

# Langfristszenarien und Potenziale zur Ressourceneffizienz in Deutschland im globalen Kontext – quantitative Abschätzungen mit dem Modell GINFORS

Modelle, Potentiale und Langfristszenarien für  
Ressourceneffizienz (SimRess)



TEXTE 50/2018

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3712 93 102  
UBA-FB 002654/2

**Langfristszenarien und Potenziale zur  
Ressourceneffizienz in Deutschland im  
globalen Kontext – quantitative  
Abschätzungen mit dem Modell GINFORS**

Modelle, Potentiale und Langfristszenarien für Ressourceneffizienz  
(SimRess) – Bericht 2

von

Martin Distelkamp, Mark Meyer  
Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, Osnabrück

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](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

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

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

### **Durchführung der Studie:**

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH  
Heinrichstraße 30  
49080 Osnabrück

### **Abschlussdatum:**

März 2017

### **Redaktion:**

Fachgebiet I 1.4 Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Umweltfragen, nachhaltiger Konsum  
Michael Golde

### Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

### Weitere Publikationen aus dem Forschungsvorhaben 3712 93 102:

TEXTE 48/2018 Potentiale und Kernergebnisse der Simulationen von  
Ressourcenschonung(spolitik) – Endbericht des Projekts „Modelle, Potentiale  
und Langfristszenarien für Ressourceneffizienz“ (Sim-Ress)

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

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 SimRess-Projekt verfolgte zwei zentrale Ziele. Inhaltlich sollten politische Maßnahmenpakete zur Steigerung der Ressourceneffizienz identifiziert und in dynamischen Modellsimulationen mit Zeithorizont bis zum Jahr 2050 simuliert werden. Methodisch sollte hierzu ein konsistenter Modellrahmen geschaffen werden, um Ansätze zur Verbesserung der Informationsbasis sowie des Berichtsumfangs bis dato existierender Modelle aufzuzeigen. Tatsächlich ist es in SimRess gelungen, einen Simulationsrahmen zu etablieren, welcher den bisherigen Stand der Wissenschaft deutlich übersteigt. Die jüngste Version des dynamischen Simulationsmodells GINFORS3, ermöglicht eine umfassende Abschätzung der umwelt-ökonomischen Effekte unterschiedlicher Politikmaßnahmen in Deutschland wie auch in anderen Volkswirtschaften: Auf einem umfassenden Multi-Regionalen Input-Output Datensatz basierend, repräsentiert GINFORS3 ein sog. dynamisches EE-MRIO Modell mit globaler Abdeckung. Dies bedeutet, dass das Modell (u.a.) sowohl für biotische wie auch für abiotische Primärrohstoffe als auch für Treibhausgasemissionen die Entwicklung verschiedener globaler Footprint-Konzepte bis zum Jahr 2050 projizieren kann.

Der vorliegende Band des Abschlussberichts dient einer eigenständigen Vorstellung des im Verlauf des SimRess-Projekts etablierten Modellrahmens. Zudem werden die weitreichenden Möglichkeiten zum Einsatz des Modells zur Evaluation historischer Entwicklungen, zur Abschätzung aktueller Entwicklungstrends sowie zur Beurteilung zukünftiger Auswirkungen politischer Maßnahmen durch zahlreiche Anwendungsbeispielen illustriert.

Da das Modell die Auswirkungen von Einkommens- und weitergehenden systemischen Rebound-Effekten berücksichtigt, konnten wir in eigenen Simulationsstudien verdeutlichen, dass umfassende Steigerungen der gesamtwirtschaftlichen Primärrohstoffeffizienz in der Regel keine gleichwertigen absoluten Reduktionen des Primärrohstoffkonsums auslösen werden. Um eine weitreichende Entkopplung globaler Wohlstands niveaus von globalen Extraktionsaktivitäten erreichen zu können, bedarf es vielmehr harmonisierter Politikansätze, um simultan sowohl angebotsseitige wie auch nachfrageorientierte Maßnahmen zur Reduktion von Primärrohstoff-Einsatz wie auch -Konsum zu entwickeln. Zur Weiterentwicklung des nationalen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess muss vor diesem Hintergrund dazu geraten werden, zukünftig neben RMI-basierten Indikatoren auch den Indikator RMC mit in die Berichterstattung aufzunehmen.

