

Materialflussindikatoren als Leitgrößen zur Ressourcenschonung

Die unerträgliche Ressourcen-leichtigkeit des Seins

Materialflussindikatoren sind ein zentrales Element in Strategien zur Ressourceneffizienzsteigerung und zur Ressourcenschonung. Wofür stehen diese Indikatoren und welche Aussagekraft haben sie? Was folgt daraus für Ansätze zur Dematerialisierung?

Von Felix Müller, Jan Kosmol, Hermann Keßler, Michael Angrick und Bettina Rechenberg

1 Einleitung

Natürliche Ressourcen stehen nur begrenzt und in noch geringerem Umfang auch in ausreichend hoher Qualität zur Verfügung. Bereits heute sind ökologische Grenzen erreicht, die sich in der Degradierung von Ökosystemen und Ökosystemleistungen zeigen (Steffen et al. 2015; Faulstich et al. 2012). Ressourcenschonung, allerdings mit einem überwiegenen Fokus auf rohstoffwirtschaftliche Aspekte, findet eine gesteigerte Resonanz auf nationalen und internationalen politischen Agenden.

Diese Orientierung ist zunächst nicht verwunderlich, denn unsere gesamten Wertschöpfungsketten fußen auf einer materiellen Stoffwandlung. Im Zuge dessen entlassen wir ständig Emissionen und Abfälle in die natürliche Umwelt, die deren Zustand beeinflussen.

Die Bundesregierung hat sich 2012 mit der Verabschiedung von ProgRess ein eigenes Ressourceneffizienzprogramm aufgelegt, das zunächst abiotische, nichtenergetische und stofflich genutzte biotische Rohstoffe fokussiert (BMU 2012). Im Jahr 2016 wurde nicht nur eine Erfolgskontrolle anhand eines Fortschrittsberichts veröffentlicht, sondern im gleichen Zuge ein zweites Ressourceneffizienzprogramm verabschiedet (BMUB 2016).

Eine zentrale Orientierungsgröße in ProgRess II ist noch immer die Rohstoffproduktivität, ein Schlüsselindikator der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie aus dem Jahr 2002. Definitionsgemäß drückt der Indikator aus, wie effizient abiotische Primärmaterialien in Deutschland eingesetzt werden, um das Bruttoinlandsprodukt zu erwirtschaften. Gemessen wird dies mit dem Inputindikator für direkten Materialeinsatz, kurz DMI (Direct Material Input).

2 Zielsetzungen von Materialflussindikatoren – Der „Faktor X“

Nicht nur in Deutschland, sondern auch international dienen Materialflussindikatoren bzw. ihre Produktivitäten auf einer hochaggregierten Ebene dem Monitoring der Ressourceneffizienz und eines Green Growth (OECD 2008). Allerdings wurden tatsächliche Steigerungsziele nur in wenigen Fällen verbindlich in Umweltpolitiken implementiert. Eine Ursache hierfür ist auch, dass die Aussagekraft dieser Indikatoren sehr kontrovers gesehen wird (Kågeson 1999; Kleijn 2001; Bringezu et al. 2003; Wiedmann et al. 2006). Daher sind viele Ziele Gegenstand eines politischen, gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskurses. In diesem Zusammenhang werden auch dezidierte Dematerialisierungsziele diskutiert (Bringezu 2015). Diese stehen in der Tradition des sogenannten Faktor-X-Konzepts. Das X steht dabei für einen Reduktionsfaktor des Einsatzes einer Ressource zur Bereitstellung einer Leistung. Beide sollen voneinander entkoppelt werden. Es entspricht in seiner qualitativen Verhältnislogik den Konzepten der Öko- und Ressourceneffizienz bzw. -produktivität (Reijnders 1998).

Zu den eigentlichen Pionierarbeiten des Faktor-X-Ansatzes zählen ein Bericht an den Club of Rome von Ernst-Ulrich von Weizsäcker: „Doppelter Wohlstand – Halbierter Naturverbrauch“ (Weizsäcker et al. 1995) sowie ein Buch von Schmidt-Bleek: „Wie viel Umwelt braucht der Mensch?“ (Schmidt-Bleek 1994). Während die beiden früheren Wissenschaftler des Wuppertal Instituts erstrebenswerte Steigerungsfaktoren „X“ auf 4 – in einer Überarbeitung dann 5 (Weizsäcker et al. 2010) – und 10 taxierten, werden weitere Faktoren von bis zu 50 in normativer Weise postuliert (Reijnders 1998).

