

# Ressourcenschonung als Zukunftsaufgabe – Ansatzpunkte für eine systemische Ressourcenpolitik



# Impressum

## Herausgeber:

Umweltbundesamt  
Fachgebiet I 1.1  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Telefax: (0340) 2103-0  
E-mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [www.twitter.com/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)

## Autorinnen und Autoren:

Martin Hirschnitz-Garbers und Susanne Langsdorf  
(Ecologic Institut, Berlin)  
Ullrich Lorenz (Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau)

## Unter Mitwirkung von/Kommentiert durch:

Martin Distelkamp und Mark Meyer  
(Gesellschaft für wirtschaftliche  
Strukturforschung (GWS), Osnabrück)

Deniz Koca (Lund Universität, Lund)

Harald Sverdrup (Iceland University, Reykjavik)

## Grafikdesign und Layout:

Illusine (Atelier für Illustration und Design: [www.illusine.de](http://www.illusine.de))

## Redaktion:

Ullrich Lorenz

## Im Internet über:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>  
als PDF-Dokument einsehbar und herunterzuladen.

Projekt: „Modelle, Potentiale und Langfristszenarien für  
Ressourceneffizienz“ (SimRess) [www.simress.de](http://www.simress.de)

ISSN (Print) 2363-8311

ISSN (Online) 2363-832X

## Bildquellen:

Titel, Seite 40: © Romolo Tavani\_XXL/fotolia.de

Seite 18: Fotolia\_©larswieser

Seite 31: Fotolia\_© mahey

Seite 33: Fotolia\_© Olivier Le Moal

Seite 34: Fotolia\_© elxeneize

Seite 39: Fotolia\_© ted007

## Stand:

Mai 2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>4</b>
1.1 Ressourcenschonung – eine langfristige Aufgabe	4
1.2 Systemdenken als Voraussetzung für zukunftsfähige Ressourcenpolitik	6
<b>2 Ansatzpunkte für eine systemische Ressourcenpolitik</b>	<b>12</b>
These 1: Zukünftige Knappheiten erfordern eine vorausschauende Ressourcenpolitik und können durch Recycling verringert werden	12
These 2: Eine systemisch und langfristig ausgerichtete Ressourcenpolitik muss über Effizienzorientierung hinausgehen	19
These 3: Nationale Ressourcenpolitik kann den Wandel zu Ressourcenschonung unterstützen, ihn aber nur über gemeinsame internationale Aktivitäten gestalten helfen	25
These 4: Für die Fortschrittsmessung der Wirksamkeit langfristig orientierter Ressourcenpolitik sind international vergleichbare gesamtwirtschaftliche Indikatoren vorteilhaft	32
These 5: Ressourceneffizienz zu steigern bringt Vorteile für den Klimaschutz – die Vermeidung von Treibhausgasen führt zu veränderten Rohstoffbedarfen	38
<b>3 Zusammenfassung und Ausblick – was zukunftsfähige Ressourcenpolitik beachten sollte</b>	<b>43</b>
<b>4 Literaturverzeichnis</b>	<b>46</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Ressourcenschonung – eine langfristige Aufgabe

Dass Ressourcenschonung eine zentrale Aufgabe der Politik ist, zeigt die nationale und internationale politische Agenda: In Deutschland, Europa und global gibt es politische Programme und Strategien, die zum Ziel haben, die Ressourcenanspruchnahme nachhaltig zu gestalten. Denn die Menschen greifen durch die Nutzung natürlicher Ressourcen<sup>1</sup> [1] wesentlich in bestehende sozial-ökologische Systeme ein. Dabei hat insbesondere die Gewinnung und Inanspruchnahme von Rohstoffen eine Größenordnung erreicht, die drastische Schäden an der Natur verursacht und über Umweltverschmutzung oder Abbaumethoden auch Menschen schadet. Trotz der politischen Fortschritte ist seit Beginn der Industrialisierung die Menge an Rohstoffen, die wir für vielfältige Zwecke einsetzen – beispielsweise zum Bauen und zur Produktherstellung, als Energieträger und für die Ernährung – extrem angestiegen: Von 1970 bis 2015 hat sich die globale jährliche Entnahme an nicht-metallischen Mineralien, Metallerzen, fossilen Energieträgern und Biomasse auf mehr als 80 Milliarden Tonnen nahezu vervierfacht [2]. Wenngleich nicht davon auszugehen ist, dass es einen irgendwie gearteten Kollaps geben wird, so führt die massive Rohstoffentnahme doch zu erheblichen Umweltbelastungen und birgt soziales und politisches Konfliktpotential.

Allerdings ist angesichts einer Reihe von globalen Megatrends zu erwarten, dass die

weltweite Rohstoffinanspruchnahme zukünftig ohne gegensteuernde Maßnahmen weiter steigen wird. Vor dem Hintergrund einer Bevölkerungszunahme auf rund 10 Milliarden Menschen im Jahre 2050, der weiteren Ausbreitung westlicher Konsum- und Lebensmodelle in Schwellenländern, voranschreitender Urbanisierung sowie von Digitalisierung und Vernetzung [3, 4] dürfte der globale Ressourcenverbrauch ohne Maßnahmen bis 2050 weiter deutlich ansteigen. Je nach Annahmen und Modellansätzen zur technologischen Steigerung der Rohstoffeffizienz und Entwicklung klimapolitischer Maßnahmen (z.B. des Preises für CO<sub>2</sub>) könnte die Entnahme an nicht-metallischen Mineralien, Metallerzen, fossilen Energieträgern und Biomasse im Jahr 2050 Werte zwischen ca. 120 Milliarden [5] und ca. 186 Milliarden Tonnen [2, 6] erreichen. Damit gehen auf globaler Ebene erhebliche Risiken für Umweltauswirkungen durch Klimawandel, Verlust von biologischer Vielfalt und wertvoller Landflächen sowie zunehmende Verbreitung von Chemikalien einher [7].

In Deutschland werden außer mineralische Baumaterialien, Kali und Braunkohle vergleichsweise wenige Primärrohstoffe direkt aus dem Boden gewonnen. Um zielsichere Aussagen über die Entwicklung der durch Konsum-, Investitions- und Produktionsaktivitäten in Deutschland insgesamt induzierten Primärrohstoffinanspruchnahme treffen zu können, ist es daher

---

1 | Im weiteren Sinne verstehen wir unter „Ressource“ „erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischen Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z.B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen.“ [1, S. 22]. In den Modellierungen des SimRess-Projekts wurden jedoch hauptsächlich metallische und mineralische Rohstoffe sowie fossile Rohstoffe und CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet.

von zentraler Bedeutung, auch diejenigen Rohstoffmengen zu betrachten, welche global für Produktion und Konsum in Deutschland entnommen werden. Die Messgröße „Rohstoffkonsum pro Kopf“ berechnet hierzu die sogenannten „indirekten Flüsse“ – das sind Stoffströme, die aus den unterschiedlichen Produktionsschritten resultieren, welche die hierzulande nachgefragten Güter und Dienstleistungen bis zur ihrer Fertigstellung durchlaufen. Diese indirekten Flüsse werden über sogenannte Rohstoffäquivalente (in Englisch Raw Material Equivalents, RME) in Rohstoffmengen umgerechnet. Dadurch werden die Rohstoffmengen sichtbar, die global extrahiert werden, um die exportierten bzw. importierten Rohstoffe, Halbwaren, Produkte und Güter zu produzieren: bei Metallerzen betragen die RME das 4 bis 9-Fache der beim Grenzübertritt gemessenen Mengen, bei nicht-metallischen Mineralien das 2 bis 6-Fache und bei fossilen Energieträgern das 2 bis 4-Fache [5, 8].

Der Rohstoffkonsum<sup>2</sup> pro Kopf betrug nach Abschätzung des Statistischen Bundesamtes im Jahre 2011 in Deutschland etwa 16 Tonnen [9]. Allerdings basieren diese Abschätzungen auf vereinfachenden Berechnungsmethoden, welche bspw. die internationalen Unterschiede in den Produktionsbedingungen nicht explizit abbilden. Die entsprechenden Befunde des SimRess-Projekts deuten darauf hin, dass nach Anwendung von detaillierteren Berechnungsmethoden deutlich höhere Werte für Deutschlands Rohstoffkonsum pro Kopf resultieren [5]. Dennoch liegt bereits der Wert von 16 Tonnen nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten

deutlich über einem global tragbaren Maß von etwa 5-8 Tonnen pro Kopf<sup>3</sup> [10].

Der Rohstoffkonsum in Rohstoffäquivalenten berücksichtigt nur einen Teil der bei der Rohstoffgewinnung anfallenden Reststoffe, nämlich nur die, die aus dem ersten Verwertungsschritt resultieren und somit als genutzt gezählt werden. Beim Bergbau betrifft das die höchst umweltrelevanten, sogenannten Aufbereitungsabgänge (engl. tailings). Im Rohstoffkonsum hingegen nicht enthalten sind die Mengen an Material, die zur Gewinnung der Rohstoffe bewegt werden mussten, aber nicht genutzt bzw. verwertet wurden, wie beispielsweise Abraum aus der Rohstoffextraktion. In Deutschland wurden im Jahre 2011 3,1 Milliarden Tonnen Rohstoffe entnommen, von denen jedoch nur ca. 1,1 Milliarden Tonnen genutzt wurden – nahezu 2/3 der gesamten entnommenen Rohstoffmengen fielen als ungenutzte Entnahme an [9]. Mit der ungenutzten Entnahme sind Umweltschäden verbunden, da für die Gewinnung von Rohstoffen große Mengen an Boden, Gestein und Sand bewegt werden müssen, was nicht zuletzt zu Landschaftszerstörungen führt.

Der Ressourceneffizienzpolitik Deutschlands geht es genau darum, durch systematisches Ausschöpfen von Effizienzpotentialen entlang der Wertschöpfungskette die ökologischen Belastungen zu minimieren. So sind nicht zuletzt durch das deutsche Ressourceneffizienzprogramm ProgRess politisch und technisch Fortschritte in Bezug auf die Ressourceneffizienz zu erkennen [12]. Dennoch zeigen die

---

2 | Primärrohstoffverwendung für inländischen Konsum und Investitionen oder Raw Material Consumption, RMC.

3 | Die Zielgröße einer global tragbaren pro-Kopf Rohstoffanspruchnahme ist wissenschaftlich umstritten. Kritiker der Berechnung führen u.a. an, dass die angenommenen Bezüge zwischen Materialentnahme, Umweltbelastungspotential und Tragfähigkeitsgrenzen auf nur schwer nachvollziehbaren Plausibilitätsüberlegungen beruhen, es keine empirische Evidenz gibt und massebasierte Indikatoren nicht zwischen Umweltrelevanz, Knappheit oder Verfügbarkeit der Rohstoffe differenzieren und somit relevante Zielgrößen der Ressourcenpolitik nicht adäquat abbilden. Siehe [11].

wesentlichen Indikatoren nur zögerlich in die richtige Richtung und bleiben hinter den in ProgRess genannten Zielgrößen<sup>4</sup> zurück.

Für die Weiterentwicklung der nationalen und internationalen Ressourcenpolitik wird es weiterhin darum gehen, wie Ressourcen-

schutz künftig effektiver und nachhaltiger werden kann sowie zu erkennen, welches die Kräfte sind, die den Fortschritt in Richtung Nachhaltigkeit verzögern und wie diesen begegnet werden kann. Diese Broschüre wird hierzu in Thesenform einige Vorschläge für die notwendige Debatte unterbreiten.

## 1.2 Systemdenken als Voraussetzung für zukunftsfähige Ressourcenpolitik

Die große Zahl an zu betrachtenden Rohstoffen und Materialien, Akteuren mit unterschiedlichen Interessen und die vielfältigen gegenseitigen Abhängigkeiten und Vernetzungen machen die Ressourcennutzung bzw. Ressourcenschonung zu einem äußerst komplexen System. Aktivitäten, welche helfen sollen, die Ressourcennutzung nachhaltiger zu gestalten, finden in einem Multi-Akteurs- und Mehrebenensystem statt. Dadurch wird Ressourcenschonungspolitik zu einem integrativen und komplexen Politikfeld mit vielfältigen Querverbindungen in andere Politikbereiche (z.B. Energiepolitik, Industrie- und Wirtschaftspolitik, Landwirtschaftspolitik, Finanzpolitik) und einem die gesamte Wertschöpfungskette umspannenden Anspruch. Das spiegelt sich in den Handlungsfeldern des deutschen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess II wider, mittels derer eine nachhaltige Rohstoffversorgung gesichert, Ressourceneffizienz in der Produktion gesteigert, Produkte und Konsum ressourcenschonender gestaltet sowie eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft ausgebaut werden sollen [12].

Gleichzeitig bleibt die Ressourcenpolitik auch in ProgRess II an der Effizienzsteigerung entlang der Wertschöpfungskette ausgerichtet: An jeder Station der Wertschöpfungskette von der Extraktion, Verarbeitung, Produktion, Nutzung, Entsorgung bzw. Recycling kann und soll die Effizienz technisch erhöht werden, so dass der gleiche oder mehr Nutzen durch die verwendeten Rohstoffe gewonnen werden kann und so insgesamt das Ziel erreicht wird, die Umwelt zu schonen. Das Recycling schließt den Kreislauf der Rohstoffe. Je mehr Rohstoffe im Kreislauf geführt werden, je mehr also Sekundärrohstoffe vorhanden sind, desto geringer die Notwendigkeit, neue Primärrohstoffe einzusetzen.

Die modernen Systemwissenschaften beschäftigen sich schon lange damit, wie komplexe Systeme erfasst und gesteuert werden können. Theoretisch betrachtet zeigen Systeme – miteinander verknüpfte Elemente – ein bestimmtes Verhalten in Abhängigkeit von verschiedenen Steuergrößen. Dieses ist grundsätzlich aus der Kybernetik (Steuer- und Regelungstechnik) bzw. Elektrotechnik bekannt. Die Arbeiten von

---

4 | Die wesentlichen rohstoffbezogenen Zielgrößen in ProgRess II sind: (1) Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020 im Vergleich zum Jahre 1994; (2) Fortschreibung bis 2030 des Trends der Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität der Jahre 2000 – 2010 [12].

Jay Forrester sind hier ein Meilenstein, der mit seinen Werken „Industrial Dynamics, Urban Dynamics und World Dynamics“ [13] wesentliche Grundvoraussetzungen für die Arbeiten von Meadows et al. zum bekannten World Modell lieferte, welches „Die Grenzen des Wachstums“ aufzeigend wesentliche Impulse für die Nachhaltigkeitskonvention vom Erdgipfel in Rio de Janeiro im Jahre 1992 legte. Kennzeichnend für System(dynamische)-Modelle sind Rückkopplungen zwischen den Elementen und Verzögerungen im Auf- oder Abbau von Beständen. Die Kombination aus diesen grundlegenden Eigenschaften führt zu einer Reihe von typischen Verhaltensmustern, die häufig überraschend für den Betrachter des Systems sein können.

In dieser Tradition können mit dem Analysemodell WORLD6 die Entwicklungen globaler Systemkomponenten und -mechanismen auf Basis eines kybernetischen Systemverständnisses weit in die Zukunft simuliert werden. Das WORLD6-Modell kann Simulationszeiträume bis zum Jahre 2200 – und sogar darüber hinaus – in den Blick nehmen. Je weiter die Simulationsbefunde in der Zukunft liegen, desto größer werden selbstverständlich die Unsicherheiten über die Plausibilität der getroffenen Zukunftsannahmen. Dennoch können die langfristigen Kurvenverläufe der systemdynamischen Simulationsbefunde mögliche langfristige Tendenzen und Muster vor Augen führen. Damit wird eine wichtige Grundlage zur kritischen Auseinandersetzung mit komplexen Systemzusammenhängen geboten: Genaue „Wenn-dann“-Aussagen bzw. Prognosen lässt das Modell weder zu, noch beabsich-

tigt es diese. Unter Verzicht auf eine explizite Abbildung sozio-ökonomischer oder politischer Wirkungszusammenhänge dient es insbesondere dazu, aus einer globalen steuerungstechnischen Perspektive wesentliche Rückkopplungsschleifen und deren inhärente dynamische Eigenschaften aufzuzeigen. Finden sich in dieser Broschüre Simulationsergebnisse länger als 2050 so basieren diese auf den WORLD-Simulationen und zeigen langfristiges Systemverhalten unter den genannten Annahmen.

Auf Basis eines sozio-ökonomischen Systemverständnisses wird die wesentliche Bedeutung von Interdependenzen, Rückkopplungen und die hieraus resultierende Notwendigkeit systemischer Analyseansätze auch von dynamischen, volkswirtschaftlichen Totalmodellen aufgegriffen. Durch sogenannte umweltökonomische Erweiterungen dynamischer Input-Output Modelle<sup>5</sup> [14,15] kann dieser volkswirtschaftliche Analyseansatz auch dazu genutzt werden, die implizierten Auswirkungen alternativer Szenarioannahmen auf die Ressourcenanspruchnahme abzuschätzen.<sup>6</sup> [16] Im Gegensatz zu statischen Input-Output-Modellen können dynamische Input-Output Modelle<sup>7</sup> [17] die zuvor angesprochenen Rückkopplungseffekte und daraus resultierende Systemzustände automatisch in ihrer zeitlichen Entwicklung abbilden.

Im SimRess-Projekt standen mit den Modellen WORLD6 und GINFORS<sub>3</sub> zwei Werkzeuge bereit, welche komplexe Systeme und Rückkopplungsmechanismen systemanalytisch in den Blick nehmen können, dabei aber zwei

---

5 | Statische Input-Output Analysen, welche den Informationsumfang der Input-Output Rechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen politischer Maßnahmen nutzen, etablierten sich in Deutschland gegen Ende der 1960er Jahre als Instrument der Politikberatung. Für weitergehende historische Darstellungen siehe bspw. [14]. Das heute international etablierte System moderner Input-Output Rechnungen wird historisch auf die frühen Arbeiten von François Quesnay zurückgeführt, der in der Mitte des 18. Jahrhunderts das sogenannte „Tableau économique“ als erste gesamtwirtschaftliche Abbildung interdependenter Wirtschaftskreisläufe vorstellte. Vgl. hierzu bspw. entsprechende historische Anmerkungen in [15].

6 | Eine weitergehende Darstellung eines entsprechenden Ansatzes findet sich bspw. bei [16].

7 | Das im SimRess-Projekt verwendete Simulationsmodell GINFORS ist ein dynamisches Input-Output Modell, das sich durch eine vollständige globale Abdeckung auf Basis eines Multi-Regionalen Input-Output-Datensatzes auszeichnet. Siehe hierzu bspw. [17].

bislang voneinander weitestgehend separierte Forschungszweige prototypisch verkörpern. Die Identifikation der Stärken dieser Modellansätze sowie eine weitergehende Prüfung der Anwendungsmöglichkeiten dieser Modelle im Bereich der Ressourcenpolitik standen im Mittelpunkt dieses Forschungsvorhabens. Das SimRess-Projekt<sup>8</sup> hatte zum Ziel, die potentielle Wirksamkeit von ressourcenpolitischen Maßnahmen zu bewerten. Hierzu hat das Projekt einen systemischen Ansatz gewählt unter Berücksichtigung des internationalen Handels. Die vorliegende Broschüre stellt einige wesentliche Erkenntnisse des Projektes in einer langfristigen Perspektive dar. Damit werden Impulse für die Debatte geliefert, die für die Weiterentwicklung von ProgRess oder gar einer integrierten Klima- und Ressourcenschutzpolitik genutzt werden können und sollen.

Die Notwendigkeit für eine integrierte Analyse komplexer Systeme mitsamt möglicher Rückkopplungen wird gerade im Bereich Ressourcenpolitik deutlich: Bei einem so großen und komplexen System wie der Ressourceninanspruchnahme gibt es eine Vielzahl an Rückkopplungen, Verzögerungen und Steuerungsregeln. Zum Beispiel liegen zwischen jeder Phase der Wertschöpfungskette zeitliche Verzögerungen bzw. Verweildauern der Rohstoffe. So kann beispielsweise ein Rohstoff nur dann rezykliert werden, wenn er aus der Nutzungsphase herausgegeben wird, stofflich überhaupt rezyklierbar ist, die entsprechende Technologie und Anlagen verfügbar sind und schließlich ein Abnehmer für die Sekundärmaterialien gefunden ist. Preise auf internationalen Märkten spielen hier

eine wichtige Rolle. Verzögerungen in einzelnen Phasen können zu Lieferengpässen oder Überangeboten sowie unausgelasteten Kapazitäten führen. Dieses oszillierende Muster aus Überangebot und Übernachfrage beschäftigt jeden Menschen, der in produktionsabhängigen Logistiksystemen zu tun hat und ist hinlänglich als „Schweinezyklus“<sup>9</sup> beschrieben. Die Kunst besteht darin, die starken Schwankungen im System möglichst gering zu halten, was zumeist kontra-intuitive Ansätze erfordert.

Das gesamte Rohstoffsystem ist wesentlich komplexer und umfangreicher als ein vergleichsweise einfaches Produktions- und Logistiksystem eines Produktes. Die linear angelegte Wertschöpfungskette der Ressourceninanspruchnahme kann um Rückkopplungsschleifen erweitert werden (siehe Abbildung 1). Damit wird deutlicher, wo in dem System angesetzt werden müsste, um Änderungen zu bewirken. Die unterschiedlichen Stationen der Wertschöpfungskette (Extraktion, Produktion, Nutzung, Entsorgung/Recycling) sind – ohne das System schon vollständig erfasst zu haben (z.B. sind Logistik, Umweltfolgen, Demographie nicht dargestellt) – in positive und negative Rückkopplungsschleifen eingebettet: Beispielsweise führt mehr Produktion zu mehr Einkommen und somit zu mehr Gewinn, was dazu führt, dass mehr extrahiert und produziert wird. Diese sich selbst verstärkende Schleife würde zu exponentieller Produktion und Gewinn führen, wenn es nicht limitierende Mechanismen gäbe: Je mehr extrahiert wird, desto weniger Ressourcen sind im Lager, desto höher wird der Aufwand der Gewinnung der Rohstoffe, desto geringer wird der

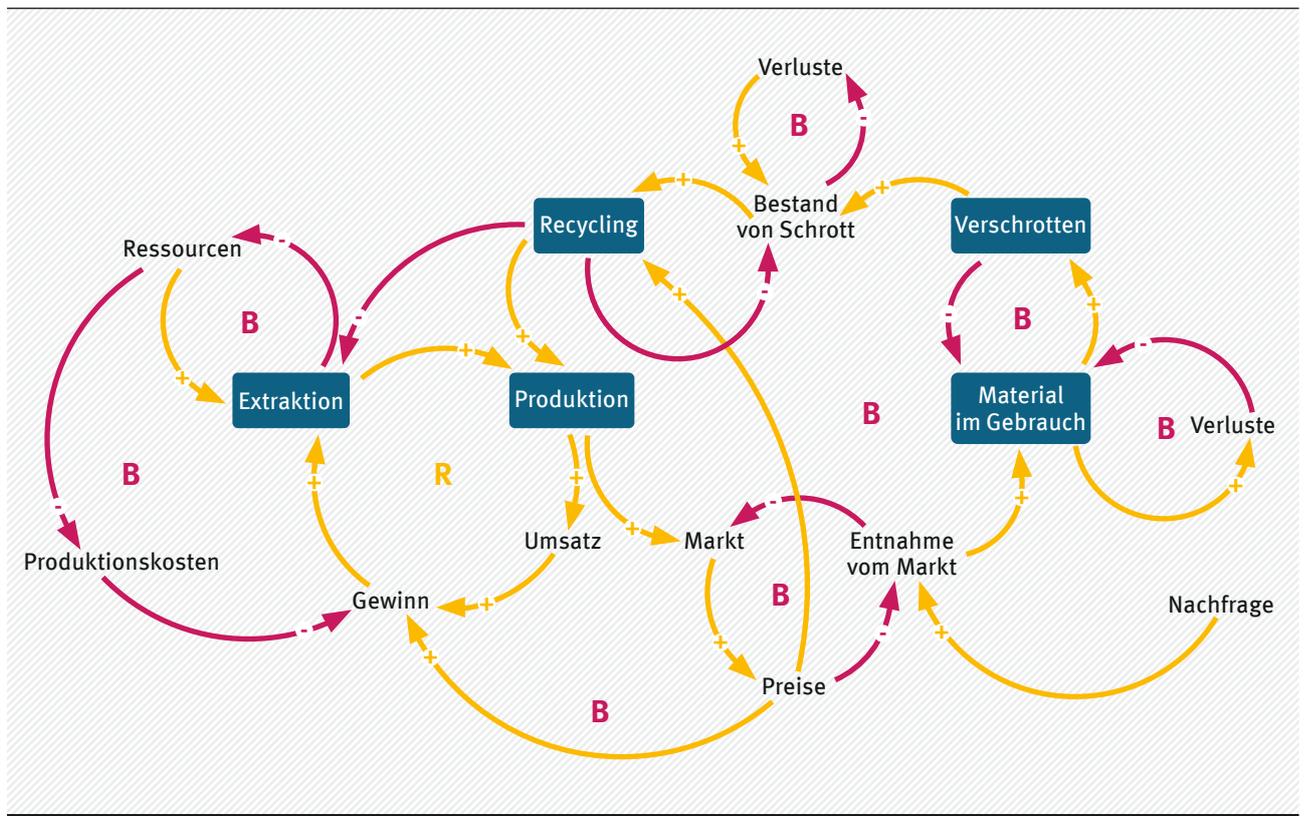
---

8 | Modelle, Potenziale und Langfristszenarien für Ressourceneffizienz; FKZ 3712 93 102.