## Abstract

The SimRess project set up a modelling and simulation framework that allows the user to assess the effectiveness of resource policy measures in terms of resource use and GHG indicators. A central outcome of these research activities is given by the most recent version of the dynamic simulation model GINFORS3, which enables policy makers to assess potential effects of applications of policy mixes in Germany as well as other national economies in terms of both, environmental implications (resource use and GHG emissions) as well as socio-economic impacts. Based on a comprehensive Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output (EE-MRIO) database, GINFORS3 represents a dynamic EE-MRIO simulation model with global coverage. For each modelled economy, all relevant monetary flows are completely integrated on the macroeconomic scale. The economic activities on the demand and supply side are consistently interlinked with approved statistical accounting schemes which account for the generation, distribution and use of income for different institutional units. It features endogenous projections of interrelated input output structures for 35 industries within each modelled economy as well as endogenous projections of structural changes in final demand components.

This Volume summarises the current methodological framework which has been established within the SimRess project and illustrates the model's power in backward looking evaluation studies as well as forward looking assessment studies. Concerning the later, own projections of prospective future scenarios indicate a high probability for Germany to achieve its long-run resource productivity targets. However, even in cases of extensive boosts in overall resource productivity, it seems rather unlikely that a sufficient decoupling of human wellbeing from resource use might be induced by isolated improvements in resource productivity only. At least, we have to note that achievements in resource efficiency (as measured by the indicator RMI) will generally not be mirrored by equivalent reductions of resource consumption levels (measured by the indicator RMC). This finding calls for the conceptualisation of harmonised policy measures which do simultaneously consider the supply- as well as demand-side drivers of national resource use.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	9
Tabellenverzeichnis .....	15
Abkürzungsverzeichnis .....	19
Zusammenfassung .....	21
Summary .....	30
1 Die Herausforderungen .....	39
1.1 Thematischer Hintergrund .....	39
1.2 Methodischer Hintergrund .....	40
1.3 Kurzzusammenfassung der aktuellen Modelleigenschaften und Ausblick .....	46
2 Methodische Herausforderungen in der Projektion und Simulation von Ressourceneffizienzentwicklungen – Anmerkungen aus ökonomischer Perspektive .....	52
2.1 Stand von Wissenschaft und Technik .....	52
2.1.1 Zur Notwendigkeit von Simulationsstudien im Bereich der Ressourcenpolitik .....	52
2.1.2 Wesentliche Aspekte des Analyse-Designs: Systemgrenzen, Szenario-Konsistenz und Parametrisierungs-Annahmen .....	56
2.2 Wesentliche Herausforderungen bei der Modellierung umwelt-ökonomischer Systemzusammenhänge .....	67
2.2.1 Welche Stellschrauben/Komponenten des (Wirtschafts-) Systems sind unabdingbar? .....	67
2.2.2 Welche Datenquellen stehen für eine solche Modellierung zur Verfügung? .....	69
2.2.3 Wahl des Modellierungsansatzes .....	70
2.3 Das Modell GINFORS3 .....	72
2.3.1 Wie lässt sich GINFORS methodisch einordnen? .....	72
2.3.2 Welche Systemkomponenten sind wie detailliert abgebildet? .....	74
2.3.2.1 Die sozioökonomischen Systemkomponenten .....	75
2.3.2.2 Die umwelt-ökonomischen Systemkomponenten .....	80
2.3.3 Wie wird die direkte und indirekte Rohstoffnutzung in GINFORS abgeschätzt? .....	81
2.3.4 Welche Fragen lassen sich mit dem Modell beantworten? .....	89
3 Blick zurück – Analysen und Abschätzungen zur deutschen Ressourceninanspruchnahme im globalen Kontext .....	91
3.1 Globale und nationale Makro-Entwicklungen seit 1970/1980 .....	91
3.1.1 Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaftsdynamik .....	91
3.1.2 Ressourcenextraktionen und globale Rohstoffproduktivität .....	97
3.1.3 CO <sub>2</sub> -Emissionen und CO <sub>2</sub> -Intensität der Wirtschaftsleistung .....	101
3.2 Wieviel Primär-Rohstoffe nutzt Deutschland? .....	105