Vergleichbar sind die Faktorziele kaum, denn je nach Veröffentlichungsdatum haben diese unterschiedliche Basisjahre und sie erstrecken sich auf sehr unterschiedliche Zeiträume von wenigen Jahrzehnten bis hin zu 100 Jahren. Zielhorizont und Höhe der Faktoren werden im Übrigen von vielen Autoren gar nicht als präzisierbar angesehen, vielmehr gehe es um die Zielkorridore und Größenordnungen. Darüber hinaus verbergen sich hinter den Faktoransätzen sehr unterschiedliche Auffassungen, welche Art von Ressourceninanspruchnahme reduziert werden solle. Schmidt-Bleek knüpfte seinen Faktor 10 an das von ihm entwickelte Konzept der Materialintensität pro Serviceeinheit (MIPS). Dabei werden abiotische und biotische Rohstoffe einschließlich nicht genutzter Förderung im Bergbau, Bodenbewegungen der Land- und Forstwirtschaft inkl.

Erosion, Bodenaushub für Baumaßnahmen, Luft und Wasser über den Service-Lebenszyklus von Produkten und Dienstleistungen bilanziert (Ritthof et al. 2002).

In anderen Faktoransätzen wird gar nicht explizit auf Materialflussindikatoren und eine rigide Dematerialisierung abgestellt. Bei Ernst-Ulrich von Weizsäcker steht die Ökoeffizienz im Vordergrund. Die Maßnahmenvorschläge gründen sich auf einem großen Technikoptimismus. Vorrangig werden der Energieeinsatz und die Treibhausgasemissionen als Bemessungsgrundlage gewählt.

Als problematisch muss angesehen werden, dass ohne festgelegte Aufwandsgrößen ein Faktorziel für bestimmte Ressourcen erreichbar ist, wohingegen es für andere natürliche Ressourcen im selben System deutlich verfehlt werden kann oder sich gar gegenläufige Effekte einstellen können. Da sich je nach Systemgrenzen der Betrachtung, den adressierten Ressourcen, den dafür applizierten Indikatoren mitsamt ihren definierten Bilanzgrenzen, den Betrachtungszeiträumen sowie der Festlegung auf absolute Ziele oder Produktivitäten aus nominal identischen Faktoren sehr gegensätzliche Ambitionsniveaus mit unterschiedlichen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Anforderungen ergeben, sind Faktoransätze im Einzelfall zu hinterfragen. Hinsichtlich der physischen Input-Ressourcen Wasser, Fläche, Energie und Rohstoffe sind die Bilanzgrenzen von richtungsweisender Bedeutung. Für Materialflüsse ist zuallererst zu bestimmen, was sie abbilden und darüber hinaus möglicherweise repräsentieren. Denn im DPSIR-Modell (Smeets/Weterings 1999) stellen Materialflussindikatoren zunächst nur Einwirkungen dar, durch die sich unerwünschte Zustandsveränderungen und Auswirkungen ergeben können.

3 Bewusstsein für Schutzgüter

Elaborierte volkswirtschaftliche Materialflussindikatoren auf Rohstoffebene (z. B. RMI) oder auch der methodisch äquivalente Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) lassen sich eindeutig den Primärrohstoffen als natürlicher Ressource zuordnen. Die Bilanzierung mithilfe dieser Indikatoren wird auf die erforderliche Entnahme und Gewinnung von Primärrohstoffen aus der natürlichen Umwelt zurückgeführt, was sie sehr viel robuster als direkte Materialflussindikatoren (z. B. DMI) macht, die Massen unabhängig vom Verarbeitungsgrad gleichermaßen abbilden. Weniger eindeutig ist das Schutzgut, welches durch Primärrohstoffe adressiert wird. Was genau soll verhindert werden, indem weniger Primärrohstoffe in Anspruch genommen werden (Schmidt 2014)? Lässt sich auch dies anhand der genannten Indikatoren bestmöglich abbilden? Der grundsätzliche, anthropozentrische Begründungszusammenhang für das Schutzgut Rohstoffverbrauch wird weniger in den ökologischen Auswirkungen, sondern im tatsächlichen Verbrauch, der Verfügbarkeit und möglichen Knappheiten von Rohstoffen gesehen (Hauschild et al. 2013; Drielsma et al. 2016). Eine häufig geäußerte Kritik, Ansätze zur Bemessung des Rohstoffverbrauchs in der Ökobilanzierung würden keine Umweltauswirkungen

hinreichend erfassen (Bringezu 2015), ist somit richtig, aber wenig zielführend, da dies gar nicht deren konzeptioneller Intention entspricht.