9 | Der historische Schweinezyklus, der sich circa alle drei bis vier Jahre wiederholt, besteht darin, dass ein Nachfrageüberhang zu hohen Preisen für Schweine führt, was die Landwirte zu verstärkter Zucht veranlasst. Bis diese Schweine auf dem Markt sind, bleiben die Preise hoch. Dann kommen verstärkt die neu gezüchteten Schweine auf den Markt, woraus sich ein relativ plötzlich auftretendes Überangebot und damit fallende Preise ergeben. Diese niedrigen Preise führen jedoch zu geringeren Schweinezuchtzahlen, so dass wieder eine Phase des Nachfrageüberhangs folgt.

Abbildung 1:

## Vereinfachtes Schema der Wertschöpfungskette mit einigen Rückkopplungsschleifen



■ R= Reinforcing/ Selbstverstärkend

■ B= Balancing/ Ausgleichend

■ Phasen der Wertschöpfungskette

Quelle: UBA

Gewinn. So entsteht durch die Kopplung einer positiv eskalierenden mit einer dämpfenden Schleife eine typische Kurvenform, wie schematisch in Abbildung 2 (siehe S.10) illustriert.

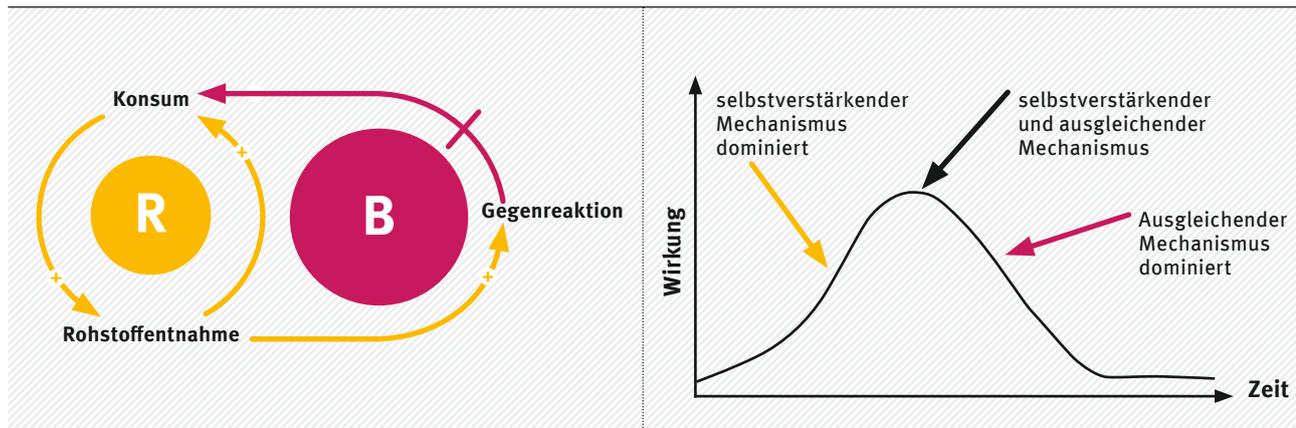
Insgesamt führen die negativen (sich ausgleichend; B = Balancing) und positiven (selbstverstärkend; r = Reinforcing) Rückkopplungen in dem System zumeist dazu, dass die Entwicklungen eines solches Systems kaum oder nur schwer vorhersagbar sind. Vor allen Dingen linear-kausale Interventionen im System können durch Rückkopplungsschleifen ausgeglichen werden. Bekannt ist dieses Phänomen im Zusammenhang mit dem „Rebound-Effekt“, wenn beispielsweise sinkende Preise für Güter durch Effizienzsteigerung in der Produktion dazu führen, dass

mehr von diesen Gütern konsumiert wird.

Ein weiteres aus der Systemanalyse bekanntes Phänomen ist, dass Dynamiken häufig relativ stabil einem typischen Muster folgen. Eine häufig anzutreffende Kurvenform ist die logistische Wachstumsfunktion, in der zunächst ein langsames Wachstum von einer exponentiellen Phase abgelöst wird und dann der Verlauf langsam abflacht (Abbildung 3, S.11). Bemerkenswert ist, dass in der langsamen Anlaufphase eine Erhöhung der Intensität nicht bedeutet, dass die Kurve schneller steigt. Das bedeutet für politische Interventionen, dass trotz ergriffener Maßnahmen scheinbar kaum eine Änderung stattfindet. Der Effekt der Maßnahme tritt erst mit einer Zeitverzögerung ein, je nach Pfadab-

Abbildung 2:

## Schematische Darstellung der Kombination einer „R“ und „B“-Rückkopplungsschleife



■ R= Reinforcing/ Selbstverstärkend    ■ B= Balancing/ Ausgleichend

Quelle: UBA, Archetyp „Limits to growth“, u.a. Senge (2006)22

hängigkeiten und Verzögerungen im System. Das Gleiche gilt zum abflachenden Ende der Kurve, wo es trotz weiterer Anstrengungen keine weiteren Verbesserungen geben wird, wenn nicht die limitierenden Faktoren bearbeitet werden. Ein mögliches Beispiel ist die Einführung von Elektrofahrzeugen: Selbst wenn die Technik theoretisch schon vorhanden ist, müssen die Fahrzeuge gebaut und schließlich auch verkauft werden. Marktanreize zur Steigerung der Nachfrage können nicht zu einer gesteigerten Zahl an Elektrofahrzeugen führen, wenn die Produktion der Fahrzeuge zu langsam ist.

Aus systemischer Perspektive sind also aufgrund von Verzögerungen und Rückkopplungen die Maßnahmen für eine wirksame Ressourcenpolitik sehr sorgfältig zu bestimmen. Je „größer“ und komplexer ein System wird, desto schwieriger wird es, das Verhalten des Systems vorhersagen zu können. Eine lineare Logik ressourcenpolitischer Ansätze entlang der Wertschöpfungskette allein reicht also nicht aus, die

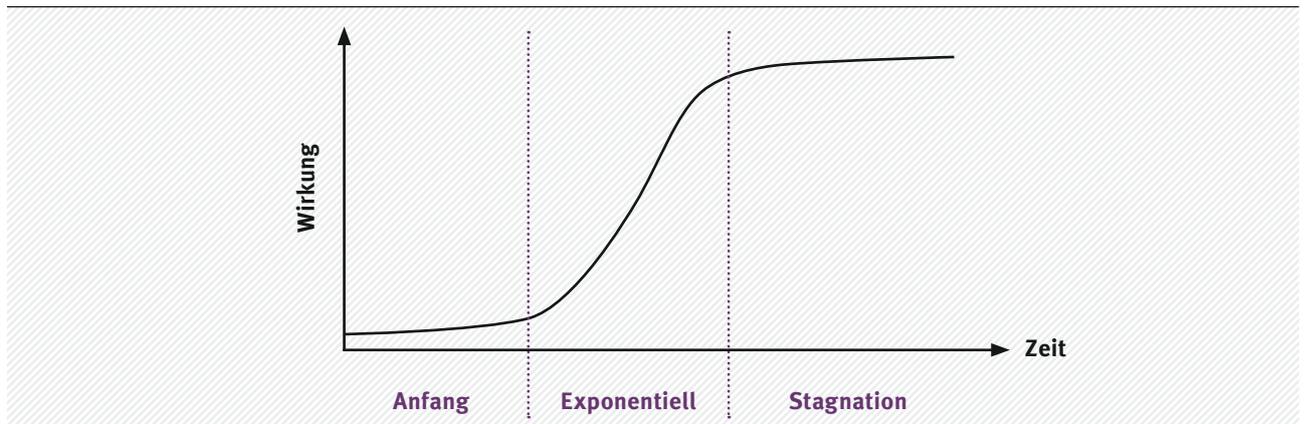
Komplexität der Ressourceneffizienzpolitik zu lösen, um somit letztlich die übergeordneten Ziele der deutschen Ressourceneffizienzpolitik<sup>10</sup> zu erreichen. Aus systemwissenschaftlicher Sicht ist es daher entscheidend, das System zu kennen, welches hinsichtlich eines bestimmten Ziels entwickelt werden soll.

Um Ressourcenpolitik entsprechend gestalten zu können, ist also eine langfristige Systemanalyse unter Berücksichtigung von Ökonomie, Umwelteffekten und möglicherweise sogar gesellschaftlichen Effekten erforderlich. Sie muss Trends und plausible Zukünfte erkennen, mögliche kausale Zusammenhänge zwischen gesellschaftlichen Entwicklungen und Ressourcennutzungen und den ökonomischen Zusammenhängen identifizieren und in ihren Auswirkungen auf die Nutzung natürlicher Ressourcen langfristig abschätzen. Das stellt hohe Anforderungen an die Systemanalyse und an die darauf gegründete Entwicklung, Koordination und Umsetzung von Politikansätzen.

10 | Insbesondere die Ziele aus dem deutschen Ressourceneffizienzprogramm ProgRes II; siehe Fußnote 4.

Abbildung 3:

### Beispielkurve für logistisches Wachstum



Quelle: UBA

Da das Gesamtsystem der Ressourcennutzung Deutschlands nicht an den nationalen Grenzen endet, sondern Verflechtungen und Wechselwirkungen in eine Vielzahl anderer Länder aufweist, benötigt Ressourcenschonungspolitik überdies noch eine supranationale Komponente. Zwar sind Bestrebungen zur Ressourcenschonung sowohl auf europäischer Ebene<sup>11</sup> [19] als auch auf internationaler Ebene<sup>12</sup> verankert,

allerdings sehen sich diese – wie auch die nationale Ressourcenschonungspolitik – Forderungen gegenüber, ambitioniertere Ziele zu setzen und zur Erreichung dieser Ziele einen grundlegenden Systemwandel zu unterstützen, um dadurch eine langfristig tragfähige, global und generationenübergreifend gerechte Ressourcennutzung gestalten zu können [10,20].

11 | Beispielsweise der Aktionsplan der Europäischen Kommission zur Kreislaufwirtschaft vom Dezember 2015 [19].

12 | Insbesondere die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (in Englisch Sustainable Development Goals), darunter allen voran Ziel #12 „Für nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sorgen“ ; aber auch die Prozesse auf Ebene der G7 (z.B. die Ressourceneffizienzallianz; siehe [84]) und der Ressourceneffizienzdialog auf Ebene der G20 (siehe [88]).

# 2 Ansatzpunkte für eine systemische Ressourcenpolitik

## These 1:

### Zukünftige Knappheiten erfordern eine vorausschauende Ressourcenpolitik und können durch Recycling verringert werden

#### Zukunftstechnologien und Rohstoffkritikalität in Deutschland

Alle Fertigungsbranchen des Industriestandorts Deutschland sind auf eine störungsfreie Versorgung mit Rohstoffen angewiesen. Gerade Zukunftstechnologien, einschließlich der Umwelttechnologien, bedürfen meist einer großen Anzahl unterschiedlicher Rohstoffe [21, 22]. Relevante Zukunftstechnologien umfassen u.a. Elektromotoren und Brennstoffzellenfahrzeuge, Leichtbau, Dünnschicht-Solarzellen, Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher, 3-D-Drucker und Hochleistungs-Permanentmagnete [23, 24, 25]. Insbesondere bei Metallen ist Deutschland jedoch fast vollständig von Importen abhängig, in vielen Fällen aus einigen wenigen Weltregionen bzw. Ländern [26]<sup>13</sup>. Das bringt nicht nur geopolitische, sondern im Falle volatiler Preise auch ökonomische Herausforderungen für eine sichere, störungsfreie und wirtschaftliche Rohstoffversorgung mit sich [27, 28, 29]. Langfristig ist von einer Zunahme ökonomischer Knappheiten bzw. von eingeschränkten Verfügbarkeiten auszugehen – das meint Situationen, in denen das Rohstoffangebot aufgrund von u.a. Geopolitik, Marktmonopolen, Preisentwicklungen oder Streiks den Bedarf nicht befriedigen kann [30].

Solche potentiellen Preis-, Versorgungs- und Lieferrisiken schränken die langfristige

Planungssicherheit der Rohstoffbeschaffung ein [31]. Sie werden über die sogenannte „Rohstoffkritikalität“ abgebildet. Neben den potentiellen Risiken nimmt die Rohstoffkritikalität auch die Verwundbarkeit „eines Systems (z.B. Unternehmen, Branche, Volkswirtschaft, globale Gesellschaft) gegenüber einer Versorgungsstörung“ in den Blick [24, S. 11]. Die Verwundbarkeit resultiert u.a. daraus, dass marktbeherrschende Rohstoffanbieter den Wettbewerb verzerren können, damit Marktakteure verunsichern und letztlich die Preise beeinflussen [31]. Erschwerend kommen mögliche Risiken struktureller Knappheiten hinzu, weil viele Metalle sogenannte Nebenmetalle sind, die beim Abbau anderer Trägermetalle (oftmals Basismetalle wie Aluminium, Blei und Kupfer) mit anfallen, da sie in den Erzen der anderen Metalle enthalten sind. Diese Metalle werden erst dann isoliert, wenn es sich ökonomisch lohnt; ihr Abbau beträgt jedoch häufig nur einen kleinen Anteil am Einkommen von Abbauunternehmen. Daher führen Anstiege der Marktpreise der Nebenmetalle nicht unbedingt zu mehr Abbau der Trägermetalle und die Versorgung mit den Nebenmetallen wird von der Abbaurate der Trägermetalle limitiert [30].

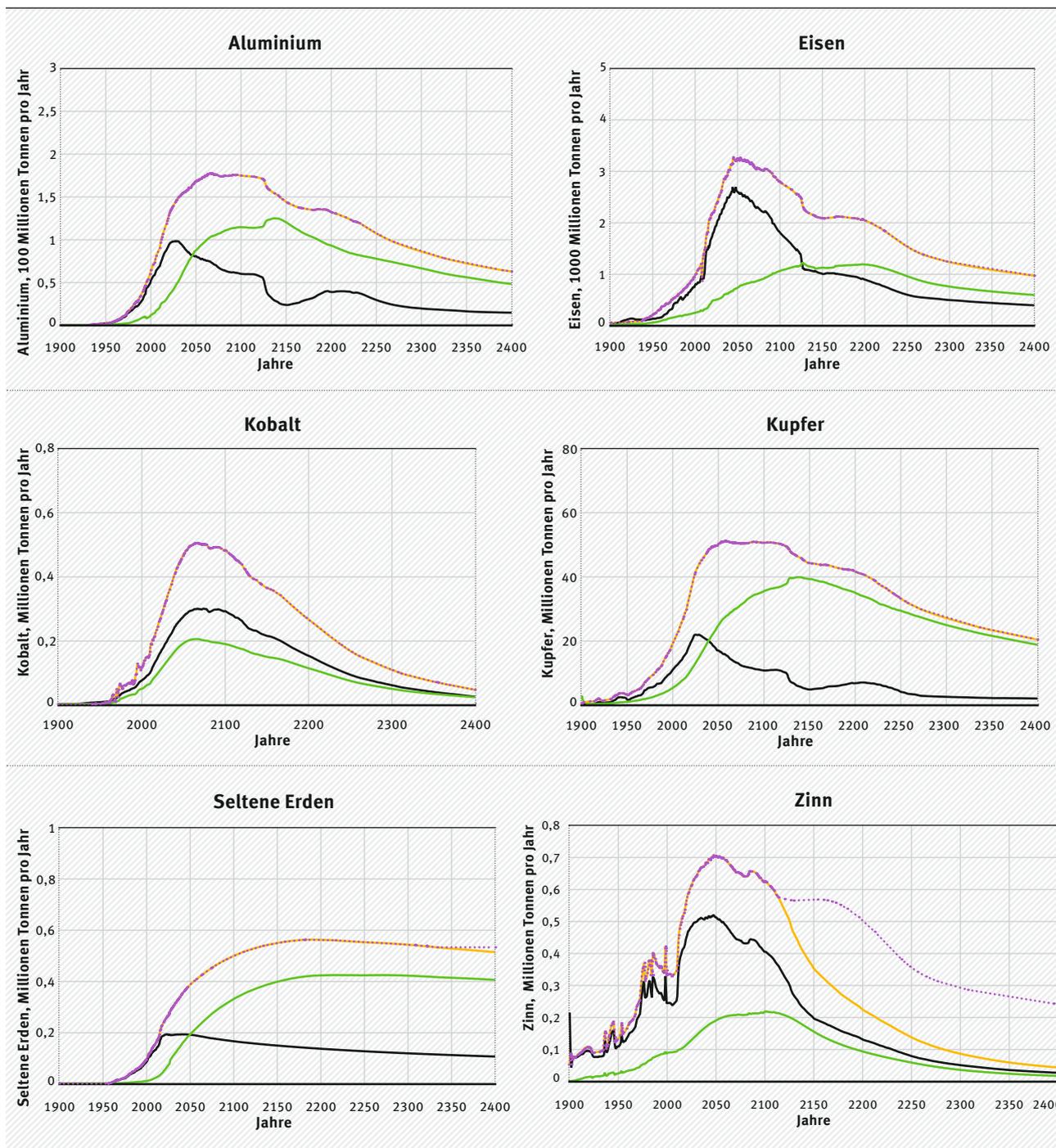
Rohstoffe, die mit Blick auf Zukunftstechnologien für die deutsche Wirtschaft kritisch sind, umfassen u.a.<sup>14</sup>

13 | Eisenerz wird überwiegend aus Brasilien, aber auch aus Kanada und Schweden importiert; Bauxit (für die Aluminiumproduktion) fast ausschließlich aus Guinea; Kupfer überwiegend aus Peru, Chile und Brasilien; Gold zu einem großen Teil aus der Schweiz; Silbererz insbesondere aus Mexiko; Metalle der Seltenen Erden größtenteils aus China und Lithium vorwiegend aus Chile [26].

14 | Die vollständige Liste der kritischen Rohstoffe kann in Marscheider-Weidemann et al. (2016) [24] sowie ergänzend in Brandenburg et al. (2017) [31] eingesehen werden.

Abbildung 4:

**Angebot, Extraktion, Nachfrage und Recyclingrohstoffmengen für verschiedene Metalle: Aluminium, Eisen, Kobalt, Kupfer, Seltene Erden und Zinn**



■ Nachfrage zum Gleichgewichtspreis     
 ■ Angebot     
 ■ Extraktion     
 ■ Rezykliert

Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Koca und Sverdrup 2018 [32]

- ▶ die Stahlveredler Niob und Kobalt,
- ▶ die Sondermetalle
- ▶ schwere und leichte Seltene Erden sowie Tantal,
- ▶ das Industriemineral Lithium,
- ▶ die Edelmetalle Platin und Palladium
- ▶ und die Raffinadeprodukte Indium und Zinn.

Forschungsergebnisse lassen darauf schließen, dass der zukünftige Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien nicht nur wesentlich über dem heutigen Bedarf liegen könnte, sondern für einzelne Rohstoffe auch deutlich über der heutigen Produktionsmenge. So wird angenommen, dass

- ▶ der Bedarf an Lithium im Jahre 2035 die Produktionsmenge im Jahre 2013 (als Vergleichswert) um fast das Vierfache sowie für Seltene Erden um das ca. Zwei- bis Dreifache übersteigen könnte [25];
- ▶ die Nachfrage nach verschiedenen Metallen (u.a. Aluminium, Chrom, Eisen, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Zink und Zinn) bis zum Jahre 2050 etwa das Zwei- bis Dreifache des heutigen Verbrauchs betragen könnte (für Seltene Erden und Silizium sogar fast das Vierfache) [32].

Die Ergebnisse der Modellsimulationen mit dem WORLD6-Modell<sup>15</sup> [33] in Abbildung 4 zeigen Tendenzen, ab wann für verschiedene Rohstoffe Versorgungsrisiken zu erwarten sind und wie weit Recycling das Versorgungsrisiko abmildern bzw. in die Zukunft verschieben könnte. Anhand der Simulationsergebnisse<sup>16</sup>

erscheinen Versorgungsengpässe möglich, da in den Kurvenverläufen die Nachfrage

- ▶ bei Aluminium, Eisen, Kobalt, Kupfer und Metallen der Seltenen Erden bereits ab ca. 2025,
- ▶ bei Zinn ab etwa 2050 und
- ▶ bei Lithium ab etwa 2100

das verfügbare Angebot (aus Extraktion und Recycling) übersteigt. Setzt man im WORLD6-Modell die Nachfrage in Relation zum allein aus Extraktion verfügbaren Angebot (ohne Recycling), dann gehen die Kurvenverläufe z.T. früher auseinander, beispielsweise bei Zinn um 2025 und bei Lithium ab 2050.