3.2.1	Wieviel Primär-Rohstoffe wurden für Konsum und Investitionen verwendet? – Abschätzungsergebnisse für RMC und TMC.....	105
3.2.2	Wieviel Primär-Rohstoffe wurden für Exporte und Importe verwendet? – Abschätzungsergebnisse für die Exporte und Importe in Rohmaterialäquivalenten .....	127
3.2.2.1	Detailanalysen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME)	132
3.2.2.2	Detailanalysen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME)	135
3.2.3	Wieviel Primär-Rohstoffe wurden in Deutschland eingesetzt? – Abschätzungsergebnisse für den RMI und die Gesamtrohstoffproduktivität.....	138
4	Ausblick 2050 – Die Referenzszenarien und Potenzialanalysen.....	145
4.1	Parametrisierte Referenzszenarien: Narrative und Umsetzung im Modellrahmen .....	145
4.1.1	Einleitende Vorbemerkungen .....	145
4.1.2	Szenario-spezifische Vorgaben für exogene Modellvariable .....	147
4.1.2.1	Bevölkerungsentwicklungen	147
4.1.2.2	Weltmarktpreise für Rohstoffe	148
4.1.3	Projektion eines „Industrieland Deutschland“ Szenarios unter business-as-usual Bedingungen.....	152
4.1.4	Projektion „Klimaaktives Deutschland“ .....	154
4.2	Ergebnisse .....	156
4.2.1	Industrieland Deutschland und Klimaaktives Deutschland im Vergleich.....	156
4.2.1.1	Globale Entwicklungstendenzen	156
4.2.1.2	Befunde für Deutschland	166
4.2.2	Das Szenario Klimaaktives Deutschland im Detail .....	181
4.2.2.1	Sensitivitätsanalyse	181
4.2.2.2	Detailergebnisse für die Primär-Rohstofffinanzspruchnahme	189
5	Simulationsstudien zur Abschätzung der Potenziale ressourcenpolitischer Interventionen.....	210
5.1	Einleitender Überblick .....	210
5.2	Möglichkeiten und Grenzen der Simulation von nationalen ressourcenpolitischen Interventionen .....	213
5.3	Simulationsexperimente zu produktionsseitigen Effizienzgewinnen.....	215
5.3.1	Das Untersuchungsdesign .....	216
5.3.2	Ergebnisse - Die Implikationen für Wirtschaft und Umwelt .....	222
5.3.3	Fazit zu den Simulationsexperimenten .....	232
6	Fazit und Ausblick .....	234
7	Quellenverzeichnis.....	240
8	Appendix.....	248

8.1	Gliederungssystematiken .....	248
8.2	Ergänzende Ergebnistabellen der ex-post-Analysen .....	254
8.3	Ergänzende Ergebnisdarstellungen des Umfeldszenarios „Klimaaktives Deutschland“ .....	264
8.4	Details der Parametrisierung zur Folgenabschätzung eines ProgRess II-konformen Politikmixes .....	272
8.5	Ergänzende Informationen zu den Simulationsexperimenten .....	278

