

TEXTE

48/2018

# Potentiale und Kernergebnisse der Simulationen von Ressourcen- schonung(spolitik)

Endbericht des Projekts „Modelle, Potentiale und  
Langfristszenarien für Ressourceneffizienz“ (Sim-Ress)



TEXTE 48/2018

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3712 93 102  
UBA-FB 002654/END

## **Potentiale und Kernergebnisse der Simulationen von Ressourcenschonung(spolitik)**

Endbericht des Projekts „Modelle, Potentiale und Langfristszenarien für  
Ressourceneffizienz“ (Sim-Ress)

von

Martin Hirschnitz-Garbers  
Ecologic Institut, Berlin

Martin Distelkamp  
Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS), Osnabrück

Deniz Koca  
Lund Universität, Lund

Mark Meyer  
Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS), Osnabrück


Harald Sverdrup  
Iceland University, Reykjavik

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

## Herausgeber:

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

## Durchführung der Studie:

Ecologic Institut  
Pfalzburger Str. 43-44  
10717 Berlin

## Abschlussdatum:

November 2017

## Redaktion:

Fachgebiet I 1.4 Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Umweltfragen, nachhaltiger Konsum  
Michael Golde  
Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien, Ressourcenschonung  
Ullrich Lorenz

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

## Weitere Publikationen aus dem Forschungsvorhaben 3712 93 102:

TEXTE 49/2018 System analysis for environmental policy – System thinking through system dynamic modelling and policy mixing as used in the SimRess project

TEXTE 50/2018 Langfristszenarien und Potenziale zur Ressourceneffizienz in Deutschland im globalen Kontext – quantitative Abschätzungen mit dem Modell GINFORS

Fachbroschüre Ressourcenschonung als Zukunftsaufgabe – Ansatzpunkte für eine systemische Ressourcenpolitik

Dessau-Roßlau, Juni 2018

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

## Kurzbeschreibung

Das Ausmaß der Nutzung natürlicher Ressourcen durch den Menschen stellt sozial-ökologische und sozio-technische Systeme gleichermaßen vor große Herausforderungen: Verfügbarkeitsrisiken, Schadstoff- und Treibhausgas-Emissionen, Abfallaufkommen auf der einen Seite, aber auch Aspekte globaler Gerechtigkeit und gesellschaftlicher Wohlfahrt auf der anderen Seite.

Um die potentiellen Auswirkungen zukünftiger ressourcenpolitisch relevanter Entwicklungen und Strategien auf relevante Umwelt- und Wirtschaftsindikatoren zu testen, wurden im SimRess-Projekt zunächst im Rahmen einer Trendanalyse solche Entwicklungen identifiziert, die zukünftig positiv wie negativ Einfluss auf die menschliche Nutzung natürlicher Ressourcen in Deutschland bzw. global nehmen könnten. Diese Entwicklungen wurden dann in ressourcenrelevante Szenarien (ohne und mit Annahme weitergehender ressourcen- und klimapolitischer Anstrengungen) eingebettet, die dann als Rahmen für die Simulation potentieller Auswirkungen im ökonometrischen Modell GINFORS3 und im systemdynamischen Modell WORLD6 sowie in einem soft-link beider Modelle dienen.

Die Simulations-Ergebnisse machen einerseits deutlich, dass eine Fortschreibung bestehender ressourcenpolitischer Bestrebungen auf der nationalen und internationalen Ebene einen wichtigen Beitrag zur Steigerung von Rohstoffproduktivität, aber auch zu Wirtschaftswachstum leistet. Andererseits wurde festgestellt, dass bestehende Forderungen, bestimmte Zielwerte für eine Senkung des pro-Kopf-Ressourcenverbrauchs nur dann erreichbar scheinen, wenn das Ambitionsniveau nationaler und internationaler Ressourcenpolitik gesteigert wird. Dazu gehört dann auch, dass neben Produktivitätssteigerungen in Produktionsstrukturen auch tradierte Konsum- und Investitionsstrukturen verändert werden müssen. Entsprechend sollte das ressourcenpolitische Instrumentarium hin zu einem stärkeren Einsatz ökonomischer und auch ordnungspolitischer Maßnahmen erweitert werden.

## Abstract

Human use of natural resources poses a great challenge to social-ecological and socio-technical systems alike: supply risks, pollutant and greenhouse gas emissions, waste generation on the one hand, but also issues of global justice and societal well-being on the other hand. In order to test potential impacts of developments and strategies relevant to resource policy, the SimRess project first identified trends that positively or negatively affect resource use in Germany and globally in the future. These trends were then incorporated into resource relevant scenarios (without as well as with assumptions of further resource and climate policy measures), which served as frames for simulating potential impacts via the econometric model GINFORS3 and the system dynamic model WORLD6 as well as through a soft-link of both models.

The simulation results show on the one hand that continuing existing resource policy efforts on national and international level will remain an important contribution to increasing resource productivity and economic development. On the other hand, however, it was found that achieving targets for per-capita resource use, as called for by national and international sustainability scholars, needs a much greater level of ambition in national and international resource policy. This demands widening resource policy's focus from increasing productivity in production structures to also tackling changes in consumption and investment patterns. Correspondingly, it seems important to expand the toolkit of resource policy instruments to much more integrate both economic and regulatory measures.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	5
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis .....	7
Abkürzungsverzeichnis .....	9
Zusammenfassung .....	10
Summary .....	18
1 Hintergrund, Ziele und Logik des SimRess-Projektes .....	26
1.1 Der Bedarf an Ressourcenschonungspolitik – Hintergrund zum SimRess-Projekt .....	26
1.2 Zielstellung des SimRess-Projektes .....	28
1.3 Vorgehen im SimRess-Projekt .....	29
1.4 Im SimRess-Projekt erarbeitete Ergebnisse und Hintergründe .....	31
1.5 Gegenstand und Struktur des vorliegenden Teilberichts .....	32
2 SimRess-Trendanalyse .....	33
2.1 Zielstellung und Vorgehen .....	33
2.1.1 Definitionen .....	33
2.1.2 Vorgehen in der SimRess-Trendanalyse .....	34
2.1.2.1 Quellenrecherche .....	34
2.1.2.2 Interviews .....	35
2.1.2.3 Expertenworkshop .....	35
2.1.2.4 Verdichtung mittels der Szenario- und Trendanalyse-Software EIDOS .....	36
2.2 Ergebnisse der SimRess-Trendanalyse .....	36
2.2.1 Exkurs: Reflektionen zum gewählten Vorgehen .....	39
3 Modellierungsansätze im SimRess-Projekt und Einbettung der Referenzszenarien .....	40
3.1 Modellierungsansatz des GINFORS3-Modells und Einbettung zweier Referenzszenarien .....	41
3.1.1 Modellierungsansatz von GINFORS3 .....	41
3.1.2 Entwicklung und Einbettung der Referenzszenarien .....	43
3.2 Modellierungsansatz des WORLD6-Modells und partizipative Modellentwicklung .....	47
3.2.1 Modellierungsansatz von WORLD6 .....	47
3.2.2 Gruppenmodellierung zur Erarbeitung von Kausalschleifendiagrammen in SimRess .....	50
3.2.3 Entwicklung und Einbettung von Szenarien .....	53
3.3 Soft-link und gemeinsamer Modell-Rahmen .....	54
4 Wesentliche Simulationsergebnisse der beiden Modelle .....	55
4.1 Simulationsergebnisse aus der Berechnung der Referenzszenarien in GINFORS3 .....	56
4.1.1 Globale Entwicklungstendenzen .....	56

4.1.1.1	Wirtschaftliche Entwicklung	56
4.1.1.2	Entwicklung umwelt- und ressourcenrelevanter Kenngrößen	57
4.1.2	Entwicklungstendenzen für Deutschland.....	58
4.1.2.1	Wirtschaftliche Entwicklung	58
4.1.2.2	Entwicklung umwelt- und ressourcenrelevanter Kenngrößen	59
4.2	Simulationsergebnisse aus der Abschätzung der Szenarien in WORLD6 .....	61
4.2.1	Potentiell Entwicklung globaler Rohstoffverfügbarkeiten im Basisszenario .....	61
4.2.2	Potentielle Entwicklungen im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ .....	65
4.3	Ergebnisse aus den ressourcenpolitischen Simulationsexperimenten (GINFORS3) und dem Politikscenario „Verbessertes Recycling“ (WORLD6) .....	67
4.3.1	Ergebnisse aus den Abschätzungen der Simulationsexperimente in GINFORS3 .....	67
4.3.1.1	Annahmen zu den Simulationsexperimenten ressourcenpolitisch induzierter Effizienzsteigerungen in Produktionstechnologien	67
4.3.1.2	Globale Implikationen für Wirtschaft und Umwelt	69
4.3.1.3	Implikationen für Wirtschaft und Umwelt in Deutschland	71
4.3.2	Abschätzungen zu den Politikscenarioen in WORLD6.....	74
5	Schlussfolgerungen, Reflektion und Ausblick .....	76
6	Wesentliche Aktivitäten zur Verbreitung der Projektergebnisse .....	78
7	Literatur .....	82



## Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Logik und Ablauf der Arbeitsschritte im SimRes-Projekt .....	29
Abbildung 2:	Aktiv-Passiv-Diagramm der 30 ausgewählten Trends .....	39
Abbildung 3:	GINFORS3 – schematische Übersicht der Systemgrenzen und Systemstrukturen .....	42
Abbildung 4:	Übersicht der Module im WORLD6-Modell.....	48
Abbildung 5:	Zentrale Themen im WORLD 6-Modell als vereinfachtes Kausalschleifendiagramm.....	49
Abbildung 6:	Zwei Phasen und sechs Stufen des GruppenModellierungsprozesses.....	51
Abbildung 7:	Allgemeines Bestandsflussdiagramm für ein Metall im WORLD6-Modell.....	52
Abbildung 8:	Endogene Bestimmung der Weltmarktpreise für Metallerze .....	55
Abbildung 9:	Globale Entwicklungen in den SimRes Referenzszenarien .....	57
Abbildung 10:	Entwicklungen des BIP und der Beschäftigungsquote in Deutschland in den Referenzszenarien .....	59
Abbildung 11:	Entwicklung umwelt- und ressourcenrelevanter Kenngrößen in Deutschland in den Referenzszenarien .....	60
Abbildung 12:	Globale Rohstoffverfügbarkeit für Blei, Kupfer und Zink pro Person und Jahr (links). Recyclinganteil am Gesamtangebot für Blei, Kupfer und Zink (rechts). Globale Rohstoffverfügbarkeit für Chrom, Mangan und Nickel pro Person und Jahr (unten).....	61
Abbildung 13:	Die globale Rohstoffverfügbarkeit für Selen, Indium und Gallium (links) und Antimon, Bismut, Germanium (rechts) als Angebot pro Person und Jahr. ....	63
Abbildung 14:	Die globale Rohstoffverfügbarkeit für Platinmetalle (links) sowie für Kobalt, Molybdän und Niob (rechts) pro Person und Jahr. ....	63
Abbildung 15:	Recyclinganteil für Lithium, seltene Erden, Zinn, Indium, Gallium (links), Kobalt, Molybdän, Niob, PGM und Nickel (rechts). ....	64
Abbildung 16:	Genutzte Bestände für Eisen-, Nickel- und rostfreien Stahl (oben links); Blei, Kupfer und Zink (oben rechts); Molybdän und Rhenium (unten links); sowie Aluminium, Eisen, Kupfer und Zement (unten rechts).....	65
Abbildung 17:	Rohstoffverfügbarkeiten für Blei, Kupfer und Zink pro Person und Jahr im Basisszenario (oben links) und im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (oben rechts) sowie Preisentwicklung für Kupfer im Basisszenario (unten links) und im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (unten rechts). ....	66
Abbildung 18:	Genutzter Bestand für Indium im Vergleich von Basisszenario (links) und Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (rechts).....	66



Abbildung 19:	Potentielle Wirkungen der Simulationsexperimente auf die globale Ressourceninanspruchnahme (oben links), CO <sub>2</sub> -Emissionen (oben rechts) und die weltwirtschaftliche Entwicklung (unten).....	70
Abbildung 20:	Potentielle Wirkungen der Simulationsexperimente auf die Ressourceninanspruchnahme (oben), CO <sub>2</sub> -Emissionen (oben rechts) und die wirtschaftliche Entwicklung (unten) in Deutschland.....	73
Abbildung 21:	Vergleich von Angebot und recycelten Mengen für Kupfer und Indium im Vergleich Basisszenario (links) und Recycling-Szenario (rechts). ..	74
Abbildung 22:	Preisunterschied für Kupfer zwischen Basisszenario (links) und Recycling-Szenario (rechts).....	75
Abbildung 23:	Preis Unterschied für Indium zwischen Basisszenario (links) und Recycling-Szenario (rechts).....	75
Abbildung 24:	Schematische Darstellung der Effekte verbesserten Recyclings auf die langfristige Verfügbarkeit von Rohstoffen insgesamt (oben links) und pro Person (oben rechts), .....	76
Tabelle 1:	Die 12 Trendthemen aus der SimRess-Trendanalyse .....	12
Tabelle 2:	Übersicht über die im SimRess-Projekt erarbeiteten Ergebnisveröffentlichungen .....	31
Tabelle 3:	Definitionen der Entwicklungen im Fokus der SimRess-Trendanalyse .....	33
Tabelle 4:	Beispiel für die ExpertInnen-Einschätzung zum Trendthema Urbanisierung .....	36
Tabelle 5:	Überblick über die 12 Trendthemen aus der SimRess-Trendanalyse.	37
Tabelle 6:	Vergleich nationaler und internationaler klimapolitischer Szenario-Annahmen in den SimRess-Referenzszenarien .....	44
Tabelle 7:	Vergleich der klimapolitischen Szenario-Annahmen zum „Anteil der Erneuerbare Energien“ in Nicht-EU-Ländern in den SimRess-Referenzszenarien (Anteil in %).....	45
Tabelle 8:	Szenario-Annahmen zur Weltmarktpreisentwicklung für ausgewählte fossile Energieträger in den SimRess-Referenzszenarien.....	46
Tabelle 9:	Annahmen und Vorgaben zu Umfang und Stärke der produktionsseitigen Systemtransformation in den Simulationsexperimenten.....	68

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BAU</b>	Business-as-usual
<b>BIP</b>	Bruttoinlandsprodukts
<b>BRICS</b>	Brasilien, Russland, Indien, China, Südafrika
<b>CLD</b>	Kausalschleifendiagramm (Causal Loop Diagramme)
<b>Gt</b>	Gigatonne
<b>IEA</b>	Internationale Energieagentur (International Energy Agency)
<b>MRIO</b>	Multi-regionale Input-Output (Modell)
<b>p.a.</b>	per annum, pro Jahr
<b>RMC</b>	Raw Material Consumption (Primärrohstoffverbrauch)
<b>RMI</b>	Raw Material Input (Primärrohstoffeinsatz)
<b>SUT</b>	Supply and use tables
<b>t</b>	Tonne(n)
<b>URR</b>	ultimately recoverable resources
<b>WIOD</b>	World Input Output Database

## Zusammenfassung

### Hintergrund des SimRess-Projektes

Seit Beginn der Industrialisierung hat sich die Ressourcennutzung des Menschen stark erhöht: allein in den vergangenen vier Jahrzehnten hat sich der Verbrauch auf über 80 Mrd. t nahezu vervierfacht. Der pro Kopf Verbrauch in Deutschland liegt nach unterschiedlichen Abschätzungen bei rund 16t bis 24t Primärrohstoff/Jahr und damit weit über einem global übertragbaren Maß angesichts planetarer Grenzen und von globaler Verteilungsgerechtigkeit.

Eine Reihe globaler Megatrends wird in den kommenden Jahrzehnten den Ressourcenverbrauch weiter steigern. Dazu zählen vor allem die Bevölkerungszunahme und die Übernahme westlicher Konsum- und Lebensmodelle in Schwellenländern. Andere Trends – wie Urbanisierung oder weitere Digitalisierung und Vernetzung – können sich positiv oder negativ auf den Ressourcenverbrauch auswirken. Insgesamt muss man jedoch davon ausgehen, dass zukünftig die Ressourceninanspruchnahme weiter deutlich ansteigt: UNEP schätzt, dass im Jahr 2050 die dann rund 10 Mrd. Menschen bis zu ca. 186 Mrd. t Mineralien, Erze, fossile Brennstoffe und Biomasse verbrauchen. Damit gehen auf globaler Ebene deutliche Risiken für Umweltauswirkungen einher, die bestehende planetare Grenzen entweder bereits überschreiten oder zu überschreiten drohen.

Mit der wirtschaftlichen Verflechtung sowie ein- und ausgehenden Waren- bzw. Stoffströmen fällt ein großer Teil des deutschen Ressourcenverbrauchs in anderen Ländern an. Die „indirekten Materialströme“ der Einfuhren – und damit die Umweltwirkungen, die mit diesen Entnahmen im Ausland verbunden sind – sind (noch) nicht in allen in der politischen Diskussion relevanten Indikatoren mit enthalten. Und selbst wenn über das Monitoring der Indikatoren Effizienzfortschritte erkennbar sind, so können Rebound-Effekte deren Nutzen für die Umwelt aufzehren.

Diese Komplexitäten sowie die Vielzahl ressourcenrelevanter Akteure und Aktivitäten in Multi-Akteur- und Mehrebenensystemen machen Ressourcenschonungspolitik zu einem vielschichtigen und hochgradig vernetzten Politikfeld mit vielfältigen Querverbindungen in andere Politikbereiche. Weiterhin weist Ressourcenschonungspolitik unterschiedliche Begründungsperspektiven auf, die von der Sicherung eines dauerhaften nachhaltigen Zugangs zu Ressourcen über die Steigerung der Ressourceneffizienz von Prozessen und Produkten, um Wettbewerbsvorteile zu erzielen und Abhängigkeiten von potentiell knappen Ressourcen bzw. Importen zu reduzieren bis hin zur Wahrung bestehender Tragfähigkeiten sozial-ökologischer Systeme und Einhaltung planetarer Grenzen reicht.

Damit ist nur die Entnahme vielfältiger natürlicher Ressourcen als Input für Produktions- und Entwicklungsprozesse sowie für assoziierte Infrastrukturen Gegenstand von Ressourcenschonungspolitik, sondern auch die Inanspruchnahme von Umweltraum für die Entsorgung und Absorption unerwünschter bzw. nicht mehr benötigter Stoffströme (Emissionen, Abfälle).

### Zielsetzung und Vorgehensweise des SimRess-Projektes

Vor diesem Hintergrund verfolgt das SimRess-Projekt zwei wesentliche Ziele:

1. Politische Maßnahmenpakete (Politikmixe) zur Steigerung der Ressourceneffizienz identifizieren sowie in einem ökonometrischen Modell und einem systemdynamischen Modell auf mögliche langfristige Auswirkungen (2050 und teilweise darüber hinaus) zu untersuchen.
2. Einen konsistenten, gemeinsamen Modellrahmen diskutieren, der die Ergebnisse beider Modelle vergleichen und mögliche Ansätze zur Verbesserung der Informationsflüsse zwischen den Modellen identifizieren helfen könnte.

Dadurch sollen politische Handlungsempfehlungen für eine langfristige Ressourcenpolitik ermöglicht und ein Beitrag zur Weiterentwicklung des nationalen Ressourceneffizienzprogramms ProgResS geleistet werden.

Um die vorgenannten Ziele zu erreichen, wurde ein mehrstufiges Vorgehen von aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen und Arbeitsschritten gewählt: (1) Zunächst wurden als vorbereitende Hintergrundrecherchen

- ▶ eine Trendanalyse durchgeführt, um ressourcenpolitisch relevante plausible zukünftige Entwicklungen zu identifizieren;
- ▶ Referenzszenarien unter Rückgriff auf Umfeldszenarien aus einem anderen UFOPLAN-Vorhaben (PolResS – Entwicklung der politischen Debatte zur Ressourceneffizienz in Deutschland bis 2050, FKZ 3711 93 103) entwickelt, um die Befunde aus der Trendanalyse angereichert und im Modell GINFORS3 parametrisiert;
- ▶ mögliche ressourcenpolitische Ansätze identifiziert, welche die analysierten Trends adressieren und sich potentiell für die Diskussion ressourcenpolitischer Maßnahmenpakete eignen

(2) Dann wurden die beiden Modelle GINFORS3 und WORLD6 aufbauend auf den Befunden aus den Hintergrundrecherchen weiterentwickelt und kalibriert. Zur Abschätzung möglicher Wirkungen der Referenzszenarien sowie ressourcenpolitischer Ansätze (über Simulationsexperimente) wurde dann das Modell GINFORS3 eingesetzt, während mittels des WORLD6-Modells Abschätzungen zur globalen Verfügbarkeit verschiedener Rohstoffe mit und ohne ressourcenpolitische Ansätze zur Stärkung des Recyclings durchgeführt wurden. Zusätzlich wurden Informationen über die jeweiligen Modellmechanismen und Datengrundlagen sowie verschiedene Datensätze zur Harmonisierung zwischen den beiden Modellen ausgetauscht. Dadurch konnte nicht nur ein integrativer Modellierungsrahmen diskutiert, sondern über einen Soft-Link zwischen den Modellen auch getestet werden.

(3) Die so ermittelten Simulationsergebnisse wurden abschließend im Modellvergleich hinsichtlich der Konsistenz diskutiert und fanden Eingang in verschiedene Veröffentlichungen und Diskussionen auf einer Abschlusskonferenz und Abschlussworkshops.

Der vorliegende Teilbericht stellt die wesentlichen Befunde aus den Simulationsarbeiten in den beiden Modellen zusammen und beschreibt das Vorgehen zur Trendanalyse. Die Texte bauen damit auf verschiedenen SimResS-Veröffentlichungen zur Trendanalyse, zur den Modellierungsergebnissen und zur zusammenfassenden Bewertung auf.

### **SimResS-Trendanalyse**

Die Trendanalyse war Bestandteil der Hintergrundrecherchen und diente der Vorbereitung für die Modellsimulationen in SimResS. Durch die Trendanalyse sollten bestehende relevante Trends im Umfeld der Ressourcenpolitik analysiert werden, um auf diese Weise die Plausibilität der Referenzszenarien, die in SimResS für die Modellierungsarbeiten entwickelt wurden, prüfen zu können.

Mit der Trendanalyse wurden plausible, relevante Entwicklungen identifiziert, die einen potentiellen Einfluss auf die Ressourceninanspruchnahme ausüben und damit relevant für die nationale Ressourcenpolitik sein könnten.

Die SimResS Trendanalyse kombinierte eine Quellenanalyse, telefonische Experteninterviews und einen Expertenworkshop. Zur Eingrenzung der Trendsuche auf weniger beleuchtete und unerwartete Entwicklungen wurden anstelle wissenschaftlicher Artikel eine Google Recherche und eine Zeitungsrecherche nach Schlüsselwörtern durchgeführt. Alle relevanten Einzelergebnisse wurden dann thematisch geclustert, um Unterschiede, Gemeinsamkeiten und potentielle Zusammenhänge zu ermitteln. Dadurch wurden 17 Trendthemen konsolidiert und in Form von Narrativen zusammengeführt.

Diese Trendthemen wurden in Interviews und in einem Workshop zur Diskussion gestellt, um Lücken aufzudecken, Querverbindungen und Kausalbeziehungen offenzulegen und um die Trends bezüglich ihrer Bedeutung für ressourcenpolitische Ziele zu bewerten. Über dieses Vorgehen wurden mehr als 300 potentiell relevante Einzeltrends identifiziert und zu insgesamt 12 Trendthemen verdichtet:

Tabelle 1: Die 12 Trendthemen aus der SimRes-Trendanalyse

Trendthema	Aspekte
Urbanisierung	Ausbreitung städtisches Konsum- und Verhaltensmuster Anstieg des Ressourcenbedarfs, aber auch Ressourceneffizienzpotentiale.
Sozio-ökonomische Beschleunigung	Ausbreitung westlicher Wachstumsmodelle und Lebensstile Wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen zunehmend wachstumsorientiert und immer schneller Arbeitsprozesse zunehmend digital und verdichtet
Arbeitswelt	demografischer Wandel steigert Bedarf an Fachkräften Arbeitsalltag beschleunigt sich, klassische Lebensläufe werden weniger
Ressourcengovernance	Wirtschaftlich relevante Rohstoffe werden knapper Rohstoffförderung zunehmend staatlich kontrolliert Investitionen in unkonventionelle Fördertechnologien
Ernährung	Zunahme globaler Konsum tierischer Produkte Nachfrage nach Convenience- und Lifestyleprodukten steigt, gleichzeitig verbreiten sich nachhaltige Ernährungs- und Selbstversorgungsansätze
Neue Denkweisen und Weltbilder	Widerstand gegen sozial-ökologisch belastende Wirtschaftsweisen Transitionsinitiativen breiten sich aus
(Neue) Geschäftsmodelle	Zunahme Anzahl und Bedeutung multinationaler Konzerne Ausweitung des Online-Handels Zunahme Nutzung online tools mit Hintergrundinformationen fördert nachhaltige GeschäftsModelle
Finanzwirtschaft	globale Finanzströme nehmen zu Preisvolatilitäten und Risiken von Blasen steigen an erste kleinere Reformen im Bereich der Finanzwirtschaft
Mobilität/Infrastruktur	Elektromobilität langfristig vorherrschendes Mobilitätskonzept Intermodale Mobilität und Carsharing erzeugen Anpassungsbedarf städtischer Infrastruktur
Digitalisierung und Vernetzung	Digitalisierung durchdringt alle Lebens- und Arbeitsbereiche Mehr Vernetzung und Partizipationsmöglichkeiten des Einzelnen
Marketing und Konsum	Konsummuster gleichen sich westlichen Lebensstilen an Werbung etabliert Konsum als sinn- und identitätsstiftend Unternehmen bieten personalisierte Werbung und Produkte an
Bildung	Trend zur Höherqualifizierung wirkt Fachkräftemangel z.T. entgegen Schulen und Universitäten werden ökonomisiert lebenslanges Lernen und vernetztes Denken werden wichtiger

Die Trends wurden dann im Rahmen der Parametrisierung und Berechnung der Referenzszenario-so wie in der Identifikation ressourcenpolitischer Ansätze berücksichtigt.

## Szenarioentwicklung und Modell-soft-link für die Modellierungsarbeiten in SimRess

Basierend auf den Befunden der Trendanalyse wurden im SimRess-Projekt im Wesentlichen zwei Referenzszenarien (weiter)entwickelt und im GINFORS3-Modell verwendet, um die potentiellen Wirkungen ressourcenpolitischer Ansätze bewerten zu können. Ein erstes Referenzszenario entstand im Rahmen des Projektes PolRess (dort als Umfeldszenario entwickelt) und repräsentiert ein „business as usual“ Szenario mit dem Titel „Industrieland Deutschland“. In einem weiteren Referenzszenario wurden zusätzlich noch Annahmen für ein „Klimaaktives Deutschland“-Szenario erarbeitet, das zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland beitragen soll.

Abweichend von den beiden vorgenannten SimRess-Referenzszenarien wurden für die Modellierungen in WORLD6 thematisch ähnliche, jedoch nicht auf den PolRess-Umfeldszenarien basierende Szenarien entwickelt und verwendet. Ein Basisszenario dient dem als Nicht-Politik-Szenario dem Vergleich mit einem klimapolitischen Szenario (Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ – durch Reduktion der Nutzung fossiler Brennstoffe zwischen 2020 und 2060 soll die globale Erwärmung unter 2°C gehalten werden) und einem ressourcenpolitischen Szenario (Szenario „Verbessertes Recycling“ – simuliert die potentiellen Wirkungen politischer Unterstützung für mehr Recycling).

Die Annahmen der SimRess-Referenzszenarien wurden dann in GINFORS3 auf ihre potentiellen Wirkungen auf Umwelt und Wirtschaft auf globaler und nationaler Ebene mittels Modellsimulationen bis zum Jahre 2050 und teilweise darüber hinaus abgeschätzt. In einem weiteren Schritt wurden Simulationsexperimente durchgeführt, welche die Wirksamkeit ressourcenpolitischer Ansätze bzw. ressourcenpolitisch induzierter Effizienzsteigerungen in Produktionstechnologien im Vergleich zu den Referenzszenarien bewerten sollten.

Das gleiche Prozedere wurde für die Szenarien durchgeführt, die für die Anwendung im WORLD6-Modell entwickelt wurden –hier wurden Abschätzung zur Wirkung der Annahmen in einem Nicht-Politik- bzw. einem PolitikszENARIO mit Blick auf langfristige Rohstoffverfügbarkeiten getroffen.

Zu Simulationszwecken wurden das ökonometrische, multi-regionale Input-Output Modell GINFORS3 und das systemdynamische Modell WORLD6 über einen soft-link miteinander verbunden. Die beiden verwendeten Modelle ergänzen sich optimal: GINFORS3 weist eine sehr detaillierte Abbildung des Deutschen und globalen ökonomischen Systems auf und stellt vertiefte Simulationen der Auswirkungen der Referenzszenarien und von politischen Maßnahmen auf das Wirtschaftssystem und den damit zusammenhängenden Ressourcenbedarf zur Verfügung. Das WORLD6 Modell bringt detaillierte Simulationen über die globale Verfügbarkeit verschiedener Rohstoffe, wie Metalle, Mineralien und fossile Energieträger ein.

Ein soft link zwischen den beiden Modellen konnte benötigte Rahmendaten teilweise endogenisieren: Das WORLD6 Modell speiste Weltmarktpreise für verschiedene Metalle als aggregierten Input in GINFORS3 ein. Dadurch benötigte GINFORS3 keine exogenen Annahmen bezüglich Verfügbarkeiten und Weltmarktpreisen mehr. Dafür erhielt das WORLD6-Modell dynamische Projektionen des GINFORS3-Modells zur globalen preisbereinigten Nachfrage nach Metallerzen in US-\$ pro Kopf. Auf Basis dieser Vorgaben war WORLD6 in der Lage, angebotsseitige Entwicklungen und resultierende Preiseffekte für die betrachteten Rohstoffkategorien herzuleiten. Im Rahmen eines iterativen Austauschprozesses entstand über den soft link ein harmonisierter Datensatz, welcher sich durch eine Endogenisierung der Weltmarktpreise zentraler Rohstoffe auszeichnet und durch die ergänzende Berücksichtigung von ökonomischen Feedback-Effekten der globalen Nachfrage auszeichnet.

## Das GINFORS<sub>3</sub> Modell

GINFORS<sub>3</sub> nimmt eine global geschlossene Abbildung der weltweiten ökonomischen Aktivitäten sowie dadurch ausgelöster globaler Umweltinanspruchnahmen vor, um ex post-Analysen sowie ex ante-Simulationen (umwelt-)politischer Maßnahmen zu ermöglichen. Die Simulationen beruhen auf einer geographischen Unterteilung der Welt in 39 Wirtschaftsgebiete (38 Volkswirtschaften sowie eine aggregierte „Rest of World“ Region), sowie einer konzeptionellen Modellierung der ökonomischen Aktivitäten von vier institutionellen Akteuren (Private Haushalte, Unternehmen, Staat sowie Übrige Welt). Angebotsseitig werden 35 Wirtschaftssektoren unterschieden, welche 59 Güter- und Dienstleistungsgruppen produzieren. Die makroökonomischen Kreislaufzusammenhänge werden um eine komplementäre Abbildung nationaler wie auch internationaler Produktionsverflechtungen zwischen unterschiedlichen Wirtschaftssektoren ergänzt.

GINFORS<sub>3</sub> ist als globales Totalmodell sozio-ökonomischer Zusammenhänge durch einen sehr hohen Endogenitätsgrad gekennzeichnet. Zentrale exogene Vorgaben sind lediglich die Bevölkerungsentwicklungen in den jeweiligen Wirtschaftsgebieten, differenziert nach drei Altersgruppen, sowie die Entwicklung der globalen Weltmarktpreise für Kohle, Öl, Gas und Erze.

## Das WORLD6 Modell

Das WORLD 6-Modell veranschaulicht als globales Modell Systemzusammenhänge zwischen Ressourcen(nutzung), der Wirtschaft, der Bevölkerung und einigen sozialen Aspekten auf weltweiter Ebene über eine Reihe miteinander verbundener Untermodule auf. Basierend auf einer aktualisierten Version des ursprünglichen WORLD3-Modells, wurden u.a. noch ein Materialien-Modul (Phosphor sowie Sand, Kies und Steine) und unterschiedliche Metalltypen umfassende Untermodule (Stahl-Modul, Bronze-Modul, Spezialmetall-Modul und Leichtmetall-Modul) ergänzt.

Als systemdynamisches Modell basiert WORLD6 auf einer (nur näherungsweise möglichen) Repräsentation globaler bio-physikalischer und sozio-ökonomischer Systeme. Die Grundprinzipien und Zusammenhänge im Modell werden zunächst als Kausalschleifendiagramme (causal loop diagrams, CLD) und Bestandsflussdiagrammen (stock and flow diagrams) entwickelt, um die Systemgrenzen, die Kernelemente des Modells, die Interaktionen zwischen den Systemkomponenten und deren kausale Zusammenhänge vor der Programmierung festzulegen. Damit basiert das Modell auf Kausalzusammenhängen, die in einer Modellstruktur arrangiert und durch viele Feedbackschleifen charakterisiert sind. Im Rahmen der Parametrisierung wird die Modelldynamik aus den Feedbackstrukturen und Zusammenhängen des konzeptuellen Systemmodells erarbeitet sowie empirische Angaben zur Größe der anfänglichen Bestände von Energieträgern und von Materialien (soweit möglich auf etwa das Jahr 1900 kalibriert) eingearbeitet. Das WORLD6-Modell ist dabei nicht auf große Mengen empirischer Zeitreihen kalibriert, sondern über Massenbilanzdifferentialgleichungen, die auf empirischen Quantifizierungen der jeweiligen Zusammenhänge basieren.

Zentrale exogene Vorgaben umfassen die Nachfrage nach verschiedenen Materialien und Metallen (in kg pro Person und Jahr), weltweit verfügbare Gesamtressourcen für jedes modellierte Metall und Material sowie Preisfeedbackkurven für Marktpreise sowie Preisfeedbacks zwischen Marktpreis und Recycling. Darüber kann für jede im WORLD6-Modell berücksichtigte Ressource die langfristige Nachhaltigkeit der Versorgung im Sinne von „weicher“ Knappheit (Nachfragerückgang) oder „harter“ Knappheit (ökonomische oder physische Knappheit) bewertet werden.

Zwecks Anwendung auf spezifische Fragestellungen systemischer Auswirkungen von Ressourcennutzungen werden die Systemabbildungen i.d.R. partizipativ in einer Reihe von Gruppenmodellierungsworkshops erarbeitet. Das war auch in SimRess der Fall, wobei nur zur Beginn der Gruppenmodellierungsphase externer Stakeholder einbezogen werden konnten. Ein idealtypischer Gruppenmodellierungsprozess besteht aus zwei Phasen mit insgesamt sechs Stufen, welcher häufig über eine Reihe von



Workshops durchgeführt wird und Kausalschleifendiagrammen als narratives Visualisierungs-Tool verwendet. Dabei dient die erste Phase der gemeinsamen Definition der (zeitlichen und räumlichen) Systemgrenzen und der wesentlichen (Schlüssel-)Elemente des Systems sowie dessen vertiefter Analyse im Hinblick auf kausale Zusammenhänge, Feedbacks und zeitliche Verzögerungseffekte. In der zweiten Phase stehen die Modelltechnische Umsetzung, Parametrisierung und Datenunterfütterung des konzeptuellen Systemmodells sowie auch die Auswertung verschiedener (Politik-)Szenarien im Vordergrund.

### **Simulationsergebnisse aus dem GINFORS<sub>3</sub> Modell**

#### *Simulationsergebnisse für die Referenzszenarien*

Die Simulationen ergeben für beide Referenzszenarien einen Anstieg des globalen BIP um über 80% im Vergleich zu heutigen Werten, wobei im klimaaktiven Umfeld-Szenario durchgehend höhere globale BIP-Werte erreicht werden. Diese globalen Wachstumstendenzen werden in beiden Referenzszenarien bis zum Jahr 2050 von einer Steigerung der globalen Rohstoff-Extraktionen um fast 50% (auf über 120 Gt) im Vergleich zum heutigen Niveau (ca. 85 Gt) begleitet. Der RMC pro Kopf steigt in beiden Szenarien im globalen Durchschnitt bis zum Jahr 2050 um mehr als 20% an und erreicht damit Größenordnungen, die ungefähr dem derzeitigen europäischen Primärrohstoff-Konsumniveau entsprechen. Die Gesamtrohstoffproduktivität nimmt im Szenario „Industrieland Deutschland“ zwischen 2010 und 2030 um rund 29% und im Szenario „Klimaaktiven Deutschland“ um 36% zu, bleibt aber in beiden Referenzszenarien unterhalb vorgeschlagener Zielwerte eines Anstiegs bis zum Jahr 2030 um 40% bis 60% im Vergleich zu 2010. Daher zeigen beide Referenzszenarien dringenden ressourcenpolitischen Handlungsbedarf zur nachhaltigen Reduktion der globalen Primärrohstoffinanspruchnahme auf.

Deutliche Unterschiede in den Ergebnissen beider Referenzszenarien ergeben sich hinsichtlich der weitergehenden klimapolitischen Handlungsnotwendigkeiten. Während für das Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ ab Mitte der 2020er Jahre global rückläufige CO<sub>2</sub>-Emissionsniveaus und bis zum Jahr 2050 eine Reduktion um ca. 32% gegenüber heutigen globalen Emissionsniveaus erreicht werden, steigen die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionsniveaus im Szenario „Industrieland Deutschland“ bis zum Jahr 2050 leicht (+4%) gegenüber derzeitigen Niveaus an. Damit scheinen lediglich die umfassenden klimapolitischen Transformationsannahmen des „klimaaktiven“ Szenarios tatsächlich geeignet, langfristig eine absolute Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen. Auf Basis angenommener Effizienzsteigerungen und Veränderungen des Energieträger-Mixes wird im Referenzszenario „Industrieland Deutschland“ ein Rückgang der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands auf 326 Mio. Tonnen im Jahr 2050, im „Klimaaktiven Deutschland“ hingegen sogar auf 239 Mio. Tonnen (entspricht einem Rückgang um 77% gegenüber 1990) erreicht.