Zur Einschätzung des Rohstoffverbrauchs und ihrer Schutzgüterinterpretation lassen sich vier grundsätzliche Auslegungen finden (Scheringer/Hofstetter 1997):

- **Intrinsische Werte:** Das Antasten des Rohstoffvorrats als solchem wird als unzulässiger Eingriff verstanden. Jeder Rohstoffabbau ist daher als Beeinträchtigung des Schutzgutes zu werten.
- **Minderung:** Die Minderung des Rohstoffvorrats wird als Einschränkung der Freiheit kommender Generationen betrachtet. Das übergeordnete Schutzziel bildet in diesem Fall die Entscheidungsfreiheit zukünftiger Generationen bzw. die intergenerationelle Gerechtigkeit.
- **Entwertung:** Es wird davon ausgegangen, dass in Zukunft Rohstoffvorkommen geringerer Qualität erschlossen werden müssen. Dies bedingt für kommende Generationen erhöhte Abbauaufwendungen.
- **Ersatz:** Aus dieser Perspektive werden der Bedarf künftiger Generationen mit den heutigen Nutzungsinteressen gleichgesetzt und die Möglichkeiten zur Substitution nichterneuerbarer Rohstoffe anhand des technischen und wirtschaftlichen Aufwands für die Entwicklung von Alternativtechnologien betrachtet.

In der dargelegten Logik bilden die volkswirtschaftlichen Materialflussindikatoren wie RMI den einfachsten möglichen Fall ab. Rohstoffen wird ein intrinsischer Wert beigemessen, sodass jede Form der Rohstoffgewinnung und -entnahme ex aequo das Schutzgut beeinträchtigt. Die Reserven und Ressourcen aller Rohstoffe werden somit als gleichermaßen schützenswert angesehen, unabhängig von ihrer Verfügbarkeit. Diesen Sachverhalt bilden die Indikatoren richtungssicher und widerspruchsfrei ab.

Im Gegensatz zu ökobilanziellen Verfahren werden Materialflussindikatoren aber nicht grundsätzlich in komplementären Sets betrachtet. Ihnen wird in einer Informationshierarchie auch eine starke Kommunikationsfunktion zugestanden, um Aufmerksamkeiten zu wecken und möglicherweise auch andere natürliche Ressourcen zu repräsentieren. Sie unterliegen wie alle hochaggregierten Indikatoren einem Zielkonflikt zwischen ihrem Informationsgehalt und ihrer Effektivität in der Kommunikation. Obgleich sie explizit nur die Rohstoff- und Materialflüsse selbst abbilden, werden sie in der öffentlichen, politischen Debatte sowohl im Sinne eines weiter gefassten Schutzgutinteresses (Vermeidung von Knappheiten) als auch als Richtwert für andere Schutzgüter (Ökosystemqualität) interpretiert. Können sie dem gerecht werden?

4 Repräsentanzfunktion für Umweltauswirkungen

Um die Umweltauswirkungen für Systeme aller Größenordnungen zu beschreiben, können drei Strategien verfolgt werden:

- Die lebenszyklusweiten Umwelteinwirkungsgrößen und Umweltauswirkungen werden mithilfe von Charakterisierungsmodellen umfänglich bilanziert und alle Umweltwirkungskategorien gleichrangig ermittelt.
- Die Umweltwirkungskategorien werden ermittelt und für das System bilanziert, aber zusätzlich durch einen Wertungsschritt in ein Schadenspotenzial überführt.
- Es wird ein Set einer möglichst geringen Anzahl an Indikatoren ermittelt, die die Umweltauswirkungen durch ein System bestmöglich und mit einem akzeptablen Maß an Unsicherheit beschreiben. Im Idealfall lässt sich dies mit einem einzigen Indikator realisieren, der alle übrigen repräsentiert.

In einer Dematerialisierungsstrategie wird Letzteres suggeriert. Allerdings lassen systematische Korrelationsanalysen nicht den Schluss zu, dass rein massebasierte Materialflussindikatoren als repräsentative Ressourcenindikatoren qualifiziert sind (Voet et al. 2004; Giegrich et al. 2011). Sollen Umweltauswirkungen durch einen Umwelteinwirkungsindikator repräsentiert werden, so ist der Kumulierte Energieaufwand (KEA) der am besten geeignete Indikator (Berger/Finkbeiner 2010). Letzteres ist auch das Ergebnis von sehr komplexen Regressionsanalysen mit bis zu 1.200 Produkten (Huijbregts et al. 2006; Huijbregts et al. 2010). Die Nutzung fossiler Energieträger kann mit eindeutigen qualitativen Wirkungszusammenhängen als maßgeblicher Treiber für viele bekannte negative Umweltauswirkungen gelten (Steinmann et al. 2016). Die Aussagen zur mangelhaften Repräsentanzfunktion der Materialflussindikatoren gelten bereits auf einer volkswirtschaftlichen Systemebene, obwohl die damit verbundene Materialvielfalt bereits zu einer gewissen Nivellierung der unterschiedlichen Umweltcharakteristiken führt und Ausreißer kaum relevant sind. Auf Mikroebene, z. B. bei paarweisen Materialsubstitutionen in Prozessen oder Produkten, trifft dies noch weitaus weniger zu, da die Heterogenität der Umweltprofile weniger verschiedener Materialien hierbei noch deutlicher zum Tragen kommt.