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Geografischer Ursprung der Rohstoffgrundlage Deutschlands nach Rohstoffgruppen und Weltregionen, 2011 .....	22
Abbildung 2:	Internationale Entwicklungen des Zeitraums 1995-2015: RMC vs. BIP .....	23
Abbildung 3:	Globale Entwicklungen in den SimRess Umfeld-Szenarien .....	24
Abbildung 4:	Entwicklung von ressourcenpolitischen Indikatoren Deutschlands, 2015 bis 2050.....	25
Abbildung 5:	Bandbreite der projizierten Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes (RMI), 2015 - 2050 .....	26
Abbildung 6:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Rohstoffkonsum, Gesamtrohstoffproduktivität und Primärrohstoffeinsatz.....	28
Abbildung 7:	Thematischer Fokus von ProgRess .....	40
Abbildung 8:	Geografischer Ursprung der Rohstoffgrundlage Deutschlands.....	42
Abbildung 9:	Internationale Entwicklungen 1995-2015: RMC vs. BIP .....	48
Abbildung 10:	Globale Entwicklungen in den SimRess Umfeld-Szenarien .....	49
Abbildung 11:	Beispiel für Ergebnisse der Simulationsexperimente – Effekte auf Deutschlands Gesamtrohstoffproduktivität und Rohstoffbedarf .....	51
Abbildung 12:	Zu beachtende Systemzusammenhänge in der Analyse umweltpolitischer Maßnahmen .....	54
Abbildung 13:	Entscheidungsoptionen bei Anwendung alternativer Simulationsmodelle .....	59
Abbildung 14:	Beispiel konsistenter Bündel für Rahmendaten .....	61
Abbildung 15:	Exemplarische Darstellung alternativer Simulationsergebnisse .....	64
Abbildung 16:	Entwicklung der deutschen Import- und Exportquote.....	68
Abbildung 17:	Konzeptionelle Darstellung einer Multi-Regionalen Input Output Tabelle .....	69
Abbildung 18:	GINFORS3 – schematische Übersicht der Systemgrenzen und Systemstrukturen .....	73
Abbildung 19:	GINFORS3 – Übersicht der sozioökonomischen Systeminterdependenzen.....	76
Abbildung 20:	Identische oder unterschiedliche Materialgehalte bei den Industrie- und Baumineralien - Auswirkungen auf die Abschätzungsergebnisse für Deutschland .....	86
Abbildung 21:	Vergleich der Abschätzungsergebnisse für Deutschlands RMC pro Kopf – SimRess/GINFORS vs. UNEP/EORA.....	87
Abbildung 22:	Wirtschaftswachstum nach Weltregionen seit 1970 .....	92
Abbildung 23:	Bevölkerungswachstum nach Weltregionen seit 1970 .....	93

Abbildung 24:	BIP pro Kopf nach Weltregionen in Relation zum globalen Durchschnitt .....	95
Abbildung 25:	Urbanisierungstrends nach Weltregionen seit 1970.....	97
Abbildung 26:	Intensivierung des globalen Waren- und Dienstleistungsaustauschs seit 1970 .....	97
Abbildung 27:	Entwicklung der globalen Ressourcenextraktionen seit 1980.....	98
Abbildung 28:	Ressourcenextraktionen nach Materialarten und Weltregionen seit 1980 .....	99
Abbildung 29:	Globale Rohstoffproduktivität seit 1980 .....	100
Abbildung 30:	„Welt ohne China“ Rohstoffproduktivität seit 1980 .....	101
Abbildung 31:	CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Weltregionen seit 1970 .....	102
Abbildung 32:	CO <sub>2</sub> -Intensität der Wirtschaftsleistung nach Weltregionen seit 1970 .....	103
Abbildung 33:	Entwicklung des deutschen CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks .....	104
Abbildung 34:	Abschätzungsergebnisse für Deutschlands DMC, RMC und TMC im Jahr 2011 im Vergleich.....	106
Abbildung 35:	Vergleich von Abschätzungsergebnissen für den RMC pro Kopf im Jahr 2011 für ausgewählte Länder .....	108
Abbildung 36:	Vergleich von Abschätzungsergebnissen für den RMC pro Kopf im Jahr 2007 für ausgewählte Länder .....	109
Abbildung 37:	Entwicklung des Rohstoffkonsums (RMC und TMC) pro Kopf in Deutschland, 1995 - 2015.....	110
Abbildung 38:	Internationaler Vergleich des Rohstoffbedarfs für inländischen Konsum und Investitionen (RMC) pro Kopf, 1995 - 2015.....	111
Abbildung 39:	Internationaler Vergleich des gesamten Rohstoffkonsums (TMC) pro Kopf, 1995 - 2015.....	112
Abbildung 40:	Internationaler Vergleich des Biomassebedarfs für inländischen Konsum und Investitionen (RMC Biomasse) pro Kopf, 1995 - 2015.113	
Abbildung 41:	Internationaler Vergleich des Bedarfs an fossilen Energieträgern für inländischen Konsum und Investitionen (RMC fossile Energieträger) pro Kopf, 1995 - 2015 .....	114
Abbildung 42:	Internationaler Vergleich des Bedarfs an Bau- und Industriemineralien für inländischen Konsum und Investitionen (RMC Mineralien) pro Kopf, 1995 - 2015 .....	115
Abbildung 43:	Internationaler Vergleich des Bedarfs an Metallerzen für inländischen Konsum und Investitionen (RMC Metallerze) pro Kopf, 1995 - 2015 .....	116
Abbildung 44:	Deutschlands letzte inländische Verwendung, physisch (Primär-Rohstoffbedarf) und monetär (in Mrd. 2010 €), 1995 - 2015 .....	117
Abbildung 45:	Deutschlands Primär-Rohstoffintensität der inländischen letzten Verwendung, 1995 - 2015 .....	118