### **Der Einfluss der Nachfrageentwicklung auf die zukünftige Verfügbarkeit von Rohstoffen**

Wie kritisch diese Rohstoffe mittel- bis langfristig tatsächlich sind, hängt wesentlich von der Entwicklung der Nachfrage ab. Die Nachfrage wird hauptsächlich durch die Bevölkerungsentwicklung<sup>17</sup> (und dem damit verbundenen Bedarf an Infrastrukturen, Produkten und Dienstleistungen), das Konsumniveau und Technologietrends beeinflusst [34, 35]. Nachfragebedingte Steigerungen der Rohstoffpreise können wiederum zu neuen Rohstofferschließungen führen, denn absolute Versorgungsengpässe für Metallrohstoffe und Industriemineralien (geologische Knappheit) sind infolge der hohen geologischen Verfügbarkeit (abgesehen von wenigen Ausnahmen wie konventionelles Erdöl) bisher

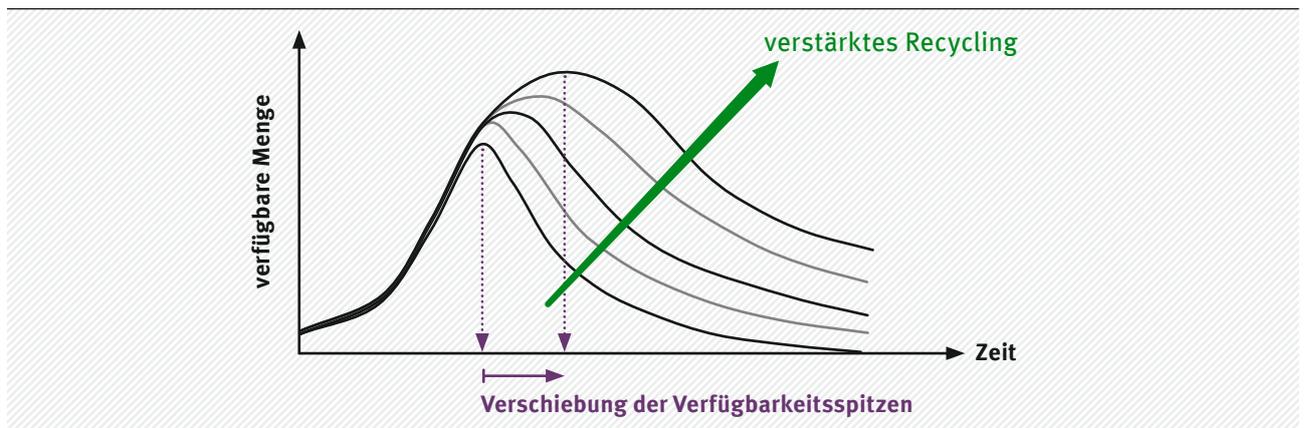
15 | Für eine umfassende Modellbeschreibung siehe [33]

16 | In ökonomischen Modellen fallen Angebot und Nachfrage preisgetrieben zusammen. Dies ist auch in WORLD6 der Fall. Gleichzeitig wird jedoch die Nachfrage vor der Preisbeschränkung dargestellt. D.h. die Käufer haben einen bestimmten Bedarf und ein Preisgebot, welche sie an der Londoner Metallbörse den Verkäufern bieten. Dieser „theoretische“ Bedarf wird aufgrund eines höher angesetzten Preises durch die Verkäufer nicht gesättigt. Der schließlich realisierte Handel (zum Gleichgewichtspreis auf den sich Käufer und Verkäufer einigen) wird durch die Kurve „angepasste Nachfrage“ dargestellt. Die WORLD6-Modellierer sprechen bei der Differenz von „soft scarcity“ bzw. von ökonomischer Knappheit.

17 | Der Anstieg der Ressourceninanspruchnahme resultiert nicht nur aus der Tatsache, dass um 2050 bis zu 3 Milliarden mehr Menschen auf der Erde leben könnten als heute, sondern insbesondere auch aus der Annahme, dass die globale Mittelschicht um bis zu 3 Milliarden Menschen bis 2050 zunehmen wird, insbesondere in Asien, was einen entsprechenden Bedarf an Rohstoffen mit sich bringt [2, 28].

Abbildung 5:

## Schematische Darstellung der Effekte verstärkten Recyclings



Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Koca und Sverdrup 2018 [32]

unwahrscheinlich [31, 36].<sup>18</sup> Nachfrage und Preisentwicklungen beeinflussen auch stark die Handlungsoptionen gegen Lieferengpässe.

### Chancen durch Recycling

Recycling ist eine Kernmaßnahme, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Abbildung 5 zeigt schematisch wie Rohstoffknappheiten durch verstärktes Recycling weiter in die Zukunft verschoben werden könnten.

Recycling reduziert den Bedarf an Primärrohstoffentnahme im In- und Ausland und die damit verbundenen Umweltauswirkungen auf Wasser, Böden, Biodiversität und Fläche [34; vgl. 37, 38, 39, 40]. Auch der Energiebedarf für die Produktion von Sekundärrohstoffen ist gegenüber dem für die Primärrohstoffproduktion in vielen Fällen geringer: so wird für die Produktion von Sekundär-Aluminium bis zu 97% weniger Energie benötigt als für Primär-Aluminium, für Kupfer bis zu 88% und für Stahl bis zu 75% [34]. Über einen verringerten Energiebedarf ermöglicht verstärktes Recycling daher, indirekt CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken [2, 34].

Darüber hinaus reduziert die heimische Sekundärrohstoffwirtschaft Importabhängigkeiten und minimiert Lieferrisiken. Die inländische Wertschöpfung wird gesteigert und Jobs werden geschaffen, beispielsweise in den Bereichen Sammlung und Transport (hier sind 85% der in der Branche Beschäftigten aktiv), sowie in der Aufbereitung und Sortierung (ca. 9% der Beschäftigten in der Branche) [35, 41, 42, 43; vgl. 31]. Mit einem weiteren Ausbau der Sekundärrohstoffwirtschaft könnten bis zum Jahre 2030 bis zu etwa 290.000 neue Arbeitsplätze entstehen, vor allem im Bereich des sogenannten Remanufacturing (insbesondere Reparatur und Aufbereitung zur Wiederverwendung) [42]. Das tatsächlich realisierbare Potential von Recycling zu Ressourcenschonung und Minderung von Knappheiten beizutragen, hängt von den Infrastrukturen und der Nachfrageentwicklung ab.

18 | Eine andere Sichtweise bezieht die geologische Verfügbarkeit der Metalle auf deren gegenwärtige Entnahmeraten ein und betrachtet es als möglich, dass die Nachfrage nach einzelnen Metallen im Jahre 2050 deren geologische Verfügbarkeit übersteigt, u.a. für Antimon, Gold und Zink [30, 32].

## **Einfluss von (technischen und institutionellen) Infrastrukturen auf das Recyclingpotential**

Verstärktes Recycling kann nur dann zu einer gesteigerten Nutzung von Sekundärrohstoffen und einem Anstieg der Versorgungssicherheit beitragen „wenn das Versorgungsrisiko des Sekundärrohstoffs kleiner ist als das des Primärrohstoffs“ [44, S. 19]. Sollen künftig größere Anteile der Rohstoffbedarfe über Sekundärrohstoffe gedeckt werden, so müssen diese langfristig zur Verfügung stehen. Dazu müssen adäquate Infrastrukturen geschaffen werden, damit die Sekundärrohstoffe aus dem anthropogenen Lager (aus Produktionsprozessen, (Alt-)Produkten sowie aus Infrastruktur- und Gebäudebeständen) auch erfasst, aufbereitet bzw. rezykliert und in entsprechender Menge und Qualität in die Wirtschaftsprozesse zurückgeführt werden können [31, 35, 41, 43]. Andernfalls besteht das Risiko einer Unterversorgung mit Sekundärrohstoffen, wodurch weniger Primärrohstoffe substituiert werden können.

Ein weiterer zeitnaher Ausbau der Sekundärrohstoffwirtschaft, um zukünftig benötigte Rohstoffmengen bereitstellen zu können, erfordert vorausschauende Planung und Investitionsbereitschaft auf Seiten staatlicher Akteure und der Recyclingbranche sowie eine enge Abstimmung zwischen diesen Akteuren. Ein solcher Ausbau erscheint plausibel, wenn man die Marktentwicklung der Sekundärrohstoffbranche in Deutschland betrachtet. Diese zeigt über die letzten Jahre und Jahrzehnte kontinuierliche Wachstumstendenzen, sowohl mit Blick auf Umsatzsteigerungen (der Umsatz stieg von 1995 bis 2009 um mehr als das Fünffache an) als auch bezüglich des Gesamteinsatzes von Sekundärrohstoffen, der von ca. 2,5% im Jahr 1995 auf über 13% im Jahr 2009

zugenommen hat [41]. Weiterhin wird bis zum Jahre 2025 ein Anstieg des Marktvolumens in der deutschen Recyclingwirtschaft um 9 Milliarden EUR (gegenüber 2011) auf ca. 25 Milliarden EUR prognostiziert [vgl. 41].

Darüber hinaus deuten auch die Preisentwicklungen (Zunahme der Preisvolatilitäten) an internationalen Rohstoffmärkten der letzten Jahre an, dass sich Investitionen in den Ausbau der Sekundärrohstoffwirtschaft bezahlt machen können, da Sekundärrohstoffpreise bei steigenden Primärrohstoffpreisen konkurrenzfähiger werden und damit den finanziellen Gewinn aus Recycling beeinflussen [35, 41].<sup>19</sup>

Ein zukünftiger Preisanstieg vieler Rohstoffe ist angesichts des erwarteten Bevölkerungswachstums und steigender Wohlstandsniveaus zumindest plausibel, starke Volatilitäten weiterhin höchst wahrscheinlich. In diesem Umfeld scheint es denkbar, dass Sekundärrohstoffe zukünftig noch wettbewerbsfähiger werden. Dies gilt umso mehr, wenn Umwelt- und Sozialstandards in der Primärrohstoffgewinnung stärker berücksichtigt werden, wie verstärkt durch Abnehmerländer eingefordert. Das könnte einen Anstieg der Produktionskosten für Primärrohstoffe bewirken, Sekundärrohstoffe würden in der Folge konkurrenzfähiger.

## **Modellierung potentieller Effekte von Recyclingszenarien**

Um mögliche Effekte verstärkten Recyclings auf Knappheitsrisiken beispielhaft abschätzen zu können, wurden im SimRess-Projekt ressourcenpolitische Ansätze zur Steigerung des Recyclings als grobe Politiksznarien im globalen systemdynamischen Model WORLD6

---

19 | Hierbei sei angemerkt, dass sich über die Preisentwicklungen bei Rohstoffen keine pauschalen Aussagen treffen lassen. In Folge der Wirtschafts- und Finanzkrise 2008 fielen die Preise für viele Rohstoffe teils dramatisch, gleichzeitig stiegen die Preise beispielsweise für Gold an, die von Anlegern vermutlich als „sichere“ Anlage verstanden wurden. In den Folgejahren stiegen die Preise teils wieder zügig an, sanken aber in den vergangenen Jahren relativ kontinuierlich und scheinen seit zwei Jahren wieder zu steigen (z.B. Kupfer, Aluminium).

umgesetzt. Diese wurden dann bezüglich ihrer potentiellen Wirkungen auf die Verfügbarkeit von Kupfer und Indium im Vergleich zu einem Szenario ohne entsprechende politische Ansätze (Business-as-usual, BAU) simuliert (Abbildung 6; siehe dazu [33]).

Wenngleich die Umsetzung im globalen Model keine instrumentenscharfe Simulation von Einzelinstrumenten erfordert<sup>20</sup> (siehe dazu [32]), so ist in der Tendenz aus den simulierten Kurvenverläufen doch erkennbar, dass sowohl für Kupfer als auch für Indium die aus Recycling gewonnenen Mengen ansteigen: für Indium deutlich (Anstieg um fast 200% bis 2150 im Vergleich zum BAU) und für Kupfer in geringem Maße (Anstieg um etwa 5% bis 2150 im Vergleich zum BAU), da Kupferrecycling heute bereits ein hohes Niveau aufweist (im Jahre

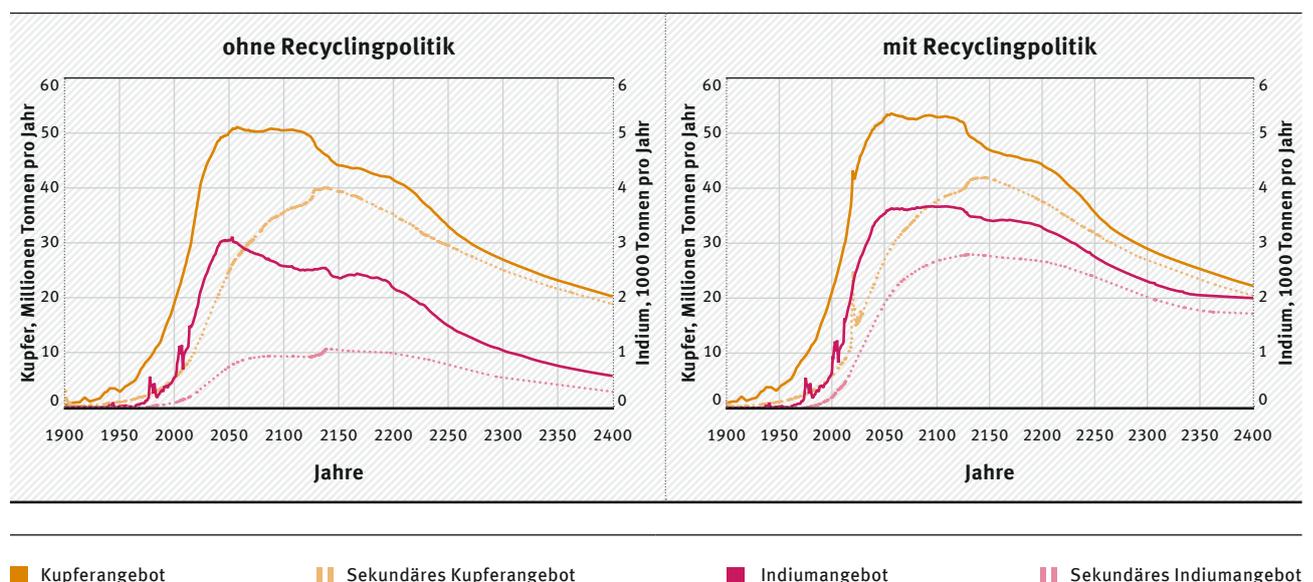
2010 wurden ca. 35% der global verwendeten Kupfermengen von etwa 24 Millionen Tonnen über Recyclingkupfer gedeckt [45]). Gleichzeitig deuten die Simulationsergebnisse darauf hin, dass die Verfügbarkeit von Recyclingmengen für beide hier dargestellten Rohstoffe langfristig (bis über das Jahr 2200 hinaus) steigt. Damit verdeutlichen die Simulationsergebnisse auch, dass Ressourcenpolitikmaßnahmen oftmals (erst) langfristig Wirkung entfalten.

### Grenzen der Ausweitung des Recyclings

Als begrenzendes Moment kommt hinzu, dass viele Rohstoffe beim Einsatz als Baumaterialien in Infrastrukturen (z.B. Aluminium, Eisen und Kupfer) z.T. über mehrere Jahrzehnte festgelegt sind und der Sekundärrohstoffwirtschaft daher erst mit deutlicher Zeitverzögerung wieder zur Verfügung stehen [31].

Abbildung 6:

## Vergleich des langfristigen Primär- und Sekundärangebots an Kupfer und Indium mit und ohne Recyclingpolitik



Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Koca und Sverdrup 2018 [33]

20 | Um Tendenzen in der Rohstoffverfügbarkeit abschätzen zu können, wurden die beiden Ansätze in den Politikenszenarien lediglich grob formuliert: (1) in einem Fall wurde von einem starken ökonomischen Anreiz für mehr Recycling ausgegangen, beispielsweise durch Primärrohstoffbesteuerung; (2) im anderen Fall wurde das Recycling von Produkten und Infrastrukturen, welche die beiden vorgenannten Rohstoffe enthalten, verpflichtend vorgeschrieben (siehe [33]).

So war im Jahr 2010 nach Berechnungen zum anthropogenen Lager Deutschlands (Hochbau, Tiefbau, Haustechnik sowie Kapital- und Konsumgüter) ein Bestand von ca. 26 Milliarden Tonnen mineralischen Baustoffen und ca. 1,2 Milliarden Tonnen Metalle enthalten [43]. Der Anteil an Sekundärrohstoffen war insgesamt eher gering – beispielhaft betrug der Recyclinganteil im Hochbau 10% [43]. In einer globalen Perspektive kommen zusätzlich noch die sich abzeichnenden Infrastrukturentwicklungen hinzu, insbesondere in Asien, die mittelfristig große Rohstoffmengen benötigen dürften und diese dann auch langfristig binden.

*„Solange die Weltwirtschaft wächst und der Großteil des neuen Rohstoffbedarfs für den Infrastrukturaufbau in aufstrebenden Industrienationen wie China oder Indien eingesetzt wird, wird sich der mögliche Recyclinganteil am Gesamtbedarf weiterhin in Grenzen halten.“ [31, S. 32]*

In Verbindung mit den Gesetzen der Thermodynamik, nach denen auch bei einer maximalen Kreislaufführung von Rohstoffen niemals 100% geschlossene Zyklen möglich sein werden (nicht einmal bei Metallen [vgl. 2, 35]), wird

deutlich, dass verstärktes Recycling den Anteil an benötigter Primärrohstoffproduktion zwar verringern, nicht aber gänzlich ersetzen kann.

Aus den Simulationsergebnissen wird deutlich, dass ein politisches Gegensteuern langfristig zielführend und erforderlich ist. Wie am Beispiel Recycling dargestellt, haben die Politikstrategien Folgen für die unterschiedlichsten Politikbereiche. So sollte verstärktes Recycling im Kontext von Ressourcenschonung und Versorgungssicherheit Kernbestandteil einer langfristig ausgerichteten Ressourcenpolitik sein; gleichzeitig sollten Ansätze verfolgt werden, die möglichen Rebound-Effekten entgegenwirken. In diesem Zusammenhang könnten sich strategische Politikmixe als hilfreich erweisen, die über weiche Instrumente hinausgehend auch harte Instrumente umfassen. So kann mittels weicher Instrumente die Umsetzungswahrscheinlichkeit für harte Instrumente längerfristig erhöht und damit langfristige Zielstellungen bei Maximierung von Synergieeffekten zwischen den unterschiedlichen Instrumenten erreicht werden [3, 46]. Diesem Zusammenhang widmet sich die folgende These.



## These 2:

### Eine systemisch und langfristig ausgerichtete Ressourcenpolitik muss über Effizienzorientierung hinausgehen

#### Ausrichtung und politische Instrumente der deutschen Ressourcenpolitik

Die Ressourcenpolitik in Deutschland ist schwerpunktmäßig auf Steigerungen der Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette, vom Rohstoffabbau über Produktion und Konsum bis zu einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft, ausgerichtet [12]. Dazu kann sie auf eine Vielzahl unterschiedlicher umweltpolitischer Instrumente zurückgreifen: während im ersten deutschen Ressourceneffizienzprogramm ProgRess (Progress I) informationsbasierte Instrumente und die Stärkung freiwilliger Maßnahmen in Wirtschaft und Gesellschaft im Zentrum standen, wird in ProgRess II ergänzend auch ökonomischen Instrumenten zunehmend Bedeutung zugemessen [12, 47]. Informationsbasierte Instrumente gelten i.d.R. als weniger wirksam im Vergleich zu ökonomischen und ordnungspolitischen Instrumenten, da erstere auf Kommunikation, Appelle, Wissensvermittlung, Überzeugungsarbeit und Freiwilligkeit setzen, um nachhaltiges Handeln bei den Politikadressaten auszulösen. Letztere hingegen arbeiten mit Ge- und Verboten bzw. mit (positiven und negativen) Anreizen, um ermöglichende Rahmen- und Rechtsetzungen sowie auch Zwang zu schaffen [48, 49, 50]. Daher werden informationsbasierte Instrumente auch als „weiche“ Instrumente bezeichnet, ökonomische und ordnungspolitische Instrumente demgegenüber als „harte“.

Die Wirksamkeit „weicher“ Maßnahmen ist nicht nur umstritten, sondern variiert auch stark von Fall zu Fall, da hier kontextuelle Faktoren

(wie z.B. Verständlichkeit und Relevanz der Informationen in Bezug auf die Lebenswelten unterschiedlicher Zielgruppen; Verarbeitungskapazitäten der Informationsempfängenden; Praktiken, Routinen und Normen im sozialen Umfeld) deutlich stärker Einfluss ausüben als das bei ökonomischen und insbesondere bei ordnungsrechtlichen Instrumenten der Fall ist [51,52,53,54]. Aber auch innerhalb der „harten“ Maßnahmen gibt es unterschiedliche Ansichten über die Wirksamkeit der Instrumente. Sowohl ökonomische als auch ordnungsrechtliche Instrumente werden als geeignete Auslöser für Innovation bei handelnden Akteuren angesehen, um bestehende umweltpolitische Ziele zu erreichen. Während ökonomische Instrumente den handelnden Akteuren i.d.R. größeren Handlungs- und Entscheidungsspielraum ermöglichen, geforderte Verminderungen von Umweltbelastungen im Rahmen ihres jeweiligen technologischen, sozio-ökonomischen und institutionellen Kontexts so kosteneffizient wie möglich zu erreichen [49, 55], wird bei ordnungspolitischen Instrumenten der Vorteil gesehen, dass sie in einigen Fällen höhere Investitionen in umweltbezogene Forschung und Entwicklung auslösen [56]. Darüber hinaus ist die Eingriffstiefe bei ökonomischen Instrumenten geringer und die Überwachung i.d.R. einfacher und weniger aufwändig als bei ordnungspolitischen Instrumenten [49, 55].

Diese Überlegungen zeigen, dass neben die Frage nach der Wirksamkeit im Sinne der ökologischen Lenkungswirkung noch die Fragen nach den (Transaktions- und Verwaltungs-)Kosten

sowie zur politischen Durchführbarkeit treten müssen. So lassen sich verschiedene Gründe dafür finden, dass „harte“ Instrumente, und insbesondere ordnungspolitische, nur in begrenztem Maß zum Einsatz kommen: tatsächlicher oder antizipierter politischer bzw. gesellschaftlicher Widerstand (beispielsweise ausgedrückt durch Abwanderungsdrohungen von Unternehmen); juristische, administrative und/oder praktische Vollzugshürden; mitunter sehr hohe Legitimationserfordernisse bei der Begründung, warum gesetzgeberisch in Lebensstile Einzelner eingegriffen werden sollte.

Das macht deutlich, dass eine langfristige effektive Ressourcenschonungspolitik ökologisch wirksame und auch mit Blick auf Wettbewerbsfähigkeit und Sozialverträglichkeit geeignete Instrumente ergreifen und somit „weiche“ und „harte“ Instrumente in Politikmischen kombinieren sollte [46, 57, 58, 59, 60]. Zwar erweitert die nationale Ressourcenpolitik das ressourcenpolitische Instrumentarium in ProgRes II zunehmend um ökonomische Instrumente<sup>21</sup> (Marktanreize); ordnungspolitische Instrumente hingegen finden sich hier kaum<sup>22</sup> [12]. Eine stärkere Nutzung harter Instrumente erscheint daher wichtig, um ambitionierte ressourcenpolitische Ziele zu erreichen. In diesem Zusammenhang stellt sich damit dann auch die Frage nach der Ausrichtung der Ressourcenpolitik und ob über Effizienzsteigerungen entlang der Wertschöpfungskette hinausgehend auch Veränderungen an Strukturen und Verhaltensweisen adressiert bzw. unterstützt werden sollen.

## Mögliche Effekte unterschiedlicher ressourcenpolitischer Ausrichtungen

In einem EU-Forschungsprojekt wurde jüngst ein umfassender klima- und ressourcenpolitischer Politikmix im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf Wirtschaft und Umwelt unter Berücksichtigung möglicher Rebound-Effekte analysiert [17]. Der Politikmix war darauf ausgerichtet, sowohl Produktionstechnologien ressourceneffizienter zu gestalten als auch strukturelle Veränderungen in der Produktion sowie in Verhaltensweisen von Konsumentinnen und Konsumenten auszulösen. Die zentralen Aussagen dieser Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Bei der Umsetzung eines umfassenden Instrumentariums, das ökonomische, ordnungsrechtliche und „weiche“ Elemente umfasst und deren jeweilige Ausgestaltung deutliche Lenkungswirkungen intendiert, sowie die Verantwortung von Produzenten und Konsumenten adressiert, scheint es möglich, die klima- und ressourcenpolitischen Ziele der EU [61, 62] zu erreichen
2. Der dadurch hervorgerufene Strukturwandel zeigt Gewinner und Verlierer (sektoral, regional). Insgesamt ist jedoch mit deutlich positiven Wirkungen auf die europäische Wirtschaft zu rechnen.

Im SimRes-Projekt wurde mittels ex-ante Abschätzungen im Simulationsmodell GINFORS<sub>3</sub> untersucht, wie sich unterschiedlich umfangreiche Effizienzsteigerungen in rohstoffintensiven Sektoren auf Rohstoffin-

---

21 | Beispielsweise die stärkere Berücksichtigung von EMAS bzw. ISO 50001 zertifizierten Unternehmen bei Förderprogrammen und in der öffentlichen Beschaffung [12].