#### *Simulationsergebnisse für ressourcenpolitische Ansätze*

Anhand detaillierter Auswertungen der Ressourcen-Indikatorberechnungen wurden in GINFORS<sub>3</sub> diejenigen Produktionstechnologien identifiziert, auf welche die höchsten Rohstoffinanspruchnahmen sämtlicher Produktionstätigkeiten in Deutschland entfallen. Für die wichtigsten Inputkoeffizienten wurden dann drei alternative Simulationsexperimente durchgeführt und die gesamtwirtschaftlichen und ökologischen Folgen zusätzlicher Effizienzgewinne bis zum Jahr 2050 analysiert. Qualitativ wurden diese drei Simulationsexperimente als Abbildungen von ressourcenpolitischen Transformationsprozessen unterschiedlichen Ausmaßes verstanden: im Rahmen einer „moderaten Transformation“ wurde für die 50 Ressourcennutzungs-relevantesten Produktionstechnologien ein zusätzlicher jährlicher Effizienzfortschritt in Höhe von 1,5% im Vergleich zur klimaaktiven Referenz unterstellt; bei der „mittleren Transformation“ wurde für die 75 relevantesten Produktionstechnologien ein zusätzlicher jährlicher Effizienzfortschritt in Höhe von 2,0% unterstellt; und bei „große Transformation“ wurde für die 100 relevantesten Produktionstechnologien ein zusätzlicher jährlicher Effizienzfortschritt in Höhe

von 2,5% unterstellt. Darüber hinaus nahmen die Experimente von „moderater Transformation“ bis „große Transformation“ eine zunehmende Diffusionsgeschwindigkeit bzw. geringere Zeitdauer bis zur Diffusion der unterstellten technologischen Innovationen von der deutschen Industrie in andere Nationen an.

Global zeigen alle drei Simulationsexperimente insbesondere zu Beginn einen raschen Anstieg der Wirtschaftsleistung, am Deutlichsten in der „großen Transformation“. Dort schlägt insbesondere der für den Umbau notwendige Forschungs- und Investitionsbedarf zu Buche. Werden die Entwicklungen der global genutzten Extraktionen betrachtet, so wird selbst im Experiment „großen Transformation“ deutlich, dass im Jahr 2050 global mit knapp 70 Gt immer noch mehr Rohstoffe extrahiert werden als zu Beginn des Jahrtausends (52 Gt).

Zentrale Befunde der Simulationsexperimente zeigen auch für Deutschland einen positiven Impuls auf die Wirtschaftsleistung sowie eine deutliche Reduktion der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen allein aufgrund der unterstellten Fortschritte der Ressourceneffizienz. Die deutsche Gesamtrohstoffproduktivität konnte in den Simulationsexperimenten bis zum Jahr 2050 um ca. 40% bis 80% im Vergleich zur klimaaktiven Referenz gesteigert werden. Allerdings zeigten die Simulationsexperimente unter Berücksichtigung aller direkten, indirekten und Rebound-Effekte auch, dass maximal Einsparungen bis 40% (große Transformation) erzielt werden konnten. Damit beträgt der deutsche RMC pro Kopf immer noch 11 bis 14 Tonnen im Jahr 2050 und liegt folglich deutlich über einem in der Wissenschaft langfristig genannten RMC-Zielkorridor von 5-8 Tonnen pro Kopf.

### **Simulationsergebnisse aus dem WORLD6 Modell**

#### *Simulationsergebnisse für das Basisszenario*

Die Simulationen der langfristigen Rohstoffverfügbarkeiten ergeben für das Basisszenario z.T. deutliche Verfügbarkeitsspitzen (Peaks) für viele technologisch wichtige Rohstoffe um das Jahr 2050 herum (für Antimon, Bismut, Blei, Germanium, Indium, Kobalt, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Platingruppenmetalle und Selen) bzw. ab 2100 (Chrom, Kupfer, Niob und Zink). Damit können sich die Verfügbarkeiten längerfristig zu limitierenden Faktoren für den weiteren Ausbau von Wind und Photovoltaik sowie für die effiziente Umwandlung von Energie in Bewegung oder Strom entwickeln.

Weiterhin wird deutlich, dass die im Basisszenario endogen integrierten Recycling-Mechanismen allein (*nota bene*: bei Annahme keiner weiteren politischen Anstrengungen, das Recycling zu verbessern) nicht ausreichen, um langfristig (etwa ab 2100) mehr als maximal 75% des Bedarfs an benötigten Rohstoffen zu decken. Wird der Blick von den Verfügbarkeiten pro Person auf die genutzten Bestände gerichtet, so zeigen im Basisszenario nur wenige Rohstoffe ein Peak-Verhalten (Kupfer, Molybdän, Nickel), während die überwiegende Anzahl der simulierten Verläufe längerfristig ansteigende Vorkommen der Rohstoffe in genutzten Beständen verdeutlicht – es werden also immer mehr Rohstoffe in Technologie und Infrastrukturen verbaut.

#### *Simulationsergebnisse für das PolitikszENARIO „Verbessertes Recycling“*

Im WORLD6-Modell wurde das PolitikszENARIO „Verbessertes Recycling“ einerseits durch marktba-sierte Anreize und andererseits durch eine verpflichtende Quote simuliert, um am Beispiel Kupfer und Indium zu untersuchen, welche Möglichkeiten sich durch verstärktes Recycling ergeben, die Verfügbarkeiten technologisch wichtiger Rohstoffe längerfristig sichern zu können.

Beide Modellimplementierungen zeigen fast identische Resultate: Während bei Kupfer das Angebot durch den Recyclinganteil nur marginal steigt, zeigt sich ein deutlich erhöhtes Indiumangebot durch Recycling. Der Kupferpeak schiebt sich etwas weiter nach oben, und marginal nach hinten auf der Zeitskala. Der Indiumpeak hingegen verschiebt sich von etwa 2050 auf nach dem Jahre 2100.

Wenn mehr Material recycelt wird, sind mehr Rohstoffe verfügbar, was die Angebotskurve verändert. So sinken die Preise für Kupfer bis zum Jahre 2100 leicht und für Indium ab dem Jahre 2100 deutlich. Damit steigt die Nachfrage wiederum leicht an und Rebound-Effekte werden insbesondere für Kupfer ersichtlich.

Längerfristige Verfügbarkeitsengpässe scheinen sich mit den hier simulierten Annahmen politischer Maßnahmen eines verstärkten Recyclings nicht verhindern, aber in der Zeit nach hinten verschieben zu lassen. Damit wäre weitere Zeit gewonnen, die für darüberhinausgehende politische Instrumentierungen genutzt werden könnte, um eine langfristig nachhaltige und sichere Versorgung mit relevanten Rohstoffen gewährleisten zu können.

### **Zentrale Erkenntnisse aus dem SimRes-Projekt**

Die Simulations-Ergebnisse des SimRes-Projektes machen mit Blick auf bestehende ressourcenpolitische Bestrebungen zweierlei deutlich:

1. Eine Fortschreibung bestehender ressourcenpolitischer Bestrebungen auf der nationalen und internationalen Ebene leistet einen wichtigen Beitrag zur Steigerung von Rohstoffproduktivität, aber auch zu Wirtschaftswachstum.
2. Nur über eine Steigerung ressourcenpolitischer Ambitionen auf nationaler und internationaler Ebene können Zielwerte für eine Senkung des Ressourcenverbrauchs erreicht werden, die in der nationalen und internationalen Nachhaltigkeitsforschung als essentiell für einen Verbleib innerhalb planetarer Grenzen diskutiert werden. Um eine Reduktion der Ressourcennutzung auf ein Niveau von 5-8 Tonnen RMC pro Kopf bis zum Jahr 2050 umsetzen zu können, müssen neben den Produktionsstrukturen auch tradierte Konsum- und Investitionsstrukturen verändert werden. Ausschließlich Effizienz-orientierte ressourcenpolitische Maßnahmen erscheinen hier nicht hinreichend, um entsprechende gesamtwirtschaftliche Transformation auszulösen. Vielmehr muss dazu das ressourcenpolitische Instrumentarium erweitert und im Hinblick auf einen stärkeren Einsatz ökonomischer und auch ordnungspolitischer Maßnahmen diskutiert werden, sodass es eine Transformation bestehender Strukturen unterstützen und auch auslösen kann.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass ressourcenpolitische Ansätze positive Wirkungen für den Klimaschutz zeitigen und andersherum auch stärkere klimapolitische Annahmen in den Simulationen zu positiven ressourcenpolitischen Effekten führen. Dabei sind jedoch viel stärker als bisher die Materialbedarfe von erneuerbare Energie- und alternativen Mobilitäts-Technologien zu berücksichtigen, die im Vergleich zu fossil-basierter Energieversorgung und Mobilität andere und vielfach mit geringeren Vorkommen ausgestattete Rohstoffe benötigen.

In ähnlicher Weise wird auch die Frage möglicher längerfristiger Knappheiten insbesondere vor dem Hintergrund möglicher gesellschaftlicher Transformationspfade und dem dafür benötigten Materialbedarf für Energieerzeugung und -versorgung, Mobilität, aber auch für Informations- und Kommunikationstechnologien relevant. Auch wenn technologischer Fortschritt vorhandene Rohstoff-Vorkommen länger aufrechtzuerhalten vermag, so können Extraktionskosten mittel- bis längerfristig ansteigen und damit ökonomische Knappheiten produzieren. Daher erscheint es ratsam, ressourcenpolitische Ansätze noch stärker auch auf Sekundärrohstoffnutzung und Substitution auszurichten.

Der soft-link zwischen beiden Modellen hat neue Erkenntnisse und robustere, da weniger von exogenen Variablen abhängigen Simulationen ermöglicht. Dabei wurden jedoch auch Schwierigkeiten deutlich: Die Diskussion eines integralen Modellierungsrahmens erweist sich aufgrund der beiden Modellierungssysteme mit unterschiedlichen zugrundeliegenden Paradigmen als schwierig. Mehr solcher Austausch zwischen unterschiedlichen Modellen wird als notwendig erachtet.

## Summary

### Background of the SimRess Project

Since the start of industrialisation, our use of resources has increased substantially: in the last four decades alone, consumption almost quadrupled to over 80 billion tonnes. Per capita consumption in Germany amounts to approximately 16 tonnes of primary resources per year, which is far above any globally transferable scale given planetary boundaries and global justice.

A number of global mega trends are set to drive up the use of resources even further in the coming decades. Preeminent among them are population growth and the assumption of western consumption and lifestyle models by populations in emerging economies. Other trends, such as urbanisation or progressive digitisation and interconnection, may have either positive or negative effects on resource consumption. All in all, however, a further significant increase in resource utilisation might be expected: According to UNEP, the approximately 10 billion people who will live on the planet in 2050 will consume up to 186 billion tonnes of minerals, ores, fossil fuels and biomass. This will be accompanied by substantial environmental impact risks at the global level that are either already exceeding the limits of our planet or are close to doing so.

Due to economic integration and the inflow and outflow of goods and materials, a large proportion of Germany's resource consumption takes place in other countries. In many cases, the indicators that inform the political debate do not (yet) include the 'indirect material flows' associated with imports – and the environmental impacts attendant to resource extraction abroad. Even if the monitoring of indicators shows individual advances, rebound effects may cancel out their benefit for the environment.

This complexity and the diversity of resource-relevant stakeholders in multi-stakeholder and multi-level systems make resource protection policy a multi-layered and highly interconnected policy field with numerous cross-links to other policy areas. On top of this, resource protection policy involves various rationale perspectives, ranging from the safeguarding of sustainable access to resources and resource efficiency gains in processes and products to achieve competitive advantages and reduce dependence on potentially scarce resources or imports, to maintenance of the existing sustainability of social-ecological systems and compliance with the limits of our planet.

Resource protection policy therefore deals not only with the extraction of diverse natural resources as inputs for production and development processes and associated infrastructures, but also with the use of environmental space for the disposal and absorption of undesired or obsolete material flows (emissions, waste).

### Objectives and approach of the SimRess project

Given this background, the SimRess project pursues two essential goals:

1. Identification of packages of policy measures (policy mixes) designed to raise resource efficiency and assessment of the potential environmental and socio-economic impacts in 2050 (and in some cases beyond) through simulation in an econometric model and a system-dynamic model.
2. Discussion of a consistent, joint modeling framework that may facilitate comparison of the results achieved by the two models and identification of possible approaches to improve the flow of information between the two models.

The aim is to formulate recommendations for long-term resource policies and make a contribution to the further development of the national resource efficiency programme ProgRess.

To achieve the above objectives, a multi-stage approach was chosen based on consecutive work packages and stages: (1) Initial preparatory background research consisted of

- ▶ trend analysis to identify the plausible future developments relevant to resource policy;
- ▶ reference scenarios developed with recourse to environmental scenarios taken from a different UFOPLAN project (PolRess – development of the political debate on resource efficiency in Germany up to 2050, FKZ 3711 93 103) that were enhanced with the results of the trend analysis and parametrised in the GINFORS3 model;
- ▶ identification of resource policy approaches that address the analysed trends and may be suitable for discussing packages of resource policy measures.

(2) As a next step, based on the results of the background research, the GINFORS3 and WORLD6 models were fine-tuned and calibrated. The GINFORS3 model was utilised to assess the potential effects of the reference scenarios and resource policy approaches (via simulation experiments), while the WORLD6 model was applied to assess the global availability of various raw materials with and without resource policies designed to boost recycling. In addition, information on the respective model mechanisms and databases as well as various datasets was exchanged to harmonise the two models. This facilitated both the discussion and the testing of an integrative modelling framework via a soft link between the models.

(3) To conclude, the simulation results thus gained were discussed in terms of consistency in the context of model comparison and were integrated into various publications and discussions at a final conference and final workshops.

This interim report summarises the main findings gained from the simulation work in the two models and describes the trend analysis process. The texts are therefore based on various SimRess publications on trend analysis, modelling results and summary evaluation.

### **SimRess trend analysis**

The trend analysis was part of the background research and served to prepare the model simulations in SimRess. The aim was to analyse existing relevant trends in the resource policy environment to test the plausibility of the reference scenarios developed for the modelling work in SimRess.

Trend analysis identified plausible and relevant developments that may have an impact on resource utilisation and may thus be relevant to national resource policy.

The SimRess trend analysis combined source analysis, telephone interviews with experts and an expert workshop. To limit the trend search to less well-researched and unexpected trends, a key word search was carried out in Google and in newspapers instead of in scientific articles. All relevant individual results were clustered by subject to determine differences, similarities and potential correlations. This led to the consolidation of 17 trend subjects which were brought together in the form of narratives.

The trend subjects were put up for discussion in interviews and at a workshop to identify gaps, disclose cross links and causal relationships and assess the trends as to their relevance to resource policy objectives. This approach led to the identification of over 300 potentially relevant individual trends which were condensed into a total of 12 trend subjects:

Table 1: 12 trend themes arising from the SimRes trend analysis

Trend theme	Aspects
Urbanisation	Spread of urban consumption and behavioural patterns Rise in resource requirements, but also resource efficiency potential
Socio-economic acceleration	Spread of western growth models and lifestyles Economic and social trends are increasingly growth-oriented and are accelerating Work processes are increasingly digital and concentrated
Working environment	Demographic change raises demand for specialists Everyday work is accelerating, classic CVs are becoming rarer
Resource governance	Growing scarcity of economically relevant resources Resource extraction is increasingly controlled by states Investment in unconventional extraction technologies
Food	Increase in global consumption of animal products Demand for convenience and lifestyle products is rising; sustainable food and self-sufficiency approaches are also spreading
New mind sets and worldviews	Resistance against subsistence strategies with negative impacts on the socio-ecological field Transition initiatives are spreading
(New) business models	Increase in number and power of multinational groups Spread of online commerce Increased use of online tools including background information promotes sustainable business models
Corporate finance	Global cash flows are rising Price volatility and risk of bubbles are on the increase Initial minor reforms in corporate financing
Mobility/infrastructure	Electromobility is the predominant long-term mobility concept Intermodal mobility and car sharing require adjustment of urban infrastructure
Digitisation and connectivity	Digitisation permeates all areas of life and work More link-up and participation opportunities for individuals
Marketing and consumption	Consumption patterns are assimilating western lifestyles Advertising presents consumption as meaningful and identity-forming Companies offer personalised advertising and products
Education	Trend towards higher qualifications partially offsets lack of qualified staff Schools and universities are being economized Lifelong learning and joined-up thinking are becoming more important

The trends were subsequently incorporated in the parametrisation and calculation of the reference scenarios and in the identification of resource policy approaches.



## Scenario development and model soft link for modelling work in SimRess

Based on the results of the trend analysis, two main reference scenarios were advanced and applied in the GINFORS3 model to assess the potential effects of resource policy approaches. The first reference scenario - a 'business as usual' scenario entitled 'industrialised Germany' - was created in the context of the PolRess project (as the project's environmental scenario). In a further reference scenario, assumptions for a 'climate-active Germany' were formulated that aim to contribute to a greenhouse gas neutral and resource-conserving Germany.

In deviation of the above SimRess reference scenarios, scenarios with similar subjects were developed and applied to the modelling in WORLD6 which were, however, not based on the PolRess environmental scenarios. A baseline scenario serves as a benchmark for comparison of the no-policy scenario with a climate policy scenario ('fossil fuel reduction' scenario: based on reduced utilisation of fossil fuels, global warming is to be kept below 2°C in the period 2020 to 2060) and a resource policy scenario ('improved recycling' scenario which simulates the potential impact of political support for increased recycling).

Subsequently, the assumptions from the SimRess reference scenarios were assessed in GINFORS3 as to their potential impact on the environment and the economy at the national and the global level, based on model simulation until 2050 and in some cases beyond. As a next step, simulation experiments were performed to evaluate the effectiveness of resource policy approaches and/or resource policy-induced efficiency gains in production technologies compared to the reference scenarios.

The same process was applied to the scenarios that had been developed for application in the WORLD6 model, with assessments being made of the impact of the assumptions in a no-policy and a policy scenario with a view to long-term resource availability.

For simulation purposes, the GINFORS3 econometric, multi-regional input-output model and the system-dynamic WORLD6 model were connected via a soft link. The two models supplement each other perfectly: GINFORS3 reflects the German and global economic systems at a highly detailed level and provides in-depth simulations of the impacts of reference scenarios and policy measures on the economic system and the associated resource requirements. The WORLD6 model contributes detailed simulations of the global availability of various resources, such as metals, minerals and fossil energy sources.

Via a soft link between the two models, the required underlying data were partially endogenised: The WORLD6 model fed the global market prices of various metals as aggregated input into GINFORS3. Consequently, GINFORS3 did not require any exogenous assumptions regarding availabilities and global market prices. In return, the WORLD6 model received dynamic projections of price-adjusted global demand for metal ores in USD per capita from the GINFORS3 model. Based on these parameters, WORLD6 was in a position to derive supply-side trends and resulting price effects for the raw material categories in question. In the context of an iterative exchange process, a harmonised dataset was created via the soft link based on the endogenised global market prices of central raw materials and the supplementary inclusion of the economic feedback effects created by global demand.

### GINFORS<sub>3</sub> model

GINFORS3 produces a closed global representation of economic activities worldwide and of the associated global environmental stresses to facilitate ex post analysis and ex ante simulations of (environmental) policy measures. The simulations are based on a geographical breakdown of the world into 39 economic regions (38 economies and an aggregated 'rest of the world' region) as well as conceptual modelling of the economic activities of four institutional players (private households, companies,



states and 'rest of the world'). The supply side is broken down into 35 sectors which produce 59 product and service categories. The correlations within the macroeconomic loop are supplemented with a complementary representation of national and international production links between various economic sectors.

GINFORS<sub>3</sub> is a holistic global model of socio-economic correlations that displays a very high degree of endogeneity. The only important exogenous parameters are population trends in the respective economic regions, broken down into three age groups, and trends in the global market prices of coal, oil, gas and ores.

### **WORLD6 model**

Via a number of linked sub-modules, the WORLD6 model presents global systemic correlations between resources (resource utilisation), the economy, the population and a number of social aspects. Based on an updated version of the original WORLD3 model, a materials module (phosphorus as well as sand, gravel and stones) and further sub-modules comprising various metal types (steel module, bronze module and light metals module) were added, among others.

WORLD6 is a system-dynamic model based on an (approximate) representation of global bio-physical and socio-economic systems. To determine the system's limits, the model's core elements, interaction between the system components and their causal relationships before the programming stage commences, the fundamental principles and correlations within the model are developed in the form of causal loop diagrams (CLD) and stock and flow diagrams. The model is thus based on causal relationships that are arranged in a model structure and are characterised by numerous feedback loops. In the context of the parametrisation, model dynamics are derived from the feedback structures and correlations within the conceptual system model and empirical data regarding the size of the initial energy sources and materials stocks (where possible calibrated to the year 1900) are incorporated. The WORLD6 model is not calibrated to large quantities of empirical times series. Instead, it is graduated via mass balance differential equations based on empirical quantifications of the respective correlations.

Central exogenous parameters comprise demand for various materials and metals (in kg per capita and year), total global availability of resources for each modelled metal and material as well as price feedback curves for market prices and price feedbacks between market price and recycling. This allows for an assessment of long-term supply sustainability in terms of soft scarcity (decline in demand) and hard scarcity (economic or physical scarcity) for each of the resources included in the WORLD6 model.

For the purpose of applying this approach to specific questions regarding the systemic effects of resource utilisation, the system representations are usually generated on a participatory basis in the context of a series of group modelling workshops. This was also the case in SimRess, although external stakeholders could only be included at the beginning of the group modelling phase. The ideal group modelling process consists of two phases comprising a total of six stages, which is often performed over a series of workshops and utilises causal loop diagrams as visualisation tools. The first phase serves to formulate a joint definition of the system limits (time and space) and the system's main (key) elements as well as in-depth analysis of causal relationships, feedbacks and time lag effects. The second phase focuses on technical implementation within the model, parametrisation and data support of the conceptual system model as well as the evaluation of various (policy) scenarios.

## Simulation results from the GINFORS<sub>3</sub> model

### *Simulation results for the reference scenarios*

In both reference scenarios, the simulations result in a rise in global GDP of over 80% compared to today's figures. The climate-active scenario consistently results in higher GDP figures. Up to the year 2050, the global growth trends in both scenarios are accompanied by an increase in global raw material extraction of close to 50% (to over 120 Gigatonnes) compared to current levels (approximately 85 Gigatonnes). The average global per capita RMC up to the year 2050 rises by more than 20% in both scenarios, reaching dimensions that roughly correspond to the current primary resource consumption level in Europe. In the period 2010 to 2030, total resource productivity goes up by around 29% in the 'industrialised Germany' scenario and by around 36% in the 'climate-active Germany' scenario; however, the figures remain below suggested target increases of 40% to 60% by 2030 compared to 2010 in both reference scenarios. The two reference scenarios therefore indicate an urgent need for resource policy measures to achieve a sustainable reduction in global primary resource utilisation.

Significant differences in the results of the two reference scenarios arise as regards the further need for climate policy measures. While the 'climate-active Germany' reference scenario indicates a global decline in CO<sub>2</sub> emission levels from mid-2020 onwards and a reduction compared to current emission levels of approx. 32% until the year 2050, global CO<sub>2</sub> emission levels in the 'industrialised Germany' scenario go up slightly until 2050 compared to current levels (+4%). This implies that only the comprehensive climate policy transformation assumptions under the 'climate-active' scenario are actually suitable to achieve an absolute reduction of global CO<sub>2</sub> emissions in the long run. Based on assumed efficiency gains and modifications of the energy sources mix, the 'industrialised Germany' scenario results in a decline in Germany's territorial CO<sub>2</sub> emissions to 326 million tons in 2050 while the 'climate-active' scenario indicates a reduction down to 239 million tonnes (a 77% decrease compared to 1990).

### *Simulation results for resource policy approaches*

With the help of detailed analysis of the resource indicator calculations, GINFORS<sub>3</sub> was used to identify the production technologies that account for the highest resource consumption of all production activities in Germany. Subsequently, three alternative simulation experiments were performed for the main input coefficients, and the macroeconomic and ecological effects of additional efficiency gains were analysed up until the year 2050. At the qualitative level, the three simulation experiments were interpreted as representations of resource policy transformation processes of different dimensions: in the context of a 'moderate transformation', an additional annual efficiency gain of 1.5% compared to the climate-active reference value was assumed for the 50 production technologies with the highest resource relevance; in the case of a 'medium transformation', an additional annual efficiency gain of 2.0% was assumed for the 75 most relevant production technologies, and for a 'major transformation', an additional annual efficiency gain of 2.5% was assumed for the 100 most relevant production technologies. In addition, the experiments assumed an acceleration of the diffusion speed from 'moderate transformation' to 'major transformation', in other words, a shorter period until the diffusion of the assumed technological innovations from German industry to other nations.

At the global level, all three simulation experiments suggest a swift increase in economic performance, especially at the beginning. This trend is most pronounced in the 'major transformation' case in which the research and investments required for the conversion have a particularly substantial impact. Analysis of the trends in globally utilised extractions shows that even in the 'major transformation' experiment, at 70 Gigatonnes, more resources will be extracted in 2050 than at the beginning of the millennium (52 Gigatonnes).

Central results from the simulation experiments also show a positive impact on economic performance in Germany, as well as a significant reduction in territorial CO<sub>2</sub> emissions, caused by the assumed progress in resource efficiency alone. Compared to the climate-active reference scenario, the simulation

experiments indicate an increase in total German resource productivity of approximately 40% to 80% until the year 2050. However, in consideration of all direct, indirect and rebound effects, the maximum savings in the simulation experiments did not exceed 40% (major transformation scenario). This translates into an annual per capita RMC in Germany of 11 to 14 tonnes in 2050, which is significantly higher than the long-term RMC target range of 5 to 8 tonnes per capita specified in scientific research.

### **Simulation results gained from the WORLD6 model**

#### *Simulation results in the baseline scenario*

In the case of the baseline scenario, the long-term resource availability simulations indicated intermittently high availability peaks for numerous technologically relevant resources around the year 2050 (in the case of antimony, bismuth, lead, germanium, indium, cobalt, manganese, molybdenum, nickel, niobium, platinum group metals and selenium) and from 2100 onwards (in the case of chromium, copper, niobium and zinc). In the longer-term, availabilities may thus develop into limiting factors for the further expansion of wind and photovoltaic power generation and the efficient conversion of energy into motion or electricity.

Furthermore, it becomes clear that the endogenously integrated recycling mechanisms in the baseline scenario alone (*nota bene*: assuming no further political efforts to improve recycling) are not sufficient to cover more than around 75% of the raw material demand in the long term (starting around 2100). If we change perspective from availability per capita to utilised stocks<sup>1</sup>, few raw materials in the baseline scenario display peak behaviour (copper, molybdenum, nickel) while the large majority of the simulated trends indicate a longer-term increase of raw material sources in utilised stocks – hence, the use of raw materials in technologies and infrastructure will increase.

#### *Simulation results for the ‘improved recycling’ policy scenario*

The WORLD6 model simulated the ‘improved recycling’ policy scenario firstly via market-based incentives and secondly via a mandatory quota to investigate which options of securing longer-term availability of technologically relevant resources arise from increased recycling, using the examples of copper and indium.

The two model implementations show almost identical results: While the recycling quota raises the supply only marginally in the case of copper, it leads to a significant increase in the indium supply. The copper peak shifts slightly upwards and marginally backwards on the time scale. In contrast, the indium peak moves from 2050 to 2100.

Increased material recycling leads to higher raw material availability which, in turn, affects the supply curve. While copper prices decline slightly until 2100, indium prices drop significantly after 2100. This is followed by a slight rise in demand as well as by rebound effects, especially in the case of copper.

It appears that although longer-term availability bottlenecks cannot be prevented by the simulated assumptions of policy measures, they can be shifted further ahead in time. This extra time could be used to implement further policy instruments to ensure the long-term, sustainable and secure supply of relevant resources.

---

<sup>1</sup> Utilised stocks are directly connected with a society’s prosperity. A rise in utilised stocks generally goes hand in hand with growth and a higher standard of living. A decline in utilised stocks usually indicates a contracting economy or an economic crisis. Since wear and tear and conversion losses reduce utilised stocks every year, the available supply must be used to offset the losses in stocks (repairs).

## Central findings arising from the SimRess project

With a view to current resource policy endeavours, the simulations in the SimRess project have two clear results:

1. The extrapolation of current resource policy endeavours at the national and international level makes an important contribution to higher resource productivity as well as to economic growth.
2. Higher resource policy ambitions at the national and international level are the only option for reaching the resource consumption reduction targets that national and international sustainability research regards as essential to avoid exceeding planetary limits. In order to implement a cut in resource utilisation to 5 to 8 tonnes of RMC per head until 2050, established consumption and investment structures must change in addition to production structures. Resource policy measures that focus exclusively on efficiency do not appear sufficient to trigger the respective macroeconomic transformation. Instead, resource policy instruments must be expanded and the increased use of economic and regulatory measures must be discussed to support and trigger the transformation of existing structures.

Furthermore, the results indicate that resource policy approaches produce positive effects on climate protection and, vice versa that stronger climate policy assumptions lead to positive resource policy effects in the simulations. In this context, a lot more weight must be given to the material requirements associated with renewable energy and alternative mobility technologies, which require different, and often more rare, resources than fossil-based energy supply and mobility.

Similarly, the issue of potential longer-term scarcity becomes more relevant, especially given the range of possible social transformation approaches and the material requirements associated with energy generation, energy supply and mobility as well as with information and communication technologies. Even if technological progress is capable of extending existing resource deposits, extraction costs may rise in the medium to long term, creating economic bottlenecks. It therefore appears advisable to include a stronger focus on secondary resource utilisation and substitution in resource policy approaches.

The soft link between the two models has facilitated new insights and more robust simulations with a lower dependency on exogenous variables. However, it also showed up problems: The different paradigms underlying the two modelling systems make it difficult to discuss an integral modelling framework. More exchanges along these lines should take place between different models.

# 1 Hintergrund, Ziele und Logik des SimRess-Projektes

## 1.1 Der Bedarf an Ressourcenschonungspolitik – Hintergrund zum SimRess-Projekt

Seit Beginn der Industrialisierung hat sich die Ressourcennutzung des Menschen stark erhöht. Global betrachtet verbrauchen wir mehr Primärrohstoffe als je zuvor, allein in den vergangenen vier Jahrzehnten hat sich der Verbrauch auf über 80 Mrd. t nahezu vervierfacht (Ekins, Hughes, und et al. 2017). Der pro Kopf Verbrauch in Deutschland liegt nach unterschiedlichen Abschätzungen bei rund 16t<sup>2</sup> bis 24t Primärrohstoff/Jahr und damit weit über einem global übertragbarem Maß (Distelkamp und Meier 2017; Lutter, Giljum, und Manstein 2016). Auch bei der Verarbeitung der Rohstoffe zu Produkten, Energieträgern und Infrastruktur werden Ressourcen beansprucht, rund 50Gt CO<sub>2</sub>e ausgestoßen, Ökosysteme geschädigt und die Artenvielfalt gefährdet (EEA 2012; MEA (Millennium Ecosystem Assessment) 2005; Montzka, Dlugokencky, und Butler 2011).

Eine Reihe globaler Megatrends wird in den kommenden Jahrzehnten den Ressourcenverbrauch weiter steigern. Dazu zählen vor allem die Bevölkerungszunahme und die Übernahme westlicher Konsum- und Lebensmodelle in Schwellenländern. Andere Trends – wie Urbanisierung oder weitere Digitalisierung und Vernetzung – können sich positiv oder negativ auf den Ressourcenverbrauch auswirken (Langsdorf und Hirschnitz-Garbers, 2014). Insgesamt muss man jedoch davon ausgehen, dass zukünftig die Ressourceninanspruchnahme weiter deutlich ansteigt: UNEP schätzt, dass im Jahr 2050 die dann rund 10 Mrd. Menschen bis zu etwa 186 Mrd. t Mineralien, Erze, fossile Brennstoffe und Biomasse verbrauchen könnten (Ekins, Hughes, und et al. 2017). Damit gehen auf globaler Ebene deutliche Risiken für Umweltauswirkungen einher, die bestehende planetare Grenzen entweder bereits überschreiten oder zu überschreiten drohen (W. Steffen u. a. 2015).

Mit der wirtschaftlichen Verflechtung sowie ein- und ausgehenden Waren- bzw. Stoffströmen fällt ein großer Teil des deutschen Ressourcenverbrauchs in anderen Ländern an. Die „indirekten Materialströme“ der Einfuhren – und damit die Umweltwirkungen, die mit diesen Entnahmen im Ausland verbunden sind – sind (noch) nicht in allen in der politischen Diskussion relevanten Indikatoren mit enthalten. Und selbst wenn über das Monitoring der Indikatoren Effizienzfortschritte erkennbar sind, so können Rebound-Effekte deren Nutzen für die Umwelt aufzehren.

Diese Komplexitäten, die verschiedenen Funktionen, die Ressourcen erfüllen (wirtschaftliche, sozio-ökonomische, sozial-psychologische, kulturelle), die Vielzahl ressourcenrelevanter Akteure und Aktivitäten in Multi-Akteur- und Mehrebenensystemen machen Ressourcenschonungspolitik zu einem vielschichtigen und hochgradig vernetzten Politikfeld mit vielfältigen Querverbindungen in andere Politikbereiche (siehe auch Umweltbundesamt 2015). Vor diesem Hintergrund integriert Ressourcenschonungspolitik unterschiedliche Begründungsperspektiven:

- Sicherung eines dauerhaften nachhaltigen Zugangs zu Ressourcen, der im Sinne der Nachhaltigkeit eine sozio-ökonomische bzw. sozio-technische Entwicklung unter Beachtung globaler Verantwortung ermöglicht;

<sup>2</sup> Der genaue Wert liegt bei 16,2 t pro Kopf, nach Berechnungen anhand der Daten des Statistischen Bundesamtes für 2011 zu genutzte heimische Entnahme von 1,115 Mrd. Tonnen (Quelle: Statistisches Bundesamt 2014) + Importe in Rohmaterialäquivalenten von 1,675 Mrd. Tonnen (Quelle: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Globalisierungsindikatoren/Tabellen/36.html>) - Exporte in Rohmaterialäquivalenten von 1,488 Mrd. Tonnen (Quelle: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Globalisierungsindikatoren/Tabellen/37.html>) = 1,302 Mrd. Tonnen. Geteilt durch den Bevölkerungsstand Deutschlands nach Statistischem Bundesamt von 80,328 Millionen für 2011 ([https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/\\_lrbev03.html](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/_lrbev03.html)) ergibt das einen Wert von 16,208 t pro Kopf.



- ▶ Steigerung der Ressourceneffizienz von Prozessen und Produkten, um Wettbewerbsvorteile zu erzielen und Abhängigkeiten von potentiell knappen Ressourcen bzw. Importen zu reduzieren;
- ▶ Wahrung bestehender Tragfähigkeiten sozial-ökologischer Systeme und Einhaltung planetarer Grenzen.

Ressourcenschonungspolitik behandelt daher politikfeldübergreifend relevante Themen im Rahmen der Betrachtung sozio-technischer Stoffwechselsysteme (Metabolismus) sowie der Berücksichtigung von Input- und Outputströmen: nicht nur ist die Entnahme vielfältiger natürlicher Ressourcen im In- und Ausland als Input für Produktions- und Entwicklungsprozesse in der heimischen Wirtschaft sowie für assoziierte Infrastrukturen Gegenstand von Ressourcenschonungspolitik, sondern auch die Inanspruchnahme von Umweltraum für die Entsorgung und Absorption unerwünschter bzw. nicht mehr benötigter Stoffströme (Emissionen, Abfälle) (M. Fischer-Kowalski, Krausmann, und Pallua 2014; Marina Fischer-Kowalski und Hüttler 1998; Krausmann u. a. 2008; UBA 2015).

Die Output-Orientierung der Ressourcenschonungspolitik nimmt Bezug auf das Konzept der planetaren Grenzen, deren Einhaltung sie unterstützen will. Planetare Grenzen und bestehende Tragfähigkeiten orientieren sich insbesondere an Zustands- und Wirkungsgedanken (Zustand und Auswirkung im Kontext des Driver-Pressure-State-Impact-Response Konzeptes der EEA (1999)), da sie Schwellen- oder Grenzwerte vor dem Hintergrund biophysikalischer und biogeochemischer Systemzustände sowie global (noch) tragbarer Stoffkonzentrationen formulieren (Rockström u. a. 2009a). Dabei werden sowohl Ressourcenentnahmen (Süßwasser, Landnutzung, Stickstoffentnahme) als auch Emissionen (CO<sub>2</sub>, Phosphor, Feinstaub, Chemikalien) und Impacts (Biodiversitätsverlust, Schädigung der Ozonschicht, Übersauerung der Meere) betrachtet und entsprechende Schwellen-/Grenzwerte formuliert. Diese Werte gelten für vier der neun definierten planetaren Grenzen (Biodiversitätsverlust; biogeochemische Stoffflüsse für Stickstoff und Phosphor; Klimasystem im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Strahlungsantrieb; Landsystemveränderungen) als bereits überschritten bzw. als in hoher Risikozone (hohes Risiko schwerwiegender Auswirkungen) befindlich (Rockström u. a. 2009b, 2009a; W. Steffen u. a. 2015). Bei längerfristigem Verbleib innerhalb oder jenseits einer Zone hohen Risikos schwerwiegender Auswirkungen besteht die Gefahr, dass Kipppunkte im System bzw. in den Teilsystemen (beispielsweise Auftauen von Permafrostzonen in subarktischen Zonen, Veränderungen im indischen Monsunsystem, Rückgang borealer Waldgebiete sowie des Regenwaldes im Amazonas) zu komplexen Kaskaden von negativen Auswirkungen für sozial-ökologische Systeme und damit für menschliche Gesellschaften und Entwicklung in weiten Teilen des Globus führen und das bisher stabile und für die menschliche Entwicklung förderliche Systemgleichgewicht des Holozäns langfristig ändern (Lenton u. a. 2008; Will Steffen u. a. 2011).