Abbildung 46:	Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 1995 - 2015 .....	119
Abbildung 47:	Provenienz der Extraktionen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 1995 - 2015 .....	120
Abbildung 48:	Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte im RME), 2000 - 2011 .....	128
Abbildung 49:	Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe im RME), 2000 - 2011 .....	128
Abbildung 50:	Deutschlands Primär-Rohstoffintensität der Exporte und Importe von Waren und Dienstleistungen, 1995 - 2015 .....	129
Abbildung 51:	Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME), 1995 - 2015.....	133
Abbildung 52:	Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME), 1995 - 2015 .....	134
Abbildung 53:	Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs der Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME), 1995 - 2015 .....	135
Abbildung 54:	Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf der Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME), 1995 - 2015 .....	137
Abbildung 55:	Abschätzungsergebnisse für Deutschlands DMI, RMI und TMR im Jahr 2011 im Vergleich .....	139
Abbildung 56:	Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes (RMI), 2000 - 2011 .....	139
Abbildung 57:	Deutschlands Primär-Rohstoffintensität der gesamten letzten Verwendung und Deutschlands Gesamtrohstoffproduktivität, 1995 - 2015 .....	140
Abbildung 58:	Unterstellte globale Bevölkerungsentwicklungen in den Umfeldszenarien.....	148
Abbildung 59:	Endogene Bestimmung der Weltmarktpreise für Metallerze .....	151
Abbildung 60:	Globale Entwicklungen in den SimRess Umfeld-Szenarien .....	157
Abbildung 61:	Entwicklung der globalen CO <sub>2</sub> -Emissionen in alternativen Zukunftsszenarien.....	160
Abbildung 62:	Entwicklung territorialer CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Umfeldszenarien .	163
Abbildung 63:	Projektion der globalen Ressourcenextraktionen bis 2050.....	164
Abbildung 64:	Jährliche Wachstumsraten des Rohstoffkonsums (RMC) in den USA, der EU27, China und Japan.....	165

