-electric-vehicle-battery-supply-chain-faqs> Zugriff: 25.05.2022.
- Europäische Kommission (2019): Der europäische Grüne Deal: Brüssel, 29 S. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF Zugriff: 19.02.2022.

- Europäische Kommission (2020): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken: Brüssel, 28 S. <https://www.parlament.gv.at/gegenstand/XXVII/EU/29927> Zugriff: 11.02.2022.
- Europäische Kommission (2021): 3rd EU Raw Materials Scoreboard 2021, Publications Office of the European Union: Luxembourg, 150 S. <https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=eb052a18-c1f3-11eb-a925-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=> Zugriff: 30.03.2022.
- Fischer-Kowalski, Marina und Haberl, Helmut (1998): Sustainable development: socio-economic metabolism and colonization of nature. *International Social Science Journal* 50 (158), S. 573-587.
- Haberl, Helmut; Wiedenhofer, Dominik; Erb, Karl-Heinz; Görg, Christoph und Krausmann, Fridolin (2017): The material stock–flow–service nexus: a new approach for tackling the decoupling conundrum. *Sustainability* 9 (1049), S. 1-19.
- Hall, Charles AS und Day, John W (2009): Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil: In the 1970s a rising world population and the finite resources available to support it were hot topics. Interest faded—but it's time to take another look. *American scientist* 97 (3), S. 230-237.
- Heiskanen, Eva; Halme, Minna; Jalas, Mikko; Kärnä, Anna und Lovio, Raimo (2001): *Dematerialization: the potential of ICT and services*, Ministry of environment: Helsinki, 240 S. <https://research.aalto.fi/en/publications/dematerialization-the-potential-of-ict-and-services> Zugriff: 15.04.2022.
- Hund, Kirsten; La Porta, Daniele; Fabregas, Thao P; Laing, Tim und Drexhage, John (2020): Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition; *World Bank*, 112 S. <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action> Zugriff: 19.04.2022.
- Kasulaitis, Barbara V; Babbitt, Callie W und Krock, Andrew K (2019): Dematerialization and the circular economy: Comparing strategies to reduce material impacts of the consumer electronic product ecosystem. *Journal of Industrial Ecology* 23 (1), S. 119-132.
- Krausmann, Fridolin; Lauk, Christian; Haas, Willi und Wiedenhofer, Dominik (2018): From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environmental Change* 52, S. 131-140.
- Lange, Steffen und Santarius, Tilman (2018): *Smarte grüne Welt? : Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit*. München Oekom verlag, 265 S.

- Lenton, Timothy M; Rockström, Johan; Gaffney, Owen; Rahmstorf, Stefan; Richardson, Katherine; Steffen, Will und Schellnhuber, Hans Joachim (2019): Climate tipping points—too risky to bet against. *Nature* 575 (7784), S. 592-595.
- Lord, Michael; Burdon, Rebecca ; Marshman, Neil ; Pye, John ; Talberg, Anita und Venkataraman, Mahesh (2019): From mining to making. Australia's future in zero-emissions metal, Energy Transition Hub, 42 S. <https://www.energy-transition-hub.org/resource/mining-making-australias-future-zero-emissions-metal> Zugriff: 10.02.2022.
- Mahnkopf, Birgit (2020): Der Kapitalismus an ökologischen, ökonomischen und sozialen Kipppunkten. *Kurswechsel* Heft 1/2020, S. 11-19.
- Marschall, Luitgard und Holdinghausen, Heike (2018): *Seltene Erden. Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters*. München: Oekom, 192 S.
- Michaux, Simon P. (2021): The Mining of Minerals and the Limits to Growth, *Geological Survey of Finland*: Espoo, 68 S. https://www.researchgate.net/publication/351712079_The_Mining_of_Minerals_and_the_Limits_to_Growth Zugriff: 26.04.2022.
- Mills, Mark P. (2020): *Mines, minerals, and "green" energy: A reality check*, Manhattan Institute, 19 S.
- Parrique, Timothée; Barth, Jonathan; Briens, François; Kuokkanen, Anna und Spangenberg, Joachim H (2019): *Decoupling debunked: Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability*. Brüssel: European Environmental Bureau, 41 S.
- Rockström, Johan; Steffen, Will; Noone, Kevin; Persson, Åsa; Chapin III, F Stuart; Lambin, Eric; Lenton, Timothy M; Scheffer, Marten; Folke, Carl und Schellnhuber, Hans Joachim (2009): Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society* 14 (2), S. 1-33.
- Sauter, Andreas; Hochstadt, Daniel; Seelig, Jan Henning; Hansen, Florian und Zeller, Torsten (2021): Grundsätzliche Ansätze zur Verbesserung der Ressourceneffizienz in der Metallindustrie. Basic Approaches to Improving Resource Efficiency in the Metals Industry. *Chemie Ingenieur Technik* 93 (11), S. 1728-1741.
- Segebart, Dörte; Hackfort, Sarah; König, Claudia; Gottschlich, Daniela; Roth, Stephanie und Röhr, Ulrike (2014): *Wissensproduktion im Spannungsfeld von Care, Gender und Green Economy—Wissenschaftliche Einrichtungen als Impulsgeberinnen für nachhaltiges Wirtschaften?*; Care, Gender und Green Economy. Forschungsperspektiven und Chancengerechtigkeit nachhaltigen Wirtschaftens: Berlin / Lüneburg, 26 S.
- Shao, Qinglong; Schaffartzik, Anke; Mayer, Andreas und Krausmann, Fridolin (2017): The high 'price' of dematerialization: A dynamic panel data analysis of

- material use and economic recession. *Journal of Cleaner Production* 167, S. 120-132.
- Steffen, Will; Broadgate, Wendy; Deutsch, Lisa; Gaffney, Owen und Ludwig, Cornelia (2015): The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review* 2 (1), S. 81-98.
- Telega, Ivan und Telega, Agnieszka (2020): Driving factors of material consumption in European countries–spatial panel data analysis. *Journal of Environmental Economics and Policy* 9 (3), S. 269-280.
- Turcheniuk, Kostiantyn; Bondarev, Dmitry; Singhal, Vinod und Yushin, Gleb (2018): Ten years left to redesign lithium-ion batteries. *Nature* 559 S. 467-470.
- Urban, Karl (2022): Die Energiewende bekommt ein Rohstoffproblem: Spektrum. https://www.spektrum.de/news/fuer-die-energiewende-werden-die-rohstoffe-knapp/2005387#Echobox=1648990779?utm_source=pocket-newtab-global-de-DE. Zugriff 20.04.2022.
- Zehle, Soenke; Arndt, Lotte und Bormann, Sarah (2007): Unsichtbare Kosten: ungleiche Verteilung ökologischer Risiken in der globalen Computerindustrie, WEED Berlin, 50 S. <https://zenodo.org/record/4293625/files/zehle-arndt-bormann-2007-unsichtbare-kosten.pdf?download=1> Zugriff: 02.03.2022.
- Zhang, Chao; Chen, Wei-Qiang und Ruth, Matthias (2018): Measuring material efficiency: A review of the historical evolution of indicators, methodologies and findings. *Resources, Conservation and Recycling* 132, S. 79-92.

Marta Rivas ist Geographin.

Dieser Artikel basiert in Teilen auf ihrer Masterarbeit mit dem Titel „Entmaterialisierung durch Digitalisierung?“, die sie an der Universität Salzburg im Februar 2023 eingereicht hat.