Aufgrund der systemischen „Spielregeln“ der Erdsystemprozesse werden die planetaren Grenzen zwar als unabhängig von menschlichen Präferenzen und sozio-technischen Entwicklungen (z.B. erwartete technologische Fortschritte oder Schwankungen im Wirtschaftswachstum) angesehen – allerdings bestimmen menschliche Aktivitäten und Auswahlentscheidungen in großem Maß wie nah wir an die kritischen Schwellenwerte heran- oder über sie hinweg manövrieren (Rockström u. a. 2009a). Damit besteht eine Vielzahl möglicher Entwicklungspfade für menschliches Wohlbefinden mit unterschiedlichen Auswirkungen hinsichtlich planetarer Grenzen.

Die globalen Entwicklungspfade seit der Industrialisierung, und insbesondere seit der Mitte des 20. Jahrhunderts, sind jedoch wenig nachhaltig und deuten auf signifikante Überschreitungen der planetaren Grenzen hin, wenn nicht gegengesteuert wird (vgl. Will Steffen u. a. 2011). Systemische Probleme und komplex vernetzte Triebkräfte liegen diesen Entwicklungen zugrunde, beispielsweise

- ▶ die zunehmende Verbreitung konsumorientierter Lebensstile und sozialer Normen;
- ▶ kürzer werdende Produkt- und Konsumzyklen (Wegwerf-Mentalität);
- ▶ zunehmende Zeitknappheit, Komplexität und Gleichzeitigkeit im Berufsleben;

- ▶ Urbanisierung und Ausbreitung urbaner Raum- und Versorgungsstrukturen;
- ▶ Pfadabhängigkeiten fossiler Energienutzung durch Infrastrukturdisein/-planung;
- ▶ volatile Ressourcenpreise und weiterhin die Externalisierung von Kosten der Energie-/Ressourcennutzung;
- ▶ internationalisierte Wertschöpfungsketten und Konsumentenwünsche;
- ▶ Digitalisierung aller Arbeits- und Lebensbereiche (z.B. personalisierte Werbung) (Hirschnitz-Garbers u. a. 2015; Langsdorf und Hirschnitz-Garbers 2014a).

Diese komplexen Systembeziehungen und Wechselwirkungen machen deutlich, dass langfristig ressourcenschonende und nachhaltige Wirtschafts- und Lebensweisen neben Steigerung von Effizienz und Kreislaufführung auch der Transformation von (Sub)Systemen, Infrastrukturen, Institutionen und sozialen Praktiken bedürfen (SRU 2016; WBGU 2011). Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene Ansätze entwickelt, aus denen heraus Politikmaßnahmen für Ressourcenschonung abgeleitet werden können und die helfen, Ressourcenschonungspolitik zu bewerten. Das „Decoupling-Konzept“ wurde im Jahr 2001 durch die OECD eingeführt, um die Verbindung zwischen Umweltschäden und wirtschaftlicher Entwicklung zu brechen (OECD 2002), sogenanntes „Impact-Decoupling“. „Ressourcen-Decoupling“ wiederum zielt im Wesentlichen darauf ab, Ressourcenverbrauch und Wirtschaftswachstum zu entkoppeln (gemessen als „total material requirement, TMR“). Werden sowohl Impact-, als auch Ressourcen-Decoupling erreicht, nutzt das Internationale Ressourcen Panel der UNEP den Begriff „double decoupling“ (UNEP 2011).

Neben der Unterscheidung in Impact und Ressourcen-Decoupling ist überdies zwischen „relativer Entkopplung“ (relative decoupling) und „absoluter Entkopplung“ (absolute decoupling) zu differenzieren. Im Falle „relativer Entkopplung“ wächst der relevante Umweltparameter (z.B. Ressourcenverbrauch) langsamer als der relevante wirtschaftliche Parameter (z.B. GDP). Im Falle „absoluter Entkopplung“ die Ressourceneffizienz stärker zunimmt als die wirtschaftliche Aktivität. In der Folge nimmt der Ressourcenverbrauch in absoluten Zahlen ab. „Absolute Entkopplung“ beinhaltet nicht die Abnahme des Ressourcenverbrauchs in Folge einer wirtschaftlichen Krise. „Absolute Entkopplung“ bezieht sich auf die gestaltete Reduktion des Ressourcenverbrauchs, bei gleichbleibend hoher Lebensqualität (Umpfenbach 2013). Über reine Decoupling-Ansätze oder „Faktor-X“ Reduktionen hinausgehend werden Systemveränderungen und Transformationen zu ressourcenleichten und CO<sub>2</sub>-neutralen Lebensweisen als wesentlicher Schlüssel zum Erfolg gesehen – das umfasst Veränderungen im Mensch-Natur-Verhältnis, in Produktions- und Konsummustern, im Umgang mit bzw. Management von Allgemeingütern, in Eigentums- und Besitzverhältnisse sowie in Überzeugungen und mentalen Modellen.

## 1.2 Zielstellung des SimRess-Projektes

Vor diesem Hintergrund verfolgt das SimRess-Projekt zwei wesentliche Ziele:

3. Die potentielle Wirksamkeit ressourcenpolitischer Ansätze (Strategien und Maßnahmenpakete bzw. Politikmixe) zur Verbesserung von Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung
  - a) einerseits im Rahmen von verschiedenen Referenzszenarien<sup>3</sup> sowie
  - b) andererseits im Vergleich weiterer Annahmen zu ressourcenpolitischen Ansätze mit den Referenzszenarien

---

<sup>3</sup> Die Referenzszenarien werden auf Grundlage von im UFOPLAN-Projekt PolRess (FKZ 3711 93 103) gebildeten Umfeldszenarien entwickelt und durch die Befunde aus der SimRess-Trendanalyse verfeinert.



mit Zeithorizont 2050 und darüber hinaus zu testen. Dazu werden das ökonomischen Modell GINFORS3 der GWS mbH und das systemdynamische Modell WORLD3 eingesetzt. Das bestehende Modell WORLD3 wurde dabei im Projektverlauf durch die Projektpartner der Universität Lund/Universität Island um weitergehende Modellierungen des Ressourcennexus ergänzt und zum Modell WORLD6 weiterentwickelt.

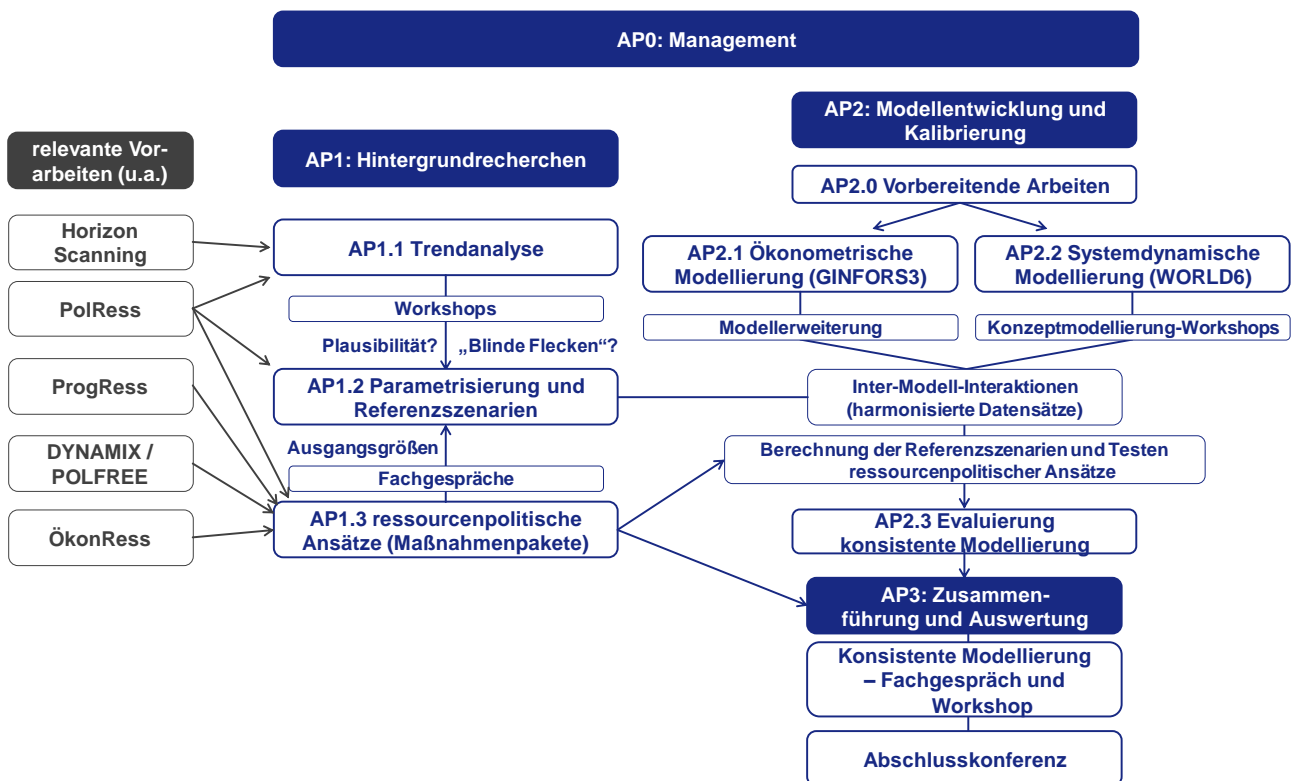
4. Einen konsistenten, gemeinsamen Modellrahmen diskutieren, der die Ergebnisse beider Modelle vergleichen und mögliche Ansätze zur Verbesserung der Informationsflüsse zwischen ökonomischem und systemdynamischen Modell herausarbeiten soll sowie die Stärken beider Modellansätze kombinieren könnte.

Dadurch sollen sowohl politische Handlungsempfehlungen ermöglicht werden als auch Beiträge zur Diskussion geliefert werden, wie Modellierung zwecks Unterstützung von wissenschaftsbasierter Politikberatung weiterentwickelt und robuster bzw. konsistenter gemacht werden kann. Damit will das SimRes-Projekt einen Beitrag zur Weiterentwicklung des nationalen Ressourceneffizienzprogramms ProgRes leisten.

### 1.3 Vorgehen im SimRes-Projekt

Um die vorgenannten Ziele zu erreichen, wurde ein mehrstufiges Vorgehen von aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen und Arbeitsschritten gewählt. Die folgende Abbildung 1 zeigt die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitspaketen (AP) und Arbeitsschritten.

Abbildung 1: Logik und Ablauf der Arbeitsschritte im SimRes-Projekt



Quelle: Autoren

Im Rahmen vorbereitender Hintergrundrecherchen (AP1) wurde zunächst eine Trendanalyse (AP1.1) von ressourcenpolitisch relevanten Entwicklungen durchgeführt, die zukünftig einen positiven oder

negativen Einfluss auf die globale bzw. heimische Ressourceninanspruchnahme haben könnten (siehe Kapitel 2 für die Ausführungen zur Trendanalyse). Die Befunde der Trendanalyse wurden dann verwendet, um

- ▶ einerseits die Referenzszenarien, die basierend auf Vorarbeiten aus anderen Projekten in SimRess zur Abschätzung möglicher Auswirkungen ressourcenpolitischer (und in geringem Umfang auch klimapolitischer) Ansätze entwickelt wurden, auf Plausibilität zu prüfen und entsprechend zu parametrisieren (AP1.2);
- ▶ und andererseits bestehende ressourcenpolitische Ansätze (AP1.3) zu identifizieren, die ressourcenpolitisch förderliche Trends unterstützen und hinderliche Trends abfedern können, und diese im Lichte möglicher Bündelung als Maßnahmenpakete zu diskutieren.

Parallel zu den Arbeiten in AP1 und aufbauend den Befunden auf AP1.2 wurde dann die Modellentwicklung der beiden verwendeten Modelle WORLD6 und GINFORS3 vorgenommen und beide Modelle anhand ihrer jeweiligen Datengrundlagen und Bezugsgrößen kalibriert (AP2). Dabei wurde

- ▶ das bestehende dynamische ökonomische Modell GINFORS zum GINFORS3-Modell weiterentwickelt (AP2.1; siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 3.1)
- ▶ und das systemdynamische Modell WORLD zum WORLD6 weiterentwickelt und mittels mehrerer Konzept-Modellierungsworkshops partizipativ durch Stakeholder-Input systemisch fokussiert (AP2.2; siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 3.2).

Die beiden kalibrierten Modelle tauschten dann Informationen über die jeweiligen Modellierungsansätze und Datengrundlagen sowie verschiedene Datensätze zur Harmonisierung aus. Dadurch konnte nicht nur ein integrativer Modellierungsrahmen diskutiert, sondern über einen Soft-Link zwischen den Modellen aus getestet werden (siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 3.3). Anschließend wurden im Modell GINFORS3 sowohl die Referenzszenarien als auch ressourcenpolitische Ansätze (über Simulationsexperimente, die ressourcenpolitische induzierte Effizienzsteigerungen in Produktionstechnologien simulierten) bezüglich ihrer Auswirkungen auf Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen getestet und berechnet und getestet. Demgegenüber wurden mittels des WORLD6-Modells Abschätzungen zur globalen Verfügbarkeit verschiedener Rohstoffe mit und ohne ressourcenpolitische Ansätze zur Stärkung des Recyclings durchgeführt wurden. Die so ermittelten Simulationsergebnisse wurden abschließend im Modellvergleich hinsichtlich der Konsistenz diskutiert (u.a. in einem Modellübergreifenden Expertenworkshop im April 2016) und evaluiert (AP2.3), unterstützt auch durch den zuvor etablierten Soft-Link.

Die Simulationsergebnisse wurden dann zusammen ausgewertet (AP3) und fanden dann Eingang in

- ▶ ein Diskussionspapier,
  - ▶ in die Diskussionen im Rahmen
1. der Konferenz „Decarbonisation and Resource Efficiency – 100% Renewable Energy and more“, die im November 2016 als SimRess-Abschlusskonferenz umgesetzt wurde, und
  2. eines gemeinsamen projektübergreifenden zwei-tätigen Abschlussworkshop mit dem Projekt DeteRess<sup>4</sup> im Dezember 2016, und
- ▶ in verschiedene Abschlussberichte (siehe dazu im folgenden Kapitel 1.4).

---

<sup>4</sup> Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz; FKZ 3712 93 321. Das Projekt DeteRess erforschte anhand ausgewählter rohstoffsparender Technologien den Handlungskorridor, den die Rohstoffpolitik in Deutschland in den kommenden Jahrzehnten hat.

## 1.4 Im SimRess-Projekt erarbeitete Ergebnisse und Hintergründe

Die folgenden Veröffentlichungen umfassen (teilweise) Ergebnisse des SimRess-Projektes:<sup>5</sup>

Tabelle 2: Übersicht über die im SimRess-Projekt erarbeiteten Ergebnisveröffentlichungen

Projektgegenstand	Veröffentlichung
Trendanalyse	UBA (Hrsg.) (2014). Die Zukunft im Blick: Trendbericht für eine vorausschauende Ressourcenpolitik. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. <a href="https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick">https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick</a>
Ressourcenpolitische Ansätze	Hirschnitz-Garbers, M., D. Koca, H.U. Sverdrup, M. Meyer und M. Distelkamp (2017). System analysis for environmental policy – System thinking through system dynamic Modelling and policy mixing as used in the SimRess project. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
ökonometrische Modellierung	Distelkamp, M. und M. Meyer (2017). Langfristszenarien und Potenziale zur Ressourceneffizienz in Deutschland im globalen Kontext – quantitative Abschätzungen mit dem Modell GINFORS3. SimRess-Endbericht Band 1. Osnabrück: GWS Distelkamp, M. und Ahlert, G. (2015). Ressourcenindikatoren Deutschlands auf dem Prüfstand. Ergebnisse auf Grundlage eines globalen MRIO-Modells. SimRess-Arbeitspapier, unveröffentlicht.
systemdynamische Modellierung	Koca, D. und H.U. Sverdrup (2017). Using the system dynamic WORLD6 Modell for assessing resource scarcities and resource policy. SimRess project report Volume 2. Lund: Lund University, Iceland University. Die folgenden Veröffentlichungen entstammen Hintergrundarbeiten des WORLD6-Modelliererteams: Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., (2016a). Modelling the global primary extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources using the COBALT Modell. Biophysical Economics and Resource Quality. DOI: 10.1007/s41247-017-0017-0 Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., (2016b). Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM Modell. Resources, Conservation and Recycling 114: 112-129 Sverdrup, H., Koca, D., Ragnarsdottir, K.V. (2015a). Aluminium for the future: Modelling the global production, assessing long term supply to society and extraction of the global bauxite reserves. Resources, Conservation and Recycling. 103:139-154 Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., Koca, D., (2015b). An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: Security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity. Journal of Cleaner production; Special issue on strategic leadership towards sustainability. In press. Sverdrup, H., Koca, D., Ragnarsdottir, K.V. (2014a). Investigating the sustainability of the global silver supply, reserves, stocks in society and market price using different approaches. Resources, Conservation and Recycling. 83; 121-140.

<sup>5</sup> Über die hier genannten Veröffentlichungen hinaus wurden vielfältige Zwischenberichte, Inputpapier für Fachgespräche und Materialien für Projektbesprechungen erarbeitet, die nicht als formale Projekt-Veröffentlichungen aufgeführt sind.

Projektgegenstand	Veröffentlichung
	<p>Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., Koca, D., (2014b). On Modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> 87:158-174</p> <p>Sverdrup, H.U., and Ragnarsdottir, K.V., (2014c). Natural Resources in a planetary perspective. <i>Geochemical Perspectives Vol. 2, number 2, October issue</i> 2014. 2:1-156. European Geochemical Society.</p>
Konsistente Modellierung	<p>Biemann, K., M. Distelkamp, M. Dittrich, F. Dünnebeil, B. Greiner, M. Hirschnitz-Garbers, D. Koca, u. a. (2017). Sicherung der Konsistenz und Harmonisierung von Annahmen bei der kombinierten Modellierung von Ressourceninanspruchnahme und Treibhausgasemissionen. Reader zum Erfahrungsaustausch im Rahmen des SimRess-Modellierer- Workshops am 7./8. April 2016 in Berlin ‚Simulation Ressourceninanspruchnahme und Ressourceneffizienzpolitik‘. DOKUMENTATIONEN 04/2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-30_dokumentation_04-2017_Modellierung_simress.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-30_dokumentation_04-2017_Modellierung_simress.pdf</a>.</p>
Zusammenführung der Ergebnisse	<p>Hirschnitz-Garbers, M., D. Koca, H.U. Sverdrup, M. Meyer und M. Distelkamp (2017). System analysis for environmental policy – System thinking through system dynamic Modelling and policy mixing as used in the SimRess project. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.</p> <p>Hirschnitz-Garbers, Martin, Susanne Langsdorf, Martin Distelkamp, Mark Meyer, Deniz Koca, Harald U. Sverdrup, und Ullrich Lorenz (2016). A systemic view on resource efficiency policy“. <i>SimRess Discussion Paper</i>. October 2016, Berlin: unpublished.</p>

## 1.5 Gegenstand und Struktur des vorliegenden Teilberichts

Der vorliegende Teilbericht beschreibt zunächst das Vorgehen zur und die wesentlichen Ergebnisse der Trendanalyse (siehe Kapitel 2). Anschließend werden die beiden Modellierungsansätze dargestellt, mit Blick auf Integration der Referenzszenarien, die in SimRess unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Trendanalyse gebildet wurden, in das GINFORS3-Modell in Kapitel 3.1, zu WORLD6 in Kapitel 3.2 und bezüglich der Modellinteraktion in Kapitel 3.3. Dabei werden die wesentlichen Modellierungsansätze beider Modelle erläutert, die für das Verständnis der Simulationsergebnisse relevant sind.

Darauf aufbauend stellt der vorliegende Teilbericht dann die wesentlichen Ergebnisse aus der Berechnung der Referenzszenarien in GINFORS3 (siehe Kapitel 4.1), der Abschätzung globaler Rohstoffverfügbarkeiten in WORLD6 (Kapitel 4.2) und ausgewählter ressourcenpolitischer Ansätze über Simulationsexperimente (siehe Kapitel 4.3) in den beiden Modellen zusammen. Die detaillierten Befunde zum WORLD6-Modell inklusive Simulationsergebnissen sind verfügbar in Koca und Sverdrup (2017); für das GINFORS3-Modell sind die Befunde ausführlich dargestellt in Distelkamp und Meyer Ergebnissen (2017). Weiterhin werden die Ergebnisse der Identifikation und Diskussion ressourcenpolitischer Ansätze und Maßnahmenpakete (bzw. Politikmixe) in Hirschnitz-Garbers u.a. (2017) aufbereitet.

Die Ausführungen im vorliegenden Teilbericht basieren auf den hier genannten Veröffentlichungen – daher werden sie im Folgenden nur als Quellenangaben von Abbildungen und Tabellen verwendet, die aus den o.g. Veröffentlichungen 1:1 kopiert wurden.

## 2 SimRes-Trendanalyse

### 2.1 Zielstellung und Vorgehen

Die Trendanalyse ist Bestandteil der Hintergrundrecherchen, die als vorbereitende Grundlage für die Modellsimulationen in SimRes dienen. Durch die Trendanalyse sollten bestehende relevante Trends im Umfeld der Ressourcenpolitik analysiert werden, um auf diese Weise die Plausibilität der Umfeldszenarien, die in SimRes für die Modellierungsarbeiten herangezogen wurden, prüfen und Aussagen dazu machen zu können, welche Herausforderungen und Chancen mit den Trends bezüglich Ressourceninanspruchnahme und Ressourcenpolitik verbunden sind.

Um den Simulationsaktivitäten in SimRes plausible Szenarioentwicklungen zugrunde legen und Parameterentwicklungen in unterschiedlichen qualitativen Umfeldszenarien vergleichen zu können, wurde als Basisszenario das „Industrieland Deutschland“ Szenario herangezogen, das im Rahmen des Projektes PolRes<sup>6</sup> unter Federführung der eusg mittels partizipativer Szenariotechnik erarbeitet wurde (Bergmann und Lehr 2015). Von diesem Basisszenario ausgehend wurden zwei weitere eigenständige Umfeldszenarien für die Parametrisierung im globalen, dynamischen multi-regionalen Input-Output Modell GINFORS3 parametrisiert.

Mit der Trendanalyse in SimRes wurden dann so umfassend wie möglich plausible, relevante Entwicklungen identifiziert, die einen potentiellen Einfluss auf die Ressourceninanspruchnahme ausüben und damit relevant für die nationale Ressourcenpolitik sein könnten. Die Trends wurden dann im Rahmen der Szenarioparametrisierungen in den Modellen sowie in der Identifikation von ressourcenpolitischen Ansätzen berücksichtigt.

#### 2.1.1 Definitionen

Der Fokus der SimRes-Trendanalyse lag auf der Identifikation und Analyse bisher weniger beleuchteter Entwicklungen und umfasste somit die Analyse von weak signals, emerging issues und Trends, weniger von wild cards und Megatrends. Die folgende Tabelle 3 gibt kurze Definition der Begriffe, wie sie in dieser Studie verstanden werden. Sie sind weitgehend konsistent zu den Definitionen aus dem Horizon Scanning Projekt des UBA (vgl. Behrendt u. a. 2015, 51 ff.).

Tabelle 3: Definitionen der Entwicklungen im Fokus der SimRes-Trendanalyse

Entwicklung/Begriff	Definition
Emerging issues	Emerging issues sind aufkommende oder sich entwickelnde gesellschaftliche, wirtschaftliche oder umweltbezogene Aspekte, die zukünftig so relevant sein könnten, dass sie einen zentralen Gegenstand ressourcenpolitischer Überlegungen und Entscheidungen ausmachen (Behrendt u. a. 2015).
Megatrends	Megatrends sind langfristige Transformationsprozesse, die sich fundamental auf gesellschaftliche, wirtschaftliche, politische und technologische Bereiche auswirken und über Jahrzehnte wirksam sind (Z_punkt 2016).
Trends/Einzeltrends	Ein Trend beschreibt einen seit einiger Zeit beobachtbaren Sachverhalt, der eine längerfristige nicht zyklische, aber oftmals statistisch beschreibbare Veränderungsbewegung angibt (Horx 2014).
Trendthemen	Trendthemen fassen für spezifische Handlungsfelder oder Sektoren relevante Trends zusammen und berücksichtigen bestehende Kausalbeziehungen.

<sup>6</sup> PolRes – Entwicklung der politischen Debatte zur Ressourceneffizienz in Deutschland bis 2050, FKZ 3711 93 103. URL: <http://www.ressourcenpolitik.de/>

Entwicklung/Begriff	Definition
Weak signals	Weak signals sind erste Indikatoren von gegenwärtig geringeren Veränderungen, die sich als begründete Auffälligkeiten beobachten lassen. Weak signals können über emerging issues zu Trends oder Megatrends führen, aber auch Diskontinuitäten anzeigen und damit wild cards identifizieren (Behrendt u. a. 2015).
Wild cards	Wild cards sind denkbare, in ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit schwer einzuschätzende zukünftige Ereignisse, die bei Eintreten jedoch deutlichen Einfluss auf die Wirklichkeit der prognostizierten Zukunft haben (Behrendt u. a. 2015).

### 2.1.2 Vorgehen in der SimRes-Trendanalyse

Zukunftsforschung wird in Deutschland von verschiedenen Einrichtungen bereits seit mehreren Jahrzehnten eingesetzt, so z.B. in der Sicherheitspolitik und in der Technikfolgenabschätzung (siehe Behrendt u. a. 2015; Schnurr und Glockner 2016). In der Umweltverwaltung kommt dem Umweltbundesamt (UBA) eine Pionierrolle bei der Etablierung einer strategischen Zukunftsforschung für die Umweltpolitik zu – das UBA beauftragt dazu seit einigen Jahren Horizon Scanning, Trend- und Zukunftsanalysen bzw. führt sie selber durch (siehe UBA 2016)<sup>7</sup>. Die SimRes-Trendanalyse reiht sich hier ein – der SimRes-Trendbericht ist auf der vorgenannten Website einzusehen.

Die SimRes-Trendanalyse hatte zum Ziel, die aus dem Projekt PolRes heraus erarbeiteten Umfeldszenarien (Bergmann und Lehr 2015) bezüglich potentiell ressourcenpolitisch relevanter Entwicklungen anzureichern und zu verfeinern, sodass diese bei der Überführung der Umfeldszenarien in SimRes-Referenzszenarien für die Modellierung (siehe Kapitel 3.1) berücksichtigt werden konnten. Darüber hinaus dienten die Ergebnisse der Trendanalyse auch dazu, ressourcenpolitische Ansätze und Instrumente zu ermitteln, die geeignet sein könnten, ressourcenpolitisch förderliche Trends zu unterstützen und hinderliche Trends abzufedern, und deren Bündelung in Maßnahmenpakete zu diskutieren.

Die qualitative, flexible Herangehensweise der SimRes-Trendanalyse hatte den Vorteil, offen alle aufkommenden Elemente zu integrieren und auf diese Weise auch neue und unerwartete Entwicklungen aufdecken zu können. Im Rahmen der SimRes-Trendanalyse kamen verschiedene Methoden zur Anwendung: desktop research (Quellenanalyse), telefonische Experteninterviews und partizipative Kausalmodellierung über einen Expertenworkshop. Des Weiteren wurden Querverbindungen sowie potentielle strategische Ansatzpunkte für Ressourcenpolitik identifiziert.

#### 2.1.2.1 Quellenrecherche

Zur Eingrenzung der Trendsuche auf weniger beleuchtete und unerwartete Entwicklungen wurden anstelle wissenschaftlicher Artikel eine Google Recherche und eine Zeitungsrecherche nach Schlüsselwörtern durchgeführt. Die Zeitungsrecherche ergänzte die Weitfokusrecherche in der Suchmaschine Google qualitativ. Auch die Zeitungsrecherche wurde unter Nutzung des Google-Suchalgorithmus durchgeführt, der sich in einer Testrecherche den Suchmaschinen der Zeitungen überlegen zeigte und mehr einschlägige Treffer ergab. Untersucht wurden zwei renommierte deutsche überregionalen Tageszeitungen: Frankfurter Allgemeine Zeitung und Süddeutsche Zeitung sowie eine internationale Zeitschrift, die für ein gutes Screening der Wissenschaftslandschaft bekannt ist: der Economist.

Die Schlüsselwörter waren im Rahmen einer Probekodierung dreier Quellen, die parallel durch mehrere WissenschaftlerInnen durchgeführt wurde, festgelegt worden:

<sup>7</sup> URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/strategische-zukunftsforschung>, eingesehen am 5. Juli 2017.



1. Trend\*<sup>8</sup>
2. Zukunft/future (2030/2050 als mögliche Ergänzungen)
3. Entwick\*/develop\*
4. aufkommen\*/emerg\*/novel\*
5. signal
6. vision
7. scenario
8. tipping point
9. Treiber/driver
10. transition\*

Als ressourcenrelevant eingeschätzte Treffer der Google- und Zeitungsrecherche wurden in ein Suchraster eingetragen. Dort wurden u.a. die relevante Entwicklung, der Kausalzusammenhang des Trends sowie mögliche Auswirkungen auf sozialer, technischer, ökonomischer, ökologischer und politischer Ebene benannt.

Im nächsten Schritt wurden alle Einzelergebnisse thematisch geclustert, um Unterschiede, Gemeinsamkeiten und potentielle Zusammenhänge zu ermitteln. Dadurch wurden zunächst 21 Oberthemen identifiziert und die ermittelten Trends wurden ihnen zugeordnet und als Trendthema zusammengefasst. In einem weiteren teaminternen Diskussionsworkshop wurden die identifizierten Oberthemen zu schließlich 17 Trendthemen konsolidiert. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Trends und der teilweise entgegengesetzten Trends innerhalb der Trendthemen wurden die Trendthemen zunächst in Form von Narrativen zusammengeführt.

Diese Trendthemen wurden in Interviews und in einem Workshop zur Diskussion gestellt. Dadurch sollten die identifizierten Trendthemen bewertet, Lücken aufgedeckt und Querverbindungen sowie Kausalbeziehungen offengelegt werden. Des Weiteren sollten die Trends bezüglich ihrer Bedeutung für ressourcenpolitische Ziele bewertet werden.

#### **2.1.2.2 Interviews**

Im Vorfeld sowie im Nachgang zum Expertenworkshop wurden Interviews mit relevanten Experten aus dem Bereich Zukunftsforschung sowie mit solchen Institutionen durchgeführt, die am Expertenworkshop nicht teilnehmen konnten.

Von den Experten wurden im Interview zunächst die drei wichtigsten globalen und nationalen Trends erfragt sowie die drei wichtigsten nationalen und globalen Trends, die zu wenig Beachtung erfahren. Dann wurden die durch Quellenanalyse gefundenen Trendthemen (Auswahl der Trends und des jeweiligen Fokus bestimmten die Interviewpartnerinnen) bezüglich fehlender Aspekte und notwendiger Ergänzungen diskutiert. Wo möglich, wurden dann die Plausibilität, Eintrittswahrscheinlichkeit und Wünschbarkeit der Trendthemen abgefragt. Abschließend wurden Querbeziehungen, Lücken und mögliche wild cards diskutiert.

#### **2.1.2.3 Expertenworkshop**

Im Rahmen eines 1,5-tägigen Expertenworkshops wurden im März 2014 die im Rahmen der Quellenrecherche identifizierten und anhand der Interviewbefunde konsolidierten Trendthemen hinsichtlich fehlender Aspekte, Ergänzungsbedarf und Lücken in der bisherigen Analyse diskutiert. Auch hier wurden, wo möglich, die Wirkung der Trendthemen, ihre Plausibilität sowie die geographische Reichweite bewertet. Weiterhin wurden potentielle Querverbindungen zwischen den Trendthemen ermittelt und

---

<sup>8</sup> Das Symbol \* bezeichnet eine beliebige nach dem Symbol kommende Zeichenkette und erfasst somit unterschiedliche mit dem Begriffsteil vor dem Symbol beginnende Begrifflichkeiten.




potentielle emergente Trends identifiziert. Für die emergenten Trends wurden dann Wirkungen auf die Wertschöpfungskette diskutiert sowie mögliche ressourcenpolitische Ansatzpunkte und deren Auswirkungen auf das Erreichen ressourcenpolitischer Ziele herausgearbeitet.

Dazu wurden vier Kleingruppen gebildet, die sich mit jeweils sechs Trendthemen befassten. Dies erhöhte die Diskussionszeit für die einzelnen Themen. Gleichzeitig wurde zu allen Themen Feedback eingeholt. Die theoretisch mögliche Diskussion weiterer Trendthemen innerhalb der Gruppen wurde aus Zeitmangel nicht vorgenommen.

Die Lücken wurden frei beschrieben und auf Karten an Pinnwänden zu den Trends geheftet. Die Einschätzung der Wirkung der Trends, der Plausibilität und der geographischen Reichweite wurde anhand einer Skala vorgenommen. Die Expertinnen konnten Klebepunkte auf einem Kontinuum verteilen. Für die „Wirkung des Trends“ wurden gegenläufige Tendenzen durch das SimRes Team vorgeschlagen. Viele der identifizierten Trendthemen beinhalten gegenläufige Trends und somit unterschiedliche mögliche Zukünfte, je nachdem welcher aktuelle Trend sich durchsetzen wird. Es war somit Ziel der Übung, die Einschätzung der Experten einzuholen, welche Entwicklung sie erwarten.

Tabelle 4: Beispiel für die ExpertInnen-Einschätzung zum Trendthema Urbanisierung

Trendthema	Schlagwörter	Kontinuum	
Urbanisierung	Zunahme Megacities – städtische Konsummuster und Verhaltensweisen – urbane Nachhaltigkeit – Landflucht.	Negative Umweltfolgen	
			Ressourcenschonung

„Plausibilität“ (plausibel vs. nicht plausibel) und „geographische Reichweite“ (national vs. global) wurde ebenfalls entlang eines solchen Kontinuums durch die Experten eingestuft.

#### 2.1.2.4 Verdichtung mittels der Szenario- und Trendanalyse-Software EIDOS

Nach Auswertung der Quellenrecherche, Interviewbefunde und des Workshop-Feedbacks wurden die Einzeltrends pro Trendthema und die Trendthemen insgesamt mittels Prüfung möglicher Querbeziehungen zu und ähnlicher Wirkungsgefüge weiter verdichtet. Dazu kam die Software Parmenides EIDOS zum Einsatz, mit der auch Szenario- und Trendanalysen durchgeführt werden können.

In mehreren projektinternen Treffen, teilweise unter Einbeziehung der Projekt-Fachbegleitung aus dem UBA, wurden die Dynamiken zwischen verschiedenen Trends und innerhalb von Trendthemen untersucht, diskutiert und letztlich visualisiert. Dazu wurden zunächst alle Daten der Quellenrecherche, der Interviews und des Workshops zusammengeführt und alle Trends mit Richtungsangabe und potenzieller Ressourcenrelevanz in einer Tabelle vereinigt. Dann wurden für eine Auswahl als besonders relevant erachteter Trends Haupttrends und Gegentrends gebildet, welche das Potential aufweisen, andere Trends im System zu verstärken bzw. zu beeinflussen. Für diese Trendauswahl wurden dann plausible Kausalbeziehungen hinsichtlich treibender und von anderen Trends getriebener Entwicklungen identifiziert.