22 | Die Ergänzung von Vorgaben zum Ressourcenschutz in der öffentlichen Beschaffung von Standardprodukten könnte ggf. hierunter gefasst werden [12].

Tabelle 1

## Annahmen der Simulationsexperimente in SimRes

Moderate Transformation	Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ für die 50 rohstoffintensivsten der insgesamt rund 1600 im GINFORS Modell abgebildeten Produktionstechnologien wird ein zusätzlicher jährlicher Effizienzfortschritt in Höhe von 1,5% erreicht</li> <li>▶ die Effizienzfortschritte werden zuerst in der deutschen Wirtschaft erreicht. Produzenten in anderen Ländern/Regionen folgen mit einem zeitlichen Verzug von zwei (in anderen EU-Ländern), fünf (außereuropäische Industrieländer) oder zehn Jahren</li> </ul>
Mittlere Transformation	Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ für die 75 rohstoffintensivsten der insgesamt rund 1600 im GINFORS Modell abgebildeten Produktionstechnologien wird ein zusätzlicher jährlicher Effizienzfortschritt in Höhe von 2,0% erreicht</li> <li>▶ die Effizienzfortschritte werden zuerst in der deutschen Wirtschaft erreicht. Produzenten in anderen Ländern/Regionen folgen mit einem zeitlichen Verzug von einem (in anderen EU-Ländern), drei (außer-europäische Industrieländer) oder fünf Jahren</li> </ul>
Große Transformation	Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ für die 100 rohstoffintensivsten der insgesamt rund 1600 im GINFORS Modell abgebildeten Produktionstechnologien wird ein zusätzlicher jährlicher Effizienzfortschritt in Höhe von 2,5% erreicht</li> <li>▶ die Effizienzfortschritte werden simultan auf der ganzen Welt erreicht</li> </ul>
Moderate, mittl. & gr. Transformation	Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ die (einmaligen) Initialkosten für die (dauerhaften) Effizienzfortschritte belaufen sich auf das Fünffache der erzielten Ersparnis eines Jahres und umfassen Kosten für Beratungsleistungen, für Forschung &amp; Entwicklung und für Investitionen</li> </ul>

Quelle: [5]

anspruchnahme und Wirtschaftsleistung auswirken.

In drei alternativen Simulationsexperimenten (siehe Tabelle 1) wurden ausgehend von einem Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“<sup>23</sup> unterschiedlich hoch ausfallende, zusätzliche produktionsseitige Effizienzgewinne angenommen. Dabei wird als Grundannahme davon ausgegangen, dass die produktionsseitigen Effizienzsteigerungen von einer nationalen Ressourcenpolitik unterstützt bzw. durch diese erleichtert werden, deren Fokus (ähnlich wie Progress I + II) schwerpunktmäßig auf der Ver-

besserung der Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette liegt [5; siehe auch 63].

Zur Einordnung der jeweiligen Befunde ist es dabei wichtig festzuhalten, dass diese Simulationsexperimente als eine Abschätzung der maximal denkbaren ressourcenpolitischen Effekte bei umfassenden gesamtwirtschaftlichen Steigerungen der Ressourceneffizienz in der Produktion zu interpretieren sind. Die technische Realisierbarkeit von Umfang und Tempo der simulierten Effizienzfortschritte konnte im Verlauf des Sim-Res-Projekts nicht weiter geprüft werden und sollte daher auch nicht

23 | Im Laufe des SimRes-Projekts wurden zwei Referenzszenarien entwickelt und verwendet: ein Business-as-usual (BAU) Szenario „Industrieland Deutschland“ und ein darauf basierendes Szenario „Klimaaktives Deutschland“, was das BAU-Szenario im Hinblick auf stärkeres Engagement im Klimaschutz auf nationaler und internationaler Ebene erweitert. Eine kurze Beschreibung der zwei in SimRes verwendeten Referenzszenarien sowie der ihnen zugrundeliegenden Annahmen ist in Tabelle 2, S. 22 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [5]. Vor dem Hintergrund der internationalen klimapolitischen Entwicklungen mit und seit der Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention in Paris im Dezember 2015 wurde das Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ als das plausibelste angenommen und daher für den Vergleich mit den Simulationsexperimenten genutzt.

## Annahmen der in SimRes verwendeten Referenzszenarien

Referenzszenario „Industrieland Deutschland“ („Business as usual“)	Annahmen
„Klimaaktives Deutschland“ (Szenario ambitionierterer Klimapolitik)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Anstieg der Weltbevölkerung bis 2050 auf 8,7 Milliarden (gemäß UN 2015 [low variant])</li> <li>▶ Von 2020 bis 2050 Anstieg der Weltmarktpreise für Kohle um 15%, Öl um 22% und Gas um 19% (gemäß IEA 2015 [4DS-Szenario])</li> <li>▶ Von 2020 bis 2050 Anstieg der Weltmarktpreise für Metallerze um 30% (gemäß WORLD6)</li> <li>▶ Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland bis zum Jahr 2040, aber keine vollständige Dekarbonisierung der Stromerzeugung in Deutschland und anderen Ländern/Regionen bis 2050.</li> <li>▶ Soweit nicht bereits beschlossen (wie in Deutschland und Belgien) kein Ausstieg aus der Kernenergie (Entwicklung Kernenergie-Anteil in der Stromerzeugung gem. EC 2013 &amp; IEA 2015 [4DS-Szenario])</li> <li>▶ Anstieg des Zertifikatspreises im EU-ETS bis 2050 auf 62 €2010 pro Tonnen CO<sub>2</sub>; kein ETS in übrigen Ländern</li> <li>▶ Der Anteil der Elektromobilität am PKW-Verkehr erhöht sich bis zum Jahr 2050 auf 5% (Rest of World) bis 20% (Deutschland). Beim LKW-Verkehr werden geringere Anstiege erwartet (z. B. auf 10% im Jahr 2050 in Deutschland)</li> </ul> <hr/> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Anstieg der Weltbevölkerung bis 2050 auf 8,7 Milliarden (gemäß UN 2015 [low variant])</li> <li>▶ Von 2020 bis 2050 Rückgang der Weltmarktpreise für Kohle um 14%, Öl um 7% und Gas um 14% (gemäß IEA 2015 [2DS-Szenario])</li> <li>▶ Von 2020 bis 2050 Anstieg der Weltmarktpreise für Metallerze um 34% (gemäß WORLD6)</li> <li>▶ Vollständige Dekarbonisierung der Stromerzeugung in Deutschland bis 2045, in anderen Ländern/Regionen nahezu vollständig bis 2050</li> <li>▶ Soweit nicht bereits beschlossen (z.B. in Deutschland und Belgien) kein Ausstieg aus der Kernenergie (Entwicklung Kernenergie-Anteil in der Stromerzeugung gem. EC 2013 &amp; IEA 2015 [2DS-Szenario])</li> <li>▶ Anstieg des Zertifikatspreises im EU-ETS bis 2050 auf 147 €2010 pro Tonnen CO<sub>2</sub>, Einführung ETS in übrigen Ländern ab 2020, Anstieg des Zertifikatspreises bis 2050 auf 152 US-\$2010 pro Tonnen CO<sub>2</sub></li> <li>▶ Zusätzliche energetische Sanierung von 1,5% des Wohngebäudebestandes in Deutschland und (zeitverzögert) weltweit</li> <li>▶ Anhebung der Steuern auf Mineralölprodukte in Deutschland um Faktor 1,5 bis zum Jahr 2050. Andere Länder folgen zeitverzögert</li> <li>▶ Der Anteil der Elektromobilität am PKW-Verkehr erhöht sich bis zum Jahr 2050 auf 8% (Rest of World) bis 33% (Deutschland). Beim LKW-Verkehr werden geringere Anstiege erwartet (z. B. auf 17% in 2050 in Deutschland)</li> </ul>

Quelle: [5]

als tatsächlich realisierbar aufgefasst werden. Dies ist allerdings auch nicht nötig, da diese Simulationsexperimente ausschließlich zur Beantwortung folgender Frage durchgeführt wurden: Welche Auswirkungen auf ressourcenpolitische Indikatoren sind zu erwarten, wenn wir für die Zukunft (extrem optimistische)

zusätzliche gesamtwirtschaftliche Effizienzfortschritte in der Produktion unterstellen?

Abbildung 7 (siehe S. 24) zeigt die potentiellen Auswirkungen der angenommenen Effizienzfortschritte auf ausgewählte globale und nationale Indikatoren. Die Ergebnisse zeigen, dass auf-

grund der im Rahmen des Simulationsexperiments „große Transformation“ (siehe Tabelle 1, S. 21) unterstellten Annahmen sowohl die größten Steigerungen in der Gesamtrohstoffproduktivität als auch die größten Einsparungen in der Ressourceninanspruchnahme (mit Blick auf Primärrohstoffeinsatz und pro-Kopf-Rohstoffkonsum) gegenüber dem Referenzszenario<sup>24</sup> „Klimaaktives Deutschland“ simuliert werden. Die Gesamtrohstoffproduktivität erreicht in diesem Simulationslauf im Jahr 2050 etwa doppelt so hohe Werte wie im (weniger technikoptimistischen) Simulationsexperiment „moderate Transformation“. Diese Entwicklung ist auf die unterstellte Rate des autonomen technischen Fortschritts zurück zu führen, welcher im Szenario „große Transformation“ annahmegemäß um einen zusätzlichen Prozentpunkt pro Jahr im Vergleich zum Szenario „moderate Transformation“ global ansteigt (und dabei auch im Vergleich umfassendere Vorleistungsketten erreicht). Die Primärrohstoffinanspruchnahme (RMI absolut) ist im Jahr 2050 um nahezu 1 Milliarde Tonnen geringer als im Simulationsexperiment „moderate Transformation“. Auch der pro-Kopf-Rohstoffkonsum wird in diesem Simulationsexperiment am deutlichsten reduziert. Während dieser Indikator in der „moderaten Transformation“ bis zum Jahr 2050 ein Niveau von ca. 14 Tonnen erreicht, liegt der entsprechende Wert in der Simulation „große Transformation“ im Jahr 2050 nur noch bei ca. 11 Tonnen.

Deutschlands CO<sub>2</sub>-Emissionen verzeichnen anhand der Ergebnisse zwar auch im Simulationsexperiment „große Transformation“ den größten Rückgang mit ca. 20 Millionen Tonnen gegenüber dem Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“, aber die Unterschiede zwischen den drei Simulationsexperimenten sind mit

jeweils ca. 5 Millionen Tonnen Einsparung im Vergleich insgesamt gering. Das preisbereinigte BIP wächst in allen drei Simulationsexperimenten zwischen 2020 und 2050 um insgesamt ca. 2,1 bis 2,5%. Der Anstieg fällt dabei im Simulationsexperiment „große Transformation“ zu Beginn der Simulationsperiode am stärksten aus, wird dann zwischen 2030 und etwa 2045 geringer als in den beiden anderen Simulationsexperimenten, um dann bis 2050 gemeinsam mit dem Anstieg des BIP in der „mittleren Transformation“ den höchsten Wert zu erreichen.

### Erkenntnisse aus den Simulationsexperimenten

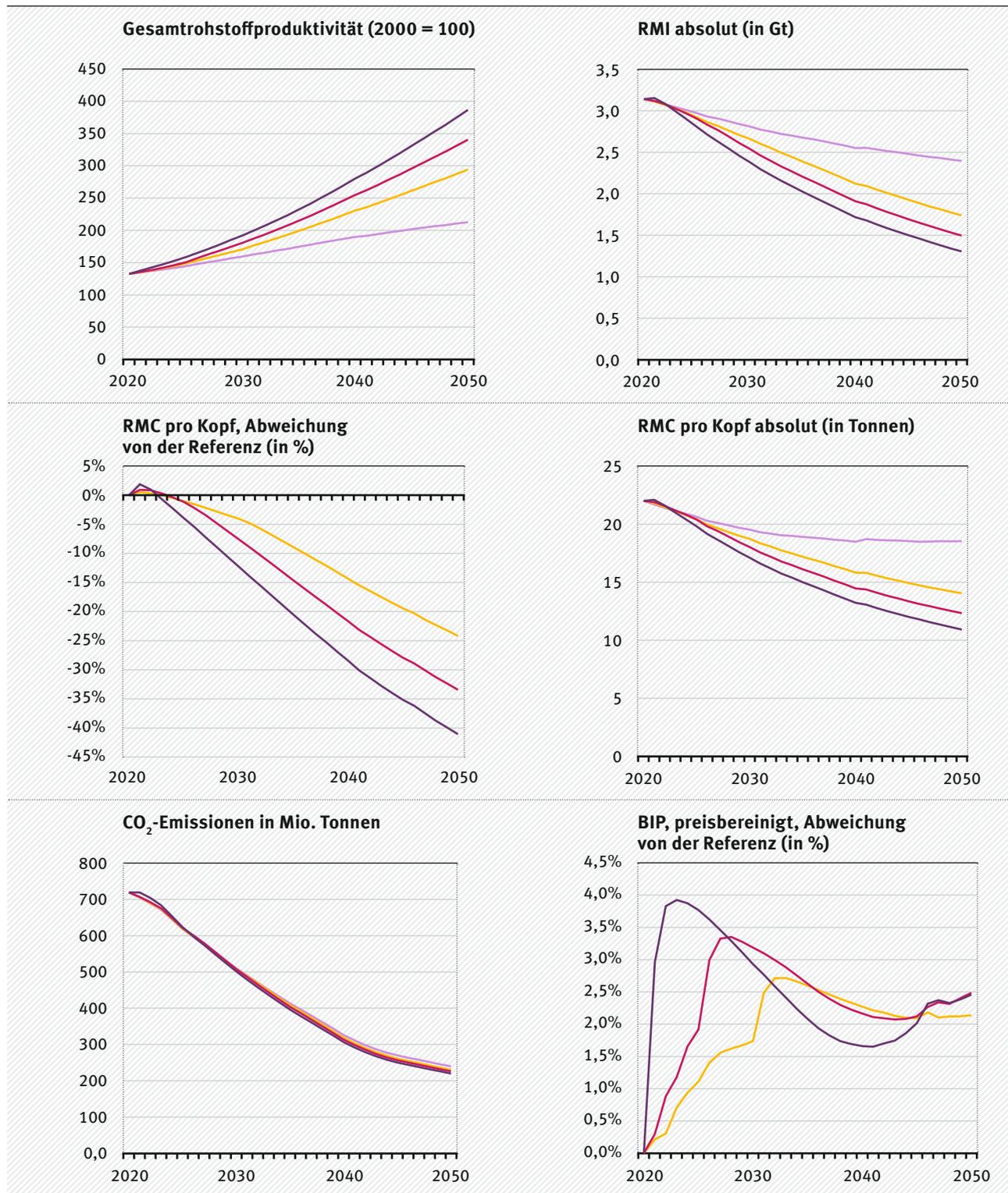
Anhand der Ergebnisse der soeben vorgestellten Simulationsexperimente können insbesondere folgende Aspekte verdeutlicht werden:

- ▶ In einem (ausgesprochen optimistischen) Szenario, welches global drastische autonome technische Effizienzfortschritte (in Höhe von jährlich zusätzlichen 2,5% im Vergleich zu historischen Erfahrungen) unterstellt, scheint es möglich zu sein, allein durch Ressourceneffizienzsteigerungen entlang der Wertschöpfungskette beeindruckende Steigerungen der Gesamtrohstoffproduktivität zu erzielen. Dabei können positive Nebeneffekte im Sinne einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und einer Steigerung des Wirtschaftswachstums erwartet werden. Ein Erreichen mittelfristiger politischer Effizienzziele erscheint in einem solchen Szenario höchst wahrscheinlich.
- ▶ Auch unter entsprechend optimistischen Annahmen bezüglich der zukünftig erzielbaren zusätzlichen technischen Effizienzfortschritte wird die pro-Kopf-

24 | Eine kurze Beschreibung der zwei in SimRes verwendeteten Referenzszenarien sowie der ihnen zugrundeliegenden Annahmen in Tabelle 2, S. 22 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [5].

Abbildung 7:

**Wirkung produktionsseitiger Ressourceneffizienzfortschritte auf Deutschlands Gesamtrohstoffproduktivität und Primärrohstoffeinsatz sowie auf die Entwicklung des Rohstoffkonsums (RMC) pro Kopf, des deutschen BIP und der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“**



■ Referenz: Klimaaktives Deutschland    
 ■ moderate Transformation    
 ■ mittlere Transformation    
 ■ große Transformation

Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5]

Ressourceninanspruchnahme allerdings höchst wahrscheinlich nicht in einem Maße reduziert, welches dem längerfristigen Ambitionsniveau bestehender ressourcenpolitischer Forderungen gerecht werden würde. Sämtliche simulierten Effizienzszenarien deuten darauf hin, dass der in der Literatur [10, 64] diskutierte Zielkorridor von 5 bis 8 Tonnen für den Rohstoffkonsum pro Kopf (RMC/Einwohner) deutlich verfehlt wird;

- ▶ die Simulationsexperimente geben damit Anlass zu bezweifeln, ob eine schwerpunktmäßig auf Ressourceneffizienzsteigerungen entlang der Wertschöpfungskette ausgerichtete Ressourcenpolitik ausreichen kann, um wissenschaftlich diskutierte mittelfristige, auf absoluten Rohstoffkonsum bezogene Ziele zu erreichen.

Damit können die SimResS-Simulationsexperimente plausibel nahelegen, dass zusätzliche ressourcenpolitische Anstrengungen unter Einsatz „harter“ Instrumente wesentlich besser geeignet erscheinen, um weitere, zur umfassenden Reduktion des Rohstoffkonsums notwendige strukturelle wie auch konsumseitige Veränderungen in Deutschland zu unterstützen bzw. auslösen. Das liegt insbesondere darin begründet, dass technik- bzw. effizienzorientierte Ressourcenpolitik über Effizienzsteigerungen durch technologischen Fortschritt Kosteneinsparungen bewirken, die dann für die Expansion der Produktion oder für mehr Konsum von Produkten und Dienstleistungen ausgegeben werden, sodass insgesamt Ressourceneinsparungen gemindert (Rebound-Effekte) oder sogar überkompensiert werden (sogenanntes „back-firing“) [65, 66, 67].

### These 3:

## Nationale Ressourcenpolitik kann den Wandel zu Ressourcenschonung unterstützen, ihn aber nur über gemeinsame internationale Aktivitäten gestalten helfen

### Auswirkungen des heimischen Rohstoffkonsums im Ausland

Produktion und Konsum in Deutschland führen im Rahmen internationaler Handelsverflechtungen zu vielfältigen Extraktions-, Verarbeitungs- und Herstellungsprozessen im Ausland, die dort wiederum Rohstoffe verbrauchen und die Umwelt beeinträchtigen [9]. Das Ausmaß der Rohstoffinanspruchnahme und Umweltauswirkungen wird dabei im Wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt:

1. dem produzierten Gut. Für die Herstellung eines Autos müssen beispielsweise andere und

vielfältigere Rohstoffe in größeren Mengen in mehr Fertigungsschritten verarbeitet werden, als das für eine Musik-CD der Fall ist [9].

2. andererseits den Technologien, die im Ausland zur Produktion der Rohstoffe und Güter verwendet werden, worauf wiederum die bestehenden Infrastrukturen und politischen Rahmenbedingungen Einfluss nehmen [2].

Damit ergeben sich deutliche Unterschiede darin, wie ressourcenschonend bzw. wie ressourcenintensiv die nach Deutschland importierten Rohstoffe und Güter gewonnen und

hergestellt werden. Entsprechend unterschiedlich groß sind die ökologischen Rucksäcke<sup>25</sup> der importierten Rohstoffe und Güter: Der ökologische Rucksack einer Mercedes S-Klasse beträgt etwa 17 Tonnen, der eines Goldrings ca. 2,7 Tonnen, der eines Laptops ungefähr 434 kg, der eines Smartphones mehr als 110 kg, der eines Mobiltelefons ca. 75 kg, der eines Computer-Chips ca. 20 kg und der einer Musik-CD etwa 1,6 kg [70, zitiert in 9; 71, 72].

An den sehr unterschiedlich großen Rucksäcken wird deutlich, dass auch bei geringem Eigengewicht des Gutes große Mengen an Rohstoff- und Umweltinanspruchnahme über den Lebensweg des Gutes induziert werden können. So wird beispielsweise für die Herstellung von Mobiltelefonen in geringen Mengen auch Gold (ca. 0,03 g pro Mobiltelefon) benötigt. Würde man aus den ca. 100 Millionen Althandys, die nach Schätzungen in deutschen Haushalten vorhanden sind, sämtliches Gold extrahieren können, so entspräche dies einer Menge von 3 Tonnen [71]. Um diese Menge an Gold durch Rohstoffabbau zu gewinnen, müssten etwa 3 Millionen Tonnen Golderz abgebaut werden [71]. Der Abbau von Golderz und die Extraktion von Gold sind mit weiteren Umwelt- und Gesundheitsbelastungen verbunden. So führt das Bewegen großer Mengen an Bodenmaterial zu Landschaftszerstörung und Entwaldung<sup>26</sup>, sowie zu Stoffeinträgen in die Gewässer. Darüber hinaus beeinträchtigt der Einsatz von Quecksilber, das zur Goldextraktion im Kleinbergbau verwendet wird, über Einträge in die Gewässer und die Luft nicht nur Flora und Fauna, sondern ruft auch massive Gesundheitsprobleme bei den in den Minen Arbeitenden und in der lokalen Bevölkerung hervor [74].