5 Repräsentanzfunktion für Knappheiten

Die Knappheit von Rohstoffen ist ein Leitmotiv zur Ressourcenschonung. Knappheitsdiskurse von Rohstoffen betreffen im Wesentlichen drei Ebenen:

- Physische Verfügbarkeit
- Strukturelle Versorgungsrisiken
- Rohstoffkritikalität

5.1 Physische Verfügbarkeit

Das Bemessen der physischen Verfügbarkeit ist eng mit dem Paradigma des geologischen *fixed stock* verbunden. Die Lithosphäre hält ein endliches Geopotenzial an Rohstoffen bereit.

Eine erste grobe Orientierung kann der Anteil der Elemente in der Lithosphäre, der sogenannte Clarke-Wert, geben. Losgelöst von kurzfristigen technologischen Trends und Nach-

fragesituationen kann hieraus eine Kategorisierung erfolgen, welche Elemente in einem Ausmaß vorhanden sind, das in menschlichen Zeiträumen keine Knappheiten erwarten lässt. Demgemäß werden die in typischen Gesteinsformationen vorkommenden Elemente Silizium, Aluminium, Eisen, Kalzium, Natrium, Kalium und Magnesium, die alle im einstelligen Prozentbereich liegen und zusammen mit Sauerstoff und Wasserstoff aus der Atmosphäre 98% unseres Planeten bilden, auch als *Elements of Hope* bezeichnet (Diederer 2010).

Bei gemeinsamer Betrachtung der genannten *Elements of Hope* und von Kohlenstoff, der ca. zu 80% fossile Energieträger und zu 50% Biomasse konstituiert, lässt sich abschätzen, dass mehr als 99% des Primärrohstoffeinsatzes Deutschlands durch diese zehn Elemente geprägt werden. Demzufolge repräsentieren gesamtwirtschaftliche Materialflussindikatoren auch maßgeblich die Elemente, die physisch am häufigsten auf der Erde vorkommen. Die geogenen Gehalte von Elementen lassen an sich natürlich noch keine Aussagen über eine wirtschaftliche oder technische Gewinnbarkeit zu.

5.2 Strukturelle Versorgungsrisiken

Über die physische Verfügbarkeit hinaus werden auch technisch-strukturelle Aspekte diskutiert, die die globale Verfügbarkeit von Rohstoffen limitieren können. Dabei lässt sich den räumlichen Disparitäten der Verteilung und den daraus resultierenden Konzentrationen der Vorkommen sowie der Produktion Rechnung tragen (Graedel et al. 2015; Melcher/Wilken 2013). So konzentrieren sich aufgrund der geologischen und geochemischen Beschaffenheiten die relevantesten Lagerstätten und Vorkommen einiger Metalle wie Zinn (Indonesien), Niob (Brasilien) oder auch Platin (Südafrika und Simbabwe) auf wenige Regionen weltweit (Gutzmer/Klossek 2014). Für andere – wie die Seltenen Erden – gibt es nicht diese hohe geologische Konzentrierung, dafür aber eine deutliche Konzentration der aktuellen Bergbauproduktion (China). Ein weiteres basales strukturelles Versorgungsrisiko betrifft Metalle, die in ihren Erzen vergesellschaftet vorliegen. Viele Metalle sind nur als Neben- oder Koppelprodukte gewinnbar. Exploration, Fördervolumen und damit verbundene Reichweiten sind somit auch an das Trägermetall gebunden (Wellmer 2008).

Die dargelegten strukturellen Risiken sind elementspezifisch zu betrachten und erfordern ein geowissenschaftliches statistisches Instrumentarium. Mithilfe von Materialflussindikatoren, auch in Disaggregation, lässt sich ohne dieses komplementäre Modellwissen keine Aussage über die Entwicklung von strukturellen Versorgungsrisiken treffen.

5.3 Rohstoffkritikalität

Die Kritikalitätsanalyse zielt darauf ab, Rohstoffe eines rohstoffnutzenden Systems (z. B. Volkswirtschaft, Branche, Unternehmen) zu identifizieren, die für dieses essenzielle Funktionen erfüllen, deren Versorgung jedoch risikobehaftet ist. Sie ermöglicht die Bewertung der Vulnerabilität (Verletzbarkeit) des rohstoffnutzenden Systems gegenüber Versorgungsstö-

rungen spezifischer Rohstoffe (VDI 2016). Neben den geologischen, technisch-strukturellen Versorgungsaspekten werden vor allem auch geopolitische, sozioökonomische und ökologische Risiken berücksichtigt (Erdmann/Graedel 2011). Aussagen zur Kritikalität lassen sich nicht allgemein ableiten, sondern sind diskret an untersuchte Elemente und Materialien geknüpft, welche die Auflösungsgrenzen von volkswirtschaftlichen Materialflussrechnungen deutlich übersteigen. Stattdessen bedarf es komplementärer Stoffflussanalysen, die auch Bestandsdynamiken von Gütergruppen und den darin gebundenen Funktionswerkstoffen berücksichtigen.