## 2.2 Ergebnisse der SimRes-Trendanalyse

Im Rahmen der Trendanalyse wurden mittels der o.g. Vorgehensweise mehr als 300 potentiell relevante Einzeltrends identifiziert und zu insgesamt 12 Trendthemen verdichtet (siehe Tabelle 5):

Tabelle 5: Überblick über die 12 Trendthemen aus der SimRes-Trendanalyse

Trendthema	Kurzbeschreibung
Urbanisierung	Weltweit konzentriert sich die Bevölkerung immer mehr in Städten. Das führt einerseits zu einer Ausbreitung von städtischen Konsum- und Verhaltensmustern, verbunden mit einem Anstieg des Ressourcenbedarfs. Andererseits ergibt die Dichte an Menschen und Infrastrukturen hohe Ressourcen- und Energieeffizienzpotentiale.
Sozio-ökonomische Beschleunigung	Westliche Wachstumsmodelle und Lebensstile breiten sich in Schwellen- und Entwicklungsländern aus. Entwicklungen in Wirtschaft und Gesellschaft werden zunehmend wachstumsorientierter und immer schneller. Die Bildungslandschaft wird ökonomisiert. Arbeitsprozesse finden zunehmend digital statt und verdichten sich immer stärker – gesundheitliche Belastungen nehmen zu.
Arbeitswelt	Der Arbeitsmarkt in Deutschland wird stark durch den demografischen Wandel beeinflusst. Der Bedarf an Fachkräften steigt, Geringqualifizierte haben es auf dem Arbeitsmarkt schwer. Der Arbeitsalltag von Hochqualifizierten beschleunigt sich, klassische Lebensläufe nehmen ab.
Ressourcengovernance	Wirtschaftlich relevante Rohstoffe werden knapper, verfügbare Reserven können gegenwärtige Spitzenproduktion in den nächsten Jahrzehnten nicht aufrechterhalten. Rohstoffförderung wird zunehmend staatlich kontrolliert und dazu auch mit entsprechender Forschungsförderung unterstützt. Um Knappheiten entgegenzuwirken und Rohstoffimportabhängigkeit zu verringern, wird in unkonventionelle Fördertechnologien für Energierohstoffe investiert.
Ernährung	Der globale Konsum von tierischen Produkten nimmt zu. In Deutschland steigt die Nachfrage nach Convenience- und Lifestyleprodukten. Gleichzeitig verbreiten sich nachhaltige Ernährungsmuster und Selbstversorgungsansätze, einhergehend mit Forderungen nach nachhaltigen und transparenten Lieferketten und Produkten.
Neue Denkweisen und Weltbilder	Der Widerstand gegen sozial und ökologisch belastende Wirtschaftsweisen wächst, alternative, nachhaltige Lebensstile werden in Nischen praktiziert. Transformationsinitiativen breiten sich aus, Entschleunigung und Zeitwohlstand werden von einer kleinen, aber wachsenden Gruppe höher geschätzt als statusgeprägter Konsum.
(Neue) Geschäftsmodelle	Zunahme der Anzahl und Bedeutung von profitorientierten multinationalen Konzernen. Online-Handel weitest sich aus; mehr und mehr Käufe werden online und mobil getätigt. Unternehmen setzen zunehmend auf „social commerce“, um über die Nutzung sozialer Medien ihre Kundenbeziehungen zu verbessern. Konsumenten nutzen zunehmend online tools mit Hintergrundinformationen zu den Produkten und Dienstleistungen, was nachhaltige Geschäftsmodelle fördert.
Finanzwirtschaft	Die globalen Finanzströme nehmen zu, Rohstoffmärkte sind ein wichtiges Ziel institutioneller Anleger. Preisvolatilitäten und Risiken von Blasen an den Finanzmärkten steigen an. Erste kleinere Reformen im Bereich der Finanzwirtschaft fanden im Zuge der globalen Finanzkrise statt; dabei kommt internationaler Kooperation entscheidende Bedeutung zu.
Mobilität/Infrastruktur	Mobilität ist nach wie vor ein zentrales Thema in Bezug auf Ressourcennutzung. Dabei wird Elektromobilität langfristig zum vorherrschenden Mobilitätskonzept. In Industrieländern vollzieht sich dieser Wandel früher, aber langsamer, als in aufstrebenden Schwellenländern. Intermodale Mobilität und Carsharing erzeugen hohen Anpassungsbedarf in städtischer Infrastruktur, reduzieren aber die Bedeutung des Autos für die Fortbewegung.

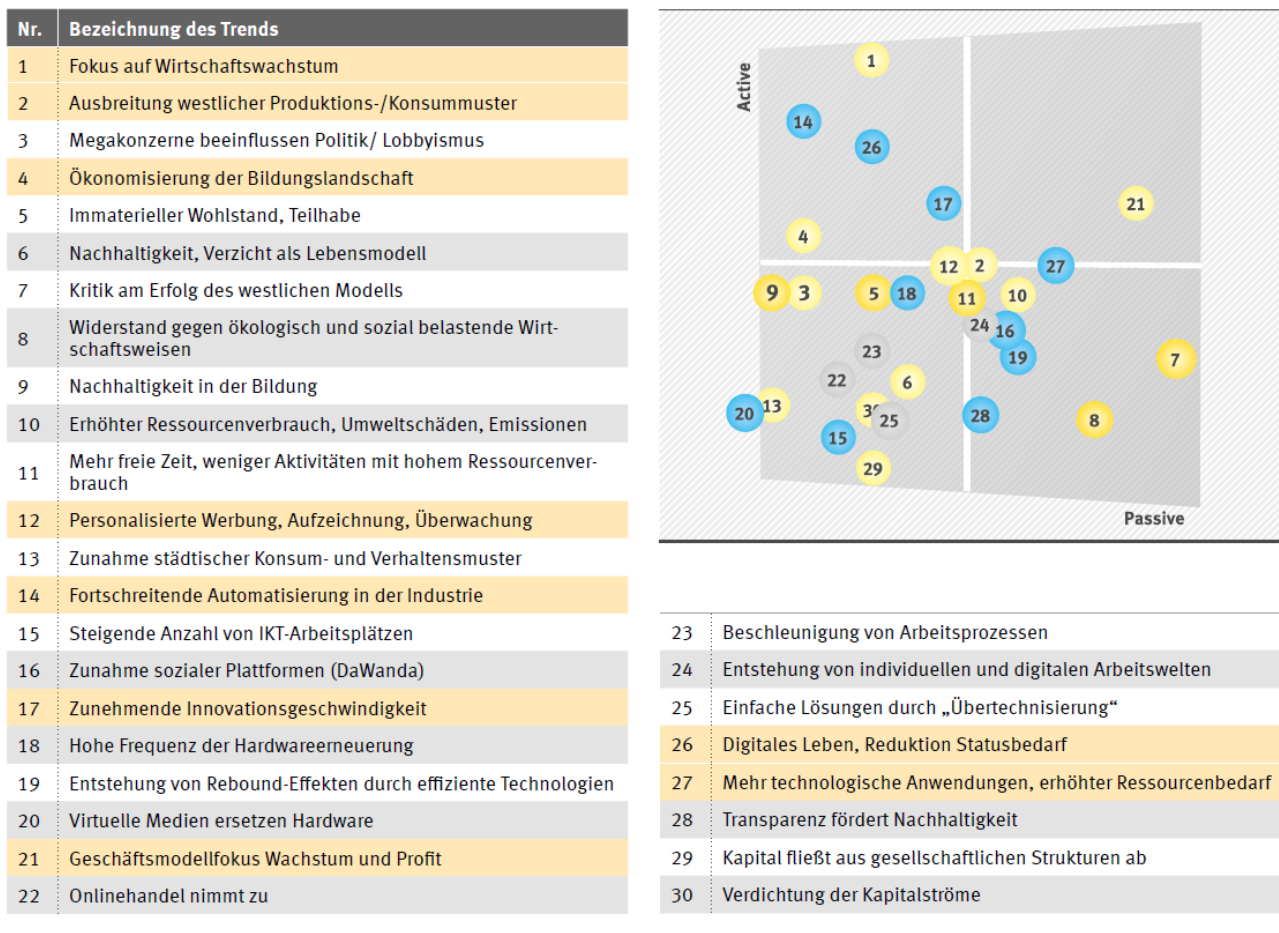
Trendthema	Kurzbeschreibung
Digitalisierung und Vernetzung	Digitalisierung durchdringt zunehmend alle Lebens- und Arbeitsbereiche. Die Vernetzung des Individuums steigt – ebenso die Partizipationsmöglichkeiten des Einzelnen an demokratischen Prozessen. Status wird entmaterialisiert – „Digital Natives“ kreieren ihre (online) Identität über das digitale Teilen von Meinungen und Erlebnissen.
Marketing und Konsum	Konsummuster in aufstrebenden Ländern gleichen sich westlichen Lebensstilen an. Werbung etabliert Produktbesitz und Konsum als sinn- und identitätsstiftend. Konsum findet zunehmend über Onlinehandel statt, was Unternehmen durch social media Nutzung und Analyse von Konsumentenverhalten in die Lage versetzt, personalisierte Werbung und Produkte anzubieten.
Bildung	Der Trend zur Höherqualifizierung hält weiter an, in akademischen Berufen wirkt dies Fachkräftemangel entgegen, nicht jedoch in anderen Berufszweigen. Schulen und Universitäten werden ökonomisiert, was sich sowohl auf die Institutionen als auch auf die Inhalte auswirkt. Die durch Digitalisierung und Vernetzung bewirkte Egalisierung der Bildung wirkt dem teilweise entgegen. Auch lebenslanges Lernen und vernetztes Denken werden in diesem Umfeld wichtiger und gefördert.

Für jedes der 12 Trendthemen wurden mögliche Verbindungen zu anderen Trendthemen bzw. zu deren Einzeltrends untersucht sowie ihre Ressourcen-/Umweltrelevanz eingeschätzt und mögliche Ansatzpunkte für Ressourcenpolitik identifiziert.

In der SimRess-Trendanalyse wurde explizit darauf verzichtet, globale und nationale Megatrends (z.B. demografischer Wandel, Klimawandel und die deutsche Energiewende) und den Bereich Energie(nutzung) als separate Trendthemen in die Analyse zu integrieren, da diese Themen intensiv erforscht werden und die Befunde der Trendanalyse hier keine neuen Erkenntnisse hervorbringen konnten, sondern Gefahr gelaufen wären, viele blinde Flecken aufzuweisen. Daher wurden mögliche Auswirkungen dieser Megatrends bzw. von Energie(nutzung) dort, wo relevant, in den 12 Trendthemen mit betrachtet.

Für insgesamt 30 ausgewählte Trends entlang der o.g. 12 Trendthemen wurden Haupttrends und Gegenteilstrends ermittelt, welche das Potential aufweisen, andere Trends im System zu verstärken bzw. zu beeinflussen. Dann wurden in einer ersten Analyse sämtliche plausiblen Kausalbeziehungen aller 30 Trends identifiziert, um die Trends nach aktiven (treibenden) und passiven (getriebenen) Trends innerhalb dieses Kausalgefüges zu sortieren und ein Aktiv-Passiv-Diagramm zu erstellen (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Aktiv-Passiv-Diagramm der 30 ausgewählten Trends



Quelle: UBA (Hrsg.) (2014)

Das Aktiv-Passiv-Diagramm zeigt: je häufiger ein Trend einen anderen Trend verstärkt, desto weiter oben auf der y-Achse ist er angesiedelt; je mehr er von anderen Trends verstärkt wird, desto weiter rechts befindet er sich auf der x-Achse. Die ausgewählten aktiven Trends im Beziehungsgefüge der Trends sind in den beiden oberen Quadranten zu erkennen und bei nebenstehender Auflistung der Trends orange markiert.

### 2.2.1 Exkurs: Reflektionen zum gewählten Vorgehen

Die SimRes-Trendanalyse zeichnet sich durch eine sehr große Reichweite aus. Nahezu jeder Trend aus unterschiedlichsten Bereichen, seien es gesellschaftliche, politische oder technologische Entwicklungen können potentiell relevant mit Blick auf Ressourceninanspruchnahme sein. Die Größe der Thematik stellte in allen drei Arbeitsschritten (Quellenrecherche, Interviews und Workshop) eine Herausforderung dar.

In den Interviews wurde aus Zeitgründen eine Auswahl von ca. 5 – 7 Trendthemen besprochen und diskutiert. Das stellte sich als gut durchführbar und geeignet heraus, relevante Einschätzungen zu generieren. Der Trendworkshop wurde explizit dazu genutzt, um einerseits Lücken in den bisherigen Trendbefunden zu ermitteln und andererseits methodisch offen Kausalketten und Quervernetzungen zwischen Trendthemen offenzulegen sowie die Wirkung von Trends auf die Wertschöpfungskette zu benennen.

Die Elemente der SimRes Trendanalyse haben sich insgesamt gut ergänzt. Es wurden Lücken der Quellenrecherche aufgedeckt sowie Quer- und Kausalverbindungen durch die Interviews und den Workshop ergänzt. Die projektinternen Treffen unter Nutzung der EIDOS-Software haben die Strukturierung der Trends und die Verdichtung der Trendthemen maßgeblich unterstützt und waren auch der Visualisierung der Wirkungsgefüge sehr dienlich.

Wenngleich manche Aspekte im partizipativen Vorgehen durchaus Verbesserungspotential aufweisen, so möchten wir doch die folgenden Elemente als gut geeignet für Trendanalysen anhand der Erfahrungen in SimRes herausstellen:

- ▶ Offene Prozesse werden durch die Teilnehmerinnen positiv eingeschätzt und sind wertvoll für das Schaffen von Ownership. Gleichzeitig bedürfen offenere Prozesse mehr Zeit, um verwertbare Ergebnisse für ein Projekt zu liefern. Es gilt: Je mehr Zeit für einen partizipativen Prozess zur Verfügung steht, desto offener und komplexer kann der Prozess gestaltet werden.
- ▶ Für kurze Workshops sind präzise (Ziel-) Vorgaben hilfreich, die klarer Kommunikation bedürfen. Diese Ziele detailliert im Projektkonsortium abzustimmen ermöglicht ein hohes Maß an Flexibilität bei der Durchführung der Workshops: So konnten die Konsortialpartner bei Bedarf als ModeratorInnen aktiv werden.

### 3 Modellierungsansätze im SimRes-Projekt und Einbettung der Referenzszenarien

Im SimRes-Projekt wurden zwei Modelle mit unterschiedlichem Modellierungsansatz eingesetzt, die sich sowohl in ihrer Aussagekraft als auch im Informationsfluss gut gegenseitig ergänzen können.

Das global dynamische ökonomische Modell GINFORS3 weist aufgrund einer umfangreichen multi-regionalen Input-Output Datenbasis eine sehr detaillierte Abbildung des Deutschen und globalen ökonomischen Systems sowie von Nachfrageentwicklungen bezüglich einer Vielzahl von Gütergruppen in verschiedenen Sektoren auf. Darüber ermöglicht es vertiefte Simulationen der Auswirkungen der Referenzszenarien und von ressourcenpolitischen Ansätzen auf das Wirtschaftssystem und den damit zusammenhängenden Ressourcenbedarf. Demgegenüber bringt das systemdynamische Modell WORLD6 detaillierte Simulationen über die globale Verfügbarkeit, Weltmarktpreisentwicklungen und Angaben zum Recycling verschiedener Rohstoffe ein. Daraus können Simulationsergebnisse mit Blick auf zukünftige Ressourcenverfügbarkeiten entwickelt werden. Die folgende Textbox 1 stellt den wesentlichen Modellierungsumfang beider Modelle dar – eine ausführlichere Beschreibung der beiden Modellansätze folgt unterhalb der Textbox.

Textbox 1: Wesentlicher Modellierungsumfang in den beiden in SimRes verwendeten Modellen

#### Modellierungsumfang des global dynamischen ökonomischen Modells GINFORS3

**wirtschaftliche Entwicklungen:** BIP / Beschäftigung / verfügbares Haushaltseinkommen / Staatsverschuldung / Zwischen- und Endnachfrage sowie bilaterale für 59 Produkt- und Dienstleistungsgruppen / Bruttoerzeugung, Arbeitsaufwand und Lohnentwicklungen für 35 Sektoren / Preisentwicklungen für Anbieter und KundInnen

**Ressourcennutzung:** RMI, RMC und davon ableitbare Indikatoren [RMC pro Kopf, Gesamtrohstoffproduktivität] / verwendete und nicht-verwertete inländische Entnahme für abiotische Materialien und Biomasse bzw. Forstwirtschaft / Rohstoffäquivalente [Raw Material Equivalents, RME] bilateraler Handelsverflechtungen für 59 Produkt- und Dienstleistungsgruppen / Nachfrage, Angebot, Handel und Landnutzung für 13 Feldfrucht-Gruppen

**Energienutzung und CO<sub>2</sub>-Emissionen:** Primärenergieverbrauch / CO<sub>2</sub>-Emissionen / Bruttoenergieverbrauch für 35 Wirtschaftssektoren und Haushalte, differenziert für 27 Energieträger

#### Modellierungsumfang des systemdynamischen Modells WORLD6

**Globale Ressourcenverfügbarkeit und Weltmarktpreise:** Die Weltmarktpreise stellen einen Schlüsselindikator der globalen Verfügbarkeit verschiedener Ressourcen dar. Knappheiten haben vielfältige Ausprägungen und Auswirkungen – im Wesentlichen machen sie sich jedoch über steigende Preise bemerkbar, die dann die Nachfrage reduzieren. Zwar können die Märkte diese Auswirkungen auf die Nachfrage i.d.R. abpuffern, jedoch stellen steigende Preise einen wichtigen Anzeiger für zunehmende Knappheiten und damit auch für den Bedarf an gesteigerter Ressourceneffizienz dar. Über den soft link mit GINFORS3 stellt WORLD6 Weltmarktpreisentwicklungen für Metalle (z.B. Aluminium, Eisen, Kupfer, Nickel, Platingruppenmetalle, Silber, Technologiemetalle, Zink) bereit.

**Recycling:** Das WORLD6 Modell macht auch Aussagen zu Metall- und Material-Recycling auf globaler Ebene. Damit erlaubt es, Effizienzsteigerungen und die Langfristigkeit bzw. Nachhaltigkeit von Ressourcenverfügbarkeiten abzubilden.

### 3.1 Modellierungsansatz des GINFORS3-Modells und Einbettung zweier Referenzszenarien

#### 3.1.1 Modellierungsansatz von GINFORS3

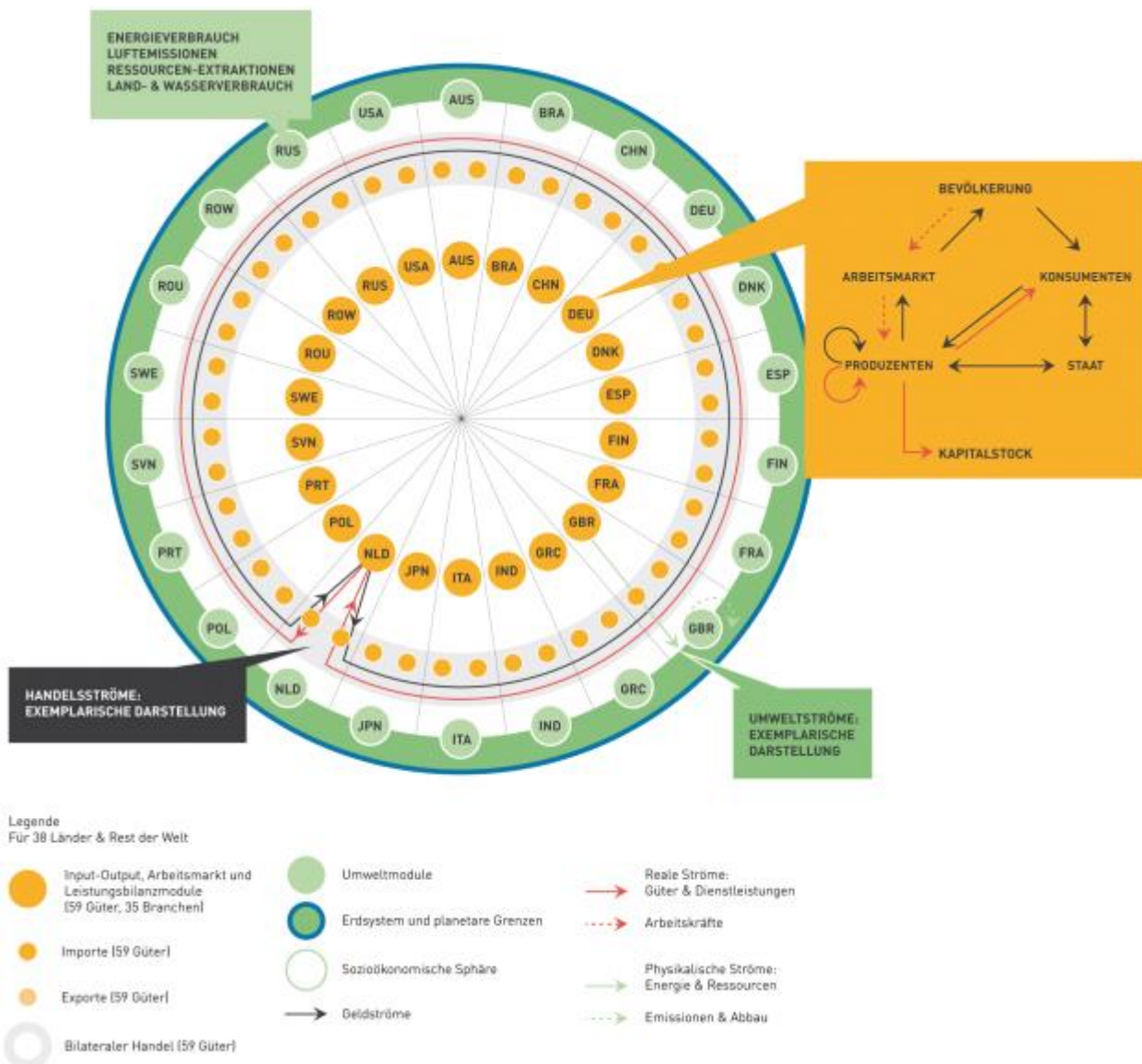
Das globale dynamische GINFORS3-Modell wird auch als ökonometrisches Modell bezeichnet<sup>9</sup>, da für die dynamische Modellierung sozioökonomischer Systemzusammenhänge in der Regel ökonometrischer Methoden bei der Parametrisierung des Modells zur Anwendung kommen – beispielsweise (panel-)ökonometrische Methoden der Zeitreihenanalyse.

GINFORS3 bildet die weltweiten ökonomischen Aktivitäten sowie dadurch ausgelöste globale Umweltinanspruchnahmen (Ressourcenextraktionen, Energieverbrauch, Luftemissionen, Land und Wasserverbrauch) geschlossen ab. Die Simulationen beruhen auf

- ▶ einer geographischen Unterteilung der Welt in 39 Wirtschaftsgebiete (38 Volkswirtschaften sowie eine aggregierte „Rest of World“-Region), sowie auf
- ▶ einer konzeptionellen Modellierung der ökonomischen Aktivitäten vier institutioneller Akteure (Private Haushalte, Unternehmen, Staat sowie Übrige Welt) in 35 unterschiedlichen Wirtschaftssektoren, die 59 Güter- und Dienstleistungsgruppen produzieren (siehe Abbildung 3).

<sup>9</sup> Eine präzisere Klassifizierung kann in Anlehnung an Scriciu et al. (2013) vorgenommen werden. Gemäß der von ihnen vorgeschlagenen Unterteilung sollten konventionelle neoklassische Ansätze (u.a. Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle, CGE-Modelle; Optimale Wachstumsmodelle sowie Dynamische Stochastische Allgemeine Gleichgewichtsmodelle, DSGE-Modelle) von einer weiten Gruppe „unorthodoxer“ Ansätze unterschieden werden. Scriciu et al. plädieren dabei ausdrücklich für eine Verwendung nicht-optimierender (in ihrem Sinne „unorthodoxer“) Simulationsmodelle in der Nachhaltigkeitsforschung. GINFORS<sub>3</sub>, dessen konzeptionelle Modellierung und empirische Parametrisierung einer INFORUM-Philosophie (Almon, 1991) folgt, gehört zur Gruppe dieser unorthodoxen Ansätze.



Abbildung 3: GINFORS3 – schematische Übersicht der Systemgrenzen und Systemstrukturen<sup>10</sup>

Quelle: Distelkamp und Meyer (2017)

Über diese Modellierungsmechanismen können wesentliche makroökonomische Zusammenhänge für die ganz überwiegende Anzahl der Wirtschaftsgebiete<sup>11</sup> geschlossen abgebildet werden:

- einerseits für jeden der vorgenannten 4 institutionellen Akteure sowohl Einkommensentstehungsprozesse als auch die Prozesse der Einkommensverteilung und -verwendung

<sup>10</sup> Aus Gründen der Anschaulichkeit werden in dieser schematischen Darstellung lediglich für 22 Wirtschaftsregionen (innerer gelber Punktekreis) die internationalen Wirtschaftsverflechtungen (bilaterale Handelsstrukturen, äußerer gelber Punktekreis) dargestellt. Die ausgewiesenen Umweltindikatoren (Ressourcenextraktionen, Energieverbrauch, Luftemissionen, Land und Wasserverbrauch) werden durch den äußeren Ring grüner Kreise symbolisiert.

<sup>11</sup> Für die Region „Rest der Welt“ kann eine solche Unterteilung nicht sinnvoll vorgenommen werden, da bspw. die institutionelle Einheit „Staat“ auf diesem Aggregationsniveau nicht definiert ist. Für Malta und die Türkei kann zudem (aufgrund lückenhafter amtlicher Berichterstattungen) keine im Sinne der restlichen Modellstrukturen vollständige Unterteilung der makroökonomischen Transaktionen für sämtliche Akteure vorgenommen werden.

- und andererseits nationale und internationale Produktionsverflechtungen zwischen unterschiedlichen Wirtschaftssektoren.

Die entsprechenden Modellberechnungen basieren auf den konzeptionellen Strukturen der Input-Output-Rechnungen, wobei Preisdynamiken unter Berücksichtigung der Entwicklung sektoraler Kostenstrukturen endogen fortgeschrieben werden. In Abhängigkeit von empirisch geschätzten Preis- und Produktionselastizitäten sowie unter Berücksichtigung autonomer technologischer Fortschrittsparameter können daher auch Vorleistungs- Arbeits- und Endnachfrageentwicklungen im Zeitablauf endogen projiziert werden. Damit ermöglicht das Modell sowohl ex post-Analysen als auch ex ante-Simulationen umwelt- und ressourcenpolitischer Maßnahmen.

Für die hierzu notwendigen Modellparametrisierungen dienten die Ergebnisse des World Input Output Database Projektes (WIOD) als Ausgangsdatensatz, da darüber eine international vollständig harmonisierte Zeitreihe nationaler Aufkommens- und Verwendungstabellen (supply and use tables, SUT) verfügbar ist, die zusätzlich umwelt- und energiebezogene Informationen bereitstellt.<sup>12</sup>

Das GINFORS3 Modell ist als globales Totalmodell sozio-ökonomischer Zusammenhänge durch einen sehr hohen Endogenitätsgrad gekennzeichnet. Zentrale exogene Vorgaben sind lediglich die Bevölkerungsentwicklungen in den jeweiligen Wirtschaftsgebieten, differenziert nach drei Altersgruppen, sowie die Entwicklung der globalen Weltmarktpreise für Kohle, Öl, Gas und Erze – teilweise konnten diese Informationen im SimRess-Projekt über einen soft link mit dem WORLD6-Modell weitergehend endogenisiert werden (siehe Kapitel 3.3). Sämtliche zur Parametrisierung verwendete Datensätze wurden auf Basis international anerkannter Buchungssystematiken erstellt (siehe hierzu bspw. im europäischen Kontext EUROSTAT 2008 oder eben die vorgenannte WIOD).

### 3.1.2 Entwicklung und Einbettung der Referenzszenarien

Im SimRess-Projekt wurden im Wesentlichen zwei Referenzszenarien entwickelt.<sup>13</sup> Die Referenzszenarien haben den Zweck, verschiedene Rahmenannahmen plausibler zukünftiger Entwicklungen in den Modellen bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Entwicklung von Ressourcennutzungsindikatoren, Treibhausgasemissionen und sozio-ökonomische Indikatoren zu testen. In SimRess wurden dazu verschiedene Szenarien gebildet, die unterschiedliche Abstufungen in den Annahmen globaler und nationaler Aktivitäten auf den Gebieten der Ressourcen- und auch der Klimapolitik aufweisen und dadurch einen argumentativen Kontext für Veränderungen der Annahmen bieten. Die SimRess-Referenzszenarien umfassen dabei sowohl

1. ein Szenario, welches keine über den gegenwärtigen Stand von Ressourcen- und Klimapolitik hinausgehenden weiteren Aktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene vorsieht (ein sogenanntes „Weiter-wie-bisher“ oder „Business-as-usual“ (BAU)-Szenario“); als auch
2. ein Szenario, welches insbesondere weitere klimapolitische Maßnahmen auf globaler und nationaler Ebene enthält (ein sogenanntes klimaaktives Szenario).

<sup>12</sup> siehe auch <http://www.wiod.org/>. Weitergehende Details sowie exemplarische Anwendungen dieses Datensatzes finden sich bspw. bei Dietzenbacher et al. (2013) oder Timmer et al. (2015).

<sup>13</sup> Abweichend von den SimRess-Referenzszenarien wurden für die Modellierungszwecke in WORLD6 zum Ende des Projekts hin vier thematisch ähnliche, jedoch nicht auf den PolRess-Umfeldszenarien basierende Szenarien entwickelt und verwendet. Sie weichen daher von den SimRess-Referenzszenarien ab und ermöglichen keinen direkten Vergleich der Ergebnisse beider Modelle mit Blick auf die Entwicklung von Szenario-Parametern.

Das BAU-Referenzszenario wurde basierend auf dem Umfeldszenario „Fortschreitende Industrialisierung“ aus dem Projekt PolRes (siehe Fußnote 6) entwickelt und in SimRes als Szenario „Industrieland Deutschland“ parametrisiert. Als klimapolitische Annahmen wurde dabei von stetigen, aber eher inkrementellen Weiterentwicklungen internationaler und nationaler klimapolitischer Maßnahmen ausgegangen.

Das klimaaktive Referenzszenario greift Elemente des PolRes-Umfeldszenarios „Starke Innovation“ auf und wird in SimRes als Szenario „Klimaaktives Deutschland“ parametrisiert. Im Vergleich zum PolRes-Umfeldszenario „Fortschreitende Industrialisierung“ verändern sich die ökonomischen und gesellschaftlichen Strukturen stärker, beispielsweise gehen wir von umfassenderen klimapolitischen Transformationsbemühungen aus, die dazu führen, dass der Energiebedarf in Deutschland im Jahr 2050 zu 100% durch erneuerbare Energien abgedeckt wird.

Die Referenzszenarien wurden nur in den Modellierungsmechanismen des GINFORS3-Modells umgesetzt (siehe dazu Kapitel 3.1). Die folgenden beiden Tabellen stellen die dort umgesetzten klimapolitischen Szenario-Annahmen beider Referenzszenarien mit Blick auf ausgewählte klimapolitische Parameter<sup>14</sup> gegenüber.

Tabelle 6: Vergleich nationaler und internationaler klimapolitischer Szenario-Annahmen in den SimRes-Referenzszenarien

Klimapolitikparameter	Ausprägung der Parameterannahmen im ...	
	Referenzszenario „Industrieland Deutschland“	Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“
Kohleverstromung	Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland bis zum Jahr 2040	Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland bis zum Jahr 2040
ETS-Preis	Anstieg des Zertifikatspreises im EU-ETS bis 2050 auf 62 € pro t CO <sub>2</sub> Kein ETS in übrigen Ländern	Anstieg des Zertifikatspreises im EU-ETS bis 2050 auf 147 € pro t CO <sub>2</sub> Einführung ETS in übrigen Ländern ab 2020, Anstieg des Zertifikatspreises bis 2050 auf 152 US-\$2010 pro t CO <sub>2</sub>
Förderung der energetischen Gebäudesanierung	Keine zusätzliche energetische Gebäudesanierung im Simulationszeitraum	Zusätzliche energetische Sanierung von 1,5% des Wohngebäudebestandes ab dem folgenden Startjahr: Deutschland: 2016 Übrige EU-Länder: 2021 Industrialisierte Nicht-EU-Länder: 2026 BRIC, Mexiko & Türkei: 2031
Mineralölsteuer	Keine Anpassung der Steuersätze im Simulationszeitraum	Anhebung des Steuersatzes auf Mineralölprodukte in Deutschland um Faktor 1,5 bis zum Jahr 2050. Übrige Länder folgen zeitverzögert: Übrige EU-Länder: 5 Jahre Industrialisierte Nicht-EU-Länder: 10 Jahre BRIC, Mexiko und Türkei: 15 Jahre

<sup>14</sup> Weitergehende Details zu Hintergründen und Quellen der jeweiligen Parametervorgaben können der in Kapitel 1.4 genannten Veröffentlichung zum ökonometrischen Modell GINFORS3 entnommen werden.

Förderung der Elektromobilität, private Haushalte	Bis zum Jahr 2050 erreichte Anteile der Elektromobilität am motorisierten Individualverkehr Deutschland: 20% Übrige EU-Länder und industrialisierte Nicht-EU-Länder: 15% BRIC, Mexiko & Türkei: 10% Rest of World: 5%	Bis zum Jahr 2050 erreichte Anteile der Elektromobilität am motorisierten Individualverkehr Deutschland: 33,3% Übrige EU-Länder und industrialisierte Nicht-EU-Länder: 25,0% BRIC, Mexiko & Türkei: 16,7% Rest of World: 8,3%
Förderung der Elektromobilität, Wirtschaft	Bis zum Jahr 2050 erreichte Anteile der Elektromobilität am motorisierten Straßen-Lieferverkehr Deutschland: 10% Übrige EU-Länder und industrialisierte Nicht-EU-Länder: 7,5% BRIC, Mexiko & Türkei: 5% Rest of World: 5%	Bis zum Jahr 2050 erreichte Anteile der Elektromobilität am motorisierten Straßen-Lieferverkehr Deutschland: 16,7% Übrige EU-Länder und industrialisierte Nicht-EU-Länder: 12,5% BRIC, Mexiko & Türkei: 8,3% Rest of World: 8,3%

Quelle: Distelkamp und Meyer (2017)

Tabelle 7: Vergleich der klimapolitischen Szenario-Annahmen zum „Anteil der Erneuerbare Energien“ in Nicht-EU-Ländern in den SimRes-Referenzszenarien (Anteil in %)

Nicht-EU-Land	Anteil an der Stromproduktion in % im Jahr ...			
	2030 im Referenzszenario ...		2050 im Referenzszenario ...	
	„Industrieland Deutschland“	„Klimaaktives Deutschland“	„Industrieland Deutschland“	„Klimaaktives Deutschland“
Russland	12,8	23,3	16,7	55,2
China	29,6	40,1	38,7	77,2
Indien	30,2	40,7	35,4	73,9
Japan	20,8	31,3	26,2	64,7
USA	23,9	34,4	33,3	71,8

Quelle: Distelkamp und Meyer (2017)

Darüber hinaus waren weitere simulationsrelevante Annahmen in den Referenzszenarien mit Blick auf die Bevölkerungsentwicklung weltweit und in Deutschland sowie auf die Entwicklung der Weltmarktpreise für ausgewählte Rohstoffe nötig:

► Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung bis 2050

- die Weltbevölkerung steigt kontinuierlich an und erreicht im Jahr 2050 ein Niveau von ca. 8,7 Mrd. Menschen (gemäß der „Low variant“ der aktuellen Bevölkerungsprojektion der Vereinten Nationen; United Nations 2015).
- In Deutschland nimmt die Bevölkerung bis 2050 im Vergleich zu heute um etwa 5 Millionen Einwohner auf ca. 77 Millionen ab (gemäß der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung, Variante 2: Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung; Statistisches Bundesamt 2015).

Die Annahmen zu Bevölkerungsentwicklung sind in beiden Referenzszenarien, die sich nur im Hinblick auf ressourcen- und klimapolitische Ambitionen unterscheiden, identisch.

- ▶ Weltmarktpreise für Rohstoffe (Massenmetallerze Aluminium, Eisen und Kupfer) sowie die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas):
- a) die Annahmen der zukünftigen Weltmarktpreisentwicklungen für die Massenmetalle wurden durch einen iterativen Informationsaustausch mit dem Modell WORLD6 (soft link) Modellendogen, also nicht aus einer externen Quelle übernommen, generiert (zum soft link siehe Kapitel 3.3). Danach steigen die Preise für Metallerze um jährlich 0,8 bis 1,2% an;
- b) Für die fossilen Energieträger wurden die folgenden, in den beiden Referenzszenarien unterschiedlichen Weltmarktpreisentwicklungen angenommen.

Tabelle 8: Szenario-Annahmen zur Weltmarktpreisentwicklung für ausgewählte fossile Energieträger in den SimRes-Referenzszenarien

Energie-träger	Literaturquelle	SimRes-Referenzszenario	2020	2030	2040	2050
Kohle	OECD Steam Coal Import Price (2013 USD/Tonne)	Klimaaktives Szenario	88	78	77	76
		Industrieland Deutschland	101	108	112	116
Rohöl	IEA Crude Oil Import Price (2013 USD/bbl)	Klimaaktives Szenario	105	102	100	98
		Industrieland Deutschland	112	123	132	137
Gas	Europe Import Price (2013 USD/Mbtu)	Klimaaktives Szenario	10,5	10,0	9,2	9,0
		Industrieland Deutschland	11,1	12,1	12,7	13,2

Quelle: IEA (2015)

Die Simulationsergebnisse zu den potentiellen Auswirkungen der Referenzszenario-Annahmen sind im Kapitel 4.1 mit Blick auf die folgenden Indikatoren aufgeführt:

- a) für die globale Ebene:
  - ▶ BIP (in konstanten 2010-USD)
  - ▶ Rohstoffextraktion (in Giga-Tonnen)
  - ▶ pro Kopf Rohstoffkonsum (RMC, in Tonnen)
  - ▶ CO<sub>2</sub>-Emissionen (in Giga-Tonnen)
  - ▶ CO<sub>2</sub>-Fußabdruck pro Kopf (in Tonnen)
- b) für die nationale Ebene:
  - ▶ BIP (in Milliarden 2010-EUR)
  - ▶ Arbeitnehmer (in Tausend)
  - ▶ Beschäftigungsquote (in %)
  - ▶ real verfügbares Einkommen pro Kopf in Haushalten (in Tausend 2010-EUR)
  - ▶ Veränderungen in der Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen (in %)
  - ▶ Veränderungen in der Beschäftigung (Arbeitnehmer) nach Wirtschaftsbereichen (in %)
  - ▶ Primärenergieverbrauch (in Petajoule)
  - ▶ CO<sub>2</sub>-Emissionen (in Millionen Tonnen)
  - ▶ CO<sub>2</sub>-Fußabdruck pro Kopf (in Tonnen)
  - ▶ Rohstoffextraktion (in Giga-Tonnen)

- ▶ pro Kopf Rohstoffkonsum (RMC, in Tonnen)
- ▶ Gesamtrohstoffproduktivität (als Index)

Zwecks Test der potentiellen Wirkungen ressourcenpolitischer Ansätze dienen die Referenzszenarien dann auch dem Vergleich zwischen den Auswirkungen auf die vorgenannten Indikatoren zwischen den Referenzszenario-Annahmen und den Annahmen für experimentelle Simulationstests ausgewählter ressourcenpolitischer Ansätze. Damit sollte die folgende Frage beantwortet werden: Führen die (teilweise zusätzlichen) ressourcenpolitischen Strategien zu Verbesserungen von Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung über die Annahmen in den Referenzszenarien hinaus? Die Simulationsbefunde dazu sind im Kapitel 4.1 aufgeführt.