## **Gegenwärtige und zukünftige Rohstoffabhängigkeiten Deutschlands**

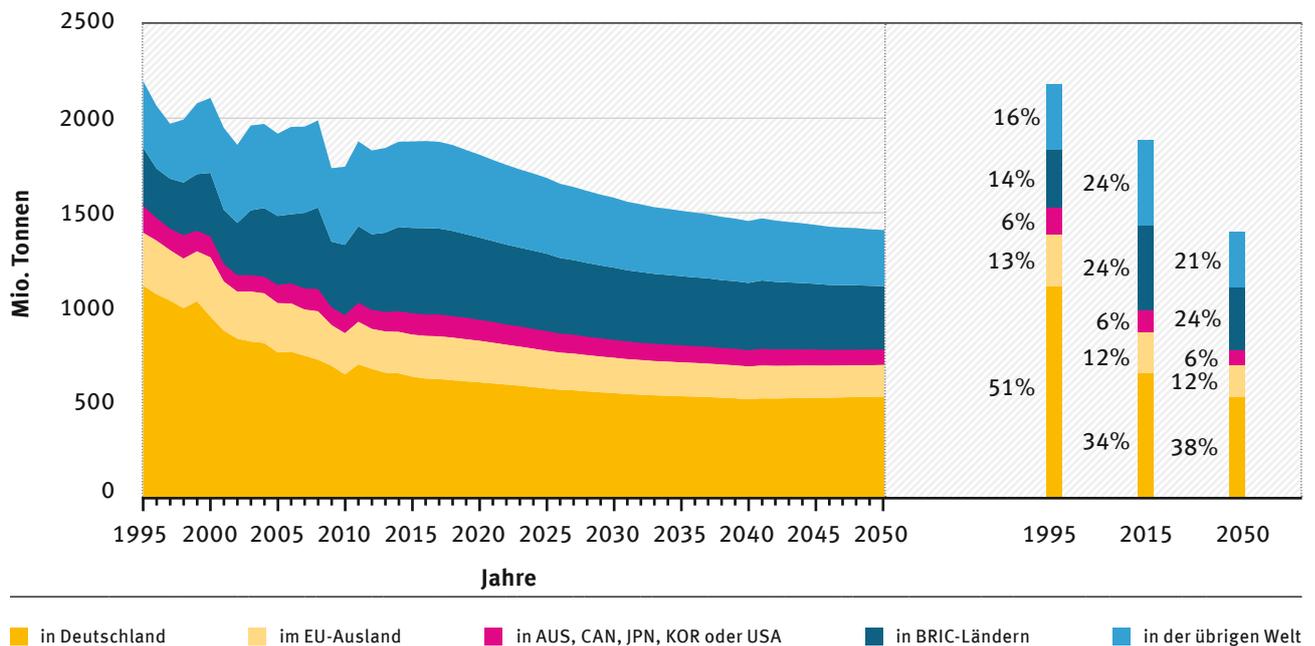
Deutschland hat im Jahre 2013 mehr als 600 Millionen Tonnen an Rohstoffen importiert, davon 332 Millionen Tonnen in Form von (unbearbeiteten) Rohstoffen, 129 Tonnen als Halbwaren und 142 Tonnen als Fertigwaren [75]. Den größten Anteil an den mehr als 600 Millionen Tonnen importierten Rohstoffen machten dabei fossile Energieträger aus (etwa 315 Millionen Tonnen, mehr als die Hälfte davon Erdöl), gefolgt von Metallerzen (ca. 121 Millionen Tonnen), Biomasse (knapp 118 Millionen Tonnen) und Mineralien (etwa 51 Millionen Tonnen) [9]. Diese Werte beziehen sich dabei nur auf das in den Außenhandelsstatistiken erfasste tatsächliche (Netto-) Gewicht der gehandelten Rohstoffe und Güter. Rechnet man die Vorleistungen und Vorketten bzw. den ökologische Rucksack der Güter in Form von Rohstoffäquivalenten (Raw Material Equivalents, RME; siehe hierzu These 4, S. 32) hinzu – berücksichtigt man also die indirekten Importe – so erhöht sich der Wert drastisch. So wurden im Jahr 2011 ca. 613 Millionen Tonnen Rohstoffe importiert, ihre Entsprechung in RME hingegen beläuft sich auf 1,675 Milliarden Tonnen – das ist fast das Dreifache der importierten Mengen [9]. Für den Rohstoffkonsum (RMC) betrug der Wert ca. 1,3 Milliarden Tonnen [9] (siehe hierzu auch These 4, S. 32). Den größten Teil der vorgenannten Importe bezieht Deutschland aus lediglich zehn Ländern: den europäischen Ländern Belgien, Frankreich, Großbritannien, Niederlande, Norwegen, Österreich und Polen sowie den außereuropäischen Ländern Brasilien (insbesondere für den Import von Biomasse und metallischen Rohstoffen), Russland (insbesondere für den Import von Erdgas) und

25 | Der ökologische Rucksack bezeichnet die Mengen an natürlichen Ressourcen, die für die Herstellung eines Produktes über seinen gesamten Lebensweg hinweg benötigt werden, abzüglich des Eigengewichtes des Gutes. Er basiert auf dem Konzept von Materialinput pro Serviceeinheit (kurz MIPS), das von Schmidt-Bleek in den 90er Jahren am Wuppertal Institut entwickelt wurde, um das Umweltbelastungspotential von Produkten und Dienstleistungen abschätzen zu können [68, 69].

26 | So werden für den Goldabbau im peruanischen Amazonas-Gebiet Madre de Dios jährlich zwischen 2.000 und 6.000 ha tropischer Regenwald abgeholzt. Damit ist der Goldbergbau dort noch vor Land- und Forstwirtschaft der Haupttreiber für die Entwaldung [73].

Abbildung 8:

## Herkunft der Extraktionen für den inländischen Rohstoffkonsum (RMC), 1995 - 2050



Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5]

den USA [9]. Die starke internationale Handelsverflechtung und hohe Importabhängigkeit der deutschen Wirtschaft zeigen, dass Deutschland durch die heimischen Produktions- und Konsummuster eine globale Mitverantwortung für Rohstoffinanspruchnahme und Ressourcenschonung in anderen Ländern trägt [9, 12].

Die im Rahmen des SimRess-Projekts mit dem Simulationsmodell GINFORS3 durchgeführten Abschätzungen deuten darauf hin, dass der historische Wert des deutschen Rohstoffkonsums im Jahre 2011 tatsächlich eventuell noch etwas höher gelegen haben könnte (etwa 1,878 Milliarden Tonnen, siehe Abbildung 8).<sup>27</sup> Die entsprechende ex-post Analyse ist dabei insbesondere davon geprägt, dass der Anteil der im Ausland entnommenen Rohstoffe für den inländischen Rohstoffkonsum (letzte

inländische Verwendung in Rohstoffäquivalenten, RMC – siehe hierzu These 4, S. 32) zwischen 1995 und 2015 (insbesondere über Extraktionen in den BRIC-Ländern und der übrigen Welt) von 49% auf 66% zugenommen hat.

Die zusätzlich durchgeführten ex ante Simulationen zeigen zudem, dass, vor dem Hintergrund der bisherigen historischen Erfahrungen, mittelfristig keine grundlegenden Änderungen der bisherigen Wirtschaftsstrukturen zu erwarten sind. Zumindest erscheint es höchst plausibel davon auszugehen, dass heimische Konsum- und Investitionsentscheidungen auch zukünftig auf starken Handelsverflechtungen basieren und der überwiegende Teil der für Deutschlands Konsum und Investitionen extrahierten Rohstoffe aus dem Ausland stammen und auch bereits im Ausland weiterverarbeitet werden (siehe Abbildung 8).

27 | Zu den Gründen für die höheren Werte siehe auch These 4, S. 32.

Unter dieser Prämisse sowie der Berücksichtigung mittelfristig zusätzlich zu erwartender klimapolitischer Maßnahmen auf globaler und nationaler Ebene<sup>28</sup> sind die SimRess-Projektionen (unter anderem) dadurch geprägt, dass die für den inländischen Rohstoffkonsum benötigten Rohstoffe im Jahre 2050 infolge der Energiewende wieder zu einem etwas größeren Anteil als 2015 im Inland entnommen werden (38% statt 34%). Diese Veränderung der Relationen wird in den Simulationen dadurch getrieben, dass aufgrund der klimapolitischen Vorgaben weniger fossile Energieträger importiert werden müssen. Dennoch ist auch für die Zukunft damit zu rechnen, dass gut die Hälfte der Primär-Rohstoffe für Konsum und Investitionen in Deutschland aus dem Nicht-EU Ausland stammen werden.

### **Deutsche Ressourcenpolitik übernimmt globale Verantwortung**

Die deutliche Zunahme der internationalen Verflechtung deutscher Produktions- und Konsummuster zwischen 1995 und 2015 sowie die simulierten Werte bis 2050 zeigen, dass die globale Mitverantwortung Deutschlands nicht nur größer geworden ist, sondern auch längerfristig bestehen bleiben dürfte. Dieser globalen Verantwortung kann nationale Ressourcenpolitik Rechnung tragen, indem sie beispielsweise

- ▶ die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung im Ausland über bilaterale Rohstoffpartnerschaften sowie über Mitwirkung an der Erarbeitung und Umsetzung internationaler Standards in der Rohstoffgewinnung nachhaltiger gestalten hilft [76, 77];
- ▶ die Anwendung ressourcenschonender Technologien im Ausland durch Förderung des Transfers von Umwelt- und Ressourceneffi-

zienstechnologien (z.B. mittels Exportförderung) stärkt [78, 79, siehe auch 80]; und

- ▶ den inländischen Absatz ressourcenschonend hergestellter Güter steigert (z.B. durch Erhöhung des Anteils mit glaubwürdigen Umweltzeichen versehener Produkte im Handel).

In dieser Kombination kann nationale Ressourcenpolitik dazu beitragen, dass sowohl die heimischen Produktions- und Konsummuster einen geringeren ökologischen Rucksack mit sich bringen als auch die internationale Verbreitung ressourcenschonender Technologien und Ansätze vorangetrieben wird, sodass die Ressourcenschonung auch in anderen Ländern gestärkt werden kann.

### **Nationale Ressourcenpolitik kann ressourcenpolitische Fortschritte anderer Länder unterstützen**

Wie wichtig ressourcenpolitische Fortschritte in anderen Ländern sind, zeigen weitere Simulationsergebnisse des SimRess-Projektes. Betrachtet man die Entwicklung der pro-Kopf-Werte des Rohstoffkonsums (RMC) im Zeitraum 1995 bis 2015 in verschiedenen Ländern, wird anhand der Modellabschätzungen erkennbar, dass die Werte in den meisten Ländern (z.T. deutlich) gestiegen sind und nur in einigen wenigen Ländern (Deutschland, Japan und Spanien) ein (geringer) Rückgang zu verzeichnen ist (siehe Abbildung 9).

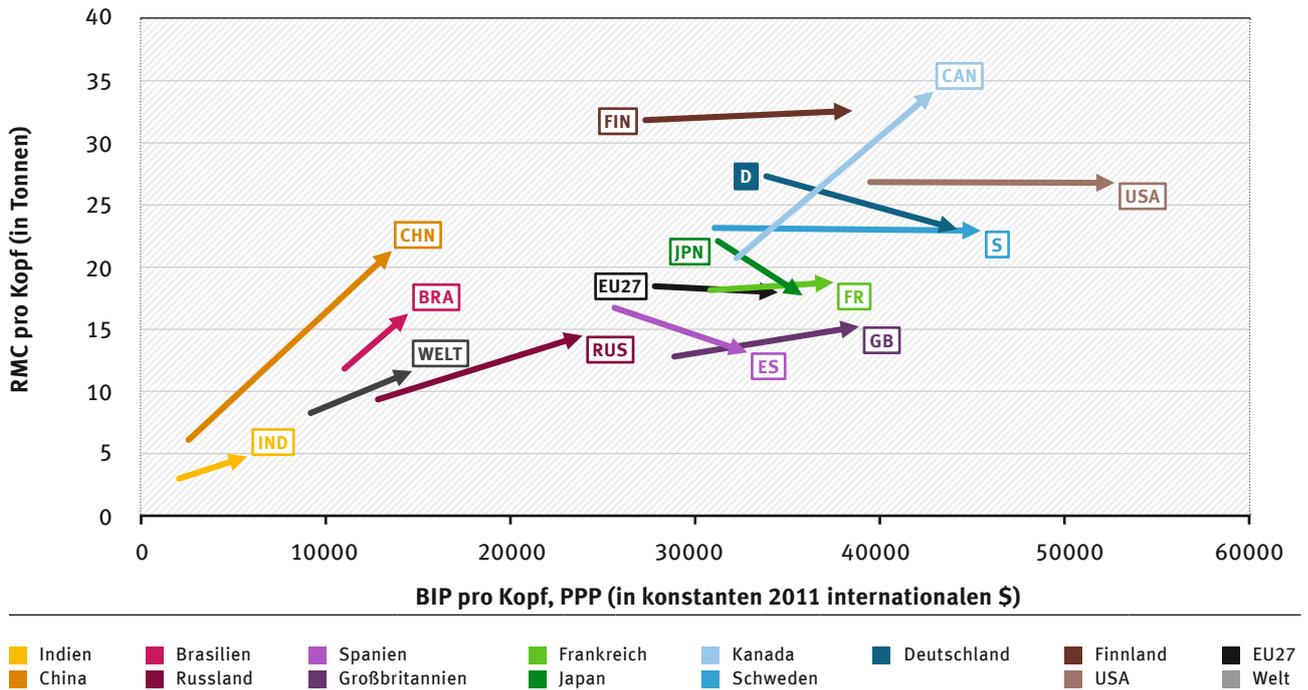
Darüber hinaus wurden im Rahmen der ressourcenpolitischen Simulationsexperimente Annahmen (siehe Tabelle 1, S. 21) dazu getroffen, mit welcher zeitlichen Verzögerung andere Länder Deutschland darin folgen, durch ressourcenpolitische Ansätze produktionsseitige

---

28 | Zu den klimapolitischen Annahmen siehe Tabelle 2, S. 22.

Abbildung 9:

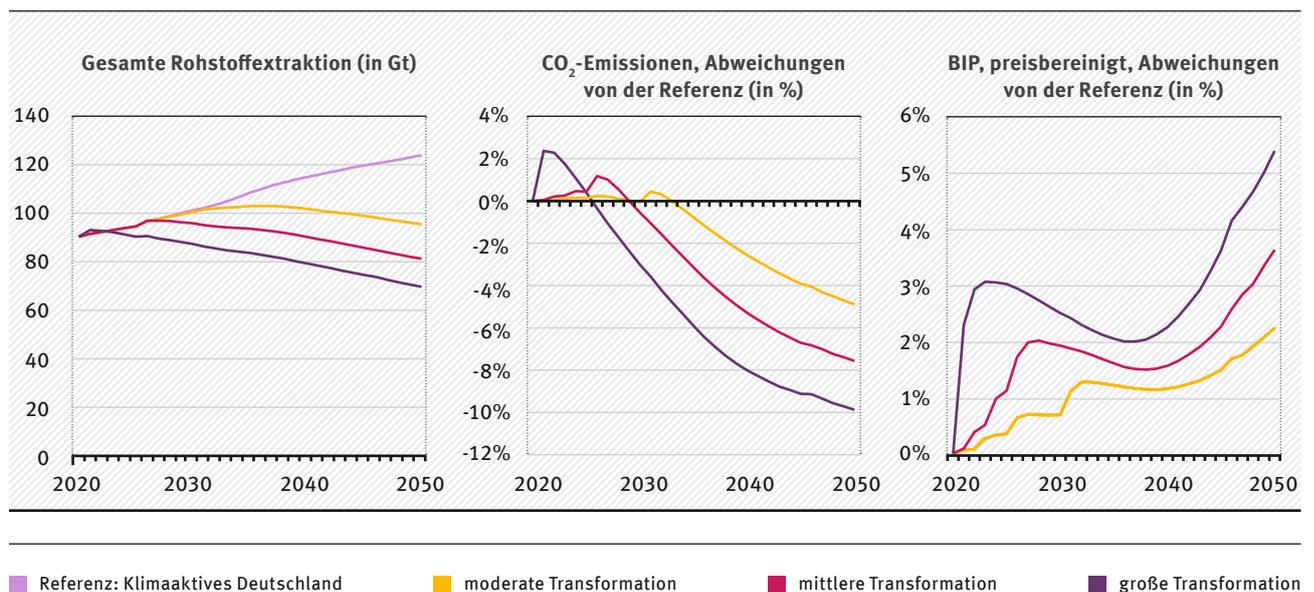
### Internationaler Vergleich des inländischen Rohstoffkonsums (RMC) pro Kopf, 1995 - 2015



Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5]

Abbildung 10:

### Potentielle Wirkung produktionsseitiger Ressourceneffizienzfortschritte auf die globale Rohstoffextraktion, globale CO<sub>2</sub>-Emissionen und das globale BIP



Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5]

Effizienzgewinne zu unterstützen. Abbildung 10 zeigt die potentiellen Wirkungen auf die globale Rohstoffextraktion, die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und das globale BIP.

Abbildung 10 lässt erkennen: Je schneller und je ambitionierter andere Länder ressourcenpolitisch Effizienzsteigerungen in Produktionstechnologien unterstützen, desto deutlicher fallen in den Modellabschätzungen aus

- ▶ die mögliche Verringerung der globalen Rohstoffinanspruchnahme (von etwa 96 Milliarden Tonnen im Simulationsexperiment „moderate Transformation“ im Jahre 2050 auf ca. 70 Milliarden Tonnen im Simulationsexperiment „große Transformation“)
- ▶ der Rückgang der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen (Reduktion um ca. 5% in 2050 im Simulationsexperiment „moderate Transformation“ bzw. um ca. 10% in der „großen Transformation“)
- ▶ der Anstieg des globalen BIP: um etwa +2,2% im Jahre 2050 im Simulationsexperiment „moderate Transformation“ bzw. um ca. +5.6% in der „großen Transformation“ [5].

## Potentielle zukünftige globale Rohstoffentnahmen

Die Abschätzungen aus den Simulationsexperimenten weisen die gleichen Tendenzen bezüglich der zukünftigen globalen Rohstoffextraktionen auf wie vergleichbare, modellbasierte Projektionen. Je nach zugrunde liegenden Annahme des jeweiligen Modells steigt die globale Rohstoffextraktion ohne weitere ressourcenpolitische Maßnahmen von ca. 84 Milliarden Tonnen im Jahr 2015 [2, 6] auf Werte von 125 Milliarden Tonnen [5] bis 186 Milliarden Tonnen<sup>29</sup> [2, 6] im

Jahr 2050 an. Und selbst wenn weitere ressourcenpolitische Maßnahmen ergriffen werden, so zeigen die Abschätzungen, dass bis zum Jahr 2050 trotzdem ein weiterer Anstieg der globalen Rohstoffextraktion möglich ist: Im Rahmen des SimRess-Projekts ist ein absoluter Anstieg um etwa 7% im Simulationsexperiment „moderate Transformation“ ersichtlich (siehe Abbildung 10, S. 30). Die Abschätzungen von Hatfield-Dodds et al. [6] zeigen für das „Effizienz-Plus“-Szenario (inklusive klimapolitischer Ansätze) im Vergleich zum dort gewählten Referenzszenario<sup>30</sup> sogar einen Anstieg von etwa 58%. Lediglich in den beiden Simulationsexperimenten „mittlere Transformation“ und „große Transformation“ des SimRess-Projektes ist bis 2050 ein absoluter Rückgang gegenüber den Werten von 2015 sichtbar (siehe Abbildung 10).

Wenngleich die globalen Rohstoffextraktionen im Falle des Simulationsexperiments „große Transformation“ um mehr als 50 Milliarden Tonnen (auf ca. 70 Milliarden Tonnen im Jahr 2050) gegenüber dem Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ reduziert werden könnte (siehe Abbildung 10), so würde damit eine Rückführung der globalen Rohstoffextraktionen auf das Niveau des Jahres 2000 (52 Milliarden Tonnen) – wie in wissenschaftlichen Studien als Zielgröße vorgeschlagen – deutlich verfehlt [vgl. 10, 81, 82, 83]. Das deutet darauf hin, dass es nicht nur in Deutschland, sondern auch in anderen Ländern des verstärkten Einsatzes „harter“ Instrumente bedarf (siehe These 2, S. 19). Dabei müssen diese „harten“ Instrumente auch entsprechend ausgestaltet werden, damit die oben genannten Zielgrößen erreicht werden. Auch wenn insgesamt positive Effekte auf das globale Wirtschaftswachstum zu erwarten sind [vgl. auch 2], so

29 | Die Unterschiede in den ermittelten Werten können vermutlich u.a. durch unterschiedliche Feedback-Mechanismen in den Modellen bezüglich des zukünftigen Bedarfs an nicht-metallischen Mineralien für Bauaktivitäten in China und Indien erklärt werden (siehe [17]).

30 | Im „Ressourceneffizienz“-Szenario von Hatfield-Dodds et al. [siehe 6] kommt es sogar zu einem Anstieg von bzw. um ca. 81%.

treten dabei regionale Unterschiede auf. Einzelne Regionen bzw. Länder würden dadurch nachteilige und wiederum andere vorteilhafte ökonomische Effekte im Sinne von „Verlierern und Gewinnern“ erfahren [siehe 6]. Im oben genannten „Effizienz-Plus“- Szenario von Hatfield-Dodds et al. führen die ressourcenpolitischen Ansätze beispielsweise dazu, dass

- ▶ Netto-Rohstoff-importierende Länder und Regionen wie China, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Indien, Indonesien, Japan, Korea, Neuseeland und Westeuropa ein Wachstum des pro-Kopf-BIP verzeichnen, während
- ▶ Rohstoff-exportierende Länder und Regionen wie Brasilien, Mexiko, Russland, Osteuropa, Südafrika und Südamerika einen Rückgang ihres pro-Kopf-BIPs erfahren würden, da eine global gesteigerte Ressourceneffizienz die Nachfrage nach exportierten Rohstoffen abschwächen würde [6].

Um diese ökonomischen Nachteile auf globaler Ebene auszugleichen, wäre eine internationale Kompensationsregelung nötig, über die Länder mit hohem oder mittlerem Einkommen ca. 30 – 50% ihrer potentiellen ökonomischen Gewinne an Länder transferieren, die Verluste erleiden [6]. Daran wird deutlich, dass eine nationale Ressourcenpolitik nur im Kontext gemeinsamer internationaler Bestrebungen einen Beitrag zu einer global gerechten Ressourcenpolitik leisten kann, die 1.) in planetaren Grenzen verläuft [84], die 2.) die politischen Zielgrößen für eine absolute Reduktion der Rohstoffinanspruchnahme erreicht und die 3.) hilft mögliche Wettbewerbsverzerrungen und nachteilige sozio-ökonomische Effekte ressourcenpolitischer Aktivitäten zu minimieren. Solch ein globaler Politikansatz scheint wiederum nur in einem international abgestimmten Kontext gelingen zu können. Die G7- und G20-Prozesse zu Ressourceneffizienz [siehe 2, 85, 86, 87, 88, 89] und die Globalen Nachhaltigkeitsziele legen für eine solche Politik ein Fundament.



## These 4:

### Für die Fortschrittsmessung der Wirksamkeit langfristig orientierter Ressourcenpolitik sind international vergleichbare gesamtwirtschaftliche Indikatoren vorteilhaft

#### Gesamtwirtschaftliche Indikatoren für die Fortschrittsmessung in der nationalen Ressourcenpolitik

Die nationale, und auch die internationale, Ressourcenpolitik benötigen zielführende Indikatoren, die den Fortschritt bzw. die Wirksamkeit ressourcenpolitischer Ansätze im Sinne eines ressourcenschonenderen Umgangs mit Rohstoffen adäquat messen und auch im internationalen Vergleich darstellen können – beispielsweise im Kontext der ressourcenpolitischen Aktivitäten auf Ebene der G7/G20 (siehe These 3, S. 25).

Dazu sind auf gesamtwirtschaftlicher Ebene auf der einen Seite (möglichst langfristig) vergangene Entwicklungen der globalen Rohstoffinanspruchnahme<sup>31</sup> durch die inländische Wirtschaft zu ermitteln und auf der anderen Seite ex-ante Abschätzungen von zukünftigen Entwicklungen und von Politikfolgen erforderlich. Beides setzt geeignete Berechnungsmethoden und Modelle voraus. Nur dann kann Ressourcenpolitik langfristig ausgerichtet und trotzdem flexibel agierend gestaltet sowie der Einsatz von Instrumenten legitimiert werden. Für eine entsprechend adäquate ressourcenpo-

litische Fortschrittsmessung über gesamtwirtschaftliche Indikatoren sind insbesondere die folgenden zwei Dimensionen in den Blick zu nehmen:

1. Umfang der Abdeckung der Rohstoffinanspruchnahme durch die Indikatoren;
2. internationale Vergleichbarkeit bzw. Harmonisierbarkeit der Indikatoren.