6 Hermeneutik des Vorsorgeprinzips

Weder für Umweltauswirkungen noch für Knappheiten konnte eine stringente Repräsentanz bei Materialflussindikatoren skizziert werden. Eine Ursache könnte darin bestehen, dass die qualitativen und quantitativen Zusammenhänge und Ursache-Wirkungsbeziehungen nicht hinreichend bekannt sind.

Einige Autoren, die eine Dematerialisierung als zentrale und dominante Handlungsmaxime propagieren (Schmidt-Bleek 1994), entlehnen daher der Umweltpolitik das Vorsorgeprinzip als Begründungszusammenhang. Dabei dient es sowohl der Ableitung der grundsätzlichen Notwendigkeit einer Senkung der Primärmaterialentnahme als auch einer Bestimmung von verschiedenen quantitativen Zielgrößen einer Dematerialisierung (Bringezu 2015). Schmidt-Bleek leitet aus dem Vorsorgeprinzip die Prämisse ab, dass natürliche Systeme so wenig und so langsam wie möglich durch menschliche Aktivitäten verändert werden sollten, und begründet dies mit den oben genannten Annahmen zu Stoffströmen, Umweltwirkungen und der weitgehenden Unkenntnis über Ursache-Wirkungsbeziehungen. Bringezu bezieht sich auf die Argumentation von Schmidt-Bleek und erläutert, dass die Prämisse in dem Sinne vorsorgend sei, dass gebündelte Einwirkungen auf die Umwelt und subsequently auf die Gesellschaft, die mit diesen Stoffströmen einhergehen und entlang der Rohstoffextraktion bis zur Produktentstehung auftreten, begrenzt werden sollten (Bringezu 2015).

Hinsichtlich der Bedeutung des adressierten Schutzguts, der Stabilität des planetaren Ökosystems, könnte nach gängigen Kriterienkatalogen das Vorsorgeprinzip umweltpolitische Maßnahmen zur Dematerialisierung legitimieren (Persson 2016). Da aber der Zusammenhang von Materialentnahme und Umweltbelastungspotenzial allein auf Plausibilitätsargumenten beruht und sich der Ansatz sowohl einer empirischen wissenschaftlichen Analyse als auch einer wissenschaftlichen Bewertung der Unsicherheit entzieht, sind zwei wesentliche Voraussetzungen, die beispielsweise die EU-Kommission zur Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips sieht, nicht erfüllt (Europäische Kommission 2000). Die Setzung von pauschalen Dematerialisierungszielen ist in diesem Sinne willkürlich und kann sich nicht auf das Vorsorgeprinzip berufen. Da keine objektiven Kriterien zur Überprüfung der Dematerialisierungsthese vorliegen, handelt es sich bei der Zieldefinition um ein

Werturteil. Derartige Wertefragen sollten besser im demokratischen Prozess entschieden werden als anhand genereller Prinzipien, die eine nicht vorhandene Objektivität vortäuschen (Persson 2016).

7 Zusammenschau

Im vorliegenden Beitrag wurde die Aussagekraft von solidären Materialflussindikatoren als Zielgrößen zur Dematerialisierung in verschiedenen Zusammenhängen geprüft. Im Ergebnis wird Folgendes deutlich:

- Physische Materialflussgrößen können der ihnen kommunikativ und qualitativ zugesprochenen Relevanz zur Abbildung weiterer Ressourcen analytisch nicht gerecht werden. Von hohen physischen Material- oder Rohstoffeinsätzen lässt sich nicht pauschal auf eine hohe „Ressourcenrelevanz“ schlussfolgern. Wird eine auf Primärrohstoffe bezogene Materialflussgröße berücksichtigt, so lässt sich lediglich die Rohstoffrelevanz bzw. im Zusammenhang mit einer Leistungskennzahl die Rohstoffeffizienz bestimmen.
- Das Ambitionsniveau eines Ziels für Materialflussgrößen ist stark vom Bilanzraum und den Systemgrenzen der Indikatoren abhängig.
- Eine Repräsentanzfunktion zur Vermeidung von Rohstoffknappheiten ist weder für absolute, strukturelle noch relative sozioökonomische Knappheiten gegeben. Zu Rohstoffknappheiten lassen sich keine verallgemeinerbaren, plausiblen Zusammenhänge durch aggregierte Materialflussindikatoren konstruieren.
- Eine Repräsentanzfunktion für negative Umweltauswirkungen ist für aggregierte Materialflussindikatoren allenfalls rudimentär. Inputindikatoren für Rohstoffe und Material sind weder hinsichtlich der Umweltwirkungen der Rohstoffgewinnung noch der gesamten Umweltbelastungen des sozioökonomischen Systems als aussagekräftige Kenngrößen qualifiziert. Ist die Repräsentanzfunktion auf gesamtwirtschaftlicher Ebene schon verschwindend gering, so lässt sich diese bis zur Mikroebene gar nicht mehr plausibel darstellen. Mit großem Konsens in der Fachliteratur ist der fossile Energieaufwand als physische Inputgröße in Energieeinheiten der bestmögliche solitäre Repräsentant für weitere Umweltwirkungen eines Systems, der als Proxy-Indikator allen Materialflussgrößen vorzuziehen wäre.
- Demzufolge ist auch der Begriff „Ressourcenleichtigkeit“, der mit seiner Metaphorik – wenig Material, d. h. ein „leichter Materialrucksack“, entspräche einer geringen natürlichen Ressourceninanspruchnahme – in einer kommunikativen Logik durchaus Stärken aufweist, irreführend und kann richtungsentscheidende Falschaussagen provozieren.
- In Ermangelung der hinreichenden Repräsentanzfunktion lassen sich aus ökologischen Erfordernissen keine unmittelbaren Ziele für hochaggregierte Materialflussindikatoren analog zu Klimazielen oder planetaren Grenzen (Steffen et al. 2015) ableiten. Die Zielbildung beruht stattdessen