## **3.2 Modellierungsansatz des WORLD6-Modells und partizipative Modellentwicklung**

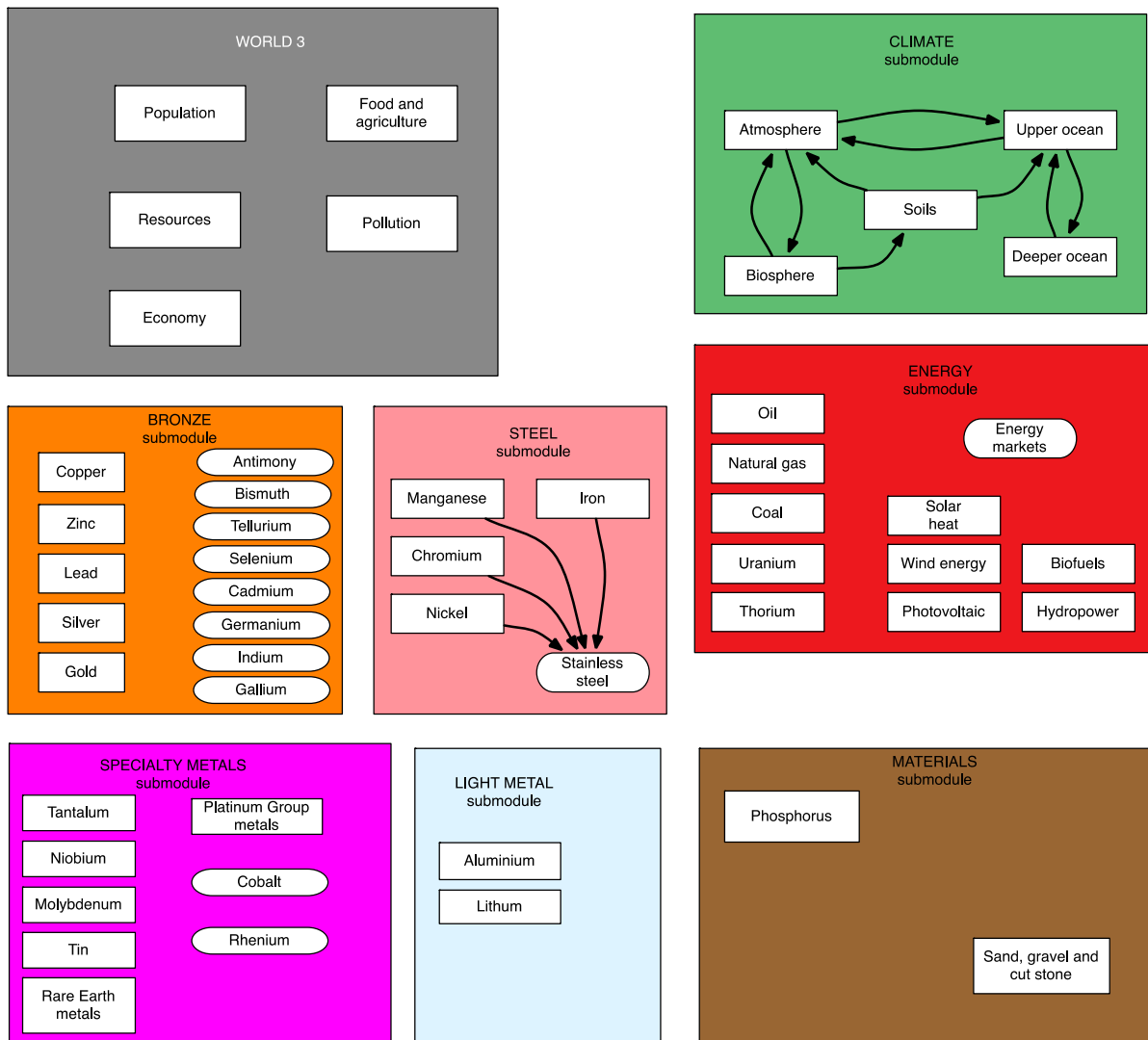
### **3.2.1 Modellierungsansatz von WORLD6**

Das WORLD 6-Modell veranschaulicht als globales Modell Systemzusammenhänge zwischen Ressourcen(nutzung), der Wirtschaft, der Bevölkerung und einigen sozialen Aspekten auf weltweiter Ebene. Dazu weist das WORLD6-Modell verschiedene Untermodule auf (siehe Abbildung 4):

1. eine aktualisierte Version des ursprünglichen World 3-Modells (Meadows et al., 1972, 1993, 2005), das sich in vielen Aspekten nicht vom ursprünglichen Modell unterscheidet, inkl. eines
  - ▶ Nahrungs- und Land-Moduls,
  - ▶ Bevölkerungs-Moduls,
  - ▶ einfachen Ökonomie-Moduls mit Unterscheidung zwischen Industriekapital- und Servicekapital,
  - ▶ Umweltverschmutzungs-Moduls und
  - ▶ einfachen Ressourcen-Moduls.
2. ein Materialien-Modul, das Phosphor sowie Sand, Kies und Steine umfasst;
3. vier jeweils unterschiedliche Metalltypen umfassende Module:
  - ▶ Stahl-Modul, umfasst Chrom, Eisen, Mangan und Nickel;
  - ▶ Bronze-Modul, umfasst Blei, Gold, Kupfer, Silber und Zink sowie die Technologie-Metalle Antimon, Bismut, Cadmium, Gallium, Germanium, Indium, Selen und Tellur;
  - ▶ ein specialty metals Modul, umfasst Cobalt, Molybdän, Niob, Platingruppenmetall, Rhenium, Seltene Erden, Tantal und Zinn;
  - ▶ Leichtmetall-Modul, umfasst Aluminium und Lithium;
4. ein Energiemodell einschließlich
  - ▶ Fossiler Brennstoffe Gas, Kohle und Öl;
  - ▶ Kernkraft-Brennstoffe Thorium und Uran;
  - ▶ erneuerbarer Energieträger (teilweise unter Nutzung fossiler Metalle) Geothermie, Photovoltaik und Windenergie sowie Bioenergie und Wasserkraft;
5. ein vereinfachtes Klimawandel-Modul, das Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Atmosphäre, Biosphäre, Böden und die Ozeane berücksichtigt.



Abbildung 4: Übersicht der Module im WORLD6-Modell.



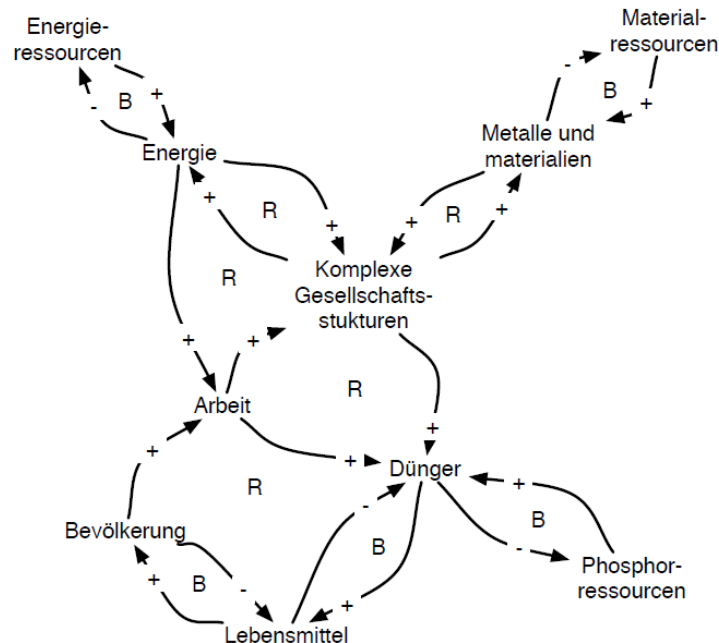
Quelle: Koca und Sverdrup (2017)

Für jede im WORLD 6-Modell berücksichtigte Ressource kann die langfristige Nachhaltigkeit der Versorgung im Sinne von Knappheiten mit Blick auf Preiserhöhungen, Nachfragerückgang und Entwicklung der physischen Verfügbarkeiten bewertet werden.

Das WORLD6-Modell wurde in einer Systemdynamiksoftware entwickelt und umgesetzt. Die Grundprinzipien und Zusammenhänge im Modell wurden zunächst als Kausalschleifendiagramme (causal loop diagrams, CLD) und Bestandsflussdiagrammen (stock and flow diagrams) entwickelt, um die Systemgrenzen, die Kernelemente des Modells und deren kausale Zusammenhänge vor der Programmierung festzulegen. Damit basiert das Modell auf Kausalzusammenhängen, die in einer Modellstruktur arrangiert und durch viele Feedbackschleifen charakterisiert sind. Diese Diagramme sind die grafische Darstellung der in der Modellsoftware zugrunde gelegten Differentialgleichungen. In der Systemanalyse und damit auch in der systemdynamischen Modellierung kommt der Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkungen zwischen dem biophysikalischen System, dem vom Menschen errichteten System zur Nutzung des biophysikalischen Systems und dem sozialen bzw. sozio-ökonomischen System große Bedeutung zu. Daher ist es in der Vorbereitung der systemdynamischen Modellierung in WORLD6 von zentraler Bedeutung, die Interaktionen zwischen den Systemkomponenten und deren kausale Zusammenhänge zu ermitteln. Dazu dienen die CLDs – so zeigt Abbildung 5 als beispielhaftes

CLD, dass zur Befriedigung der vielfältigen Bedürfnisse in den heutigen Gesellschaftsstrukturen große Ansprüche an die Versorgung mit Energie, Materialien und Nahrung gestellt werden.

Abbildung 5: Zentrale Themen im WORLD 6-Modell als vereinfachtes Kausalschleifendiagramm



Quelle: Koca und Sverdrup (2017). Die Pluszeichen bedeuten, dass sich beide mit einem ++-Pfeil verbundenen Elemente in die gleiche Richtung verändern, sprich wenn das eine zunimmt, nimmt auch das andere zu. Minuszeichen bedeuten entsprechend eine entgegengesetzte Veränderungsrichtung: nimmt das eine zu, nimmt das andere entsprechend ab und umgekehrt. Die Buchstaben R (= reinforcing) und B (= balancing) stehen für sich selber verstärkende (R) oder sich ausbalancierende (B) Kausalschleifen.

Das Modell ist – anders als GINFORS3 als ökonometrisches Modell – nicht auf große Mengen empirischer Zeitreihen kalibriert. Stattdessen führen die zugrundeliegenden Kausalitäten zu charakteristischen Massenbilanzdifferentialgleichungen, die auf empirischen Quantifizierungen der jeweiligen Zusammenhänge basieren. Die Parametrisierung besteht aus mehreren Teilen:

1. Kausalstrukturen, wie in den CLDs und den Bestandsflussdiagrammen beschrieben. Die Modelldynamik entsteht hauptsächlich aus den Feedbackstrukturen und Zusammenhängen des konzeptuellen System-Modells;
2. Ratenkoeffizienten und Verteilungskoeffizienten aus der Übertragung von einem Parameter in einen anderen (Förderungsraten, Schürfraten, Bevölkerungswachstumsraten) in den Differentialgleichungen;
3. empirische Angaben zur Größe der anfänglichen Bestände von Energieträgern sowie von Materialien (dabei wird das Modell soweit möglich auf etwa das Jahr 1900 kalibriert) und Angaben zu den Erzgehalten der Metallvorkommen (u.a. reich, hoch, gering, sehr gering, äußerst gering).

Wie auch beim GINFORS3-Modell zieht auch das WORLD6-Modell einige Eingaben als exogene Vorgaben heran. Sie stellen in gewisser Hinsicht zwingende Funktionen dar:

- Nachfrage nach verschiedenen Materialien und Metallen (in kg pro Person und Jahr); die Nachfrage wird mit der Bevölkerung aus den Modellendogenen Simulationen multipliziert und ergibt die Standardnachfrage. Im Rahmen des soft links mit GINFORS3 konnten die Nachfrage-Daten aus GINFORS3 endogen in das WORLD6-Modell überführt werden (siehe Kapitel 3.3);

- ▶ weltweit verfügbare Gesamtressourcen für jedes modellierte Metall und Material (beispielsweise basierend auf den Datenbeständen des Geologischen Dienstes der USA; United States Geological Survey USGS), eingeteilt in Klassen auf Grundlage der Förderkosten; dabei wird die mit den niedrigsten Kosten verbundene Ressource konsistent als erstes gefördert (sogenannte Opportunitätskostenmethode);
- ▶ Preisfeedbackkurven für Marktpreise sowie Preisfeedbacks zwischen Marktpreis und Recycling. Diese werde soweit möglich mit empirischen Daten verknüpft (beispielsweise anhand von Daten der Metallhandelsbörsen).

Die CLDs, die der systemdynamischen Modellierung in SimRess zugrunde liegen, wurden partizipativ in einer Reihe von Gruppenmodellierungsworkshops – teilweise unter Einbezug externer Stakeholder – erarbeitet. Daher wird im Folgenden als Exkurs kurz auf die idealtypische Methodik der Gruppenmodellierung eingegangen (weitere Reflektionen dazu sind in der entsprechenden Veröffentlichung, die in Kapitel 1.4 genannt ist, nachzulesen).

### **3.2.2 Gruppenmodellierung zur Erarbeitung von Kausalschleifendiagrammen in SimRess**

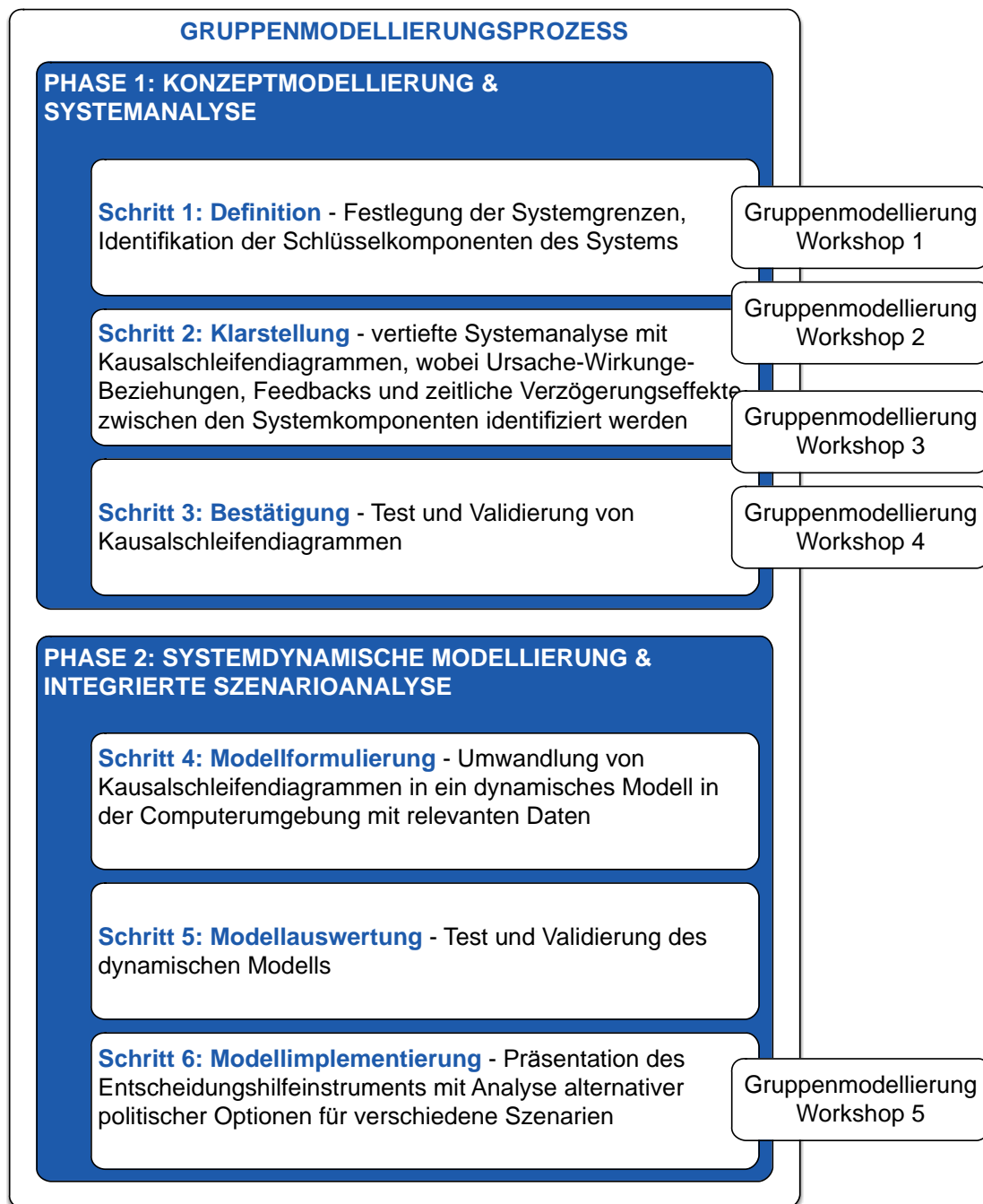
Auf Systemwissenschaften basierte Gruppenmodellierung mit Beteiligung von Stakeholdern ist ein transparenter Lernprozess, bei dem Stakeholder die Möglichkeit haben, ihr Wissen auszutauschen und in die Analyse dynamischer komplexer Systeme transdisziplinäre einzubringen.

Ein idealtypischer Gruppenmodellierungsprozess<sup>15</sup> besteht aus zwei Phasen mit insgesamt sechs Stufen, welche häufig in einer Reihe von fünf Workshops bearbeitet werden (Abbildung 6). Dabei finden Kausalschleifendiagrammen als narratives Visualisierungs-Tool vor allem während der ersten Phase (konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse) Einsatz. Daher wird in den folgenden Ausführungen nur die erste Phase ausführlicher beschrieben, während die zweite Phase eher mit Blick auf die Modellierungsmechanismen im Anschluss an diesen Exkurs beschrieben wird.

---

<sup>15</sup> Für eine ausführliche Beschreibung und Reflektion des Gruppenmodellierungs-Prozesses in SimRess, der vom idealtypischen Vorgehen abweichen musste, siehe die Projekt-Veröffentlichung, die in Kapitel 1.4 dazu genannt ist.

Abbildung 6: Zwei Phasen und sechs Stufen des Gruppenmodellierungsprozesses



Quelle: Koca und Sverdrup (2017).

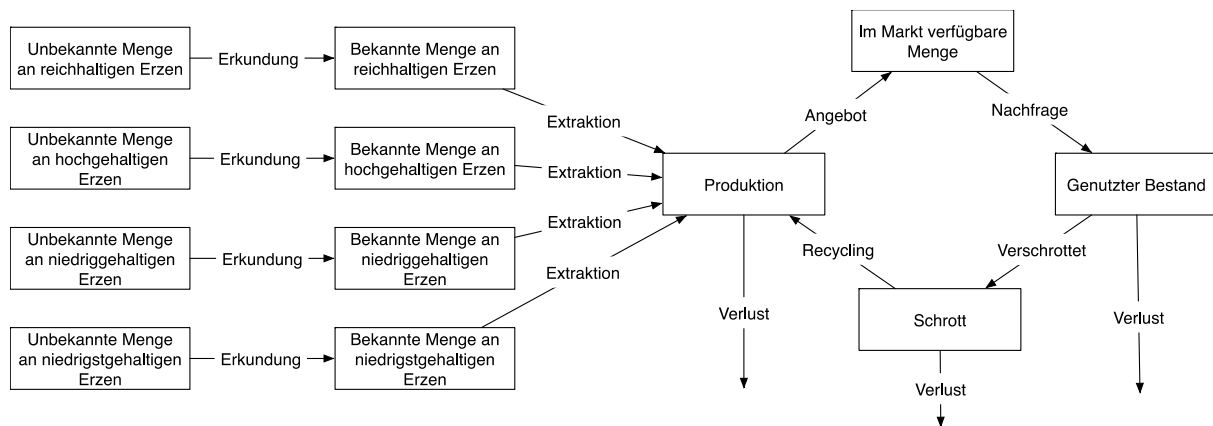
### Phase 1: Konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse

In der ersten Phase der Gruppenmodellierung werden in einer Reihe von moderierten Workshops (idealerweise vier) die mentalen Systemrepräsentationen verschiedener Stakeholder mit Hilfe von CLDs in gemeinsam abgestimmte konzeptuelle Modelle der wesentlichen Systemzusammenhänge überführt. Dazu wird die Kausalschleifendiagramm-Methode als gemeinsames Kommunikations- und Systemanalyse-Tool eingesetzt, um unter allen Stakeholdern aus verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Hintergründen eine gemeinsame Sprache und Logik zu etablieren. Das vereinfacht die Kommunikation und den Austausch zu den Systemkomponenten und deren Zusammenhängen und unterstützt so den transdisziplinären Wissensaustausch.

Die Workshops in der ersten Phase dienen den folgenden drei Schritten:

1. *Schritt 1 – Definition des Systems:* Die Stakeholder legen im transdisziplinären Austausch einerseits die (zeitlichen und räumlichen) Systemgrenzen des konzeptuellen Modells fest und definieren andererseits die wesentlichen (Schlüssel-)Elemente des Systems. Gegen Ende des ersten Workshops gewinnen die Stakeholder eine Einsicht in das heutige Erscheinungsbild des Systems;
2. *Schritt 2 – Klarstellung:* Das konzeptuelle Systemmodell wird vertieft analysiert im Hinblick auf mögliche kausale Zusammenhänge (Ursache-Wirkungs-Beziehungen), Feedbacks und zeitliche Verzögerungseffekte in den Wechselwirkungen. Dazu erstellen die Stakeholder im Rahmen zweier aufeinander aufbauender Workshops (angeleitet von der Moderation) CLDs, die die Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Feedbackschleifen zwischen den Schlüsselkomponenten reflektieren. Zusätzlich können für ein besseres Verständnis des Systems und der Verknüpfungen zwischen seinen Komponenten Bestandsflussdiagramme verwendet werden (siehe Abbildung 7 für ein beispielhaftes Bestandsflussdiagramm für ein Metall im WORLD6-Modell). Als Resultat beider Workshops wird angestrebt, dass die Stakeholder die größeren Systemzusammenhänge ganzheitlich verstehen sowie ein gewünschtes zukünftiges System skizzieren und Lösungsmöglichkeiten diskutieren, wie das zukünftige System erreicht werden könnten.

Abbildung 7: Allgemeines Bestandsflussdiagramm für ein Metall im WORLD6-Modell<sup>16</sup>



Quelle: Koca und Sverdrup (2017)

3. *Schritt 3 – Bestätigung:* Der Bestätigungsschritt dient dem Test und der Validierung der in den vorangegangenen Workshops erarbeiteten CLDs bzw. des konzeptuellen Systemmodells. Hierbei ist es essentiell, dass sämtliche teilnehmenden Stakeholder gemeinsam finale Versionen der Diagramme erarbeiten bzw. ihnen zustimmen. Um einen allgemeinen Konsens herzustellen, kann es erforderlich sein, die anfängliche Problemdefinition und die Systemgrenzen zu ändern und die Diagramme entsprechend nochmals anzupassen. Daher beginnt die Bestätigung bereits zu Ende des dritten Workshops und umfasst einen eigens zu diesem Zwecke anberaumten Workshop.

In der zweiten Phase, der systemdynamischen Modellierung und integrierten Szenarioanalyse spielen insbesondere Modelltechnische Umsetzungen und Modellierer-seitige Szenarioanalysen eine Rolle –

<sup>16</sup> Das beispielhafte Diagramm verdeutlicht, dass die Produktions-/Extraktionskosten mit abnehmenden Erzgehalt ansteigen, da viel mehr Gestein bewegt werden muss und entsprechend ein höherer Einsatz von Maschinen, Energie und Arbeitskräften erforderlich ist, um aus den Fördertätigkeiten so viel Erz zu gewinnen, wie in Vorkommen mit höherem Erzgehalt enthalten ist. Diese Art von Flussdiagramm wird für jedes Metall und Material verwendet. Bei einigen Metallen mit vielen Abhängigkeiten wird es komplizierter ausfallen (siehe zum Beispiel Sverdrup et al. 2015, 2014).

externe Stakeholder werden i.d.R. zur Diskussion der Simulationsergebnisse aus den Modellläufen eingebunden. Daher geht es in der zweiten Phase insbesondere um die Modelltechnische Umsetzung, Parametrisierung und Datenunterfütterung des konzeptuellen Systemmodells sowie um die Auswertung verschiedener (auch Politik-)Szenarien.

### 3.2.3 Entwicklung und Einbettung von Szenarien

Im Rahmen der Simulationen mit dem WORLD6-Modell wurden vier Szenarien entwickelt, um die Ergebnisse der Simulationsläufe mit verschiedenen Annahmen der Entwicklung der Nutzung fossiler Brennstoff, expliziter ressourcenpolitischer Maßnahmen bzw. einer Kombination vergleichen zu können. Die Szenarien basieren, anders als die im GINFORS3-Modell verwendeten Referenzszenarien, nicht auf den Umfeldszenarien aus dem PolRess-Projekt und unterscheiden sich damit von den SimRess-Referenzszenarien. Eine Vergleichbarkeit der Entwicklung von Szenario-Parametern zwischen den Simulationsläufen beider Modelle ist damit nur eingeschränkt gegeben.

Die folgenden vier Szenarien wurden im WORLD6 Modell entwickelt:

1. **Basisszenario** – "Business-as-usual"-Szenario, das als Basis für die Vergleiche mit den Politiksszenarien dient. Im Basisszenario werden Extraktion und Recycling von Metallen und Materialien über die Marktdynamik und möglichen Gewinn gesteuert; ressourcenpolitische Maßnahmen finden darüber hinaus nicht statt. Wenn es günstiger wird, Öl aus Kohle herzustellen, als der Marktpreis für Öl, dann wird Öl auf diesem Wege hergestellt. Das gleiche gilt auch für Öl aus Erdgas, und jeweils umgekehrt.
2. **Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“** – das Szenario setzt die Annahme um, die Nutzung fossiler Brennstoffe zwischen 2020 und 2060 soweit zu verringern, dass die globale Erwärmung unter 2°C gehalten wird. Dazu ist eine 90%ige Verringerung der fossilen Brennstoffe zwischen 2020 und 2060 erforderlich.
3. **Szenario „Verbessertes Recycling“** – Politiksszenario, dass die potentiellen Wirkungen politischer Unterstützung für mehr Recycling simuliert. Die Verbesserung des Recyclings erfordert eine große Anzahl von einzelnen Maßnahmen, die im ganzen System verteilt sind – konkrete, einzelne Instrumente wurden nicht explizit umgesetzt. Als Beispiele werden die potentiellen Wirkungen auf Kupfer und Indium modelliert.
4. **Kombiniertes Szenario** – das Szenario verknüpft die beiden Szenarien „Reduktion fossiler Brennstoffe“ und „Verbessertes Recycling“, um mögliche Synergieeffekte bzw. Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz und Ressourcenschonung in den Blick zu nehmen.

Zur Simulation der Verfügbarkeit unterschiedlicher Rohstoffe wurden für alle im Modell berücksichtigten Metalle die Vorkommen in jedem Land von Grund auf klassifiziert und dann addiert. Für die meisten Metalle führte dies zu deutlich größeren Schätzungen der letztlich erzielbaren Ressourcen (ultimately recoverable resources, URR) als früher berichtet. Eine Herausforderung besteht darin, dass die URR von Öl und Erdgas aus politischen Gründen lange höher als tatsächlich vorhanden angegeben worden sind. Aus diesem Grund legen wir für die URR Schätzungen soweit verfügbar die tatsächlichen Daten zu Verfügbarkeiten zugrunde, und nicht die von verschiedenen Ländern angegebenen Werte.

Das **Basisszenario** im WORLD6 Modell geht davon aus, dass über die integrierten Feedbackkreise hinaus keinerlei aktive Politik oder Eingriffe relevant werden. Die integrierten Feedbackkreise werden endogen im Modell modelliert. Die wichtigsten Feedbacks sind hier zusammengefasst:

1. Mit erhöhten Gewinnen steigt die Extraktionsrate. Die Gewinne steigen, wenn die Rohstoffpreise schneller steigen als die Extraktionskosten. Wenn der Gewinn auf Null (oder darunter) fällt, wird die Extraktion gestoppt. Im Laufe der Zeit verringern sich mit dem technischen Fortschritt die Extraktionskosten.



2. Die Nachfrage sinkt mit steigenden Rohstoffpreisen.
3. Der Preis sinkt bei mangelndem Angebot, und steigt bei erhöhtem Angebot.
4. Es werden mehr Rohstoffe recycelt, wenn der Rohstoffpreis steigt oder wenn der erzielbare Gewinn aus Recycling steigt. Mit der Zeit verringern sich wegen des technischen Fortschritts die Recyclingkosten.
5. Einige dynamisierte Skalierungsfunktionen sind im Modell integriert:
  - a) Eine Formel, nach der sich die Bergbaueffizienz mit der Zeit steigert. Die Parameter hierfür wurden aus der relevanten Literatur entnommen.
  - b) Die Extraktionskosten steigen bei abnehmender Ressourcenqualität, sowohl in Bezug auf Kosten als auch auf Energiebedarf.

Das Basisszenario ist in der Lage, die Marktparameter der Vergangenheit (Abbaurate, Rohstoffpreis, wenn vorhanden Rohstoffqualität, Vorräte und Ressourcen) zu rekonstruieren. Dieses Modell wurde nicht mit einem Datensatz kalibriert, sondern arbeitet auf der Basis von physikalischen und ökologischen Ansätzen, die über Masse- und Energiebilanzen kalibriert sind. Das Modell berechnet intern auf Basis von ökonomischen Grundsätzen, welche Vorräte abgebaut werden.

Für das Recycling wurden die Marktdynamiken direkt in das Basisszenario integriert. Die Recyclingraten ergeben sich aus Rückkopplungen von Marktmechanismen innerhalb des Modells im Basisszenario. So ist ein "erhöhtes Recycling" als Reaktion auf erhöhte Preise in das Modell eingebaut.

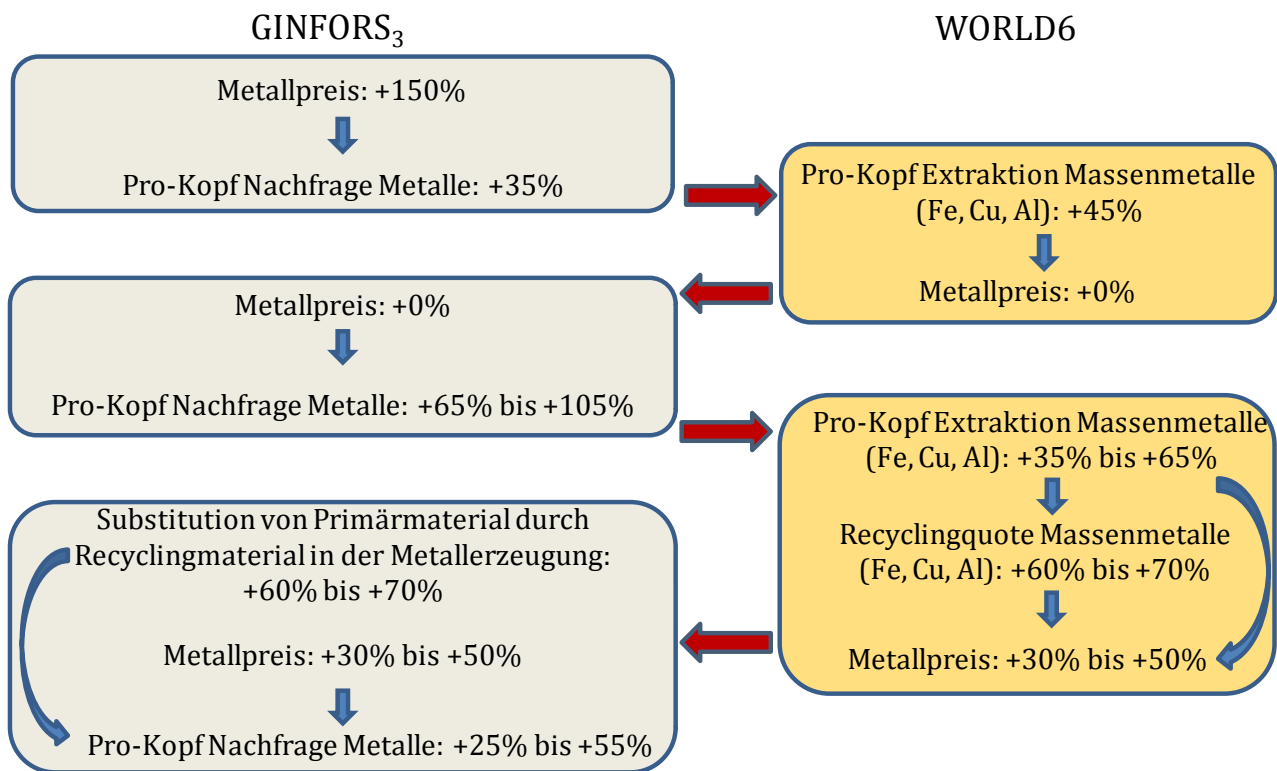
Die Simulationsbefunde zu den Szenarien „Basisszenario“ und „Reduktion fossiler Brennstoffe“ sind im Kapitel 4.2 aufgeführt, während die des Politikszenarios „Verbessertes Recycling“ und des kombinierten Szenarios in Kapitel 4.3 beschrieben werden.

### 3.3 Soft-link und gemeinsamer Modell-Rahmen

Wie bereits erwähnt, konnte im Laufe des SimRes-Projektes ein soft link (Datenaustausch) zwischen den beiden Modellen erprobt und umgesetzt werden, der einzelne exogene Vorgaben in den beiden Modellen iterativ durch Resultate des jeweils anderen Modells ersetzt:

- Das GINFORS3-Modell stellt die dynamischen Projektionen zur globalen preisbereinigten Nachfrage nach bestimmten Ressourcenkategorien (z.B. Metallerze) in US-\$ pro Kopf als Zwischen- oder Endnachfrage an WORLD6 zur Verfügung. Auf Basis dieser Vorgaben war WORLD6 in der Lage, angebotsseitige Entwicklungen und resultierende Preiseffekte für die betrachteten Rohstoffkategorien sowie Implikationen auf die Substitution von Primärrohstoffen durch Recyclingprodukte endogen herzuleiten.
- Das WORLD6-Modell speiste die Weltmarktpreise für verschiedene Metalle (z.B. Eisen, Kupfer, Aluminium) als aggregierten Input in GINFORS3 ein. Dadurch benötigte GINFORS3 keine exogenen Annahmen bezüglich Verfügbarkeiten und Weltmarktpreisen mehr. Auf Basis dieser aktualisierten Weltmarktpreise konnte daraufhin eine neue GINFORS3-Simulation erstellt werden, auf deren Basis dann wiederum ein aktualisierter Input für das WORLD6-Modell zur Verfügung stand (siehe Abbildung 8).

Abbildung 8: Endogene Bestimmung der Weltmarktpreise für Metallerze



Quelle: Autoren

Am Ende dieses iterativen Prozesses stand ein harmonisierter Datensatz, der den Bedarf an exogenen Vorgaben in beiden Modellen reduzieren konnte. Dieses per soft link verbundene System bietet Potential, im Hinblick auf weitere Rohstoffe und Produkte zukünftig noch weiter ausgebaut zu werden. Die Kombination und Interaktion zwischen den beiden Modellen ermöglicht nun, systemische Wechsel- und Rückwirkungen sowie langfristige Systemveränderungen abzubilden – das war mit früheren Typen an Simulationsmodellen in dieser Form nicht möglich.

## 4 Wesentliche Simulationsergebnisse der beiden Modelle

In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Simulationsergebnisse der beiden Modelle mit Blick auf

- ▶ potentielle Auswirkungen der Referenzszenarien anhand der Abschätzungen mittels GINFORS3 dargestellt (Kapitel 4.1). Dabei werden sowohl globale Entwicklungstendenzen (Kapitel 4.1.1 beschrieben als auch nationale Entwicklungstendenzen (Kapitel 4.1.2);
- ▶ potentielle Entwicklung globaler Verfügbarkeiten verschiedener Rohstoffe mittels WORLD6 (Kapitel 4.2).

Anschließend werden die Ergebnisse der Simulationsexperimente ressourcenpolitisch induzierter Effizienzsteigerungen in Produktionstechnologien sowie die zugrundeliegenden Annahmen beschrieben (Kapitel 4.3). Aufgrund des Detaillierungsgrades der nationalen Wirtschaft wurde insbesondere das GINFORS3-Modell eingesetzt, um die potentiellen Wirkungen ressourcenpolitischer Ansätze auf das Deutsche und das globale Wirtschaftssystem abzuschätzen (Kapitel 4.3.1). Das WORLD6 Modell wurde zusätzlich herangezogen, um plausible Annahmen bezüglich möglicher Effekte politischer Maßnahmen

zur Steigerung des Recyclings auf globaler Ebene für unterschiedliche Rohstoffe abzuschätzen (Kapitel 4.3.2).

Der Vergleich der potentiellen Wirkungen der politischen Ansätze mit den Referenzszenarien erlaubt dann in Kapitel 5, Schlussfolgerungen hinsichtlich des notwendigen Ambitionsniveaus von Ressourcenpolitik abzuleiten, um eine signifikante Verringerung der Ressourcennutzung zu bewirken.

## **4.1 Simulationsergebnisse aus der Berechnung der Referenzszenarien in GIN-FORS3**

Hier werden die Ergebnisse der beiden SimRess-Referenzszenarien mit Blick auf potentielle globale (4.1.1) und nationale (4.1.2) Entwicklungstendenzen dargestellt. Die Ergebnisse aus den Simulationsexperimenten zu politikinduzierten Ressourceneffizienzsteigerungen werden unter Kapitel 4.3.1 beschrieben.