#### (1) Umfang der Abdeckung der Rohstoffinanspruchnahme durch gesamtwirtschaftliche Indikatoren

Die nationale Ressourcenpolitik sieht im gegenwärtig gültigen ProgRes II die folgenden beiden Indikatoren zur Rohstoffinanspruchnahme vor, die jeweils im Sinne von Effizienz- bzw. Produktivitätsindikatoren in Beziehung zur ökonomischen Kenngröße BIP gesetzt werden [12]:

1.  $DMI_{\text{abiotisch}}$  (= abiotischer direkter Materialeinsatz) ; mittels des Indikators Rohstoffproduktivität, ausgedrückt als  $BIP/DMI_{\text{abiotisch}}$ , wird seit dem Jahre 2002 im Rahmen des Monitorings für die nationale Nachhaltigkeitsstrategie die Effizienz der heimischen Produk-

31 | Mit Blick auf die internationalen Auswirkungen heimischer Rohstoffinanspruchnahme im Sinne von Vorketten spielen gesamtwirtschaftliche Indikatoren in der ressourcenpolitischen Fortschrittsmessung eine wichtige Rolle (siehe dazu auf den folgenden Seiten). Gesamtwirtschaftliche Indikatoren sind als Elemente einer vorausschauenden Ressourcenpolitik wichtig, um physische Rohstoffinanspruchnahme und Rohstoffproduktivität der heimischen Wirtschaft im Sinne einer nachhaltigen, ressourcenschonenden und ressourceneffizienten Rohstoffnutzung zu messen. Darüber hinaus muss eine wirksame Ressourcenpolitik auch die Meso- und Mikroebene in den Blick nehmen, um

(a) auch produkt- und stoffstromspezifische sowie Kreislaufwirtschafts- und Sektor-bezogene Auswirkungen und Ziele sowie

(b) Auswirkungen der Rohstoffinanspruchnahme auf die Umwelt als Senke (z.B. bezüglich Treibhausgasemissionen) und auf anderer Ressourcen wie Boden und Wasser berücksichtigen zu können. Gesamtwirtschaftliche Indikatoren sind daher ein wichtiger Teilaspekt mit Blick auf relevante ressourcenpolitische Indikatoren (siehe [64]). Sie stehen jedoch hier im Zentrum der Ausführungen zu dieser These.



tion gemessen, mit der sie Rohstoffe für die Wertschöpfung einsetzt.<sup>32</sup>

2. *RMI* (= Rohstoffeinsatz, engl. Raw Material Input, inkl. Biotik); mittels des weitergehenden Indikators Gesamtrohstoffproduktivität soll Folgendes in die Produktivitätsmessung einbezogen werden:

- a) einerseits noch die biotischen Rohstoffe als wichtiger Bestandteil der entnommenen Rohstoffmengen sowie
- b) andererseits die Importe als wichtiger Beitrag (i) zu den (abiotischen und biotischen) Rohstoffmengen, die global für die Herstellung der importierten Güter und Dienstleistungen benötigt werden, sowie (ii) zur Wertschöpfung

Der Indikator Gesamtrohstoffproduktivität wird daher berechnet aus  $(BIP+Importe)/RMI$  (inkl. Biotik).

Der Umfang der Rohstoffinanspruchnahme, die im Indikator Rohstoffeinsatz *RMI* berücksichtigt wird, ist größer als beim Indikator direkter abiotischer Materialeinsatz  $DMI_{abiotisch}$ . Denn anders als der  $DMI_{abiotisch}$  bildet der *RMI* über Umrechnung in Rohstoffäquivalente (RME)<sup>33</sup> auch die Rohstoffinanspruchnahmen ab, die mit der Erzeugung der Importe (Halb- und Fertigwaren) im Ausland verbunden sind (als ökologischer Rucksack, der das Gewicht der für die Herstellung der Importe nötigen Rohstoffe widerspiegelt) [9, 90].

32 | Die Produktivität misst damit, wie viel wirtschaftliche Leistung (in Geldwährung, z.B. Euro) mit dem Einsatz einer Einheit an Rohstoffen (in Mengen, z.B. Tonnen) produziert wird [90].

33 | Zu den mit der Umrechnung in Rohstoffäquivalente verbundenen Herausforderungen siehe im Folgenden, S. 34.f

## (2) Internationale Vergleichbarkeit bzw. Harmonisierbarkeit gesamtwirtschaftlicher Indikatoren zur Rohstoffinanspruchnahme

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Wirtschaftsleistungen (ausgedrückt in BIP) verschiedener Länder ist eine internationale Vergleichbarkeit ressourcenpolitischer Produktivitätsindikatoren problematisch und nicht zielführend – da je nach wirtschaftlichen Entwicklungen auch ohne Fortschritte in der Ressourcenschonung Veränderungen in Produktivitätsindikatoren stattfinden. Daher beziehen sich die Ausführungen zur internationalen Vergleichbarkeit hier auf die gesamtwirtschaftlichen Indikatoren der absoluten Rohstoffinanspruchnahme.

Die Harmonisierung bzw. (Weiter)Entwicklung international vergleichbarer Indikatoren zur Messung der Fortschritte bzw. Erfolge ressourcenpolitischer Bestrebungen spielen auch im Rahmen der internationalen Aktivitäten zu Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung eine wichtige Rolle. Gemäß Empfehlungen

der G7-Umweltminister und der G7-Allianz für Ressourceneffizienz sollen zunächst bestehende Indikatoren-Systeme auf Lücken überprüft und dann ggf. Indikatoren neu entwickelt bzw. bestehende Indikatoren weiterentwickelt werden, so dass sie den internationalen Vergleich ermöglichen und dadurch auch helfen, Erfolgsbeispiele zu identifizieren [86, 91].

Vor diesem Hintergrund weist der Indikator *RMI* den Nachteil auf, dass die Summe der *RMI*-Daten nicht über verschiedene Länder hinweg addiert werden kann, um einen aggregierten Gesamtindikator für eine Region zu bilden – d.h., der *RMI* ist nicht territorial additiv [90]. Grund dafür ist, dass der *RMI* die Importe und die zu ihrer Herstellung benötigten Rohstoffäquivalente (als Eigengewicht der zur Herstellung der Güter verwendeten Rohstoffe) berücksichtigt, die Exporte aber nicht abzieht. Dadurch können Mehrfachzählungen der gleichen Materialentnahme auftreten

- ▶ einerseits durch Zählung sowohl im Entnahme- als auch im importierenden Land;



- ▶ andererseits durch Zählung im Export von inländisch entnommenen Rohstoffen und späterem Import von aus den exportierten Rohstoffen hergestellten Gütern [90].

Im internationalen Vergleich des Indikators *RMI* sind damit Verzerrungen durch Mehrfachzählungen zu erwarten [89].<sup>34</sup>

Das spricht dafür, einen Indikator für das internationale ressourcenpolitische Monitoring zu verwenden, der Mehrfachzählungen vermeidet und auch über mehrere Länder hinweg additiv ist [89]. Der Indikator Rohstoffkonsum (*Raw Material Consumption, RMC*<sup>35</sup>) erfüllt diese Bedingungen. Er misst die Rohstoffe, die für den inländischen Konsum und die Investitionen im Inland erforderlich sind. Er bildet darüber den Eigenbedarf einer Volkswirtschaft ab; die exportierten Güter und die dafür erforderlichen Rohstoffe sind im *RMC* herausgerechnet [64]. Damit eignet sich dieser Indikator nicht als Produktivitätsindikator, da er die Exporte herausrechnet, die ökonomische Kenngröße BIP in Deutschland aber stark von den über Export erzielten Wirtschaftsleistungen bestimmt wird.

Um die internationale Vergleichbarkeit zu verbessern, könnte der Indikator Rohstoffkonsum *RMC* ergänzend zum Indikator *Gesamtrohstoffproduktivität* ( $(\text{BIP} + \text{Importe}) / \text{RMI}$  (inkl. Biotik) als fester Bestandteil des nationalen ressourcenpolitischen Monitorings vorgeschrieben werden, um die absolute Rohstoffanspruchnahme zu messen. Die Daten für den *RMC* stehen über das Statistische Bundesamt zur Verfügung [90, 92].

Dieser Vorschlag wurde auch bereits an anderer Stelle gemacht: für die ressourcenpolitische Berichterstattung im Kontext der Messung des Fortschritts hin zu einer absoluten Verringerung der pro-Kopf-Rohstoffanspruchnahme von Günther und Golde [64] sowie zur internationalen Messung der in Handelsbeziehungen eingebetteten Rohstoffströme von der OECD [93, 94].

Aber selbst bei Verwendung des *RMC* tauchen Herausforderungen auf, da die Erhebung des *RMC* je nach Datengrundlage, Modell und Herangehensweise differiert.

### **Möglichkeiten zur methodischen Weiterentwicklung des RMC für die nationale Fortschrittsmessung**

Die folgende Abbildung 11 stellt die SimRess-Abschätzungen [95] den Befunden aus anderen, ähnlichen Studien gegenüber, um je nach verwendetem bzw. berechnetem Indikator die Unterschiede in der Rohstoffanspruchnahme zu zeigen. Für das Jahr 2010 sind neben den SimRess-Abschätzungen die Berechnungsergebnisse

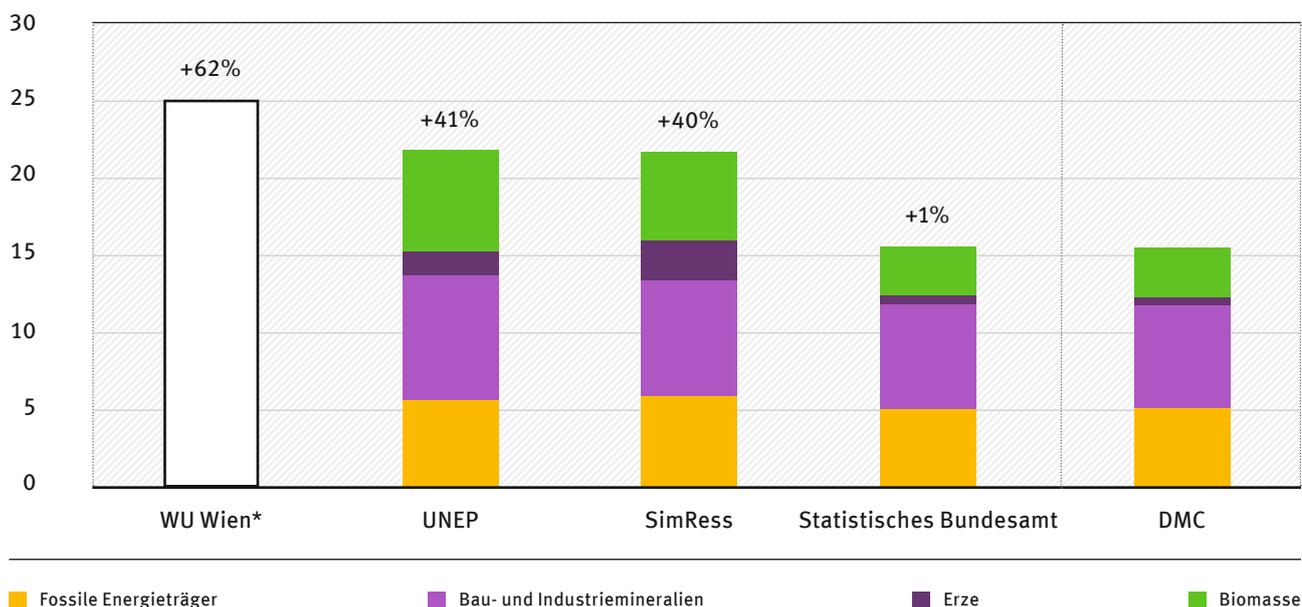
- ▶ des UNEP International Resource Panel (in der Abbildung bezeichnet als UNEP) [96]
- ▶ von Stefan Giljum und Stephan Lutter (WU Wien) auf Basis von Exiobase 3.1 (entnommen aus dem Bericht „Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016“) (in der Abbildung bezeichnet als WUWien) [9] und
- ▶ des Statistischen Bundesamtes [97, 98, 99] dargestellt.

34 | So wäre beispielsweise die Summe aller nationalen RMI-Angaben der 28 EU-Mitgliedstaaten größer als ein für die gesamte EU gemessener RMI [90].

35 | In der offiziellen Berichterstattung des Statistischen Bundesamtes wird der Indikator auch als „Letzte inländische Verwendung in Rohstoffäquivalenten“ bezeichnet. Siehe URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/InlaendischeVerwendung.html> eingesehen. Zugriff am 2. Mai 2018

Abbildung 11:

## Vergleich der RMC-Werte pro Kopf (in Tonnen) für 2010 aus verschiedenen wissenschaftlichen Studien



\* Die WU Wien-Daten beziehen sich auf das Jahr 2011

Quellen: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5] sowie UBA (Hrsg.) 2016 [9], UNEP 2017 [96], Statistisches Bundesamt 2017a [97], 2017b [98] und 2017c [99]

Es wird deutlich, dass die Berechnungen von SimRess, UNEP und WU Wien deutlich höhere Werte für den Indikator Rohstoffkonsum aufweisen als das beim Statistischen Bundesamt der Fall ist: Während die pro-Kopf-RMC-Werte des Statistischen Bundesamtes bei ca. 15 Tonnen liegen (und damit nur um ca. 1% über den DMC-Werten des Statistischen Bundesamtes in der obigen Abbildung)<sup>36</sup>, zeigen alle anderen Vergleichsstudien Werte oberhalb von 20 Tonnen – die SimRess-Ergebnisse und die UNEP-Ergebnisse liegen um ca. 40% höher, die WU-Werte sogar um 62%. In der Betrachtung der vier Rohstoffkategorien, die im RMC abgebildet werden,

liegen die Ergebnisse aus SimRess und von UNEP insbesondere bei Biomasse und Metallerzen um teilweise das Zwei- bis Vierfache höher als die Werte des Statistischen Bundesamtes. Damit lässt sich festhalten, dass sich die in SimRess erarbeiteten Abschätzungsergebnisse für den RMC in Deutschland im Gegensatz zu den Abschätzungen des Statistischen Bundesamtes gut in das Bild anderer bis dato verfügbarer Abschätzungen einfügen.<sup>37</sup>

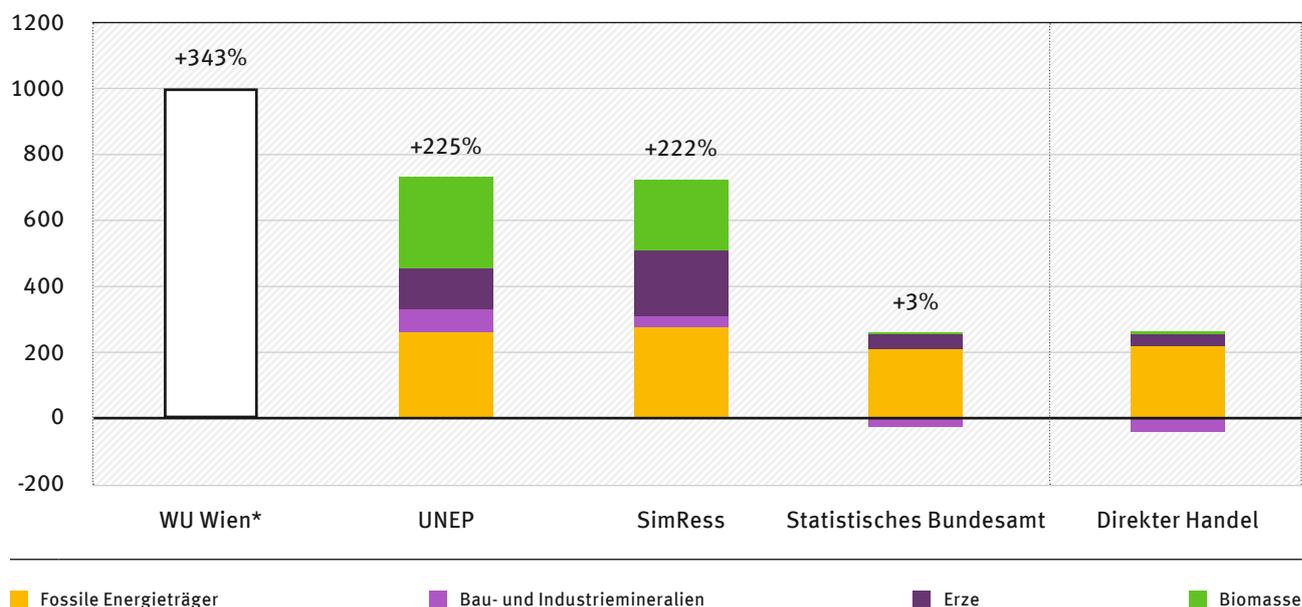
Noch deutlicher sind die Unterschiede, wenn man die physische Handelsbilanz Deutschlands in Rohstoffäquivalenten (RME) betrachtet (siehe

36 | DMC steht für Domestic Material Consumption und meint die inländische Materialverwendung ohne Einbezug der Rohstoffmengen, die im Ausland für die Herstellung der im Inland konsumierten Güter benötigt wurden [89]. Der DMC saldiert Import und Exporte und misst die inländische Rohstoffentnahme plus Einfuhr von Gütern nach Verarbeitungsgrad abzüglich Ausfuhr von Gütern nach Verarbeitungsgrad. Gemäß den Daten des Statistische Bundesamtes entspricht der Saldo des direkten Handels (= der DMC, gemessen mit dem Gewicht der Güter beim Grenzübergang ohne Rohstoffäquivalente) damit bis auf 1%-Abweichung der Außenhandelsbilanz gemessen in RME, auch wenn die Materialrucksäcke bzw. die Rohstoffäquivalente in den RME ein deutlich größeres Gewicht mitbringen als nur ihr Eigengewicht (siehe auch These 4).

37 | Dass die in SimRess simulierten Größenordnungen der pro-Kopf-RMC-Werte anderen wissenschaftlichen Abschätzungen ähneln, zeigt über Abbildung 11 hinaus noch der Vergleich mit den RMC-Werten in einem anderen globalen Input-Output-Modell von Giljum et al. [101]. Dort werden für das Jahr 2007 pro-Kopf-Werte von ca. 22 Tonnen ermittelt, während die SimRess-Befunde für 2007 Werte von 24 Tonnen abschätzen [95, 96].

Abbildung 12:

## Vergleich der physischen Handelsbilanz in RME (in Millionen Tonnen) für 2010 aus verschiedenen wissenschaftlichen Studien



\* Die WU Wien-Daten beziehen sich auf das Jahr 2011

Quellen: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5] sowie UBA (Hrsg.) 2016 [9], UNEP 2017 [96], Statistisches Bundesamt 2017b [98] und 2017c [99], Statistisches Bundesamt 2016 [100].

Abbildung 12). Während die Werte des Statistischen Bundesamtes bei ca. 230 Millionen Tonnen liegen (und damit nur um ca. 3% über den Werten des direkten Handels in der Abbildung 12), zeigen alle anderen Vergleichsstudien Werte von 700 Millionen Tonnen und mehr – die SimRess-Ergebnisse und die UNEP-Ergebnisse liegen um ca. 220% höher, die WU-Werte sogar um 343%.

Die Unterschiede in den Werten resultieren insbesondere aus der sogenannten „domestic technology assumption“ (DTA), die das Statistische Bundesamt aus Gründen der Datenverfügbarkeit und Realisierbarkeit für die Abschätzung der Rohstoffäquivalente bei Importen weiterverarbeiteter Güter zugrundelegt [90].<sup>38</sup>

Unter der DTA wird davon ausgegangen, dass für die Herstellung der Güter in den exportierenden Ländern genauso viel Materialeinsatz erforderlich ist, wie die Herstellung des Gutes in Deutschland benötigen würde – damit wird unabhängig vom Herstellungsland die gleiche ressourceneffiziente Technologie unterstellt wie in Deutschland. In SimRess wird diese Annahme nicht verwendet, sondern die verschiedenen Länder arbeiten mit unterschiedlich ressourceneffizienten Technologien, was eine insgesamt größere Primärrohstoffanspruchnahme für die Güterherstellung mit sich bringt – und darüber die höheren RMC-Werte in SimRess begründet. Da die DTA bei den offiziellen Berechnungen des Statistischen Bundesamtes [90] und auch bei der Berichterstattung der nationalen statisti-

38 | Dazu heißt es: „Der Import in Rohstoffäquivalenten umfasst den Import aller Güter, umgerechnet in das Gewicht der Rohstoffe, die zu ihrer Erstellung notwendig sind. Hierbei wird das Herstellungsland nicht berücksichtigt, sondern für wenig verarbeitete Güter ein internationaler Durchschnitt zu Grunde gelegt. Für weiterverarbeitete Güter wird der „domestic-technology“-Ansatz verwendet, d.h. der Materialeinsatz in Rohstoffäquivalenten, der in Deutschland für die Erstellung eines entsprechenden Gutes notwendig gewesen wären. Eine Ausnahme bildet der direkte Import von elektrischer Energie. Hierbei werden die konkreten Produktionsbedingungen des jeweiligen Exportlandes berücksichtigt.“ [90, Glossar S. 110].

schen Ämter an Eurostat Verwendung findet [102, 103], besteht hier das Risiko, dass hierüber niedrigere *RMC*-Werte berichtet werden. Zwar gibt es bisher keine politischen Zielwerte mit Bezug zum *RMC*, aber wissenschaftlich begründete Vorschläge für einen *RMC*-basierten Zielkorridor für den pro-Kopf- Rohstoffkonsum von 5 bis 8 Tonnen [10, 64]. Wenn diese Zielwerte in Relation zu aktuellen pro-Kopf- Rohstoffkonsum Abschätzungen unter Verwendung der DTA betrachtet werden, wird das implizierte Ambitionsniveau zur Erreichung dieser Zielwerte ggf. deutlich unterschätzt.

Wenngleich für die nationale Ressourcenpolitik mit der bestehenden Methodik zur Berechnung

des *RMC*-Indikators ein richtungssicheres Monitoring ressourcenpolitischer Fortschritte möglich ist, kommt der hier diskutierten methodischen Frage große Bedeutung für den internationalen Vergleich und die internationale Fortschrittmessung zu. Insbesondere vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz-Aktivitäten auf Ebene von G7 und G20 sowie mit Blick auf die Forderung der OECD, den *RMC*-Indikator zu verwenden, spricht daher Vieles dafür, Ansätze zu einer differenzierteren Technologienutzung für die Güterherstellung in anderen Ländern weiterzuentwickeln [vgl. 102, 103] und die dafür notwendige Datenbasis zu verbessern, um dann eine international vergleichbare Berichterstattung über *RMC*-Werte vornehmen zu können.

## **These 5: Ressourceneffizienz zu steigern bringt Vorteile für den Klimaschutz – die Vermeidung von Treibhausgasen führt zu veränderten Rohstoffbedarfen**

### **Nexus Klimaschutz und Ressourcenpolitik**

Der eingangs dargestellte Bedarf an einer systemisch ausgerichteten Ressourcenpolitik wird auch deutlich, wenn man mögliche Zusammenhänge zwischen verschiedenen Kernzielen der deutschen Umweltpolitik betrachtet, insbesondere mit Blick auf Klimaschutz und Ressourcenschonung im Sinne einer sparsamen Rohstoffnutzung. Beide Umweltpolitikbereiche sind eng miteinander verknüpft bzw. stehen aus systemischer Sicht in positiver, sich gegenseitig stärkender Wechselwirkung miteinander. Wenn beispielsweise neue Technologien oder Produkte Material-leichter sind als ihre Vorgänger, so müssen weniger Primärrohstoffe abgebaut werden.

Dies spart Rohstoffe und Energie, die sonst bei Abbau und Transport angefallen wären. Dies gilt natürlich umso mehr, wenn erfolgreicher Klimaschutz die Nachfrage nach Produkten verringert, beispielsweise wenn Verkehrspolitik die Nachfrage nach Automobilen reduziert. Ebenso wird bei der Produktion von Sekundärrohstoffen i.d.R. wesentlich weniger Energie benötigt als bei der Primärrohstoffentnahme und -produktion. Der Klimaschutz in Form der Energiewende bedarf für spezifische technologische Ansätze durchaus einer großen Anzahl verschiedener, oftmals kritischer Rohstoffe, bei deren Abbau Umweltbelastungen entstehen. Umwelttechnologien wie Erneuerbare Energien sowie neue alternative Antriebssysteme sind ein wichtiges Beispiel,

doch auch für Gebäudedämmung und den Umbau der städtischen Infrastrukturen werden große Mengen an Rohstoffen benötigt.