weitgehend auf Postulaten, die sich auf das Vorsorgeprinzip berufen.

- Die Auslegung des Vorsorgeprinzips ist kontrovers, da sie die fehlende empirische Repräsentativität der Materialflussindikatoren für bekannte Umweltwirkungen ignoriert und stattdessen unklare langfristige Auswirkungen von Umwelteinwirkungen reklamiert, die nicht mit bestehenden Wirkungsmodellen beschrieben werden können.

8 Die Stärken betonen

Bei aller Kritik an der Bedeutungsüberlastung der Materialflussindikatoren als Zielgrößen darf ihr eigentlicher Wert aber nicht übergangen werden. Sie entfalten ihre Bedeutung vor allem in einer metabolischen Zusammenschau und als Instrumente für weitere Bewertungen.

8.1 Systemische Sicht auf den sozioökonomischen Metabolismus

Das Konzept, auch als anthropogener (Baccini/Bader 1995) oder industrieller Metabolismus (Ayres/Ayres 2002) etabliert, ist wissenschaftlich in der Industrial Ecology und in der Praxis fest etabliert und gestattet es, die Stoffwechselbeziehung von Systemen beliebiger Größenordnungen mit ihrer Umwelt zu erfassen. Desgleichen lassen sich Input-Output-Relationen, Stoffwandlungen und Stoffdynamiken im Innern der Systeme untersuchen (Adriaanse et al. 1997; Matthews et al. 2000). Für komplexe Systeme wie Volkswirtschaften ermöglichen Materialflussindikatoren in ihrer funktionalen Zusammenschau und in Gliederung nach unterschiedlichen Materialien und Verwendungen beachtliche Einblicke in Systemzustände, -änderungen und Triebkräfte (Bringezu et al. 2009). Sie liefern grundlegende Strukturinformation über die materielle Basis der Volkswirtschaft, die auch im Vergleich unterschiedlicher Volkswirtschaften und deren Entwicklung interpretierbar sind.

8.2 Materialflussanalyse als Instrument für weitere Bewertungen

Neben der Materialflussanalyse existieren mit der Stoffflussanalyse, der Sachbilanz- oder Inventaranalyse und der physischen Input-Output-Rechnung Instrumentarien, um den Stoffwechsel für Systeme jedweder Größe wertneutral abzubilden. Die daraus folgenden Daten lassen sich durch Disaggregation, Normierung und Anwendung von Charakterisierungsmodellen in essenzielle Informationen überführen. Die physischen Analysen selbst liefern also den Grundstock für die weitergehenden, zielgerichteten Analysen und Methoden.

9 Fazit

Eine Dematerialisierung als Strategie, die solitäre, physische, aggregierte Materialflussgrößen zu Steuerungsgrößen erhebt, muss kritisch gesehen werden. Denn eine Dematerialisierung um ihrer selbst willen ist wenig überzeugend. Nur unter

nahezu konstanten, realitätsfernen Randbedingungen hinsichtlich der qualitativen Einsatzfaktoren ist diese richtungssicher als Strategie zur Ressourceneffizienzsteigerung oder gar Ressourcenschonung.

Die über viele Jahre von Dematerialisierungsvertretern vorgetragenen Vorzüge der Durchlässigkeit, auf allen Ebenen des sozioökonomischen Systems, Massenindikatoren gleicher Systematik anwenden zu können und Gestaltung, Handlung sowie Optimierung daran auszurichten, ist fachwissenschaftlich kontrovers und verliert zunehmend an Bedeutung. Auf Ebene einzelner Prozesse oder Produkte ist ein solches Vorgehen mit Größen wie MIPS nicht seriös aufrechtzuerhalten. Der Detaillierungsgrad muss größer, die betrachteten funktionalen Ressourcenkategorien breiter aufgestellt werden. Schließlich müssen über rein physische Indikatoren von Fußabdrücken hinaus Knappheits- und Wirkungscharakterisierungen erfolgen, um verlässliche Aussagen zur Ressourceneffizienz ableiten zu können (Tukker et al. 2015).