### **4.1.1 Globale Entwicklungstendenzen**

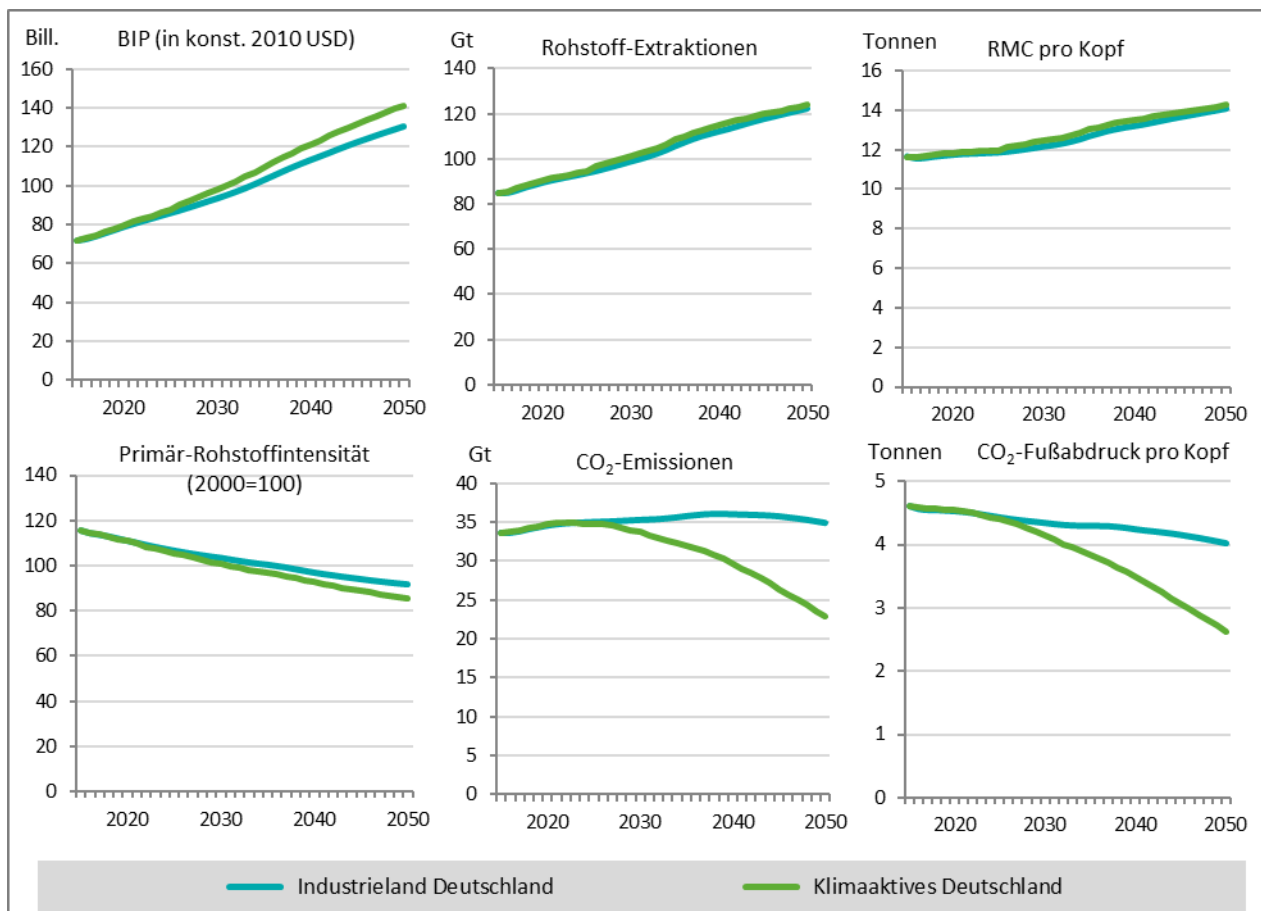
#### **4.1.1.1 Wirtschaftliche Entwicklung**

Der globale Bevölkerungsanstieg (annahmegemäß wächst die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 auf ca. 8,7 Mrd. Menschen an) wird sowohl im Referenzszenario „Industrieland Deutschland“ als auch im Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ von einem Anstieg des globalen preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts (BIP) um über 80% im Vergleich zu heutigen Werten begleitet (mittlerer Zeitreihenplot der oberen Reihe in Abbildung 9). Dabei werden im klimaaktiven Referenzszenario durchgehend höhere globale BIP-Werte simuliert und auch die jährliche Wachstumsrate des globalen BIP liegt über den für das „Industrieland Deutschland“ Szenario simulierten Werten. Im Vergleich zu den globalen ökonomischen Wachstumsperspektiven anderer umweltpolitischer Szenario-Analysen können diese Ergebnisse als ein relativ dynamischer ökonomischer Ausblick charakterisiert werden – nennenswerte qualitative Abweichungen von entsprechenden Vergleichsstudien treten nicht auf.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Vgl. hierzu beispielsweise UNEP (2012, S. 427): „Nearly all scenarios project a further increase in GDP as an indicator of economic development, although there is variation between scenarios, with global average per-person growth rates ranging between 1.2 and 2.2 per cent annually“.

Abbildung 9: Globale Entwicklungen in den SimRes Referenzszenarien



Quelle: Distelkamp und Meyer 2017

#### 4.1.1.2 Entwicklung umwelt- und ressourcenrelevanter Kenngrößen

Diese Wachstumstendenzen werden in beiden Referenzszenarien von qualitativ nahezu identischen Steigerungen der globalen Nachfrage nach Primärrohstoffen begleitet: in beiden Szenarien nehmen die globalen Rohstoff-Extraktionen bis zum Jahr 2050 um fast 50% zu auf über 120 Gigatonnen (Gt) im Vergleich zum heutigen Niveau von ca. 85 Gt (linker Zeitreihenplot der mittleren Abbildungsreihe in Abbildung 9).

Beide Szenarien legen damit eine relative Entkopplung der globalen Wirtschaftsaktivität von der Primärrohstoff-Nachfrage nahe: so geht die globale Primärrohstoff-Intensität (also der Quotient globaler RMC / reales globales BIP) im Zeitverlauf um ca. 20% („Industrieland Deutschland“) bzw. ca. 25% („klimaaktives Deutschland“) zurück (rechter Zeitreihenplot der mittleren Abbildungsreihe). Da die im globalen Durchschnitt beobachteten graduellen Rückgänge der Primärrohstoff-Intensitäten auf den ersten Blick eher gering erscheinen, sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass die jüngere Vergangenheit durch global steigende Rohstoff-Intensitäten geprägt wurde.<sup>18</sup> Die Projektionen zeichnen somit, gemessen an aktuellen Entwicklungstrends, ein relativ optimistisches Bild und beziehen endogen im Modell abgebildeten Produktivitätssteigerungen mit ein. Dennoch zeigen die Simulationsergebnisse für beide Szenarien weder eine absolute Entkopplung der Primärrohstoff-Nachfrage vom globalen ökonomischen Geschehen, noch eine Reduktion der durchschnittlichen globalen pro Kopf Rohstoff-Nachfrage: der RMC pro Kopf steigt in beiden Szenarien im globalen Durchschnitt bis zum

<sup>18</sup> Vgl. hierzu bspw. auch Dittrich et al. (2012).

Jahr 2050 um ca. 21%-22% an (mittlerer Zeitreihenplot der mittleren Abbildungsreihe in Abbildung 9). Damit erreicht der durchschnittliche globale RMC pro Kopf in beiden Szenarien zum Ende des Simulationszeitraums in etwa die Größenordnungen der derzeitigen europäischen Primärrohstoff-Konsumniveaus.

Damit zeigen beide Referenzszenarien drängenden, im Ausmaß nahezu identischen ressourcenpolitischen Handlungsbedarfe zur nachhaltigen Reduktion der globalen Primärrohstoffinanspruchnahme auf. Sie unterscheiden sich – gemäß der jeweiligen Szenario-Annahmen – jedoch deutlich hinsichtlich der weitergehenden klimapolitischen Handlungsnotwendigkeiten. Die Entwicklungstendenzen der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionsniveaus zeigen über den Simulationszeitraum hinweg nur für das Szenario „Klimaaktives Deutschland“ einen Rückgang – bis zum Jahr 2050 wird eine Reduktion um etwas mehr als 30% gegenüber heutigen Emissionsniveaus erreicht (linker Zeitreihenplot der unteren Abbildungsreihe in Abbildung 9). Im Vergleich dazu werden im Szenario „Industrieland Deutschland“ bis zum Jahr 2050 leicht ansteigende globale CO<sub>2</sub>-Emissionsniveaus (+4%) simuliert. In der pro Kopf Betrachtung (mittlerer Zeitreihenplot in der unteren Abbildungsreihe in Abbildung 9) zeigen beide Referenzszenarien einen Rückgang der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 – der Rückgang ist im Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ wesentlich nachhaltiger (etwa -43% im Vergleich zu heutigen Niveaus). Zwar tragen beide Referenzszenarien durch weitreichende technologische Fortschritte in Treibhausgas-relevanten Sektoren zu klimapolitisch geforderten Veränderungen bei, allerdings erscheinen lediglich die umfassenden klimapolitischen Annahmen des „Klimaaktives Deutschland“ Szenarios tatsächlich geeignet, langfristig eine absolute Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen.

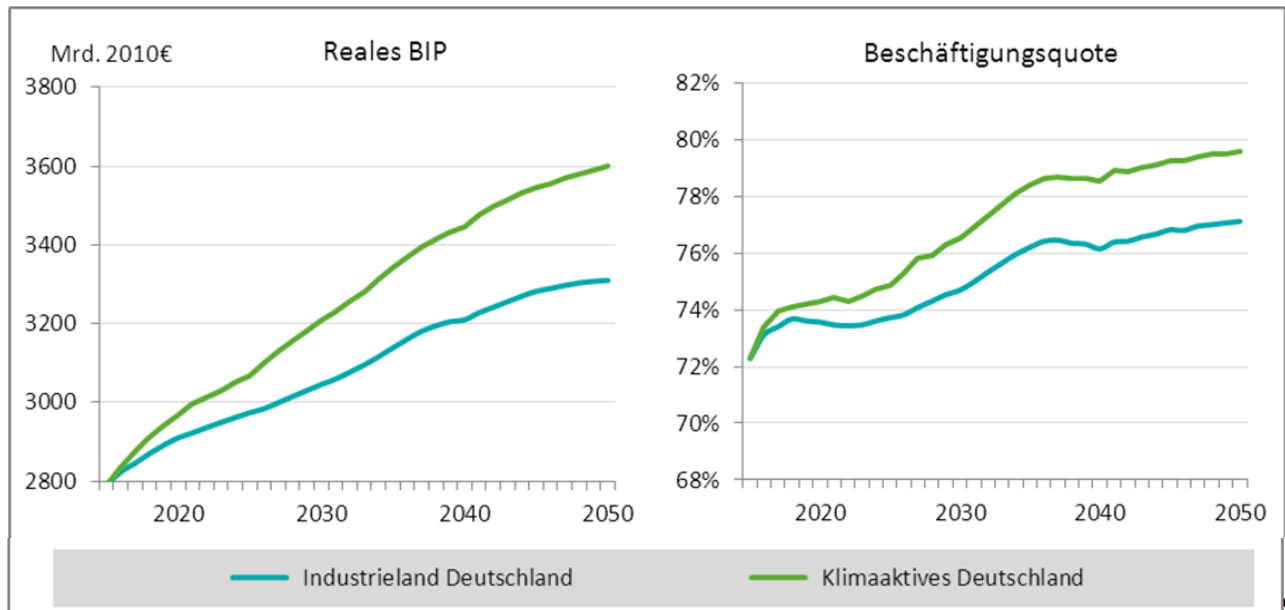
#### **4.1.2 Entwicklungstendenzen für Deutschland**

##### **4.1.2.1 Wirtschaftliche Entwicklung**

Bis in die Mitte des 21. Jahrhunderts werden in beiden Referenzszenarien positive ökonomische Wachstumsraten simuliert: Das preisbereinigte Niveau des Deutschen BIP (in Mrd. €, Basisjahr 2010) steigt in beiden Referenzszenarien langfristig an (Abbildung 10; links). Im Referenzszenario „Industrieland Deutschland“ nimmt das BIP bis 2050 um 18,6% zu, im Referenzszenario „Klimaaktives Deutschland“ sogar um 28,9%.

Die im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ im Vergleich zum „Industrieland Deutschland“ höheren BIP-Wachstumsraten sind insbesondere auf den höheren Innovationsgrad des Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ zurückzuführen, der mit einem Anstieg des Anteils erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung für Deutschland auf 100% bis zum Jahr 2050 einhergeht (im Vergleich zu 69% im Szenario „Industrieland Deutschland“). Zur Umsetzung dieses ambitionierten Ausbaupfades werden im Vergleich zum Szenario „Industrieland Deutschland“ im Modell zusätzliche Investitionsausgaben abgebildet, welche über Modellendogene Einkommenskreisläufe einen höheren und steileren Anstieg des BIP im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ bewirken.

Abbildung 10: Entwicklungen des BIP und der Beschäftigungsquote in Deutschland in den Referenzszenarien



Quelle: Distelkamp und Meyer 2017

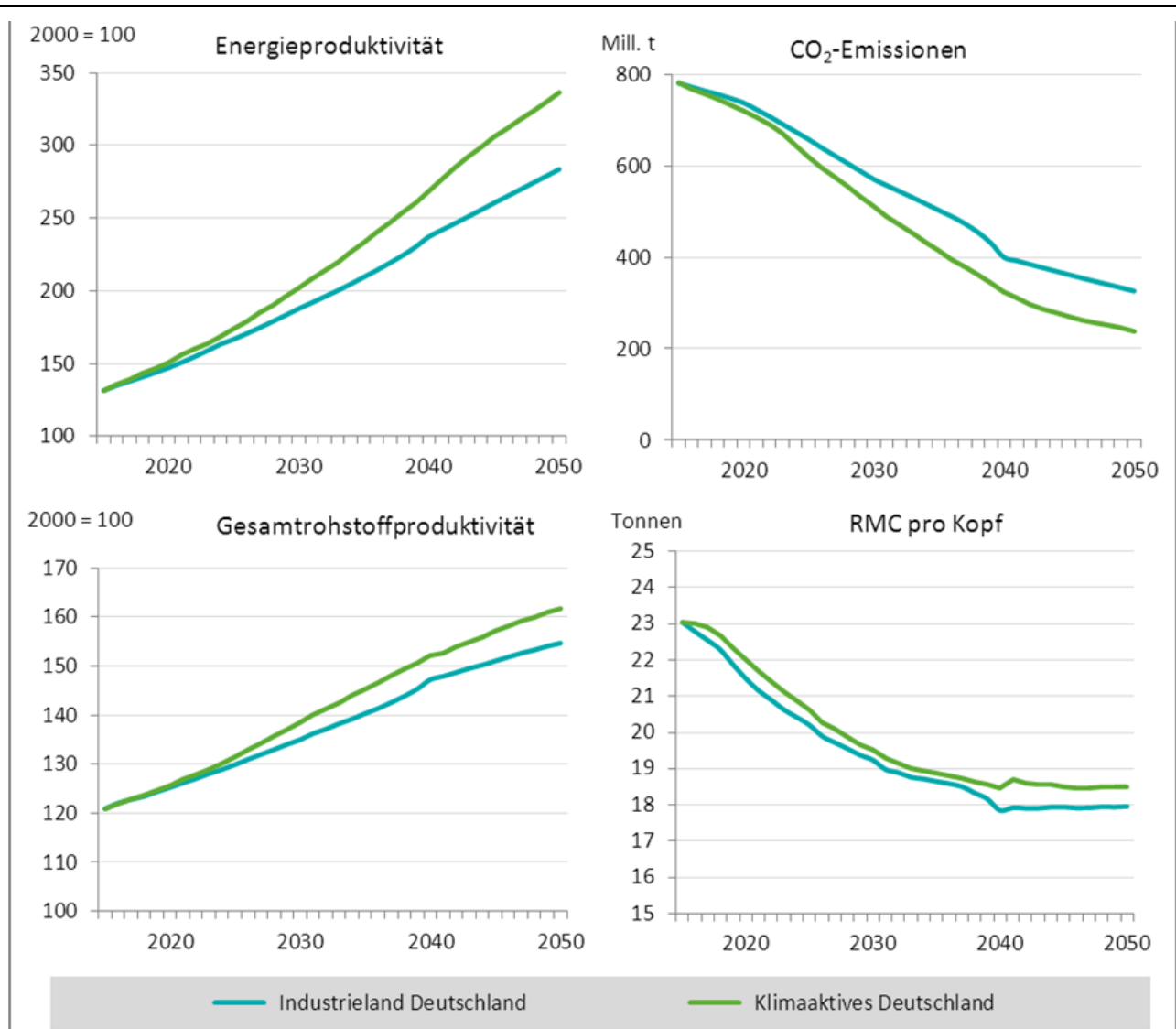
In Verbindung mit der exogen vorgegebenen Bevölkerungsentwicklung für den Zeitraum bis 2050 (angenommen wurde ein Rückgang der gesamten Bevölkerung in Deutschland auf unter 77 Mio. Einwohner), ergibt sich ein Rückgang der Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter (15 bis 64 Jahre) von etwa 53,6 Mio. in 2015 auf ca. 44 Mio. in 2050. Setzt man die Anzahl der Erwerbstätigen in Relation zur Bevölkerung in dieser Altersgruppe, so resultiert in beiden Referenzszenarien ein Anstieg der Beschäftigungsquote (rechte Grafik in der oberen Abbildung).

#### 4.1.2.2 Entwicklung umwelt- und ressourcenrelevanter Kenngrößen

Unter Berücksichtigung der klimapolitischen Vorgaben ergeben die Simulationen beider Referenzszenarien deutliche Steigerungen der Energieproduktivität (linke Grafik der oberen Abbildungsreihe von Abbildung 11). Weiterhin ergeben die Simulationen anhand der in beiden Referenzszenarien unterstellten Veränderungen des Energieträger-Mixes einen Rückgang der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands – auf 326 Mio. Tonnen im Jahr 2050 im Szenario „Industrieland Deutschland“ und auf 239 Mio. Tonnen im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ (Rückgang um ca. 77% im Vergleich zum Ausgangsniveau des Jahres 1990) (rechte Grafik in der mittleren Abbildungsreihe).



Abbildung 11: Entwicklung umwelt- und ressourcenrelevanter Kenngrößen in Deutschland in den Referenzszenarien



Quelle: Distelkamp und Meyer 2017

Die Entwicklung ressourcenpolitisch relevanter Indikatoren für Deutschland wird in Abbildung 11 dargestellt und zeigt

- ▶ die simulierte Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität (definiert als Relation der Summe aus preisbereinigtem BIP und gesamtwirtschaftlicher Importnachfrage sowie dem Indikator RMI) und
- ▶ den Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) pro Kopf.

Die Gesamtrohstoffproduktivität steigt im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ bis 2030 um ca. 15% und bis 2050 um 34% gegenüber 2010 an; im Szenario „Industrieland Deutschland“ liegen die simulierten Werte bei +12% bis 2030 und +28% bis 2050 (linker Zeitreihenplot in der unteren Abbildungsreihe). Damit wird einerseits deutlich, dass eine aktive Klima- und Energiepolitik einen relevanten Beitrag zur Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität leisten kann. Andererseits verdeutlichen die Simulationsergebnisse jedoch auch, dass die simulierten Anstiege der Gesamtrohstoffproduktivität dem Ambitionsniveau bestehender ressourcenpolitischer Forderungen nicht gerecht werden, da der Anstieg weder die in ProgRes geforderte Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber

1994 erreicht (vgl. Statistisches Bundesamt 2017) noch beispielsweise den von Günther und Golde (2015) bis zum Jahr 2030 geforderten Anstieg um 40% bis 60% im Vergleich zu 2010.

Gleiches gilt für die Entwicklung des Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC) pro Kopf. Hier zeigen die Simulationen einen moderaten Rückgang des deutschen RMC bis zum Ende des Simulationszeitraums auf ein Niveau von ca. 18 („Industrieland Deutschland“), bzw. 18,5 („Klimaaktives Deutschland“) t pro Kopf (rechter Zeitreihenplot in der unteren Abbildungsreihe). Das „Klimaaktives Deutschland“ Szenario weist leicht höhere Werte auf, da die stärkeren klimapolitischen Aktivitäten im Szenario zwar die Entnahmen bzw. Inputs an fossilen Energieträgern verringern, gleichzeitig führen aber sowohl die insgesamt höheren Investitionen zur Erreichung der Energiesystemtransformation als auch über Kreislaufeffekte induzierte Rebound-Effekte zu einem leicht höheren Primär-Rohstoffbedarf pro Kopf. Mit Blick auf die pro-Kopf-Werte der Ressourcenindikatoren wird der ressourcenpolitische Handlungsbedarf besonders deutlich, wenn man bedenkt, dass für 2050 bezüglich des RMC pro Kopf ein Zielkorridor von 5 bis 8 Tonnen diskutiert wird (vgl. Bringezu (2015) und Günther, Golde (2015)).

## 4.2 Simulationsergebnisse aus der Abschätzung der Szenarien in WORLD6

Hier werden die Ergebnisse der beiden Szenarien „Basisszenario“ und „Reduktion fossiler Brennstoffe“ dargestellt. Die Ergebnisse zum PolitikszENARIO „Verbessertes Recycling“ sowie zum kombinierten Szenario werden unter Kapitel 4.3.2 beschrieben.

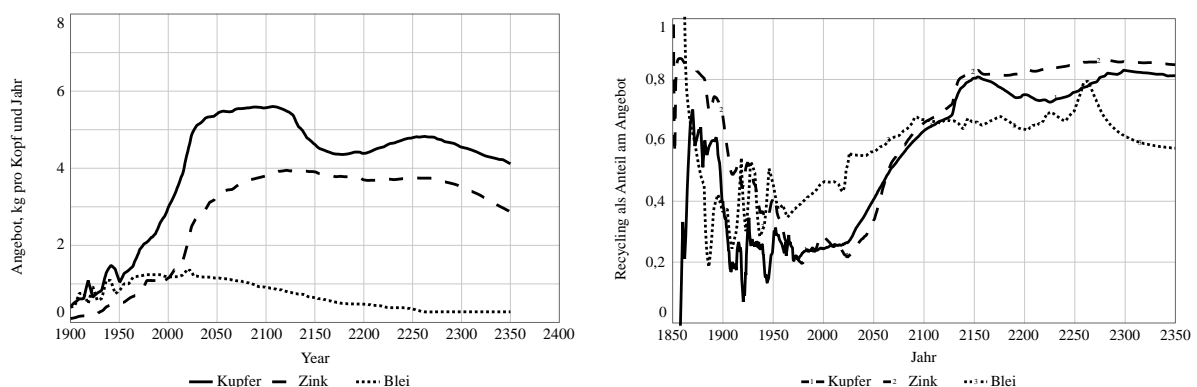
### 4.2.1 Potentiell Entwicklung globaler Rohstoffverfügbarkeiten im Basisszenario

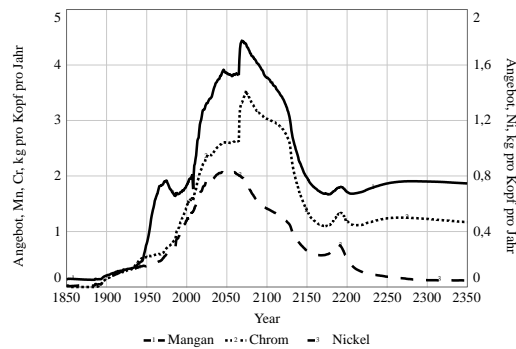
Im Folgenden werden für das Basisszenario beispielhaft die Entwicklungen der langfristigen globalen Verfügbarkeiten für ausgewählte Rohstoffe pro Person und Jahr sowie im genutzten Bestand pro Person gezeigt.

Während die Verfügbarkeit pro Person Zunahme, Stagnation oder Rückgang der globalen Rohstoffverfügbarkeiten relativ zur Bevölkerungszahl anzeigt, ist der genutzte Bestand pro Person ein Indikator für die Inanspruchnahme pro Person, die mit der Lebensqualität zusammenhängt. Ein Wachstum des genutzten Bestandes ist ein Indikator für einen besseren Lebensstandard.

Abbildung 12 zeigt das verfügbare Angebot an Blei, Kupfer und Zink (links) sowie den Anteil des recycelten Materials am Gesamtangebot (rechts).

Abbildung 12: Globale Rohstoffverfügbarkeit für Blei, Kupfer und Zink pro Person und Jahr (links). Recyclinganteil am Gesamtangebot für Blei, Kupfer und Zink (rechts). Globale Rohstoffverfügbarkeit für Chrom, Mangan und Nickel pro Person und Jahr (unten).





Quelle: Koca und Sverdrup (2017)

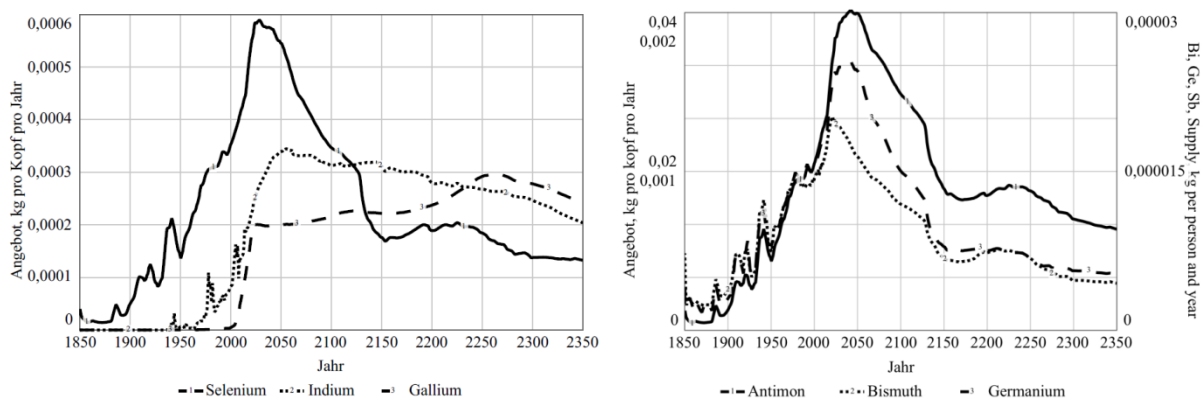
Alle hier dargestellten Metalle zeigen Verfügbarkeitsspitzen um 2050 (Blei, Nickel und Mangan) bzw. 2100 (Chrom, Kupfer und Zink) herum. Die Verfügbarkeitsspitze für Nickel könnte die Produktion von rostfreiem Stahl limitieren und die Bedeutung von Recycling für die Herstellung von rostfreiem Stahl deutlich steigern. Der Grund für abnehmende Verfügbarkeiten bei Chrom und Mangan liegt potentiell in der Energieknappheit, die den Abbau von gering konzentriertem Erz beschränkt.

Der Anteil an rezykliertem Kupfer am Gesamtangebot an Kupfer erreicht um 2050 herum Werte von 50% und klettert bis zum Jahre 2200 auf über 90%. Bei Zink nimmt der Anstieg des Recyclinganteils am Gesamtangebot einen ähnlichen Verlauf wie für Kupfer. Für Blei nimmt der Recyclinganteil am Gesamtangebot bis ca. 2075 auf ca. 60% zu, wo er längerfristig in etwa verbleibt. Kupfer, Zink, und Blei sind die wichtigsten Grundmetalle für viele Schlüsseltechnologien, und jegliche Störung in der Produktion dieser Metalle wirkt sich direkt auf das Angebot anderer Technologie-Metalle aus.

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die Ergebnisse der Simulationen der Rohstoffverfügbarkeiten im Basisszenario für die technologisch wichtigen Metalle Antimon, Bismut, Germanium, Gallium, Indium, Kobalt, Molybdän, Niob, Platingruppenmetalle und Selen. Bis auf Gallium, Indium und Niob wird anhand der Simulationsergebnisse für alle vorgenannten Rohstoffe eine ausgeprägte Verfügbarkeitsspitze etwa um das Jahr 2050 herum deutlich, mit danach z.T. stark abnehmender Verfügbarkeit pro Person. Für Niob erscheint eine Verfügbarkeitsspitze um das Jahr 2125 herum, die Verfügbarkeit bleibt jedoch dann auf nur leicht geringerem Level nahezu konstant im Simulationszeitraum. Die Verfügbarkeit von Indium stabilisiert sich nach der Spitze um 2050 herum zunächst, nimmt aber langfristig (ab Mitte des 23. Jahrhunderts) ab. Ähnlich zeigt auch der Kurvenverlauf für Gallium nach der Spitze um 2050 herum eine länger stabile Rohstoffverfügbarkeit, um dann längerfristig weiter anzusteigen und erst zum Ende des Simulationszeitraums hin wieder zu sinken.

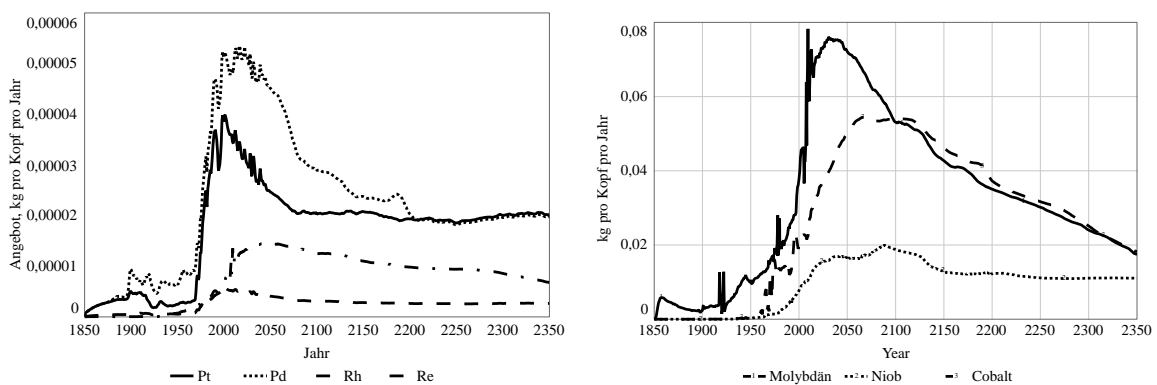
Die Platinmetalle (**Platin, Palladium, Rhodium**) sowie Kobalt, Molybdän und Niob sind der Schlüssel für eine Reihe von modernen Technologien (Katalysatoren in der modernen Chemie, super-effiziente Anlagen), als auch für die Luftfahrt und militärische Technologien. Das Indium- und das Germaniumangebot sind limitierende Faktoren für den weiteren Ausbau von Photovoltaik. Die Verfügbarkeitsverläufe der vorgenannten Rohstoffe zeigen alle peak-Verhalten (sichtbare Verfügbarkeitsspitzen), so dass sie die Nutzung der auf ihrer Nutzung basierenden Technologien in Zukunft begrenzen könnten. Wiederaufladbare Batterien erfordern Kobalt, und Kobalt wird vor Lithium zum limitierenden Faktor. Beide haben begrenzte Vorkommen, was die Gesamtzahl an Elektrofahrzeugen langfristig limitieren könnte. Der Ausbau von Wind und Photovoltaik kann durch Ressourcenknappheit für Kupfer, Silber und Technologiemetallen beschränkt werden. Für die effiziente Umwandlung von Energie in Bewegung oder Strom sind mehrere Speziallegierungsmetalle wie **Molybdän, Rhenium, Nickel, Niob, und Tantal** essentiell. Die Umwandlung kann auch ohne diese Metalle stattfinden, allerdings mit signifikant niedrigerer Effizienz.

Abbildung 13: Die globale Rohstoffverfügbarkeit für Selen, Indium und Gallium (links) und Antimon, Bismut, Germanium (rechts) als Angebot pro Person und Jahr.



Quelle: Koca und Sverdrup 2017

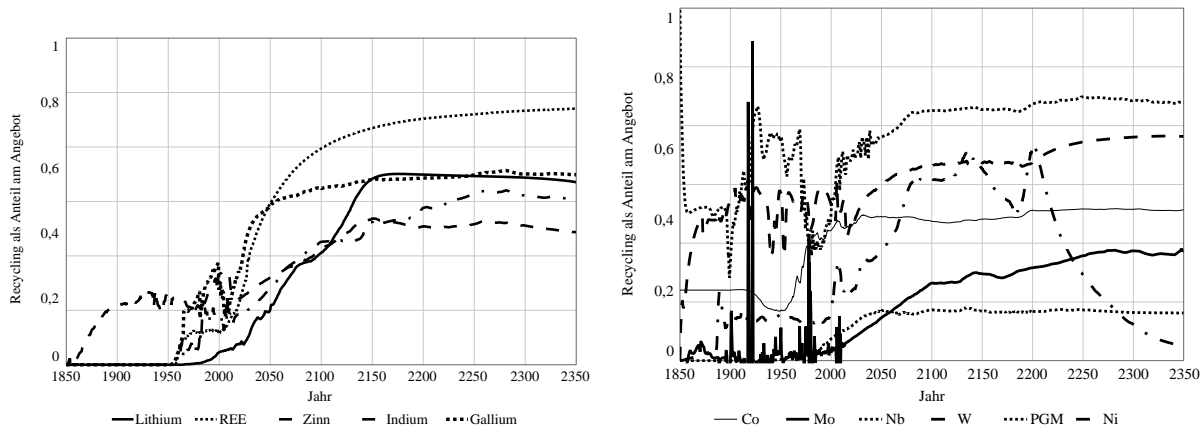
Abbildung 14: Die globale Rohstoffverfügbarkeit für die Platinmetalle Platin (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh) und Rhenium (Re) (links) sowie für Kobalt, Molybdän und Niob (rechts) pro Person und Jahr.



Quelle: Koca und Sverdrup 2017

Aus Abbildung 15 wird ersichtlich, dass anhand der Simulationen im Basisszenario die im Modell endogen integrierten Recycling-Mechanismen allein (*nota bene*: bei Annahme keiner weiteren politischen Anstrengungen, das Recycling zu verbessern) nicht ausreichen, um Verfügbarkeitsrisiken zu vermeiden. In keinem Fall können 100% des Rohstoffbedarfs der vorgenannten Rohstoffe aus Recycling gedeckt werden – langfristig maximal 70-75% für Niob und Seltene Erden und um die 30 – 50% für den Großteil der übrigen simulierten Rohstoffe. **Seltene Erden** sind von fundamentaler Bedeutung für viele Zukunftstechnologien und erneuerbare Energien, beispielsweise für Stromspeicher, kleine Elektromotoren und Generatoren. Der Wandel zu alternativen Energieformen und Transportmöglichkeiten ist stark eingeschränkt, wenn diese Erden nicht ausreichend zur Verfügung stehen. Die hohe Recyclingrate in der obigen Abbildung resultiert aus der Annahme, dass die technologischen Möglichkeiten in Europa und den USA erhalten bleiben. Recycling von Magneten ist relativ einfach; wesentlich aufwändiger und damit teurer ist es bei Batterien, da nur kleine Konzentrationen Seltener Erden eingesetzt werden.

Abbildung 15: Recyclinganteil für Lithium, seltene Erden, Zinn, Indium, Gallium (links), Kobalt, Molybdän, Niob, PGM und Nickel (rechts).

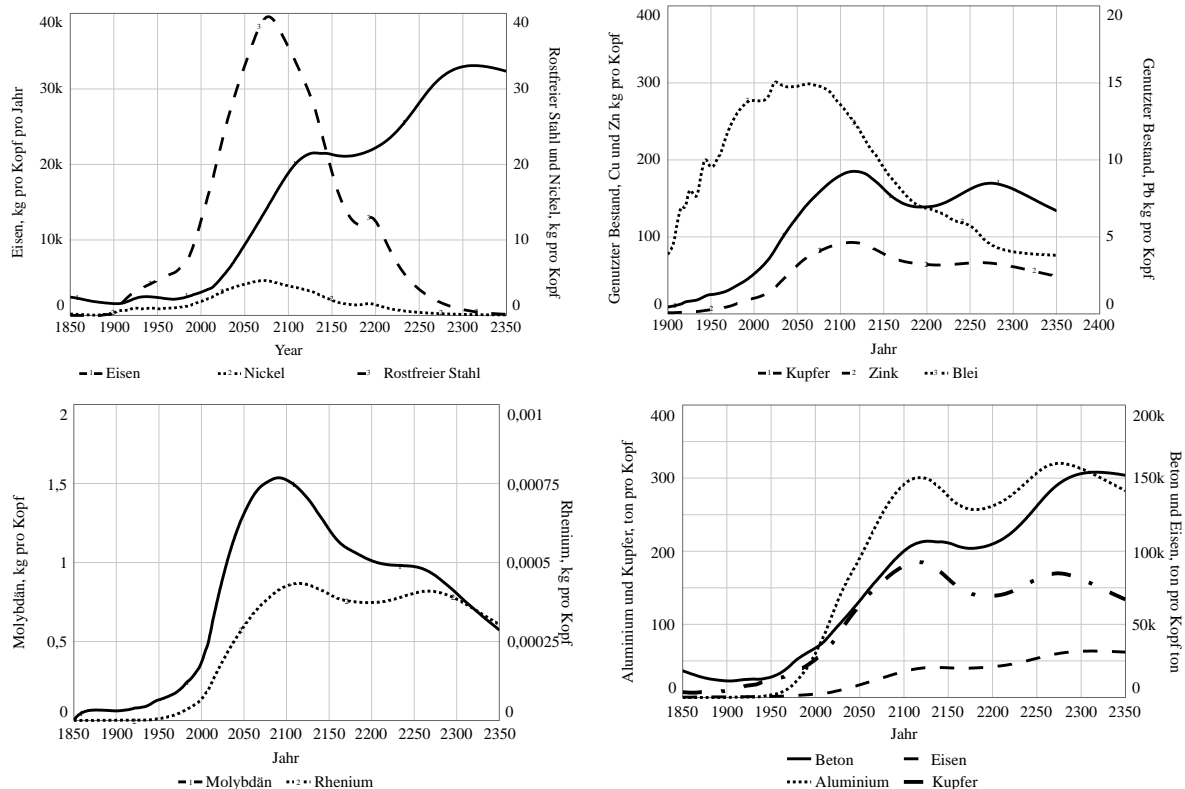


Quelle: Koca und Sverdrup 2017

Wird der Blick von den Verfügbarkeiten pro Person zum **genutzten Bestand**<sup>19</sup> gerichtet (Abbildung 16), so wird anhand der Simulationen im Basisszenario nur für wenige Rohstoffe ein Peak-Verhalten deutlich (Kupfer, Molybdän, Nickel, rostfreier Stahl), während die überwiegende Anzahl der simulierten Verläufe längerfristig ansteigende Vorkommen der Rohstoffe in genutzten Beständen zeigt bzw. erst spät im Simulationszeitraum eine Abnahme.