Wenngleich die Verbindung zwischen Klimaschutz und Ressourceneffizienz zunehmend erkannt wird (beispielsweise wird im Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 auf die Wechselwirkungen verwiesen), so findet ein systemisches Zusammendenken kaum statt. Im SimRes-Projekt wurden vor diesem Hintergrund zwei eigenständige Referenzszenarien im Simulationsmodell GINFORS<sub>3</sub> parametrisiert. Das Referenzszenario „Industrieland Deutschland“ repräsentiert dabei stetige, aber eher inkrementelle Weiterentwicklungen internationaler energiepolitischer Maßnahmen. Das alternative Szenario „Klimaaktives Deutschland“ hingegen geht von umfassenderen energiepolitischen Transformationsbemühungen aus (siehe hierzu Tabelle 2 auf S. 22).

### **„Industrieland Deutschland“ und „Klimaaktives Deutschland“ – Eine erste Bewertung der Effekte der Klimaschutzpolitik auf die Rohstoffinanspruchnahme**

In beiden Szenarien steigen in den Modellsimulationen sowohl die Weltbevölkerung als auch das BIP pro Kopf bis 2050 an, wobei das Wachstum hauptsächlich in bisher wirtschaftlich schwächeren Ländern und Regionen entsteht, in denen auch die Bevölkerung weiter relativ stark wächst. Im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ wird ein jährliches globales Wachstum von 1,4% projiziert, was leicht über dem Basisszenario „Industrieland Deutschland“ liegt (1,2%). Das höhere Wachstum im „Klimaaktiven Deutschland“ entsteht dabei hauptsächlich durch den Umbau des Energiesystems, der großer Investi-

tionen bedarf. Dieses Wachstum spiegelt sich in beiden Szenarien in Steigerungen der globalen Rohstoffextraktion um fast 50% bis 2050 im Vergleich zu heute wider. Dank des technischen Fortschritts nimmt die Primärrohstoff-Intensität bis 2050 um ca. 20% (Basisszenario) bis ca. 25% („Klimaaktives Deutschland“) ab, doch eine absolute Entkopplung der Primärrohstoff-Nachfrage von der Wirtschaftsentwicklung wird nicht erreicht. Der globale RMC pro Kopf steigt in beiden Szenarien bis 2050 um ca. 22% an.

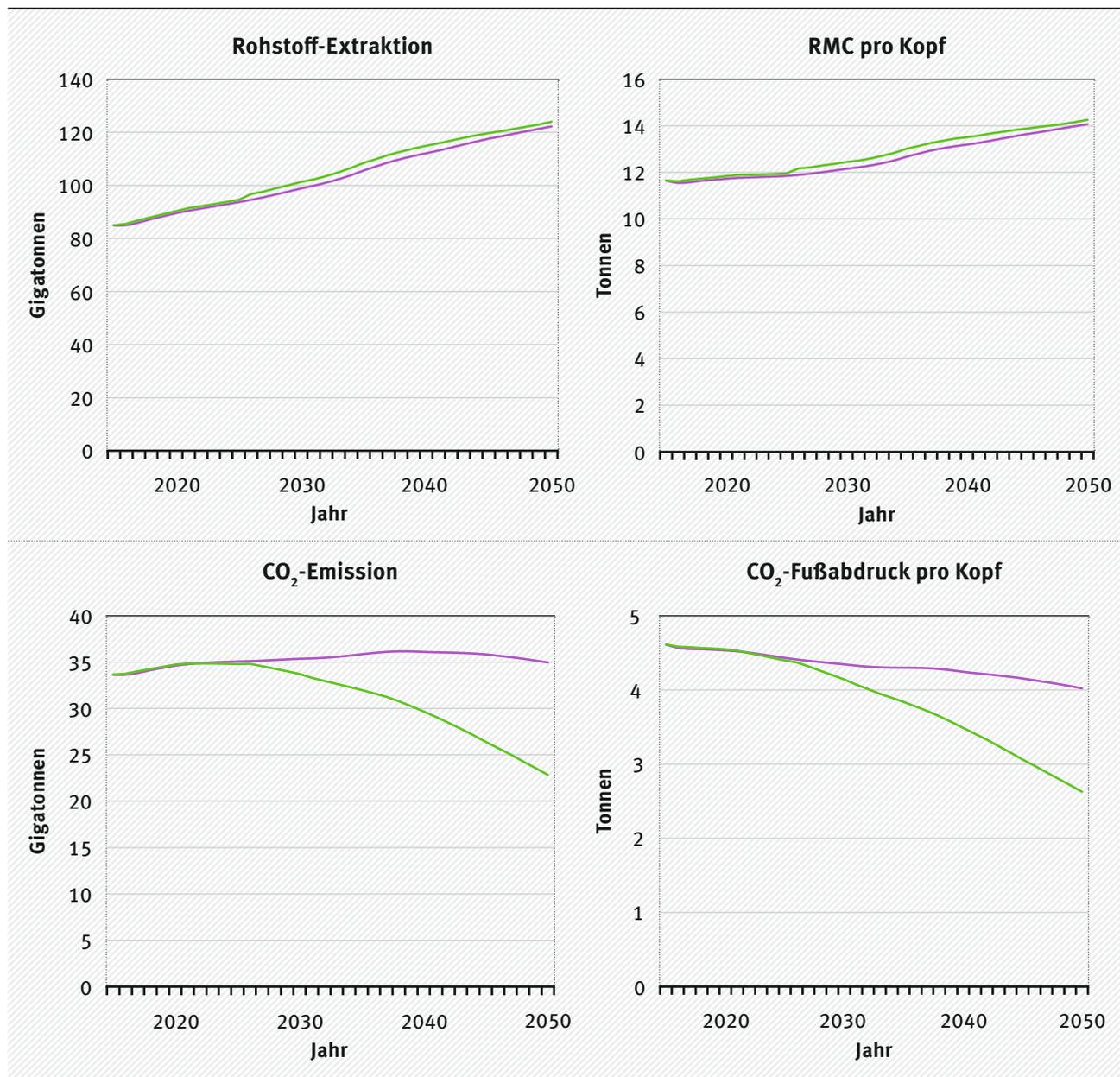
Die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen in den Modellsimulationen im Szenario „Klimaaktives Deutschland“, welches auch Annahmen zu klimapolitischen Entwicklungen auf globaler Ebene macht<sup>39</sup>, rund 32% unter den heutigen Emissionen. Bis 2050 wird in diesem Szenario eine Reduktion um 11 Gigatonnen CO<sub>2</sub> auf dann 23 Gigatonnen CO<sub>2</sub> erreicht. Im „Industrieland Deutschland“ steigt das Emissionsniveau bis 2050 um ca. 4% an. Die globalen Rohstoffextraktionen steigen um 37 bis 39 Gigatonnen auf etwa 120 Gigatonnen im Jahr 2050 an und liegen in beiden Szenarien relativ dicht beieinander. In Deutschland gehen den Abschätzungen



39 | Siehe hierzu Tabelle 2, S. 22

Abbildung 13:

## Globale Entwicklungen klima- und ressourcenpolitischer Indikatoren in den SimRes Referenzszenarien, 2015 – 2050



■ Industrieland Deutschland ■ Klimaaktives Deutschland

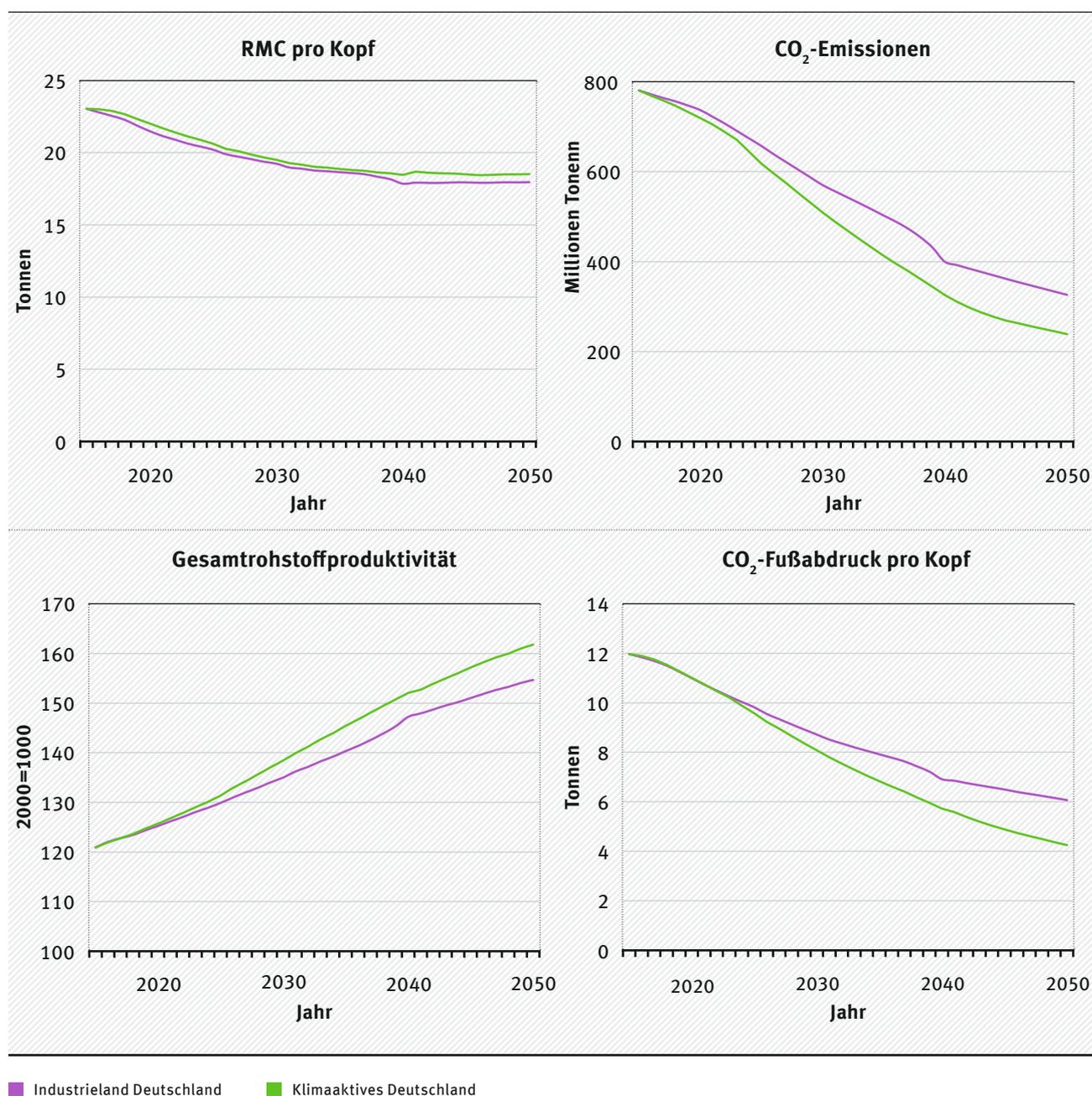
Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5]

zufolge bis 2050 in beiden Szenarien sowohl der Rohstoffkonsum pro Kopf (RMC) als auch der Primärrohstoffeinsatz (RMI) zurück. Der gesamte Materialkonsum (TMC pro Kopf) sinkt ebenfalls deutlich, da in den Szenarien von einem Ausstieg aus der Braunkohle ausgegangen wurde, einem Sektor in dem große Mengen Material

bewegt werden müssen. Die Gesamtrohstoffproduktivität steigt in den Modellsimulationen im Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ insgesamt stärker als im Referenzszenario „Industrieland Deutschland“; der Anstieg im erstgenannten Szenario beträgt durchschnittlich 1,6% pro Jahr im Zeitraum 2010 – 2030 bzw.

Abbildung 14:

## Nationale Entwicklungen klima- und ressourcenpolitischer Indikatoren in den SimRes Referenzszenarien, 2015 bis 2050



Quelle: Eigene Ergebnisse und Darstellung; Distelkamp und Meyer 2017 [5]

1,9% pro Jahr im Zeitraum 2020 – 2030. Das liegt knapp unterhalb des vorgeschlagenen Zielkorridors von über 2% pro Jahr [64]. Im Zeitverlauf 1995 bis 2020 steigt die Gesamtrohstoffproduktivität um durchschnittlich 1,6% pro Jahr an. Diese Trendverläufe ähneln den beobachteten Entwicklungen der Gesamtroh-

stoffproduktivität, die im Zeitraum 2000 – 2010 um jährlich rund 1,3% zunahm [64].

Wie Abbildung 14 verdeutlicht, zeigen die Abschätzungen in beiden Szenarien einen sich ähnelnden Kurvenverlauf für den RMC pro Kopf, mit einem leicht höheren Wert im Szenario

rio „Klimaaktives Deutschland“. Hinter dieser scheinbar gleichen Entwicklung verbirgt sich der Klima-Ressourcen Nexus: die Energiesysteme unterscheiden sich in beiden Szenarien fundamental, was sich auch in einem anders zusammengesetzten RMC widerspiegelt. Der Rückgang des RMC in den Abschätzungen im „Klimaaktiven Deutschland“ geht auf den verminderten Bedarf an fossilen Energieträgern zurück. Dem steht jedoch ein vermehrter Rohstoff-Bedarf für den Umbau der Energieinfrastrukturen gegenüber. Darüber hinaus führen über Rückkopplungseffekte induzierte Rebound-Effekte insgesamt zu einem leicht höheren Rohstoffkonsum (RMC) pro Kopf.

In beiden Szenarien ist mit einem deutlichen Rückgang des Primärenergieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen. Im Szenario „Industrieland Deutschland“ gehen die deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 326 Mio. Tonnen bis 2050 zurück, im „Klimaaktiven Deutschland“ sogar auf 239 Mio. Tonnen. Trotz einer modellierten vollständigen Umstellung der Stromerzeugung auf Erneuerbare Energien bis zum Jahr 2045 entspricht dies nur einer Reduktion um ca. 77% gegenüber 1990. Es besteht somit sogar im ambitionierten Szenario eine deutliche Lücke zum Zielwert von 95% Reduktion gegenüber 1990.

### **Klimaschutz und Ressourcenschutz zusammendenken**

Diese Ergebnisse zeigen einerseits, dass Synergieeffekte zwischen Klimaschutz und Ressourcenschonung plausibel sind. Andererseits wird jedoch auch deutlich, dass die komplexen Zusammenhänge der Ressourcenpolitik und des Klimaschutzes zu berücksichtigen sind, um in einer systemischen Sicht eine differenzierte Einschätzung von gegenseitigen Wechselwirkungen geben zu können. Statt der Weiterentwicklung einzelner Instrumente für isolierte Sektoren

bedarf es einer systemischen Ressourcenpolitik. Die Berücksichtigung der Komplexität kann die Zielerreichung erleichtern: Neben Verringerungen in den Materialinput-Indikatoren RMI und RMC führen produktionsseitige Effizienzfortschritte auch zu signifikanten Reduktionen der Treibhausgasemissionen in bestimmten industriellen Sektoren, die mit isolierten klimapolitischen Maßnahmen eher schwer zu erreichen sind. In den GINFORS<sub>3</sub>-Simulationsexperimenten des SimRess-Projekts lag die globale Rohstoffextraktion im Jahr 2050 44% unter dem Referenzszenario. Gleichzeitig lagen die CO<sub>2</sub>-Emissionen 10% niedriger als in der Referenz. Nach diesen Berechnungen kann eine Verringerung des globalen Primärrohstoffkonsums um 1% eine 0,23% Verringerung an globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 0,23% auslösen. In Deutschland lag der Effekt sogar bei 0,3%.

Umgekehrt stellt sich die Situation komplexer da: zwar steigt die Rohstoffproduktivität im „Klimaaktiven Szenario“ stärker als im Basisszenario „Industrieland Deutschland“, doch der RMC pro Kopf liegt ebenfalls etwas höher, insbesondere aufgrund der großen Ressourceneinsätze für den Umbau des Energiesystems. Insgesamt gleichen sich die Effekte auf den RMC zwar nahezu aus, doch die Zusammensetzung des deutschen Ressourcenverbrauchs verschiebt sich enorm.



# 3

## Zusammenfassung und Ausblick – was zukunftsfähige Ressourcenpolitik beachten sollte

SimRes zeigt, dass eine integrative und systemisch konzipierte Ressourcenpolitik dazu beiträgt, die Ziele des Ressourcenschutzes und des Klimaschutzes zu erreichen. Dabei reicht es jedoch nicht aus, einzelne Politikinstrumente zu verbessern und lediglich die Wertschöpfungskette zu betrachten. Erst die Berücksichtigung der systemischen Zusammenhänge und unterschiedlichen Politikfelder ermöglicht eine wirksame und effiziente Zielerreichung und zeigt zukünftige Handlungsfelder auf.

So trägt Ressourceneffizienz zum Klimaschutz bei, indem die energieintensive Extraktion, Verarbeitung und Transport reduziert werden. Modellrechnungen zeigen, dass unter Berücksichtigung möglicher Rebound-Effekte eine Verringerung des Primärrohstoffkonsums um 1% zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in einer Größenordnung von 0,2% bis 0,3% führt. Umgekehrt verringert die Energiewende zwar den Bedarf an fossilen Rohstoffen, erhöht aber technologiespezifisch den Bedarf an einigen kritischen Rohstoffen. In einer systemischen Sicht gilt es, mögliche Synergien gegen mögliche Zielkonflikte abzuwägen und langfristige vs. kurzfristige Effekte in den Blick zu nehmen. Ökonomische Knappheiten treten bei den Stahlveredlern Niob und Kobalt, Metallen der Seltenen Erden sowie bei Indium, Lithium, Platin, Palladium, Tantal und Zinn voraussichtlich bereits mittelfristig auf; langfristig sind auch mit Blick auf ihre Verfügbarkeit heute eher unproblematische Rohstoffe wie Aluminium, Eisen und Kupfer betroffen. Die tatsächlich eintretenden Versorgungsengpässe hängen letztlich davon ab, wie sich die zukünftige Nachfrage angesichts von

Bevölkerungswachstum und Konsumententwicklungen darstellt.

Eine ehrgeizige Ressourcenpolitik ist nicht nur aufgrund zu erwartender Knappheiten und als Klimaschutzaktivität geboten, sondern lohnt sich auch wirtschaftlich: Simulationsexperimente im SimRes-Projekt mit drei unterschiedlichen ressourcenpolitischen Ambitionsniveaus zeigen, dass ambitionierte Ressourcenpolitik nicht nur die größten Steigerungen in der Gesamtrohstoffproduktivität und die größten Einsparungen in der Rohstoffinanspruchnahme erreicht, sondern auch das größte Wirtschaftswachstum (in BIP) bis 2050 erzielt.

Um die langfristige Rohstoffverfügbarkeit zu erhöhen, ist eine Reihe von Maßnahmen möglich und geboten. Der Bedarf kann durch die Erhöhung der Extraktion, durch die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen oder Substitution kritischer durch andere Rohstoffe gedeckt werden oder durch Suffizienzmaßnahmen reduziert werden. Im SimRes-Projekt wurde insbesondere die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen untersucht. Die Nutzung von Sekundärrohstoffen entlastet die Umwelt, denn die CO<sub>2</sub>-Emissionen und andere Umweltbelastungen (z.B. von Böden, Wasser und Biodiversität), die beim Recycling entstehen, sind meist deutlich geringer als beim Rohstoffabbau. Überdies werden die inländische Wertschöpfung erhöht, Arbeitsplätze geschaffen und die Importabhängigkeit reduziert, sofern die Gewinnung der Sekundärrohstoffe im Inland erfolgt. Um die Versorgungssicherheit mit Sekundärrohstoffen zu gewährleisten, müssen die Sekundärrohstoffe aus dem anthropogenen

Lager erfasst, aufbereitet und hochqualitativ rezykliert werden. Die Simulation einer deutlichen Recyclingzunahme zeigt, dass ökonomische Knappheiten vermieden oder zumindest weit in die Zukunft verschoben werden können.

Die SimRes Ergebnisse machen allerdings auch deutlich, dass über eine vornehmlich auf Ressourceneffizienzsteigerungen in der Wertschöpfungskette orientierte Ressourcenpolitik zwar signifikante Effizienzsteigerung möglich sind, dass darüber jedoch keine hinreichende absolute Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch erreicht wird. Effizienzsteigerungen führen über Kosteneinsparungen zur Steigerung von Produktion und/oder Konsum, welche die Einsparungen „auffressen“ (Rebound-Effekt) oder gar überkompensieren. Wissenschaftlich formulierte Ziele der Ressourcenschonung, wie die Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität um 40-60% bis 2030 (Basisjahr 2010) werden verfehlt. Eine global gerechte und nachhaltige Primärrohstoffanspruchnahme pro Kopf von 5-8 Tonnen ist mit bestehender Ressourcenpolitik nicht zu erreichen.

Eine wirkungsvolle Ressourcenpolitik muss also nicht nur systemisch ausgerichtet werden, auch die Instrumententypen (regulatorisch, informativ, ökonomisch) und die Strategien als solche (Erhöhung der Primärrohstoffentnahme vs. Bereitstellung von Sekundärrohstoffen vs. Suffizienzpolitik) müssen neu ausgerichtet werden. Ressourcenpolitik bedarf starker ordnungsrechtlicher und ökonomischer Instrumente. „Weiche“ Instrumente wie Informationspolitik, die (noch) vorrangig in der nationalen Ressourcenpolitik vorzufinden sind, sind allein wenig wirksam, sollten jedoch Teil eines Politikmixes sein. Darüber hinaus muss Ressourcenpolitik strukturelle und konsumseitige Veränderungen in Deutschland einbeziehen, die den Rebound-

Effekt adressieren. Hierzu gilt es, den Aspekt der Suffizienz zu stärken.

Des Weiteren braucht eine starke nationale Ressourcenpolitik angesichts der globalen Verflechtung eine ebenso starke internationale Komponente: Der Anteil der im Ausland abgebauten Rohstoffe für den inländischen Rohstoffkonsum (RMC) ist zwischen 1995 und 2015 von 49% auf 66% gestiegen. Eine ambitionierte Klimapolitik würde diesen Anteil bis 2050 wieder leicht reduzieren, doch auch in Zukunft wird rund die Hälfte der Primärrohstoffe aus dem Nicht-EU Ausland stammen. Der zukünftige globale Anstieg des Ressourcenverbrauchs wird jedoch hauptsächlich in nachholenden Ländern stattfinden. Im Rahmen der Simulationsexperimente „moderate, mittlere und große Transformation“ wurde in SimRes auch ein „Nachahmer“-Effekt simuliert. Nach diesen Berechnungen werden im Simulationsexperiment „große Transformation“ im Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ weltweit

- ▶ ca. 50 Milliarden Tonnen Rohstoffe eingespart,
- ▶ die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 10% reduziert
- ▶ und das globale BIP um ca. 5,6% gesteigert.

Dieser Verantwortung kann sich die deutsche Ressourcenpolitik stellen, indem sie beispielsweise (i) in bilateralen Rohstoffpartnerschaften Nachhaltigkeitsaspekte stärkt; (ii) internationale Standards in der Rohstoffgewinnung für Nachhaltigkeit mitentwickelt und sich für die Umsetzung dieser Standards entlang globaler Lieferketten einsetzt; (iii) im Inland den Absatz ressourcenschonend hergestellter Güter steigert und (iv) Umwelttechnologien transferiert.

Aussagekräftige Daten über die vergangene, gegenwärtige und erwartbare Rohstoffanspruchnahme sind die Grundlage der Ressour-

cenpolitik. Deren Aussagekraft hängt von den genutzten Indikatoren ab, insbesondere von deren Abdeckungsgrad und der internationalen Vergleichbarkeit. Aktuell stützt sich die nationale Ressourcenpolitik (ProgRess II) auf die gesamtwirtschaftlichen Indikatoren  $DMI_{abiotisch}$  und RMI, jeweils als Produktivitätsindikator in Beziehung zum BIP. Der Rohstoffeinsatz RMI bildet über sogenannte Rohstoffäquivalente auch die Materialentnahmen ab, die mit der Erzeugung der Importe im Ausland verbunden sind. Der DMI leistet dies nicht. Allerdings können die RMI-Daten nicht über verschiedene Länder hinweg addiert werden, da der RMI die Exporte nicht abzieht und so Mehrfachzählungen entstehen können.