Zu groß sind die Widersprüche und Zielkonflikte und zu elaboriert die Alternativen zum sozioökonomischen Metabolismus aus der *industrial-ecology*-, der Ökobilanz- sowie der Kritikalitätsforschung. Im Zentrum stehen dabei Stoff- und Materialflussindikatoren, die allerdings entweder systemisch ausgelegt werden oder aber eine Qualifizierung erfahren. Die Kritikalitätsanalyse lenkt dabei den Blick auf den wohl relevantesten, aber bei einer auf eine inputseitige Dematerialisierung abzielenden Strategie vernachlässigten Aspekt: Die Zweckbestimmung, die Bedeutung, den Nutzen der eingesetzten Rohstoffe und Materialien für ein System. Tun wir die richtigen Dinge mit unserem Rohstoffeinsatz, beispielsweise eine Transformation zu einem postfossilen Energiesystem oder den Ausbau resilienter Siedlungsstrukturen, was zunächst auch einen Mehraufwand bedeuten kann? Überführen wir Rohstoffe in langfristig produktives Sachkapital? Hieraus ergeben sich aufschlussreiche Anhaltspunkte im weiteren Diskurs.

Literatur

- Adriaanse, A./Bringezu, S./Hammond, A./Moriguchi, Y./Rodenburg, E./Rogich, D./Schütz, H. (1997): Resource flows: the material basis of industrial economies. World Resources Institute. Washington, DC.
- Ayres, R. U./Ayres, L. (2002): A handbook of industrial ecology. Edward Elgar Publishing.
- Baccini, P./Bader, H.-P. (1995): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg u. a., Spektrum Akademischer Verlag.
- Berger, M./Finkbeiner, M. (2010): Correlation analysis of life cycle impact assessment indicators measuring resource use. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 16/1: 74–81.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin.
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRes II) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin.
- Bringezu, S. (2015): Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. In: Resources 4/1: 25–54.