<sup>19</sup> Der genutzte Bestand steht direkt mit dem Wohlstand einer Gesellschaft in Verbindung. Wenn sich der genutzte Bestand erhöht, liegt in der Regel Wachstum und ein verbesserter Lebensstandard vor. Ein abnehmender genutzter Bestand ist in der Regel ein Indikator für Schrumpfung der Wirtschaft oder für wirtschaftliche Krisen. Verschleiß und Umwandlungsverluste reduzieren den genutzten Bestand jedes Jahr, sodass das verfügbare Angebot genutzt werden muss, um die Verluste im Bestand auszugleichen (Instandsetzungen).

Abbildung 16: Genutzte Bestände für Eisen-, Nickel- und rostfreien Stahl (oben links); Blei, Kupfer und Zink (oben rechts); Molybdän und Rhenium (unten links); sowie Aluminium, Eisen, Kupfer und Zement (unten rechts).



Quelle: Koca und Sverdrup 2017

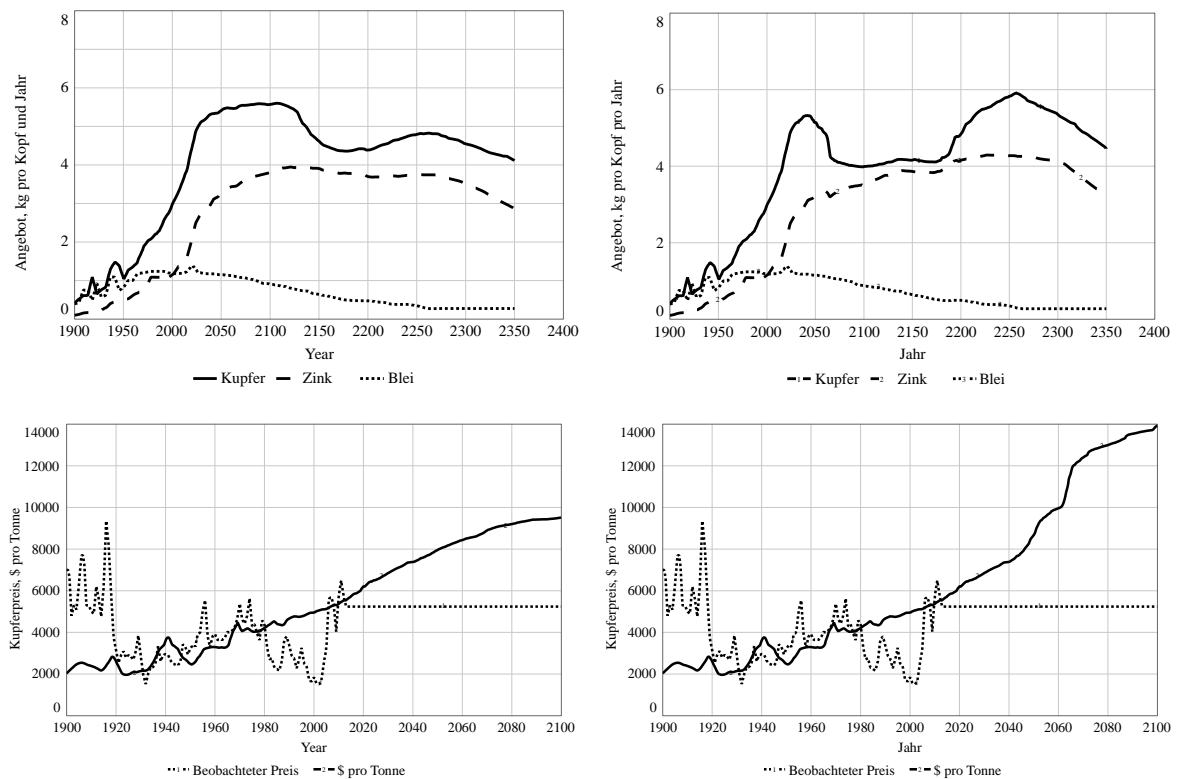
Die Simulationsergebnisse für die Entwicklungen des genutzten Bestands sind für weitere Materialien und Metalle im WORLD6-Bericht einsehbar (Koca und Sverdrup 2017).

#### 4.2.2 Potentielle Entwicklungen im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“

Abbildung 17 zeigt einerseits die Entwicklung der Rohstoffverfügbarkeiten für Blei, Kupfer und Zink im Vergleich von Basisszenario und dem Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (obere Abbildungsreihe) und andererseits die Preisentwicklung für Kupfer im Vergleich beider Szenarien (untere Abbildungsreihe). Die Simulationsergebnisse veranschaulichen, dass im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (erste) Verfügbarkeitsspitzen für Kupfer etwas früher und höhere Verfügbarkeiten dann erst später eintreten (aufgrund des erhöhten Kupferbedarfs für Technologien, die helfen, die globale Erwärmung bis 2060 auf unter 2 °C zu begrenzen). Das liegt gemäß der Simulationsergebnisse in der Entwicklung des Kupferpreises begründet, da ein Anstieg der Kupferpreise im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ um das Jahr 2100 herum stärker ausfällt als im Basisszenario und damit gesteigertes Recycling incentiviert – wodurch die Verfügbarkeit dann ansteigt. Die Zunahme des Recyclings als Antwort auf den erhöhten Kupferpreis gleicht den größten Teil der Lücke im Kupferhandel auf und kompensiert teilweise die Abnahme im Primärabbau. Dies funktioniert gut für Zink und Kupfer, könnte aber für die Technologie-Metalle zum Problem werden.



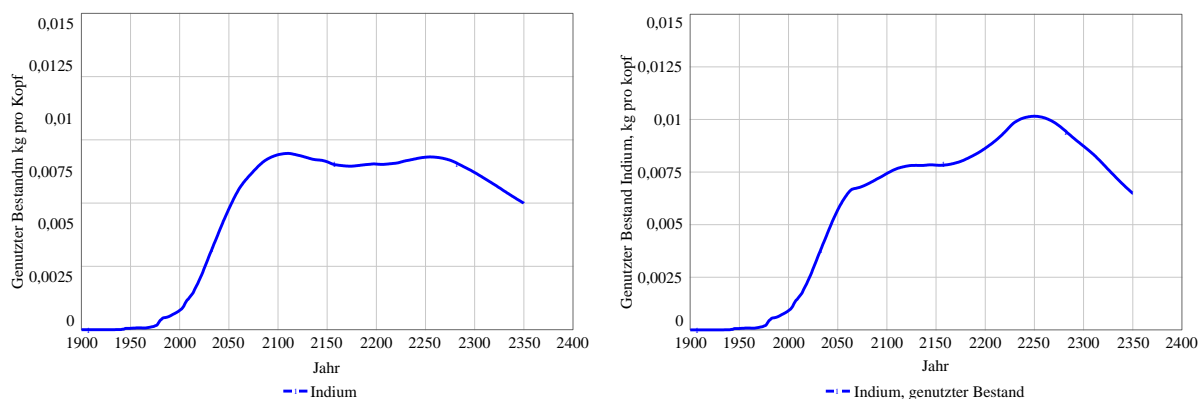
Abbildung 17: Rohstoffverfügbarkeiten für Blei, Kupfer und Zink pro Person und Jahr im Basisszenario (oben links) und im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (oben rechts) sowie Preisentwicklung für Kupfer im Basisszenario (unten links) und im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (unten rechts).



Quelle: Koca und Sverdrup 2017

Abbildung 18 zeigt die Entwicklung des genutzten Bestands für Indium. Im Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ steigt der genutzte Bestand an Indium längerfristig stärker an (die Werte liegen in der rechten Abbildung bei über 0,01 Millionen Tonnen, während sie im Basisszenario maximal 0,008 Millionen Tonnen erreichen), da insbesondere für die kohlenstoffarmen Technologien im Bereich Energie und Mobilität Indium eingesetzt und so in den Bestand gebracht wird.

Abbildung 18: Genutzter Bestand für Indium im Vergleich von Basisszenario (links) und Szenario „Reduktion fossiler Brennstoffe“ (rechts)



Quelle: Koca und Sverdrup 2017

### 4.3 Ergebnisse aus den ressourcenpolitischen Simulationsexperimenten (GINFORS3) und dem Politikscenario „Verbessertes Recycling“ (WORLD6)

Während in GINFORS3 Simulationsexperimente mit ressourcenpolitisch induzierten Effizienzsteigerungen in Produktionstechnologien durchgeführt und hinsichtlich ihrer Implikationen für Wirtschaft und Umwelt auf globaler und nationaler Ebene für Deutschland abgeschätzt wurden (Kapitel 4.3.1), wurden in WORLD6 ausgewählte ressourcenpolitische Ansätze zur Steigerung des Recyclings hinsichtlich ihrer potentiellen Wirkungen auf die globaler Verfügbarkeit unterschiedlicher Rohstoffe simuliert (Kapitel 4.3.2).

Der Vergleich der potentiellen Wirkungen der ressourcenpolitischen Simulationsexperimente mit den Referenzszenarien im Hinblick auf ressourcenpolitische Schlüsselindikatoren erlaubt es uns, Schlussfolgerungen hinsichtlich des notwendigen Ambitionsniveaus von Ressourcenpolitik abzuleiten, um eine signifikante Verringerung der Ressourcennutzung zu bewirken.

#### 4.3.1 Ergebnisse aus den Abschätzungen der Simulationsexperimente in GINFORS3

##### 4.3.1.1 Annahmen zu den Simulationsexperimenten ressourcenpolitisch induzierter Effizienzsteigerungen in Produktionstechnologien

Grundsätzlich wird der folgende Mechanismus für die Simulationsexperimente angenommen: ressourcenpolitisch induzierte Effizienzsteigerungen in verschiedenen Wirtschaftssektoren verändern die dort benötigten Rohstoffbedarfe für die jeweiligen Produktionstechnologien. Dabei werden keine konkreten ressourcenpolitischen Instrumente bzw. Instrumentenkombinationen unterstellt. Vielmehr wird angenommen, dass durch Änderungen an der Ausprägung der ressourcenpolitischen Unterstützung (im Sinne des Einsatzes eher „weicher“, eher „harter“ Instrumente oder einer Kombination daraus)<sup>20</sup> unterschiedlich starke Effizienzsteigerungen in den Produktionstechnologien ausgelöst bzw. erreicht werden können.

Über die Stärke der ressourcenpolitisch induzierten zusätzlichen Effizienzgewinne hinaus werden weitere Annahmen getroffen, beispielsweise zu internationalen Nachahmungseffekten. Hier werden Annahmen zur Geschwindigkeit der Diffusion der unterstellten technologischen Innovationen in andere Nationen gemacht, als zur zeitlichen Verzögerung mit der andere Länder Deutschland darin folgen, Effizienzfortschritte in den Produktionstechnologien in ihren Ländern zu unterstützen (siehe Tabelle 9). Insgesamt wurden drei Politikscenarien gebildet, die mit Abstufungen in den angenommenen Werten unterschiedliche Ambitionsniveaus aufweisen (siehe Tabelle 9).

<sup>20</sup> Sogenannte „weiche“ Politikinstrumente setzen auf Kommunikation, Appelle, Wissensvermittlung, Überzeugungsarbeit und Freiwilligkeit, um nachhaltiges Handeln bei Politikadressaten auszulösen und umfassen damit insbesondere informationsbasierte Instrumente. Diese gelten i.d.R. als weniger wirksam im Vergleich zu sogenannten „harten“ ökonomischen und ordnungspolitischen Instrumenten, da letztere mit Ge- und Verboten bzw. mit (positiven wie negativen) Anreizen arbeiten, um ermöglichende Rahmen- und Rechtsetzungen sowie auch Zwang zu schaffen (de Serres, Murtin, und Nicoletti 2010; Ölander und Thøgersen 2014; Goulder und Parry 2008). 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 Informationsempfänger; Praktiken, Routinen und Normen im sozialen Umfeld) deutlich stärker Einfluss ausüben als das bei ökonomischen und insbesondere bei ordnungsrechtlichen Instrumenten der Fall ist (Shove, Pantzar, und Watson 2012; Hirschnitz-Garbers und Langsdorf 2015; Borgstede und Andersson 2010).

Tabelle 9: Annahmen und Vorgaben zu Umfang und Stärke der produktionsseitigen Systemtransformation in den Simulationsexperimenten

TB		Moderate Transformation	Mittlere Transformation	Große Transformation
1	Anzahl der berücksichtigten wichtigsten Inputkoeffizienten	50	75	100
2	Stärke des zusätzlichen Effizienzgewinns <sup>21</sup>	1,5% p.a.	2,0% p.a.	2,5% p.a.
3	Bezieht sich das Simulationsexperiment ausschließlich auf Effizienzgewinne in der deutschen Wirtschaft?	nein	Nein	nein
	Mit wie viel Verzögerung folgen Produzenten in anderen EU-Ländern?	2 Jahre	1 Jahr	0 Jahre
	Mit wie viel Verzögerung folgen Produzenten in außereuropäischen Industrieländern?	5 Jahre	3 Jahre	0 Jahre
	Mit wie viel Verzögerung folgen Produzenten in sonstigen Ländern und Regionen („Rest der Welt“)?	10 Jahre	5 Jahre	0 Jahre
4	Umfang der initial zu tätigenden Aufwendungen (in Relation zur erzielten Ersparnis eines Jahres)			
	für Beratungsleistungen	1	1	1
	für Forschung & Entwicklung	1,5	1,5	1,5
	für Bruttoanlageinvestitionen	2,5	2,5	2,5

Quelle: Distelkamp und Meyer 2017

Methodisch wurden dazu zunächst anhand detaillierter Indikatorberechnungen im Ressourcenmodul von GINFORS3 diejenigen Produktionstechnologien identifiziert, auf welche die höchsten Rohstoffinanspruchnahmen sämtlicher Produktionstätigkeiten in Deutschland entfallen.<sup>22</sup> Für eine unterschiedliche große Anzahl dieser Produktionstechnologien wurden dann in den drei vorgenannten Politikszenerarien (siehe Tabelle 9) die gesamtwirtschaftlichen und ökologischen Folgen zusätzlicher Effizienzgewinne bis zum Jahr 2050 analysiert.<sup>23</sup>

Wir verstehen diese drei Simulationsexperimente als qualitative Abbildungen ressourcenpolitischer Transformationsprozesse unterschiedlichen Ausmaßes: von der „moderaten Transformation“ mit dem geringsten bis zur „großen Transformation“ mit dem höchsten Ambitionsniveau. So wird im Politikszenario „moderate Transformation“ nicht nur für die lediglich 50 wichtigsten Produktionstechnologien ein ressourcenpolitisch ausgelöster zusätzlicher jährlicher Effizienzfortschritt in Höhe von nur 1,5% angenommen, sondern andere EU-Länder, außereuropäische Industrieländer und der Rest der Welt folgen auch z.T. mit deutlicher zeitlicher Verzögerung. Demgegenüber belaufen sich die zusätzlichen

<sup>21</sup> Zusätzlich im Vergleich zur klimaaktiven Referenz.

<sup>22</sup> Basis für diese Auswertungen waren die Projektionsergebnisse für das Jahr 2020 im klimaaktiven Referenzszenario. Bei der Zusammenstellung dieser Rangfolge wurden sowohl Inputkoeffizienten auf der Hauptdiagonalen als auch Elemente, die sich auf klimapolitische Systemtransformationen beziehen, nicht berücksichtigt.

<sup>23</sup> Eine Liste der so ermittelten 100 für die Primär-Rohstoffinanspruchnahme wichtigsten Inputkoeffizienten findet sich im Anhang von Distelkamp und Meyer (2017).

jährlichen Effizienzgewinne für die 100 wichtigsten Produktionstechnologien auf 2,5% und diffundieren die unterstellten technologischen Innovationen im gleichen Jahr in alle anderen Länder bzw. folgen alle anderen Länder im gleichen Jahr mit der Unterstützung der Effizienzsteigerungen in den Produktionstechnologien.

#### 4.3.1.2 Globale Implikationen für Wirtschaft und Umwelt

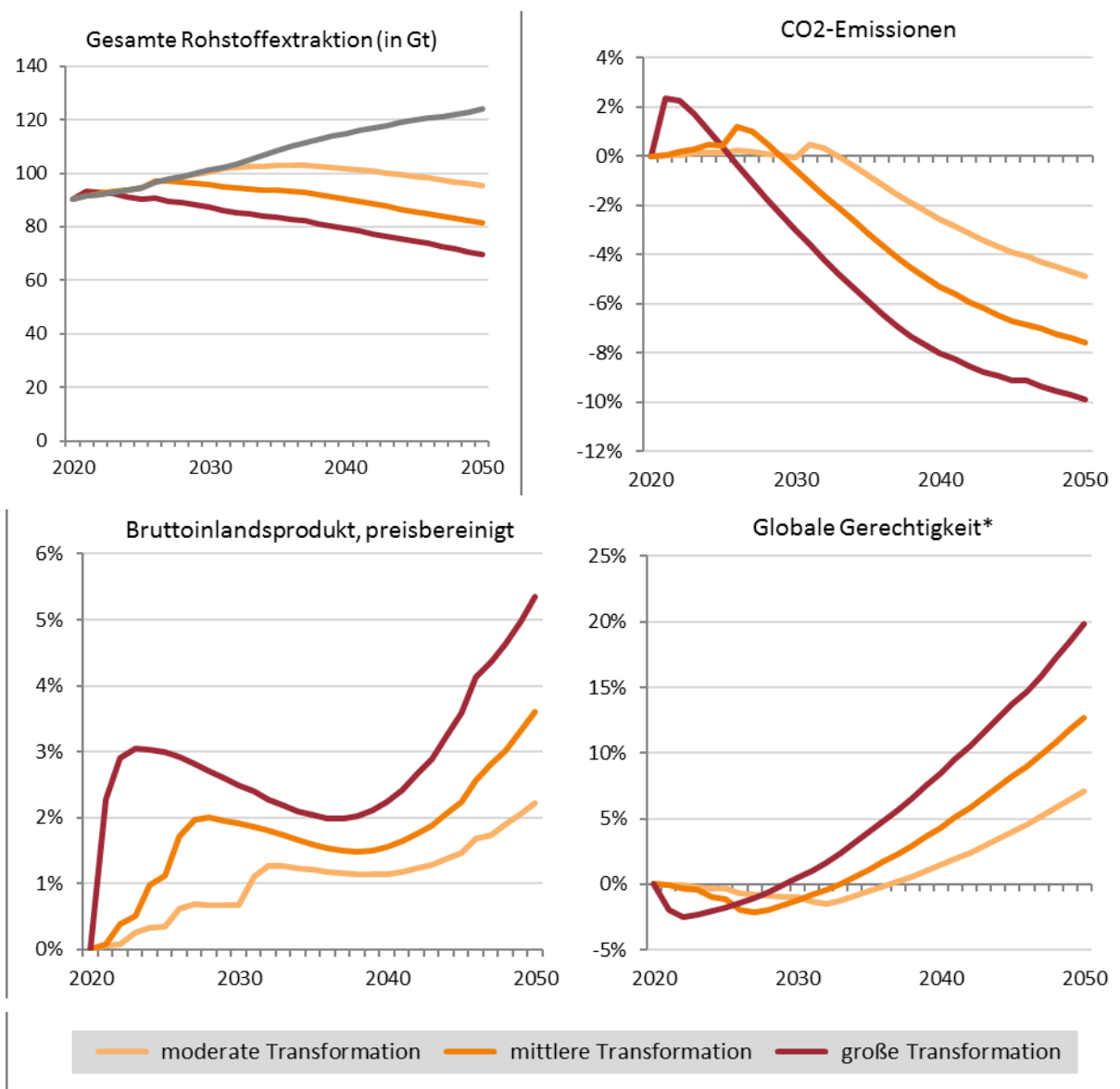
Die globalen Befunde sind in Abbildung 19 mit Blick auf die Ressourceninanspruchnahme, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und weltwirtschaftliche Entwicklungen dargestellt. Im Vergleich zum Referenzszenario „klimaaktives Deutschland“ ist die globale Ressourceninanspruchnahme im Jahre 2050 in allen drei Simulationsexperimenten um mehr als 25 Milliarden Tonnen geringer. Den deutlichsten Rückgang weist das Simulationsexperiment „große Transformation“ mit mehr als 50 Milliarden Tonnen auf knapp 70 Milliarden Tonnen auf – das ist ein Rückgang um etwa 42 % gegenüber dem Referenzszenario. Aber selbst bei der „großen Transformation“ würden im Jahr 2050 global immer noch mehr Rohstoffe extrahiert als im Jahre 2000 (52 Gigatonnen) – damit würde diese in wissenschaftlichen Studien benannte Zielgröße verfehlt (Bringezu 2011, 2009, Dittrich et al. 2012; vgl. Bringezu 2015).

Die simulierten Wirkungen der Simulationsexperimente in SimRess weisen die gleichen Tendenzen bezüglich der zukünftigen globalen Rohstoffextraktionen auf wie vergleichbare, modellbasierte Projektionen. So steigt die globale Rohstoffextraktion ohne weitere ressourcenpolitische Ansätze von ca. 84 Milliarden Tonnen im Jahre 2015 bis zum Jahre 2050 weiter deutlich an – je nach zugrundeliegenden Annahmen in den Modellen auf Werte von ca. 124 Milliarden Tonnen (in SimRess, unter Annahme ambitionierter klimapolitischer Maßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene) bis 186 Milliarden Tonnen (Ekins et al. 2017; Hatfield-Dodds et al. 2017). Werden weitere ressourcenpolitische Ansätze ergriffen, so steigt die globale Rohstoffextraktion teilweise zwar ebenfalls weiterhin an, aber wesentlich geringer als ohne diese – um etwa 10 Milliarden Tonnen im Simulationsexperiment „moderate Transformation“ des SimRess-Projektes (siehe Abbildung 19) sowie um etwa 22 Milliarden Tonnen im „Effizienz-Plus“-Szenario (inklusive klimapolitischer Ansätze) bzw. um ca. 65 Milliarden Tonnen im „Ressourceneffizienz“-Szenario von Hatfield-Dodds et al. [siehe 19]. Lediglich in den beiden Simulationsexperimenten „mittlere Transformation“ und „große Transformation“ des SimRess-Projektes wäre ein absoluter Rückgang gegenüber den Werten von 2015 sichtbar.

Wenngleich die globalen Rohstoffextraktionen im Falle des Simulationsexperiments „große Transformation“ um mehr als 50 Milliarden Tonnen gegenüber einem Szenario ohne weitere ressourcenpolitische Ansätze reduziert werden könnten, 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. 20, 21, 22, 23].

Mit Blick auf die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen weisen die drei Simulationsexperimente im Jahre 2050 um 5 bis 10% verringerte Werte gegenüber dem Referenzszenario auf – die größte Reduktion wird auch hier für die „große Transformation“ erreicht. Da die Simulationsexperimente im Vergleich zum Referenzszenario keinerlei weitergehende klimapolitische Maßnahmen unterstellen, wird am Rückgang der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich, dass die gesteigerte produktionsseitige Ressourceneffizienz allein durch den Minderbedarf an Rohstoffen (insbesondere von fossilen Energieträgern für die Verarbeitung anderer Rohstoffe, z.B. in der Stahl- oder Zementindustrie) einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten würde.

Abbildung 19: Potentielle Wirkungen der Simulationsexperimente auf die globale Ressourceninanspruchnahme (oben links), CO<sub>2</sub>-Emissionen (oben rechts) und die weltwirtschaftliche Entwicklung (unten)



\* Die globale Gerechtigkeit setzt die Entwicklung des durchschnittlichen BIP pro Kopf in den ärmsten Ländern (Indien und die Region „Rest der Welt“) ins Verhältnis zur Entwicklung des durchschnittlichen BIP in den reichsten (z.B. Australien, EU-27, Japan, Kanada, USA) Ländern.; Quelle: Distelkamp und Meyer 2017

Die Darstellungen der weltwirtschaftlichen Entwicklungen zeigen, dass in allen drei Simulationsexperimenten sowohl die globale Wirtschaftsleistung (BIP) als auch die globale Gerechtigkeit (Verhältnis der BIP-Entwicklung in den ärmsten gegenüber den reichsten Ländern) im Jahre 2050 deutlich höhere Werte annehmen als im Jahr 2020.

In allen drei Simulationsexperimenten, aber am Deutlichsten in der „großen Transformation“ kommt es insbesondere zu Beginn zu einem raschen Anstieg der Wirtschaftsleistung. Hier schlägt insbesondere der für die Effizienzsteigerungen notwendige Forschungs- und Investitionsbedarf zu Buche, da die im Vergleich zur Referenz zusätzlich notwendigen Investitionen gesamtwirtschaftliche Multiplikatoreffekte freisetzen. Die in den o.g. Annahmen zugrunde gelegten zusätzlichen Investitionen steigern ceteris paribus auch die Fixkosten der Produzenten (aufgrund zusätzlicher kalkulatorischer Abschrei-

bungskosten), sodass der Wachstumsimpuls im weiteren Verlauf zwischen ca. 2027 und 2037 stagniert. Mittelfristig werden die Kostensteigerungen für die Produzenten durch die zusätzlichen Materialeinsparungen vollständig kompensiert und befördert eine abgeschwächte Preisdynamik wiederum die Nachfrage, weshalb der Wachstumsimpuls zum Ende des Simulationszeitraums wieder ansteigt – um insgesamt 5,5% in der „großen Transformation“. Dabei ist auch mit Blick auf positive Effekte ressourcenpolitischer Ansätze auf das globale Wirtschaftswachstum (vgl. Ekins et al. 2017) zu beachten, dass Unterschiede auftreten, welche Regionen bzw. Länder nachteilige und welche vorteilhafte ökonomische Effekte im Sinne von „Verlieren und Gewinnern“ erfahren. Im oben genannten „Effizienz-Plus“-Szenario von Hatfield-Dodds et al. (2017) 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 ihrer pro-Kopf-BIPs erfahren würden, da global gestiegene Ressourceneffizienz die Nachfrage nach exportierten Rohstoffen abschwächen würde.

Mit Blick auf globale Gerechtigkeit nehmen die Werte etwa für das erste Jahrzehnt des Simulationszeitraums ab, d.h. dass die Systemtransformation zunächst zu weniger Wachstum des BIP pro Kopf in den ärmsten Ländern führt als desjenigen in den reichsten Ländern. Im weiteren Verlauf kommt es jedoch zu einer Umkehrung dieser Verhältnisse, so dass in der mittleren bis langen Frist mit teils erheblichen Beiträgen zu einer gerechteren Weltwirtschaft in Folge der produktionsseitigen Ressourceneffizienzsteigerungen gerechnet wird – die globale Gerechtigkeit nimmt in der „großen Transformation“ bis 2050 um etwa 20% zu. Für eine Interpretation der Befunde kann zunächst angeführt werden, dass in erster Linie weite Bereiche des verarbeitenden Gewerbes, die vornehmlich in den reichsten Ländern zu verorten sind, von den Ressourceneffizienzsteigerungen profitieren. Im weiteren Verlauf machen sich aber mehr und mehr auch die ausgelösten Preisimpulse bemerkbar, insbesondere für Biomasse. Die durch Effizienzgewinne ausgelöste Mindernachfrage nach Biomasse durch die Industrie führt zu Preiseffekten für Nahrungspflanzen – so sinkt beispielsweise der Weltmarktpreis für Nahrungspflanzen um 10 bis 20% - die wiederum zu einer Mehrnachfrage durch die Verbraucher führen. Von verringerten Nahrungsmittelpreisen profitieren wiederum ärmere Länder stärker als die reichsten Länder. Mit Blick auf die Rohstoffkategorien fossile Energieträger, Metallerze und Mineralien ist im internationalen Vergleich zu erwarten, dass Länder, die Nettoimporteure dieser Rohstoffe sind, aufgrund der Preiseffekte auch ökonomisch von entsprechenden Effizienzgewinnen profitieren – im Gegensatz dazu werden die rohstoffexportierenden Nationen ceteris paribus einem negativen Nachfrageeffekt ausgesetzt. (vgl. Hatfield-Dodds u. a. 2017).

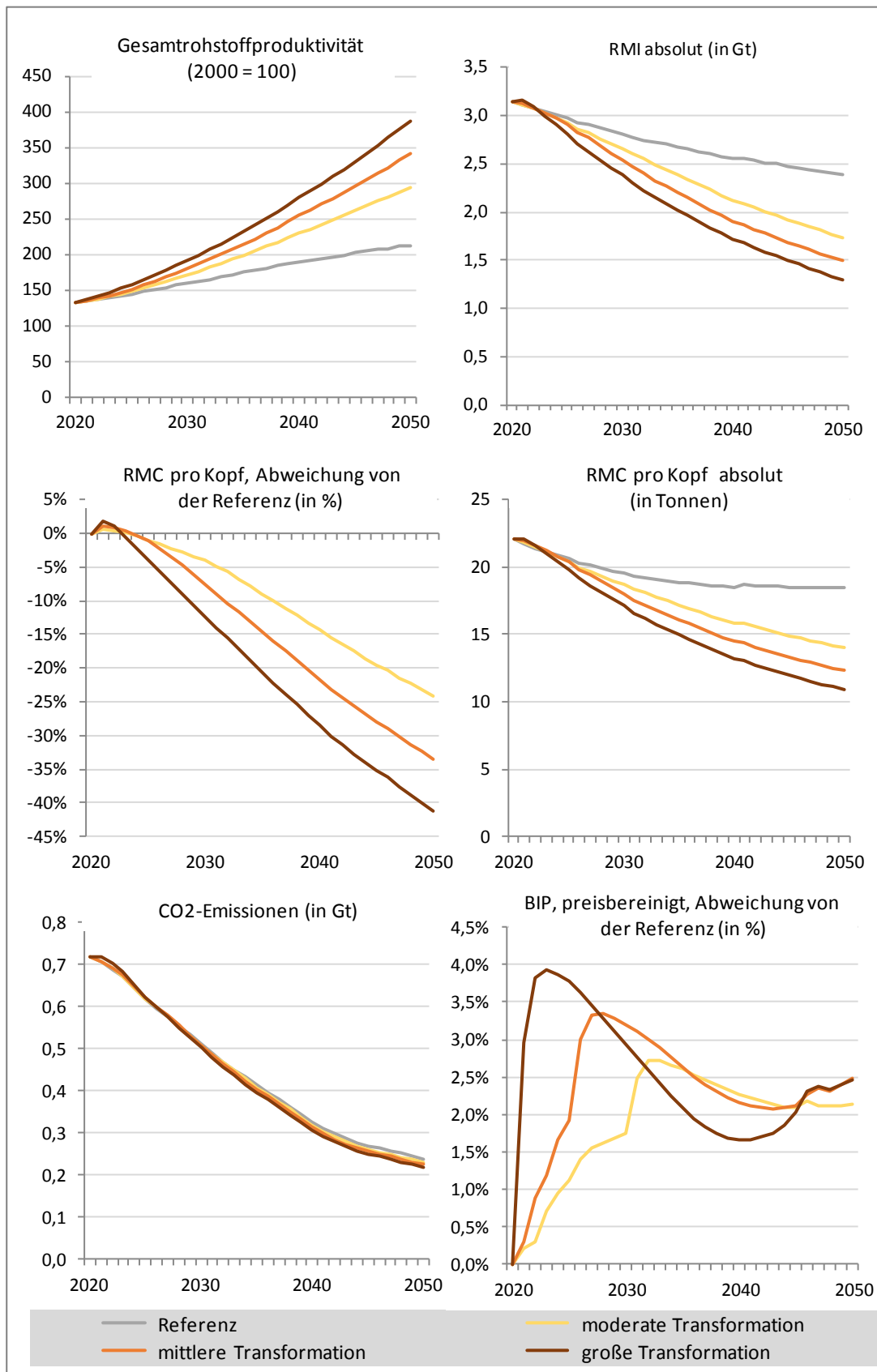
#### 4.3.1.3 Implikationen für Wirtschaft und Umwelt in Deutschland

Richten wir den Fokus auf die zentralen Befunde der Simulationsexperimente, die für Umwelt und Wirtschaft in Deutschland ermittelt werden, so spiegeln sich die globalen Tendenzen wieder. Auch für Deutschland wird mit einem positiven Impuls auf die Wirtschaftsleistung gerechnet – der größte Anstieg, um 2,5% bis 2050, wird für die Simulationsexperimente „mittlere Transformation“ und „große Transformation“ erzielt. Wie bereits bei der Betrachtung globaler Entwicklungen deutlich wurde, kann auch in Deutschland allein durch die unterstellten Fortschritte der Ressourceneffizienz eine deutliche Reduktion der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen beobachtet werden: im Vergleich zum Referenzszenario um -4% („moderate Transformation“) bis -8% („große Transformation“).



Die deutsche Gesamtrohstoffproduktivität wird bis zum Jahr 2050 im Vergleich zur klimaaktiven Referenz um ca. 40% („moderate Transformation“) bis 80% („große Transformation“) gesteigert. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, verfehlt das Referenzszenario „klimaaktive Deutschland“ die diskutierten Zielwerte zur Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität knapp – mit weitergehenden Effizienzbemühungen erscheint es plausibel, diese Zielwerte bis 2050 erreichen zu können. Zu beachten ist jedoch auch für die nationale Ebene der Primärrohstoffkonsum (mittlere Abbildungsreihe in Abbildung 20): die Simulationen zeigen Einsparungen des RMC pro Kopf gegenüber dem Referenzszenario in einer Größenordnung von 25% („moderate Transformation“) bis 40% („große Transformation“) simuliert.

Abbildung 20: Potentielle Wirkungen der Simulationsexperimente auf die Ressourceninanspruchnahme (oben), CO<sub>2</sub>-Emissionen (oben rechts) und die wirtschaftliche Entwicklung (unten) in Deutschland



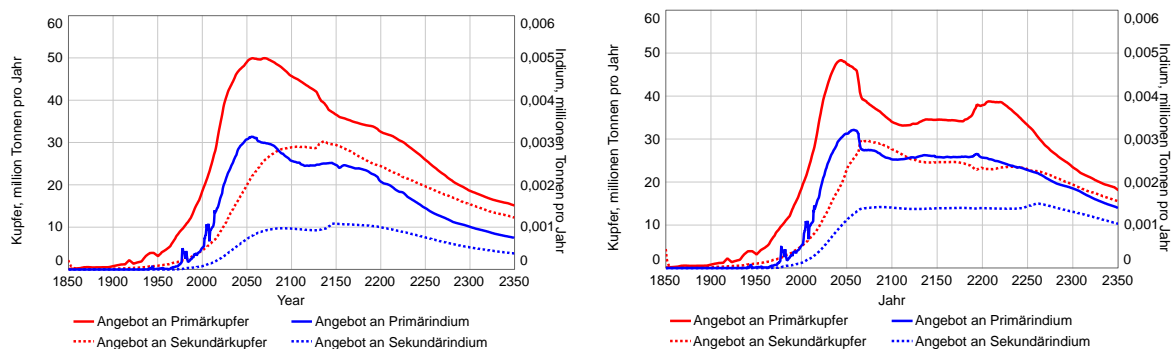
Quelle: Distelkamp und Meyer 2017

Damit erscheinen allein durch zusätzliche Effizienzfortschritte deutliche Einsparungen erreichbar – allerdings beträgt der RMC pro Kopf im Jahre 2050 selbst in der „großen Transformation“ noch etwa 11 Tonnen. Damit kommen die Simulationsexperimente zu dem Ergebnis, dass selbst bei global umfassenden produktionsseitigen Systemtransformationen auch für Deutschland der in wissenschaftlichen Diskussionen häufig genannte langfristige RMC-Zielkorridor von 5-8 Tonnen pro Kopf nicht erreicht werden kann (Bringezu 2015; Günther und Golde 2015).

#### 4.3.2 Abschätzungen zu den Politikszenarios in WORLD6

Anhand verschiedener Simulationsläufen wurde in einem Recycling-Szenario am Beispiel Kupfer und Indium untersucht, welche Möglichkeiten sich durch verstärktes Recycling ergeben, die Verfügbarkeiten technologisch wichtiger Rohstoffe längerfristig sichern zu können. Verstärktes Recycling wurde auf zwei verschiedene Weisen annahmebasiert im Modell implementiert: durch marktbasierte Anreize und durch eine verpflichtende Quote. Beide Modellimplementierungen zeigen fast identische Resultate. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt.

Abbildung 21: Vergleich von Angebot und recycelten Mengen für Kupfer und Indium im Vergleich Basiszenario (links) und Recycling-Szenario (rechts).