Der Indikator Rohstoffkonsum RMC überwindet beide Probleme – in ihm werden der ökologische Rucksack von Ressourcenentnahme sowie von Halb- und Fertigwaren abgebildet und dennoch Mehrfachzählungen vermieden. Der RMC sollte ergänzend zum nationalen ressourcenpolitischen Monitoring vorgeschrieben werden. Die Daten für den RMC stehen über das Statistische Bundesamt bereits zur Verfügung. Allerdings sollte die Berechnungsweise des RMC – wie auch des RME, der physischen Handelsbilanz Deutschlands in Rohstoffäquivalenten – des Statistischen Bundesamtes überprüft werden. Die Daten beider Indikatoren des Statistischen Bundesamtes liegen deutlich unter anderen Berechnungen (SimRess, WU Wien, UNEP). Die Unterschiede in den Werten resultieren insbesondere aus der Tatsache, dass das Statistische Bundesamt den technischen Entwicklungsstand Deutschlands auf alle Länder überträgt, obgleich de facto beträchtliche Unterschiede in der Effizienz der Produktion bestehen. Diese Herangehensweise wird auch bei der Berichterstattung der nationalen statistischen Ämter an Eurostat genutzt, was insgesamt zu einem nied-

rigeren RMC führt. Um diese Lücke zu schließen, sollten Ansätze differenzierter Technologienutzung für die Güterherstellung in verschiedenen Ländern (weiter)entwickelt werden und eine Datenbasis geschaffen werden, die durch das Statistische Bundesamt genutzt werden kann.

### **Vor diesem Hintergrund sollte eine zukunftsfähige Ressourcenpolitik**

- ▶ vorausschauend und integrativ systemische Zusammenhänge berücksichtigen und in Politikmixen adressieren. Klimaschutz und Ressourcenpolitik sollten hierzu stärker zusammengedacht werden.
- ▶ harte politische Instrumente stärker einbeziehen, um Rebound-Effekten entgegenzuwirken sowie strukturelle und konsumseitige Veränderungen zu unterstützen, die eine langfristige zukunftsfähige Entkopplung von Wirtschaftsentwicklung und Rohstoffkonsum erreichen helfen.
- ▶ der globalen Mitverantwortung gerecht werden, die Deutschland mit seinen Rohstoffimporten, intensiven Handelsverflechtungen und aufgrund des hohen Konsumniveaus für die Auswirkungen des Rohstoffabbaus in anderen Ländern trägt.
- ▶ ein systemisches ressourcenpolitisches Monitoring auf Grundlage aussagekräftiger und international vergleichbarer Indikatoren zur absoluten Rohstoffanspruchnahme umsetzen. Dazu bietet sich der Indikator Rohstoffkonsum (RMC) an. Die bisherige Berechnungsweise des RMC – wie auch des RME, der physischen Handelsbilanz Deutschlands in Rohstoffäquivalenten – sollte überprüft werden, insbesondere mit Blick auf die Annahmen über den technischen Entwicklungsstand in unterschiedlichen Ländern.

# 4

## Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt (Hrsg.), 2012. Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau-Roßlau
- [2] Ekins, Paul, Nick Hughes, (et al.), 2017. Resource Efficiency: Potential and Economic Implications. A report of the International Resource Panel. Paris: UNEP IRP.
- [3] Hirschnitz-Garbers, Martin, Adrian R. Tan, Albrecht Gradmann and Tanja Srebotnjak, 2015. Key Drivers for Unsustainable Resource Use – Categories, Effects and Policy Pointers. *Journal of Cleaner Production* 132: 13 - 31. doi:10.1016/j.jclepro.2015.02.038.
- [4] UBA (Hrsg.), 2014. Die Zukunft im Blick: Trendbericht für eine vorausschauende Ressourcenpolitik. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- [5] Distelkamp, Martin und Mark Meyer, 2017. Langfristszenarien und Potenziale zur Ressourceneffizienz in Deutschland im globalen Kontext – quantitative Abschätzungen mit dem Modell GINFORS. SimRess-Endbericht Band 1. Osnabrück: GWS.
- [6] Hatfield-Dodds, Steve, Heinz Schandl, David Newth, Michael Obersteiner, Yiyong Cai, Tim Baynes, James West and Petr Havlik (2017): Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050, with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies. *Journal of Cleaner Production* 144: 403-414. Doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.170
- [7] Lorenz, Ullrich, Sverdrup, Ulrik, Ragnarsdottir, Kristin Vala, 2017. Global Megatrends and Resource Use – A Systemic Reflection, In: Lehmann H. (eds) *Factor X. Eco-Efficiency in Industry and Science*, vol 32. Springer, Cham
- [8] Statistisches Bundesamt, 2016. Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Ausgabe 4.
- [9] UBA (Hrsg.), 2016. Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt
- [10] Bringezu, Stefan, 2015. Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. *Resources* 4: 25–54. doi:10.3390/resources4010025
- [11] Müller, Felix, Jan Kosmol, Hermann Keßler, Michael Angrick, und Bettina Rechenberg, 2016. Die unerträgliche Ressourcenleichtigkeit des Seins. *Ökologisches Wirtschaften - Fachzeitschrift* 31: 45. doi:10.14512/OEW310445.
- [12] BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit), 2016. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, März 2016
- [13] Forrester, Jay, 1961. *Industrial Dynamics*, MIT Press; Forrester, Jay, 1969. *Urban Dynamics*. MIT Press; Forrester, Jay, 1971. *World Dynamics*. Wright Allen Press, Cambridge, USA
- [14] Stahmer, Carsten, Bleses, Peter und Meyer, Bernd, 2000. Input-Output-Rechnung: Instrumente zur Politikberatung. Informationen für ein Pressegespräch am 30. August 2000. Statistisches Bundesamt.
- [15] Frenkel, Michael, John, Klaus Dieter, 2011. *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung. 7., vollständig überarbeitete Auflage*. München: Vahlen
- [16] Schoer, Karl, Dittrich, Monika, Sartorius, Christian, 2017. Konsistenz im Projekt DeteRess, Anforderungen durch das umweltökonomische Rohstoffmodell. In: Biemann (et al.): *Annahmen, Konsistenzen und Modellinteraktionen in der Modellierung von Ressourcenschonung und Treibhausgasminderungen*. Dessau-Roßlau
- [17] Distelkamp, Martin, Meyer, Mark, 2017. Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe. *Ecological Economics*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.014>.
- [18] Senge, P.M., 2006. *Die Fünfte Disziplin. Kunst und Praxis der lernenden Organisation*. Klett-Cotta
- [19] Europäische Kommission, 2015. Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. COM(2015) 614 final
- [20] WBGU, 2011. *Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. WBGU.
- [21] International Resource Panel, 2017. *Green Technology Choices: The Environmental and Resource Implications of Low-Carbon Technologies*. Nairobi, Kenya

- [22] United Nations Environment Programme, 2015. Green Energy Choices: The Benefits, Risks and Trade-Offs of Low-Carbon Technologies for Electricity Production : Summary for Policy Makers. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme
- [23] Angerer, Gerhard, Frank Marscheider-Weidemann, Arne Lüllmann, Lorenz Erdmann, Michael Scharp, Volker Handke, und Max Marwede, 2009. Rohstoffe für Zukunftstechnologien Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Schlussbericht. Berlin: BMW
- [24] Erdmann, Lorenz, Siegfried Behrendt, und Moira Feil (2011). Kritische Rohstoffe für Deutschland ‚Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte‘. Abschlussbericht. Berlin: KfW
- [25] Marscheider-Weidemann, Frank, Sabine Langkau, Torsten Hummen, Lorenz Erdmann, und Luis Tercero Espinoza, 2016. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. 29. DERA Rohstoffinformationen. DERA
- [26] Huy, Dieter, und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2015. Deutschland - Rohstoffsituation 2015
- [27] Butts, Kent Hughes, 2015. Geopolitics of Resource Scarcity, 3 Penn State Journal of Law & International Affairs 3: 1.
- [28] Dobbs, Richard, Oppenheim Oppenheim, Fraser Thompson, Sigurd Mareels, Scott Nyquist, und Sunil Sanghvi, 2013. Resource Revolution: Tracking global commodity markets. Trends survey 2013. McKinsey Global Institute
- [29] Mildner, Stormy-Annika (Hrsg.), 2011. Konfliktisiko Rohstoffe? Herausforderungen und Chancen im Umgang mit knappen Ressourcen. SWP-Studie. Berlin
- [30] Henckens, Matheus L.C.M., Peter P.J. Driessen, und Ernst Worrell, 2014. Metal Scarcity and Sustainability, Analyzing the Necessity to Reduce the Extraction of Scarce Metals. Resources, Conservation and Recycling 93:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.012>
- [31] Brandenburg, Torsten, Peter Buchholz, Ulrike Dorner, Dieter Huy, Maren Liedtke, Michael Schmidt, und Henrike Sievers, 2017. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten - potenzielle Preis- und Lieferrisiken: DERA-Rohstoffliste 2016.
- [32] Halada, Kohmei, Masanori Shimada, und Kiyoshi Ijima, 2008. Forecasting of the Consumption of Metals up to 2050. Materials Transactions 49: 402–10. doi:10.2320/matertrans.ML200704.
- [33] Koca, Deniz, und Harald Sverdrup, 2018. The WORLD Model Development and the Integrated Assessment of the Global Natural Resources Supply. SimRes project report Volume 2. Lund.
- [34] UNEP, 2013a. Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. van Der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hirschier, R.
- [35] UNEP, 2013b. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
- [36] Reuscher, Günter, Christiane Ploetz, Vera Grimm, und Axel Zweck, 2008. Innovationen gegen Rohstoffknappheit. Düsseldorf.
- [37] Rüttinger, Lukas, 2014a. Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Gewinnung Seltener Erden in Bayan Obo, China. UmSoRes-Fallstudie. Berlin: adelphi.
- [38] Rüttinger, Lukas, 2014b. Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Kupfergewinnung in Mopani, Sambia. UmSoRes-Fallstudie. Berlin: adelphi.
- [39] Rüttinger, Lukas, 2016. Umwelt- und Sozialauswirkungen der Bauxitgewinnung und -weiterverarbeitung in der Boké und Kindia-Region, Guinea. UmSoRes-Fallstudie. Berlin: adelphi.
- [40] Manhart, Andreas, Lukas Rüttinger, und Laura Griestop, 2015. Die Debatte um Konfliktrohstoffe und mögliche Bezüge zu Umweltaspekten bei der Rohstoffgewinnung. RohPolRes-Kurzanalyse 3. Berlin.
- [41] Wilts, Henning, Lucas Rainer, Nadja von Gries, und Marthe Zirngiebl, 2014. Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Studie im Auftrag der KfW Bankengruppe. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- [42] Coats, Emily und Dustin Benton, 2015. Unemployment and the circular economy in Europe: a study of opportunities in Italy, Poland and Germany. London: Green Alliance.
- [43] UBA (Hrsg.), 2015. Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. UBA Texte 83/2015. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

- [44] Gandenberger, Carsten, 2014. Explorative Analyse der Zielbeziehungen zwischen Ressourceneffizienz und Versorgungssicherheit. RohPolRes-Kurzanalyse Nr. 1. Fraunhofer ISI.
- [45] Glöser, Simon, Marcel Soulier, und Luis A. Tercero Espinoza, 2013. Dynamic Analysis of Global Copper Flows. Global Stocks, Postconsumer Material Flows, Recycling Indicators, and Uncertainty Evaluation. *Environmental Science & Technology* 47: 6564–72. doi:10.1021/es400069b.
- [46] UBA (Hrsg.), 2015. Elemente einer erfolgreichen Ressourcenschonungspolitik. Umweltbundesamt.
- [47] BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), 2012. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, Mai 2012
- [48] Goulder, Lawrence H. and Ian W.H. Parry, 2008. Instrument Choice in Environmental Policy. *Review of Environmental Economics and Policy* 2:152-174
- [49] de Serres, Alain, Fabrice Murtin und Giuseppe Nicoletti, 2010. A Framework for Assessing Green Growth Policies. OECD Economics Department Working Papers No. 774. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- [50] Ölander, Folke & Thøgersen, John, 2014. Informing Versus Nudging in Environmental Policy. *Journal of Consumer Policy* 37: 341-356.
- [51] Shove, Elizabeth, Pantzar, Mika, Watson, Matt, 2012. *The dynamics of social practice: everyday life and how it changes*. SAGE, Los Angeles
- [52] UBA (Hrsg.), 2016. Verhaltensökonomische Erkenntnisse für die Gestaltung umweltpolitischer Instrumente. Endbericht. UBA Texte 83/2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- [53] Hirschnitz-Garbers, Martin und Langsdorf, Susanne, 2015. Informationskampagnen für Konsumentinnen und Konsumenten – Effekte und Ausrichtungen. Vertiefungsanalyse 4 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRes). [www.ressourcenpolitik.de](http://www.ressourcenpolitik.de)
- [54] von Borgstede, Chris and Andersson, Kristin, 2010. Environmental Information—Explanatory Factors for Information Behavior. *Sustainability* 2: 2785-2798.
- [55] SRU, 1994. Umweltgutachten 1994 – Für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung. Drucksache 12/6995, Berlin.
- [56] Kozluk, Tomasz. and Vera Zipperer, 2014. Environmental Policies and Productivity Growth: A Critical Review of Empirical Findings, *OECD Journal: Economic Studies*, Volume 2014
- [57] Ekvall, Tomas, Martin Hirschnitz-Garbers, Fabio Eboli, and Aleksander Sniegocki, 2016. A Systemic and Systematic Approach to the Development of a Policy Mix for Material Resource Efficiency. *Sustainability* 8: 373. doi:10.3390/su8040373.
- [58] OECD, 2007. Instrument Mixes for Environmental Policy. Paris: OECD Publishing. [http://www.oecd-ilibrary.org/environment/instrument-mixes-for-environmental-policy\\_9789264018419-en](http://www.oecd-ilibrary.org/environment/instrument-mixes-for-environmental-policy_9789264018419-en) .
- [59] Jacob, Klaus (et al.), 2015. Innovationsorientierte Ressourcenpolitik in planetaren Grenzen. Endbericht des Projekts Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRes). [www.ressourcenpolitik.de](http://www.ressourcenpolitik.de)
- [60] Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (Hrsg.), 2016. Ein ressourceneffizientes Europa. Ein Programm für Klima, Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung. Position der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt // April 2016
- [61] European Commission, 2011. Roadmap to a Resource Efficient Europe, COM(2011) 571 final, Brussels.
- [62] European Commission, 2011. Energy roadmap 2050, COM(2011) 885 final, Brussels.
- [63] Hirschnitz-Garbers, Martin, Deniz Koca, Harald Ulrik Sverdrup, Mark Meyer und Martin Distelkamp, 2017. System analysis for environmental policy – System thinking through system dynamic modeling and policy mixing as used in the SimRes project. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- [64] Günther, Jens und Golde, Michael, 2015. Gesamtwirtschaftliche Ziele und Indikatoren zur Rohstoffinanspruchnahme. Dezember 2015, Dessau-Roßlau.
- [65] Madlener, Reinhard und Blake Alcott, 2011. Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkopplung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen. Kommissionsmaterialie M-17(26)13. Berlin: Deutscher Bundestag, Enquete-Kommission Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität
- [66] de Haan, Peter, Anja Peters, Elsa Semmling, Hans Marth, und Walter Kahlenborn, 2015. Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik. 31. UBA Texte. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

- [67] Santarius, Tilman, 2015. Der Rebound-Effekt. Ökonomische, psychische und soziale Herausforderungen für die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch. Metropolis, Marburg
- [68] Schmidt-Bleek, Friedrich, 1998. Das MIPS-Konzept: weniger Naturverbrauch - mehr Lebensqualität durch Faktor 10. Droemer, München
- [69] Schmidt-Bleek, Friedrich, 1997. Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS – das Maß für ökologisches Wirtschaften, zweite Auflage 1997
- [70] Schmidt-Bleek, Friedrich, 2008. Nutzen wir die Erde richtig? Die Leistungen der Natur und die Arbeit des Menschen. Fischer Verlag, Frankfurt am Main.
- [71] Wuppertal Institut, 2013. 18 Factsheets zum Thema Mobiltelefone und Nachhaltigkeit. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Dezember 2013, Wuppertal.
- [72] Voge, Ann.-Kathrin, 2015. Rohstoffe aus dem Globalen Süden. Das Beispiel Smartphone. Südwind. [http://www.vhs-inzigkofen.de/fileadmin/vhs-heim/kursbilder/3\\_Politik\\_Paedagogik/03056\\_Powerpoint\\_A.Voge\\_-\\_Rohstoffe\\_aus\\_dem\\_Globalen\\_Sueden\\_-\\_das\\_Beispiel\\_Smartphone.pdf](http://www.vhs-inzigkofen.de/fileadmin/vhs-heim/kursbilder/3_Politik_Paedagogik/03056_Powerpoint_A.Voge_-_Rohstoffe_aus_dem_Globalen_Sueden_-_das_Beispiel_Smartphone.pdf), eingesehen am 21. Juli 2017.
- [73] Asner, Gregory, Llacayo, William, Tupayachi, Raul and Ernesto Ráez Luna, 2013. Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. PNAS 11: 18454–18459
- [74] Rüttinger, Lukas (u. a.), 2015. Fallstudien zu Umwelt- und Sozialauswirkungen der Goldgewinnung in Madre de Dios, Peru. UmSoRes-Fallstudie. Berlin: adelphi.
- [75] Statistisches Bundesamt, 2017. Umweltnutzung und Wirtschaft. Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Umweltschutzmaßnahmen. Ausgabe 2016, Wiesbaden.
- [76] Ferretti, Johanna, Jacob, Klaus und Werland, Stefan, 2013. Rohstoffpartnerschaften im Rahmen der Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Kurzanalyse 2 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRes). Überarbeitete Version, Juli 2013. [www.ressourcenpolitik.de](http://www.ressourcenpolitik.de)
- [77] Werland, Stefan, 2015. Politiktransfer zur Förderung von Ressourceneffizienz. Kurzanalyse 12 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRes). [www.ressourcenpolitik.de](http://www.ressourcenpolitik.de)
- [78] Range, Claire, 2014. Prüfung der bestehenden Beratungsprogramme für Exportförderung hinsichtlich der Berücksichtigung von RE-Technologien. Kurzanalyse 8 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRes). [www.ressourcenpolitik.de](http://www.ressourcenpolitik.de)
- [79] Schmidt, Mario, Spieth, Hannes, Bauer, Joa und Haubach, Christian, 2017. Ressourceneffizienz als Exportprodukt. In: 100 Betriebe für Ressourceneffizienz – Band 1. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 46-49
- [80] BMUB, 2014. GreenTech made in Germany 4.0: Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. BMUB, Berlin
- [81] Bringezu, Stefan, 2011. Key elements for Economy-wide Sustainable Resource Management. Annales des Mines - Responsabilité et environnement, 61, p. 78–87.
- [82] Bringezu, Stefan, 2009. Visions of a sustainable resource use. In Sustainable Resource Management: Global Trends, Visions and Policies; Bringezu, S., Bleischwitz, R., Eds.; Greenleaf Publishing: Sheffield, UK,; p. 155–215
- [83] Dittrich, Monika, Giljum, Stefan, Lutter, Stephan, Polzin, Christine, 2012. Green Economies around the World? Implications of Resource Use for Development and the Environment; SERI: Vienna, Austria
- [84] Jacob, Klaus et al. (2015). Innovationsorientierte Ressourcenpolitik in planetaren Grenzen. Endbericht des Projekts Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRes). [www.ressourcenpolitik.de](http://www.ressourcenpolitik.de)
- [85] Federal Government of Germany (2015). G7 Presidency 2015. Final Report by the Federal Government on the G7 Presidency 2015. Berlin: Federal Government of Germany.
- [86] G7 Environment Ministers (2016). Communiqué G7 Toyama Environment Ministers' Meeting. Toyama, Japan May 15-16, 2016
- [87] G7 Environment Ministers (2017). Communiqué G7 Bologna Environment Ministers' Meeting Bologna, Italy 11-12 June 2017.
- [88] G20 Leaders (2017a). G20 Leaders Declaration ‚Shaping an interconnected world‘. Hamburg, 7/8 July 2017.
- [89] G20 Leaders (2017b). G20 Resource Efficiency Dialogue. Annex to G20 Leaders Declaration
- [90] UBA (Hrsg.), 2016. Rohstoffe für Deutschland. Bedarfsanalyse für Konsum, Investition und Export auf Makro- und Mesoebene. UBA-Texte 62/2016, Umweltbundesamt

- [91] Nishikawa, Junko, 2016. Report from G7 Alliance Workshop on Resource Efficiency and A Low-Carbon Society. Vortrag gehalten auf dem Symposium under G7 Alliance on Resource Efficiency, Tokyo, Japan, 13. Dezember 2016
- [92] Statistisches Bundesamt, 2018. Letzte inländische Verwendung in Rohstoffäquivalenten in Millionen Tonnen. URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/InlaendischeVerwendung.html>, Zugriff am 2. Mai 2018
- [93] OECD, 2015. Material Resources, Productivity and the Environment. OECD Green Growth Studies, OECD Publishing Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264190504-en>
- [94] OECD, 2013. Putting Green Growth at the Heart of Development. OECD Green Growth Studies, OECD Publishing Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264181144-en>
- [95] Distelkamp, Martin, Monika Dittrich und Mark Meyer, 2016. The modelling approaches used in DeteRess and SimRess - differences and similarities of methods and the results obtained. Vortrag gehalten auf dem DeteRess-SimRess-Abschlussworkshop "Resource conservation and resource productivity: modelling approaches for assessment of economy-wide material flows and potential policy impacts", Berlin, 7. Dezember 2016
- [96] UNEP, 2017. UN environment live. Science and data for people. URL <http://environmentlive.unep.org/downloader>, Zugriff am 2. Mai 2018. Dort im Auswahl-Menü der Daten-Tabellen zu SDG12 die Tabellen: Material Footprint (Total) per capita, Raw material equivalent of direct exports (Total), Raw material equivalent of direct imports (Total), Raw material trade balance (Total).
- [97] Statistisches Bundesamt, 2018a. Material, Rohstoffe, Wasser. Entnahmen und Abgaben von Material in Millionen Tonnen. URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/MaterialEnergiefluesse.html>, Zugriff am 2. Mai 2018.
- [98] Statistisches Bundesamt, 2018b. Globalisierungsindikatoren. Kennzahlen zur Außenwirtschaft. URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Globalisierungsindikatoren/Tabellen/37.html>; Zugriff am 2. Mai 2018.
- [99] Statistisches Bundesamt, 2018c. Globalisierungsindikatoren. Kennzahlen zur Außenwirtschaft nach dem Außenhandelskonzept, URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Globalisierungsindikatoren/Tabellen/38.html>, Zugriff am 2. Mai 2018.
- [100] Statistisches Bundesamt, 2016. Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall. Wiesbaden.
- [101] Giljum, Stefan, Bruckner, Martin, Martinez, Aldo, 2015. Material Footprint Assessment in a Global Input-Output Framework. *Journal of Industrial Ecology*, 19, p. 792–804.
- [102] Schoer, Karl, Jürgen Giegrich, Jan Kovanda, Christoph Lauwigi, Axel Liebich, Sarka Buyny und Josefina Matthias, 2012. Conversion of European Product Flows into Raw Material Equivalents. Final report of the project: Assistance in the development and maintenance of Raw Material Equivalents conversion factors and calculation of RMC time series. Heidelberg, May 2012
- [103] Eurostat, 2016. Handbook for estimating raw material equivalents (RME) of imports and exports and RME-based indicators for countries – based on Eurostat's EU RME model. December 2016.





[Kurzlink: [bit.ly/2dowYYI](https://bit.ly/2dowYYI)]

 [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [www.twitter.com/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)