- Bringezu, S./Sand, I. v. d./Schütz, H./Bleischwitz, R./Moll, S. (2009): Analysing global resource use of national and regional economies across various levels. In: *Bringezu, S./Bleischwitz, R. (Hrsg.): Sustainable Resource Management: Global Trends, Visions and Policies*. Sheffield, Greenleaf: 10–51.
- Bringezu, S./Schütz, H./Moll, S. (2003): Rationale for and interpretation of economy-wide materials flow analysis and derived indicators. In: *Journal of Industrial Ecology* 7/2: 43–64.
- Diederer, A. (2010): *Global Resource Depletion – Managed Austerity and the Elements of Hope*. The Netherlands, Eburon Academic Publishers, Delft.
- Drielsma, J. A./Russell-Vaccari, A. J./Drnek, T./Brady, T./Weiher, P./Mistry, M./Simbor, L. P. (2016): Mineral resources in life cycle impact assessment – defining the path forward. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21/1: 85–105.
- Erdmann, L./Graedel, T. E. (2011): Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. In: *Environmental Science & Technology* 45/18: 7620–7630.
- Europäische Kommission (2000): Mitteilung der Kommission: die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips. Brüssel, Europäische Kommission.
- Faulstich, M./Foth, H./Callies, C./Hohmeyer, O./Holm-Müller, K./Niekisch, M./Schreurs, M. (2012): *Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt*. Berlin, Erich Schmidt Verlag.
- Giegrich, J./Liebich, A./Lauwigi, C. (2011): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Heidelberg u. a.
- Graedel, T. E./Harper, E. M./Nassar, N. T./Nuss, P./Reck, B. K. (2015): Criticality of metals and metalloids. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112/14: 4257–4262.
- Gutzmer, J./Klossek, A. (2014): Die Versorgung mit wirtschaftskritischen Rohstoffen – Eine Ursachensuche und -analyse. In: *Kausch, P./Bertau, M./Gutzmer, J./Matschullat, J. (Hrsg.): Strategische Rohstoffe – Risikovor-sorge*. Berlin und Heidelberg, Springer: 61–73.
- Hauschild, M. Z./Goedkoop, M./Guinée, J./Heijungs, R./Huijbregts, M./Jolliet, O./Margni, M./De Schryver, A./Humbert, S./Laurent, A./Sala, S./Pant, R. (2013): Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18/3: 683–697.
- Huijbregts, M. A. J./Hellweg, S./Frischknecht, R./Hendriks, H. W. M./Hungerbühler, K./Hendriks, A. J. (2010): Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production. In: *Environmental Science & Technology* 44/6: 2189–2196.
- Huijbregts, M. A. J./Rombouts, L. J. A./Hellweg, S./Frischknecht, R./Hendriks, A. J./van de Meent, D./Ragas, A. M. J./Reijnders, L./Struijs, J. (2006): Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products? In: *Environmental Science & Technology* 40/3: 641–648.
- Kågeson, P. (1999): Is Factor 10 a useful tool in environmental policy. In: *Dematerialisation and Factor 10*: 1–31.
- Kleijn, R. (2001): Adding It All Up. In: *Journal of Industrial Ecology* 4/2: 7–8.
- Matthews, E./Amann, C./Bringezu, S./Hüttler, W./Ottke, C./Rodenburg, E./Rogich, D./Schandl, H./Van, E./Weisz, H. (2000): The weight of nations-material outflows from industrial economies. Washington DC.
- Melcher, F./Wilken, H. (2013): Die Verfügbarkeit von Hochtechnologie-Rohstoffen. In: *Chemie in unserer Zeit* 47/1: 32–49.
- OECD (2008): *Measuring Material Flows and Resource Productivity*.
- Persson, E. (2016): What are the core ideas behind the Precautionary Principle? In: *Science of The Total Environment* 557–558: 134–141.
- Reijnders, L. (1998): The Factor X Debate: Setting Targets for EcoEfficiency. In: *Journal of Industrial Ecology* 2/1: 13–22.
- Ritthof, M./Rohn, H./Liedtke, C./Merten, T. (2002): MIPS berechnen: Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen. Wuppertal Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Scheringer, M./Hofstetter, P. (1997): Auswahl, Begründung und Vergleich von Schutzgütern in der Ökobilanz-Methodik – ein offenes Problem. In: *Schutzgüter und ihre Abwägung aus der Sicht verschiedener Disziplinen: vorbereitende Unterlagen zum 5. Diskussionsforum Ökobilanzen vom 17. Oktober 1997 an der ETH Zürich, Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften ETH: 4–10.*
- Schmidt-Bleek, F. (1994): *Wieviel Umwelt braucht der Mensch?: MIPS – das Maß für ökologisches Wirtschaften*.
- Schmidt, M. (2014): Zu den Schutzziele der Ressourceneffizienz. In: *uwf UmweltWirtschaftsForum* 22/2–3: 147–152.
- Smeets, E./Weterings, R. (1999): *Environmental indicators: Typology and overview*. Copenhagen, European Environment Agency (EEA).
- Steffen, W./Richardson, K./Rockström, J./Cornell, S. E./Fetzer, I./Bennett, E. M./Biggs, R./Carpenter, S. R./de Vries, W./de Wit, C. A./Folke, C./Gerten, D./Heineke, J./Mace, G. M./Persson, L. M./Ramanathan, V./Reyers, B./Sörlin, S. (2015): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. In: *Science* 347/6223.
- Steinmann, Z. J. N./Schipper, A. M./Hauck, M./Huijbregts, M. A. J. (2016): How Many Environmental Impact Indicators Are Needed in the Evaluation of Product Life Cycles? In: *Environmental Science & Technology* F/7: 1–23.
- Tukker, A./Guinée, J./Van Oers, L./van der Voet, E. (2015): Towards a resource efficiency index of nations. In: *World Resources Forum*: 1–49.
- VDI (2016): *Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands. VDI-Richtlinie 4800, Blatt 2* Berlin Beuth. Stand: August 2016 Gründruck.
- Voet, E./Oers, L./Nikolic, I. (2004): Dematerialization: Not Just a Matter of Weight. In: *Journal of Industrial Ecology* 8/4: 121–137.
- Weizsäcker, E. U. v./Hargroves, K./Smith, M. (2010): Faktor Fünf: die Formel für nachhaltiges Wachstum. München.
- Weizsäcker, E. U. v./Lovins, A. B./Lovins, L. H. (1995): Faktor Vier: doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch: der neue Bericht an den Club of Rome.
- Wellmer, F. W. (2008): Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future? In: *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 159/4: 575–590.
- Wiedmann, T./Minx, J./Barrett, J./Vanner, R./Ekins, P. (2006): *Sustainable Consumption and Production – Development of an Evidence Base*, Stockholm Environment Institute.

AUTOREN + KONTAKT

Felix Müller und **Jan Kosmol** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, **Hermann Keßler** ist Leiter des Fachgebiets „Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie“ am Umweltbundesamt.

Dr. Michael Angrick ist Leiter des Fachbereichs „Emissionshandel, Deutsche Emissionshandelsstelle“ und **Dr. Bettina Rechenberg** ist Leiterin des Fachbereichs „Nachhaltige Produktion und Produkte, Kreislaufwirtschaft“ am Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1,
06844 Dessau-Roßlau. Tel.: +49 340 2103-3854,
E-Mail: felix.mueller@uba.de