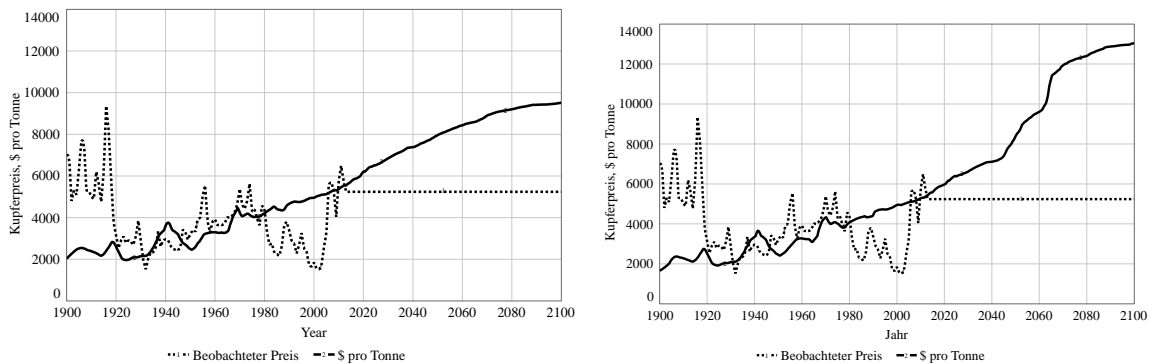


Quelle: Koca und Sverdrup 2017

Während bei Kupfer das Angebot durch den Recyclinganteil nur marginal steigt, zeigt sich ein deutlich erhöhtes Indiumangebot. Der Kupferpeak schiebt sich etwas weiter nach oben, und marginal nach hinten auf der Zeitskala. Der Indiumpeak hingegen verschiebt sich von etwa 2050 auf nach dem Jahre 2100.

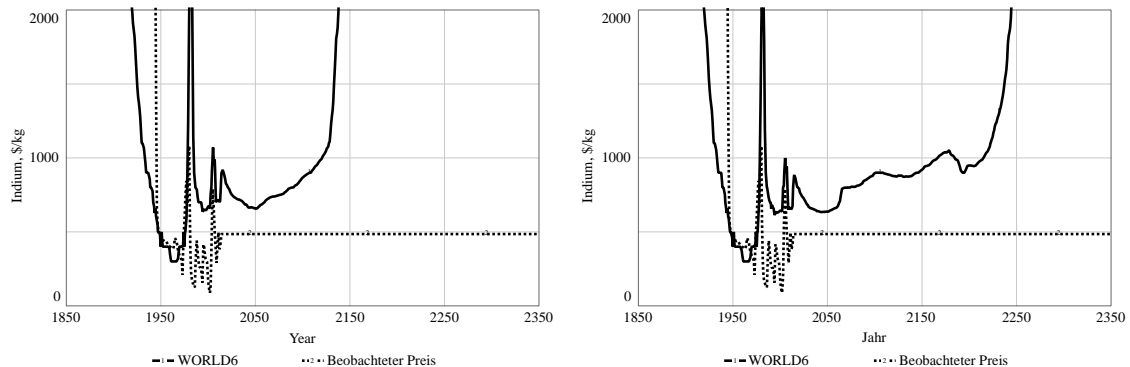
Wenn mehr Material recycelt wird, sind mehr Rohstoffe verfügbar, was die Angebotskurve verändert. So sinken die Preise für Kupfer bis zum Jahre 20100 leicht (siehe Abbildung 22) und für Indium ab dem Jahre 2100 deutlich (siehe Abbildung 23). Damit steigt die Nachfrage wiederum leicht an und Rebound-Effekte werden insbesondere für Kupfer ersichtlich.

Abbildung 22: Preisunterschied für Kupfer zwischen Basisszenario (links) und Recycling-Szenario (rechts).



Quelle: Koca und Sverdrup 2017

Abbildung 23: Preis Unterschied für Indium zwischen Basisszenario (links) und Recycling-Szenario (rechts).

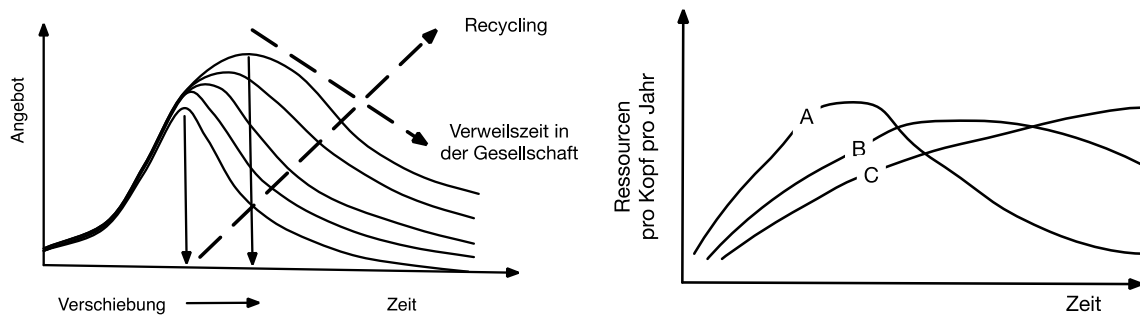


Quelle: Koca und Sverdrup 2017

Längerfristige Verfügbarkeitsengpässe scheinen sich mit den hier simulierten Annahmen politischer Maßnahmen eines verstärkten Recyclings nicht verhindern, aber in der Zeit nach hinten verschieben zu lassen. Damit wäre weitere Zeit gewonnen, die für darüberhinausgehende politische Instrumentierungen genutzt werden könnte, um eine langfristig nachhaltige und sichere Versorgung mit relevanten Rohstoffen gewährleisten zu können.

Abbildung 24 zeigt schematisch, wie sich die Peaks verschieben, wenn das Recycling verbessert wird, oder die Ressourcen effizienter genutzt werden. Die Rohstoffverfügbarkeit kann verbessert werden, wenn wir die Peaks gegeneinander verschieben. Es kann entweder der Bevölkerungspike bzw. der Ressourcenverbrauch pro Kopf oder der Ressourcenpeak verschoben werden, oder beide Peaks können gegeneinander verschoben werden. In der politischen Realität einzelner Ländern ist es kaum möglich, auf eine Verschiebung der globalen Bevölkerungspike einzuwirken. Deswegen verzichten wir hier auf eine weitere Diskussion dieser Idee. Allerdings könnten Regierungen einiges tun, um den Ressourcenverbrauch pro Kopf über andere Mittel zu verringern und somit zu längerfristiger Rohstoffversorgungssicherheit beizutragen.

Abbildung 24: Schematische Darstellung der Effekte verbesserten Recyclings auf die langfristige Verfügbarkeit von Rohstoffen insgesamt (oben links) und pro Person (oben rechts),



Linie A entspricht dem Basisszenario, Linie B kann durch verbessertes Recycling erreicht werden und Linie C durch verbessertes Recycling sowie Verringerungen im pro-Kopf-Verbrauch. Quelle: Koca und Sverdrup 2017

## 5 Schlussfolgerungen, Reflektion und Ausblick

Die Simulations-Ergebnisse des SimRess-Projektes machen mit Blick auf bestehende ressourcenpolitische Bestrebungen zweierlei deutlich:

1. Eine Fortschreibung bestehender ressourcenpolitischer Bestrebungen auf der nationalen und internationalen Ebene leistet einen wichtigen Beitrag zur Steigerung von Rohstoffproduktivität, aber auch zu Wirtschaftswachstum.
2. Nur über eine Steigerung ressourcenpolitischer Ambitionen auf nationaler und internationaler Ebene können Zielwerte für eine Senkung des Ressourcenverbrauchs erreicht werden, die in der nationalen und internationalen Nachhaltigkeitsforschung als essentiell für einen Verbleib innerhalb planetarer Grenzen diskutiert werden. Um eine Reduktion der Ressourcennutzung auf ein Niveau von 5-8 Tonnen RMC pro Kopf bis zum Jahr 2050 umsetzen zu können, müssen neben den Produktionsstrukturen auch tradierte Konsum- und Investitionsstrukturen verändert werden. Ausschließlich Effizienz-orientierte ressourcenpolitische Maßnahmen erscheinen hier nicht hinreichend, um entsprechende gesamtwirtschaftliche Transformation auszulösen. Vielmehr muss dazu das ressourcenpolitische Instrumentarium erweitert und im Hinblick auf einen stärkeren Einsatz ökonomischer und auch ordnungspolitischer Maßnahmen diskutiert werden, sodass es eine Transformation bestehender Strukturen auslösen und unterstützen kann.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass ressourcenpolitische Ansätze positive Wirkungen für den Klimaschutz zeitigen und andersherum auch stärkere klimapolitische Annahmen in den Simulationen zu positiven ressourcenpolitischen Effekten führen. Im Rahmen dieses Klima-Energie-Ressourcen-Nexus<sup>24</sup> erscheint eine ambitioniertere Ressourcenpolitik als wesentlicher Bestandteil, um nationale und auch internationale Klimaziele kosteneffizient erreichen zu helfen (siehe UNEP 2016). Dabei sind jedoch viel stärker als bisher die Materialbedarfe von erneuerbare Energie- und alternativen Mobilitäts-Technologien zu berücksichtigen, die im Vergleich zu fossil-basierter Energieversorgung und Mobilität andere und vielfach mit geringeren Vorkommen ausgestattete Rohstoffe benötigen.

<sup>24</sup> Der Klima-Energie-Ressourcen-Nexus war auch Gegenstand der Conference „Decarbonisation and Resource Efficiency – 100% Renewable Energy and more“, die im November 2016 in Berlin stattfand; siehe: <https://www.umweltbundesamt.de/en/conference-decarbonisation-ressource-efficiency>

Die Frage möglicher längerfristiger Knappheiten wird insbesondere vor dem Hintergrund möglicher gesellschaftlicher Transformationspfade und dem dafür benötigten Materialbedarf für Energieerzeugung und -versorgung, Mobilität, aber auch für Informations- und Kommunikationstechnologien relevant. Auch wenn technologischer Fortschritt vorhandene Rohstoff-Vorkommen länger aufrechtzuerhalten vermag, so können Extraktionskosten mittel- bis längerfristig ansteigen und damit ökonomische Knappheiten produzieren. Daher erscheint es ratsam, ressourcenpolitische Ansätze noch stärker auch auf Sekundärrohstoffnutzung und Substitution auszurichten.

Der soft-link zwischen beiden Modellen hat neue Erkenntnisse und robustere, da weniger von exogenen Variablen abhängigen Simulationen ermöglicht. Dabei wurden jedoch auch Schwierigkeiten deutlich: Die Diskussion eines integralen Modellierungsrahmens erweist sich aufgrund der beiden Modellierungssysteme mit unterschiedlichen zugrundeliegenden Paradigmen als schwierig. Der Austausch führte zwar zu einer Informations-seitigen Verknüpfung zwischen den beiden Modellen, es wurde jedoch auch unterstrichen, dass sich die Modelle in vielerlei Hinsicht aus gutem Grund unterscheiden und dass mehr solcher Austausch zwischen unterschiedlichen Modellen nötig ist.

In der Laufzeit des SimRess-Projektes mussten wir in zwei Bereichen von den ursprünglich anvisierten Forschungsaktivitäten abweichen und Neuausrichtungen vornehmen:

### **Gruppenmodellierungsworkshops**

Im Rahmen der Gruppenmodellierungsworkshops zur Erarbeitung des konzeptionellen Modells für das WORLD6-Modell konnten wir trotz umfassender Verfahren zur Identifikation und Einladung von Stakeholdern nur für zwei von fünf Workshops eine ausreichende Anzahl an externen Teilnehmenden gewinnen. Plausible Begründungen für die geringe Teilnahme von Stakeholdern waren nach unserer Analyse u.a.:

- a) Mangelndes Interesse, mangelnde Zeit, mangelnde Kapazitäten
- b) Sprachbarrieren, da der Workshop teilweise in englischer Sprache gehalten werden musste (aufgrund von internationalen Partnern im SimRess-Projekt)
- c) Mögliche Enttäuschungen in früheren Workshops und / oder fehlender Sinn einer erneuten Diskussion größerer Fragen der Ressourceneffizienz in Workshops früherer Projekte
- d) Informationsdefizite

Daher wurden die konzeptuellen Systemabbildungen nach den ersten beiden Workshops in internen Projekt-Treffen unter Teilnahme von SimRess Projektpartnern und Vertretern des UBA beendet. Dieser Prozess, wenngleich nicht idealtypisch, stellte sicher, dass die mit externen Stakeholdern begonnenen CLD finalisiert und sowohl für die Programmierung des WORLD6-Modells als auch für die spätere Identifikation von Ansatzpunkten für die Politik genutzt werden konnte.

### **Simulation ressourcenpolitischer Ansätze**

Entgegen den ursprünglichen Planungen konnten wir im SimRess-Kontext zwar die wissenschaftliche Entwicklung Politikmixin kritisch zu beleuchten, aber deren ex-ante Simulation nicht umsetzen. Durch Entscheidungen von Stakeholdern und auch im Projektmanagement konnte letztlich kein ressourcenpolitischer Politikmix für eine Abschätzung in den Simulationsmodellen abgestimmt und vorbereitet werden. Vielmehr wurde der Fokus auf Simulationsexperimente mit ressourcenpolitisch induzierten Ressourceneffizienzsteigerungen in ressourcenrelevanten Produktionstechnologien gelegt. Dabei



konnten keine expliziten Vorschläge für Politikinstrumente(nkombinationen) entwickelt werden, sondern die Simulationsexperimente unterscheiden sich nur in ihrer konzeptionellen Annahme aus mehr „weichen“ bzw. mehr „harten“ Instrumenten.

Damit lenkten die Projektkapazitäten und Stakeholder-Feedback den Prozess der Politikmix-Entwicklung weg von der Möglichkeit, einen vollständig ausgereiften Politikmix-Designprozess durchzuführen. Obwohl es sich um ein vielversprechendes Konzept zur Verbesserung des Systemdenkens und langfristiger Ansätze in der Ressourcenpolitik handelt, bestehen beim Design von Politikmixen große Herausforderungen, die besser analysiert werden müssen, um die Anwendbarkeit von Politikmixen für eine langfristige Ressourcenpolitik zu erhöhen.

## 6 Wesentliche Aktivitäten zur Verbreitung der Projektergebnisse

Die hier im Bericht vorgestellten Projektergebnisse lagen zu unterschiedlichen Zeiten vor und wurden daher über verschiedene Wege und Formate verbreitet. So wurde beispielsweise die Trendanalyse als UBA-Broschüre auf Deutsch (Langsdorf und Hirschnitz-Garbers 2014a) und Englisch (Langsdorf und Hirschnitz-Garbers 2014b) veröffentlicht und zum 2. European Resources Forum bzw. zum 2. Nationalen Ressourcenforum im November 2014 bekannt gemacht.

Zwischenergebnisse aus dem laufenden SimRess-Projekt wurden auf verschiedenen wissenschaftlichen Konferenzen präsentiert:

- ▶ International Society for Ecological Economics (ISEE) Conference, August 2014, Reykjavik, Island: Präsentation des GINFORS3 Modells „Structures of a welfare-oriented sustainable impact assessment Modell“; Gerd Ahlert, GWS;
- ▶ Degrowth Conference, September 2014, Leipzig, Deutschland: Präsentation der Ergebnisse der Trendanalyse „Locking in or helping shift? Trends and developments affecting sustainable resource use and degrowth“; Martin Hirschnitz-Garbers und Susanne Langsdorf (Ecologic Institut);
- ▶ World Resources Forum, Oktober 2015, Davos, Schweiz: Präsentation des Ansatzes sowie von Parametrisierung und Zwischenergebnissen der Modellsimulationen mittels Poster „Integrated Modelling for resource policy assessment – the SimRess-project approach“ (gemeinsames SimRess-Poster) sowie in der dafür konzipierten Session WS7 „System Dynamics and Econometric Approaches: potential limits of Modelling resource efficiency“;<sup>25</sup>
- ▶ Global Cleaner Production Conference, November 2015, Barcelona, Spanien: Präsentation von Parametrisierungsschritten und Zwischenergebnissen aus GINFORS3; „On the road to a resource efficient Europe: Insights from applications of a global simulation Modell“; Mark Meyer und Martin Distelkamp (GWS);
- ▶ Planetary Boundaries and Resource Efficiency Conference – A Science Policy Dialogue, Februar 2016, Potsdam, Germany: Präsentation von WORLD6-Modell Zwischenergebnissen „Interlinkages between PBs and Material Resource Efficiency – policy relevant results“; Harald Sverdrup (University of Iceland);
- ▶ International Sustainability Transition (IST) Conference, September 2016, Wuppertal, Deutschland: Präsentation des Soft-Links zwischen GINFORS3 und WORLD6 „Liaising econometric and system dynamic Modelling for simulation of macroeconomic transitions towards resource conservation.“ Mark Meyer und Martin Distelkamp (GWS), Deniz Koca (Lund University), Ullrich Lorenz (UBA); Präsentation des konzeptionellen Ansatzes Policy Mixing „Policy

---

<sup>25</sup> Die Präsentationen können hier heruntergeladen werden: <https://www.wrforum.org/workshop-ecologic-institute/>.

- mixing for reconfiguring consumption and production – a concept fit for supporting transition management?"; Martin Hirschnitz-Garbers und Susanne Langsdorf (Ecologic Institut)
- ▶ 12<sup>th</sup> Conference of the European Society for Ecological Economics, Juni 2017, Budapest, Ungarn: Präsentation der Nowcasting-Fähigkeiten bei Anwendung von GINFORS3 in der Indikatorenberichterstattung. Vortrag: "Raw Material Use of Nations - A Cross-Country Analysis Illustrating the Performance of Enhanced Resource Indicators". Mark Meyer (GWS).
  - ▶ World Resources Forum, Oktober 2017, Genf, Schweiz: Präsentation der finalen GINFORS-Parametrisierungen und Simulationsergebnisse. Vortrag: „120 Gigatons - A dynamic, model-based projection of global raw material extraction levels in 2050“. Mark Meyer (GWS).
  - ▶ World Resources Forum, Oktober 2017, Genf, Schweiz: Präsentation der konzeptionellen Reflexionen zum Policy Mixing aus SimRess. Vortrag: „Policy mixing for sustainable resource use – conceptual reflections from participatory policy mix design and scientific assessment“. Martin Hirschnitz-Garbers (Ecologic Institut).

Im Rahmen eines Projekt-übergreifenden Modelliererworkshops zu „Simulation Ressourceninanspruchnahme / Ressourceneffizienzpolitik“, zu dem das SimRess-Projekt am 7./8. April 2016 in Berlin abgehalten wurde, diskutierten Modellierer verschiedener Forschungseinrichtungen in Deutschland Ansätze und Bausteine für die integrierte gleichzeitige Betrachtung von Ressourcenschonung und Klimaschutz. Dabei standen die folgenden Fragen im Zentrum: Wie passen die unterschiedlichen Modelle und die Ergebnisse zusammen? Auf welchen (Rahmen)Annahmen basieren die unterschiedlichen Modelle? Wie können Ergebnisse der einen Modelle in andere Modelle einfließen? Unterscheiden sich die verschiedenen Modelle in gleichen/ähnlichen Ausgabegrößen und warum? Im Ergebnis der Workshopdiskussionen ist ein enger Austausch mit den Modellierern des Forschungsprojektes „DeteRess – Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz“ (FKZ 3712 93 321; Leitung: ifeu, Dr. Monika Dittrich) entstanden sowie ein gemeinsamer Reader mit Beiträgen aller Workshopteilnehmenden erarbeitet worden (siehe Biemann u. a. 2017)<sup>26</sup>.

Dieser Austausch wurde – und wird laufend – weitergeführt und fand Ausdruck in einem gemeinsamen, zweitägigen Abschlussworkshop zur Präsentation und Diskussion der (vorläufigen) Projektergebnisse beider Projekte am 7./8. Dezember 2016 in Berlin. Da DeteRess und SimRess mit jeweils unterschiedlichem Modelltechnischen und geographischen Zuschnitt den mittel- bis langfristige Rohstoffkonsum sowie die potentielle Wirkung unterschiedlicher ressourcenpolitischer Ansätze in Deutschland mit Blick auf 2030 und 2050 abschätzen, richteten sich die beiden Workshoptage an unterschiedliche Zielgruppen.

Am 7. Dezember wurden die methodischen und Modellierungsansätze mit Modellierern diskutiert. Dabei wurde deutlich, dass beide Projekte trotz der Anwendung sehr unterschiedlicher Methoden und Simulationsmodelle zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommen: der hohe Einfluss langfristiger und nur beschränkt steuerbarer Einflussfaktoren; das große Potenzial der Energiewende für die Minderung des Rohstoffkonsums; und der vorhandene, aber begrenzte Einfluss technikorientierter Dematerialisierungsansätze. Die Ergebnisse beider Projekte machen deutlich, dass strukturelle und konsumseitige Veränderungen in Deutschland zusätzlich nötig sind, um ambitionierte Ziele zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität und zur Verringerung des Rohstoffkonsums zu erreichen. Die Präsentation steht über die SimRess-Projektwebsite bereit <http://simress.de/en/downloads>.

<sup>26</sup> Der Reader steht über die Website des Umweltbundesamtes zum Download zur Verfügung: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sicherung-der-konsistenz-harmonisierung-von>.

Der zweite Workshoptag am 8. Dezember stand dann im Zeichen der Diskussion der Projektergebnisse mit ProgRess-Stakeholdern hinsichtlich möglicher Konsequenzen für die Fortschreibung und Weiterentwicklung der nationalen Ressourcenpolitik im Vordergrund. Die Präsentationen und eine Kurzdokumentation der wesentlichen Diskussionen stehen über die SimRess-Projektwebsite bereit: <http://simress.de/de/downloads>.

Aus dem SimRess-Projekt heraus wurde am November 2016 die „Decarbonisation and Resource Efficiency – 100% Renewable Energy and more“ in Berlin durchgeführt und dort auch Projektergebnisse mit Blick auf WORLD6-Modell-Simulationsergebnisse als Präsentation von Prof. Harald Sverdrup eingebracht.<sup>27</sup> Die Konferenz stand im Fokus des Klima-Energie-Ressourcen Nexus. Gemeinsam diskutierten Experten der Europäischen Umweltagentur (EEA), der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (JRC), des Club of Rome, der deutschen Ressourcenkommission sowie des Wuppertal Instituts über Synergien und Möglichkeiten zur Minimierung von Konflikten zwischen Dekarbonisierungs- und Dematerialisierungspolitik. Ein Übergang zu treibhausgasneutralen Wirtschaftssystemen erfordert tiefgreifende Umstrukturierungen von Infrastrukturen und Technologien. Während erhebliche Einsparungen an fossilen Brennstoffen vielversprechend sind, erfordert ein solcher Übergang aber auch enorme Investitionen in Produktionseinheiten für erneuerbare Energien, Batteriesysteme oder in Systeme zur Umwandlung des Stroms in Wasserstoff und Methan ("power to gas") bzw. Flüssigkeitssysteme. Weiterhin erfordern solche Technologien und Infrastrukturen bestimmte mineralische Rohstoffe, die, wie Lithium oder Seltene Erden, wirtschaftlich und/oder geopolitisch in der Zukunft knapp werden könnten.

Die Präsentationen und eine Zusammenfassung der wesentlichen Diskussionen sind über die Website des Umweltbundesamtes zugänglich: <https://www.umweltbundesamt.de/en/conference-decarbonisation-ressource-efficiency-0>.

Einzelne Simulationsläufe, die im weiteren Kontext des SimRess-Projektes im WORLD6-Modell unternommen wurden, konnten bereits in begutachteten wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht werden:

- ▶ Sverdrup, H. (2016). Modelling Global Extraction, Supply, Price and Depletion of the Extractable Geological Resources with the LITHIUM Modell. Resources, Conservation and Recycling 114 (November): 112–29. doi:10.1016/j.resconrec.2016.07.002.
- ▶ Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., (2016a). The future of platinum group metal supply; An integrated dynamic Modelling for platinum group metal supply, reserves, stocks-in-use, market price and sustainability. Resources, Conservation and Recycling 114: 130-152.
- ▶ Sverdrup, H. and K.V. Ragnarsdottir (2016b). A System Dynamics Modell for Platinum Group Metal Supply, Market Price, Depletion of Extractable Amounts, Ore Grade, Recycling and Stocks-in-Use." Resources, Conservation and Recycling 114 (November): 130–52. doi:10.1016/j.resconrec.2016.07.011.
- ▶ Sverdrup, H.U., and Ragnarsdottir, K.V. (2014). Natural Resources in a planetary perspective. Geochemical Perspectives Vol. 2, number 2, October issue 2014. 2: 129-341. European Geochemical Society

---

<sup>27</sup> Sein Vortrag "On the integrated climate impact of resources and energy extraction and use in society" ist hier verfügbar: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/dokumente/berlin\\_de-carb\\_sverdrup\\_final-1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/dokumente/berlin_de-carb_sverdrup_final-1.pdf).

- ▶ Sverdrup, H., K.V. Ragnarsdottir, and D. Koca (2015). An Assessment of Metal Supply Sustainability as an Input to Policy: Security of Supply Extraction Rates, Stocks-in-Use, Recycling, and Risk of Scarcity. *Journal of Cleaner Production*, July. doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.085.
- ▶ Sverdrup, H., D. Koca, and K.V. Ragnarsdottir (2014). Investigating the Sustainability of the Global Silver Supply, Reserves, Stocks in Society and Market Price Using Different Approaches. *Resources, Conservation and Recycling* 83 (February): 121–40. doi:10.1016/j.resconrec.2013.12.008.
- ▶ Sverdrup, H., K.V. Ragnarsdottir, and D. Koca (2014). On Modelling the Global Copper Mining Rates, Market Supply, Copper Price and the End of Copper Reserves. *Resources, Conservation and Recycling* 87 (June): 158–74. doi:10.1016/j.resconrec.2014.03.007.

## 7 Literatur

- Almon, C. (1991). The INFORUM Approach to Interindustry Modelling. *Economic Systems Research*, 3(1), 1–7.
- Behrendt, S., M. Scharp, R. Zieschank, und J. van Nouhuys (2015). ‚Horizon Scanning‘ und Trendmonitoring als ein Instrument in der Umweltpolitik zur strategischen Früherkennung und effizienten Politikberatung. Konzeptstudie. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_106\\_2015\\_horizon\\_scanning\\_und\\_trendmonitoring\\_als\\_instrument\\_in\\_der\\_umweltpolitik.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_106_2015_horizon_scanning_und_trendmonitoring_als_instrument_in_der_umweltpolitik.pdf).
- Bergmann, D. und T. Lehr (2015). Qualitative Umfeldszenarien für die Ressourcenpolitik. Endbericht zum Arbeitspaket 4 des Projekt Ressourcenpolitik (PolRes). Berlin: eusg. <http://www.ressourcenpolitik.de/2016/02/bergmann-doris-lehr-thomas-2015-qualitative-umfeldszenarien-fuer-die-ressourcenpolitik/>.
- Biemann, K., M. Distelkamp, M. Dittrich, F. Dünnebeil, B. Greiner, M. Hirschnitz-Garbers, D. Koca, u. a. (2017). Sicherung der Konsistenz und Harmonisierung von Annahmen bei der kombinierten Modellierung von Ressourceninanspruchnahme und Treibhausgasemissionen. Reader zum Erfahrungsaustausch im Rahmen des SimRes-Modellierer- Workshops am 7./8. April 2016 in Berlin ‚Simulation Ressourceninanspruchnahme und Ressourceneffizienzpolitik‘. DOKUMENTATIONEN 04/2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-30\\_dokumentation\\_04-2017\\_Modellierung\\_simres.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-30_dokumentation_04-2017_Modellierung_simres.pdf).
- BMU (2012). German Resource Efficiency Programme (ProgRes). Programme for the Sustainable Use and Conservation of Natural Resources.
- BMUB (2016). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. BMUB, Berlin.
- Bringezu, S. (2015). Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. *Resources* 4 (1): 25–54. doi:10.3390/resources4010025.
- Bringezu, S. (2011). Key elements for Economy-wide Sustainable Resource Management. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 61, p. 78–87.
- Bringezu, S. (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
- Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., Timmer, M., de Vries, G. (2013). The Construction of World Input-Output Tables in the WIOD Project. *Economic Systems Research*, 25, 71–98.
- Distelkamp, M. und M. Meyer (2017). Langfristszenarien und Potenziale zur Ressourceneffizienz in Deutschland im globalen Kontext – quantitative Abschätzungen mit dem Modell GINFORS3. SimRes-Endbericht Band I. Osnabrück: GWS.
- Dittrich, M., Giljum, S., Lutter, S., Polzin, C. (2012). Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment. Vienna.
- ECORYS & ECN (2012). The energy efficiency investment potential for the building environment: Two approaches. Client: Directorate General for Energy of the European Commission. Rotterdam. 7 November 2012.
- EEA (2012). The European Environment State and Outlook 2010. Consumption and the Environment, 2012 UPDATE. EEA, Copenhagen.
- EEA (1999). Environmental Indicators: Typology and Overview. EEA, Copenhagen.
- Ehrlich, P., Holdren, J., (1971). Impact of population growth. *Science* 171, 1212–1217.
- Ekins, P., N. Hughes und et al. (2017). Resource Efficiency: Potential and Economic Implications. A report of the International Resource Panel. Paris: UNEP IRP. [http://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/resource\\_efficiency\\_report\\_march\\_2017\\_web\\_res.pdf](http://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/resource_efficiency_report_march_2017_web_res.pdf).
- Elshkaki, A., Graedel, T., Ciacci, L., Reck, B. (2016). Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change*, 39, 305–315.
- European Commission (2013). EU energy, transport and GHG emissions: Trends to 2050: Reference Scenario 2013. Luxembourg.
- Eurostat (2008). Eurostat Manual of Supply, Use and Input-Output Tables. Luxembourg. European Commission.
- Fischer-Kowalski, M., F. Krausmann, und I. Pallua (2014). A Sociometabolic Reading of the Anthropocene: Modes of Subsistence, Population Size and Human Impact on Earth. *The Anthropocene Review* 1 (1): 8–33. doi:10.1177/2053019613518033.

- Fischer-Kowalski, M. und W. Hüttler (1998). Society's Metabolism: The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part II, 1970-1998. *Journal of Industrial Ecology* 2 (4): 107–36. doi:10.1162/jiec.1998.2.4.107.
- Griffiths, W., Hill, R., Judge, G. (1993). *Learning and practicing econometrics*. Wiley, New York.
- Günther, J. und Golde, M. (2015). Gesamtwirtschaftliche Ziele und Indikatoren zur Rohstoffinanspruchnahme. UBA-Hintergrundpapier, Dessau-Roßlau.
- Hatfield-Dodds, S., Schandl, H., Newth, D., Obersteiner, M., Cai, Y., Baynes, T., West, J., Havlik, P. (2017). Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050, with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies. *Journal of Cleaner Production* 144 (2017), p. 403–414.
- Hirschnitz-Garbers, M., D. Koca, H.U. Sverdrup, M. Meyer und M. Distelkamp (2017). System analysis for environmental policy – System thinking through system dynamic Modelling and policy mixing as used in the SimRes project. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Hirschnitz-Garbers, M., A.R. Tan, A. Gradmann und T. Srebotnjak (2015). Key Drivers for Unsustainable Resource Use – Categories, Effects and Policy Pointers. *Journal of Cleaner Production*, Februar. doi:10.1016/j.jclepro.2015.02.038.
- Horx, M. (2014). Theorie der Trend- und Zukunftsforschung - Theorie der integrierten Prognostik. <http://www.horx.com/Zukunftsforschung/2-02.aspx>, eingesehen am 22. Juni 2017.
- IEA (2015). *Energy Technology Perspectives 2015: Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*. Paris: OECD/IEA.
- Koca, D. und H.U. Sverdrup (2017). Using the system dynamic WORLD5 Modell for assessing resource scarcities and resource policy. SimRes project report Volume 2. Lund: Lund University, Iceland University.
- Krausmann, F., M. Fischer-Kowalski, H. Schandl und N. Eisenmenger (2008). The Global Sociometabolic Transition: Past and Present Metabolic Profiles and Their Future Trajectories. *Journal of Industrial Ecology* 12 (5–6): 637–56. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00065.x.
- Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, und H. J. Schellnhuber (2008). Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (6): 1786–93. doi:10.1073/pnas.0705414105.
- Lorenz U. und Veenhoff S. (2013). Integrated scenarios of sustainable food production and consumption in Germany. *Sustainability: Science, Practice, & Policy* 9(2):92-104. Published online Jul 29, 2013. <https://sspp.proquest.com/integrated-scenarios-of-sustainable-food-production-and-consumption-in-germany-60d84a7381d7#.3m00kx0g>
- Lutter, S., S. Giljum und C. Manstein (2016). Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. World Resources Institute, Washington DC.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W. (1972). *Limits to growth*. Universe Books, New York.
- Meadows D.H, Meadows D.L., Randers J. (1993). *Beyond the limits: confronting global collapse, envisioning a sustainable future*. Chelsea Green Publishing Company.
- Meadows D.H, Randers, J., Meadows D.L. (2005). *Limits to growth, the 30-year update* Earthscan, Sterling VA.
- Meyer, M., Distelkamp, M., Ahlert, G., Meyer, B. (2013). Macroeconomic Modelling of the Global Economy-Energy-Environment Nexus - an Overview of Recent Advancements of the Dynamic Simulation Modell GINFORS3. GWS Discussion Paper 13/5, Osnabrück.
- Montzka, S. A., E. J. Dlugokencky, und J. H. Butler (2011). Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases and climate change. *Nature* 476 (7358): 43–50. doi:10.1038/nature10322.
- OECD (2002). *Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth*. SG/SD(2002)1/FINAL. Sustainable Development. Paris: OECD.
- Popper, K. (1994). *Logik der Forschung*. Tübingen: Mohr & Siebeck, 10. Auflage.
- Prognos (2013). *Ermittlung der Wachstumswirkungen der KfW-Programme zum Energieeffizienten Bauen und Sanieren*. Berlin, Basel.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. Stuart Chapin, E.F. Lambin, T.M. Lenton, u. a. (2009a). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* 14 (2): 32.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. Stuart Chapin, E.F. Lambin, T.M. Lenton, u. a. (2009b). A safe operating space for humanity. *Nature* 461 (7263): 472–75. doi:10.1038/461472a.



- Schandl, H., Hatfield-Dodds, S., Wiedmann, T., Geschke, A., Cai, Y., West, J., Newth, D., Baynes, T., Lenzen, M., Owen, A. (2016). Decoupling global environmental pressure and economic growth: scenarios for energy use, materials use and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 132, pp. 45-56.
- Scrieci, S., Rezai, A. and Mechler, R. (2013). On the economic foundations of green growth discourses: the case of climate change mitigation and macroeconomic dynamics in economic Modelling. *WENE*, 2: 251–268.
- Sorrell, S. (2009). Jevons' Paradox revisited: the evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy*, 37, 1456–1469.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J. (2008). The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecol Econ*, 65(3), 636–649
- SRU (2016). Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik. SRU. [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2016\\_Umweltgutachten\\_HD.pdf;jsessionid=1A2F5EE37593CCF66F7503D8F2AD87BD.L\\_cid335?\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_Umweltgutachten_HD.pdf;jsessionid=1A2F5EE37593CCF66F7503D8F2AD87BD.L_cid335?_blob=publicationFile).
- Statistisches Bundesamt (2017). Nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Indikatorenbericht 2016. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2015). Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2014). Umweltnutzung und Wirtschaft Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- Steffen, W., K. Richardson, J. Rockstrom, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, R. Biggs, u. a. (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science* 347 (6223): 1259855–1259855. doi:10.1126/science.1259855.
- Steffen, W., Å. Persson, L. Deutsch, J. Zalasiewicz, M. Williams, K. Richardson, C. Crumley, u. a. (2011). The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship. *AMBIO* 40 (7): 739–61. doi:10.1007/s13280-011-0185-x.
- Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R. and de Vries, G. J. (2015). An Illustrated User Guide to the World Input–Output Database: the Case of Global Automotive Production, *Review of International Economics*, 23, 575–605.
- UBA (Hrsg.) (2014). Die Zukunft im Blick: Trendbericht für eine vorausschauende Ressourcenpolitik. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick>.
- UBA (Hrsg.) (2015). Elemente einer erfolgreichen Ressourcenschonungspolitik. Umweltbundesamt.
- Umpfenbach, K. (2013). How will we know if absolute decoupling has been achieved and will it be enough? Common Approach for DYNAMIX, Deliverable D.I.3. Berlin: Ecologic Institute.
- UNEP (2012). Global environment outlook GEO 5: environment for the future we want. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Program.
- UNEP (Hrsg.) (2011). Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth. Kenya, UNEP.
- United Nations (2015). World Population Prospects: The 2015 Revision, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Data Booklet. ST/ESA/SER.A/377.
- von Weizsäcker, E., Hargroves, K., Smith, M., Desha, C., Stasinopoulos, P. (2009). Factor Five. Transforming the Global Economy through 80% Improvements in Resource Productivity. Earthscan, London and Sterling, VA.
- WBGU (2011). Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. WBGU.
- Weimer-Jehle, W., Kosow, H. (2017). Konsistenz von gesellschaftlichen Rahmenannahmen – Erfahrungen mit CIB. In: Biemann et al.: Annahmen, Konsistenzen und Modellinteraktionen in der Modellierung von Ressourcenschonung und Treibhausgasreduzierungen. UBA Dokumentationen 04/2017, Dessau-Roßlau.
- Z\_punkt (2016). Megatrends. Die globalen Treiber des Wandels, die die Zukunft Ihres Geschäfts bestimmen. <http://www.z-punkt.de/themen/artikel/megatrends>, eingesehen am 22. Juni 2017.

Gefördert im Rahmen des UFOPLAN durch das UBA, FKZ: 3712 93 102

Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien  
Ressourcenschonung; Ansprechpartner: Ullrich Lorenz, ullrich.lorenz@uba.de

Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau

[www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