Abbildung 65:	Makroökonomische Entwicklungen in Deutschland in den Referenzszenarien .....	167
Abbildung 66:	Entwicklung des deutschen BIP nach Verwendungskomponenten in den Umfeld-Szenarien, 2015 bis 2050.....	169
Abbildung 67:	Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen – Veränderungen im Zeitraum 2015 bis 2050 .....	171
Abbildung 68:	Beschäftigung (Arbeitnehmer) nach Wirtschaftsbereichen – Veränderungen im Zeitraum 2015 bis 2050 .....	172
Abbildung 69:	Entwicklung von klimapolitischen Indikatoren Deutschlands, 2015 bis 2050 .....	174
Abbildung 70:	Wie lange reicht Deutschlands CO <sub>2</sub> -Budget noch?.....	177
Abbildung 71:	Entwicklung von ressourcenpolitischen Indikatoren Deutschlands, 2015 bis 2050.....	180
Abbildung 72:	Sensitivitätsanalyse: Variationen des Privaten Konsums der Region "Rest der Welt" .....	183
Abbildung 73:	Sensitivitätsanalyse: Direkte gesamtwirtschaftliche Reaktionen in der Region "Rest der Welt" .....	184
Abbildung 74:	Sensitivitätsanalyse: Globale Modellreaktionen .....	185
Abbildung 75:	Sensitivitätsanalyse: Globale Reaktionsmuster individueller Materialkategorien .....	186
Abbildung 76:	Sensitivitätsanalyse: Globale Output-Reaktionen ausgewählter Gütergruppen .....	188
Abbildung 77:	Sensitivitätsanalyse: Ergebnisse für Deutschland .....	189
Abbildung 78:	Klimaaktives Deutschland: Entwicklung des Rohstoffkonsums (RMC) pro Kopf nach Materialkategorien in Deutschland, 2015 - 2050 .....	190
Abbildung 79:	Klimaaktives Deutschland: Entwicklung des gesamten Materialkonsums (TMC) pro Kopf nach Materialkategorien in Deutschland, 2015 - 2050 .....	191
Abbildung 80:	Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich des Rohstoffbedarfs für inländischen Konsum und Investitionen (RMC) pro Kopf, 2015 - 2050 .....	192
Abbildung 81:	Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich des gesamten Rohstoffkonsums (TMC) pro Kopf, 2015 - 2050 .....	193
Abbildung 82:	Klimaaktives Deutschland: Entwicklung des Primär-Rohstoffbedarfs (RMC) Deutschlands nach Verwendungskategorien, 2015 - 2050 ...	194
Abbildung 83:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffintensität der inländischen letzten Verwendung Deutschlands, 2015 - 2050.....	196
Abbildung 84:	Klimaaktives Deutschland: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 2015 - 2050 .....	196

Abbildung 85:	Klimaaktives Deutschland: Provenienz der Extraktionen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 2015 - 2050 .....	197
Abbildung 86:	Klimaaktives Deutschland: Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte (Exporte im RME), 2015 - 2050 .....	199
Abbildung 87:	Klimaaktives Deutschland: Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Importe (Importe im RME), 2015 - 2050 .....	202
Abbildung 88:	Klimaaktives Deutschland: Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes (RMI), 2015 - 2050 .....	205
Abbildung 89:	Klimaaktives Deutschland: Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland, 2015 - 2050 .....	206
Abbildung 90:	Automobilproduktion, in GINFORS3 berücksichtigte ökonomische Wirkungszusammenhänge .....	212
Abbildung 91:	SimRess-Potenzialanalysen, Annahmen/Einstellungen zur produktionsseitigen Systemtransformation in der Nutzeroberfläche .....	217
Abbildung 92:	SimRess-Potenzialanalysen, beispielhafte Veranschaulichung von Primärimpulsen .....	219
Abbildung 93:	SimRess-Potenzialanalysen, Ausgelöste Kausalitäten #1 .....	220
Abbildung 94:	SimRess-Potenzialanalysen, Ausgelöste Kausalitäten #2 .....	221
Abbildung 95:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die weltwirtschaftliche Entwicklung .....	223
Abbildung 96:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die globale Ressourceninanspruchnahme .....	224
Abbildung 97:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die globale Energieproduktivität und die globalen CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	225
Abbildung 98:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf makroökonomische Indikatoren Deutschlands .....	226
Abbildung 99:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2050 .....	228
Abbildung 100:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die Beschäftigung nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2050 .....	229
Abbildung 101:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Rohstoffkonsum .....	230
Abbildung 102:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Gesamtrohstoffproduktivität und Primärrohstoffeinsatz .....	231
Abbildung 103:	SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Primärenergieverbrauch, Energieproduktivität und CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	232

Abbildung 104:	Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs Exporte (Exporte in RME), 2015 - 2050 .....	269
Abbildung 105:	Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf der Exporte (Exporte in RME), 2015 - 2050.....	269
Abbildung 106:	Klimaaktives Deutschland: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs Importe (Importe in RME) , 2015 - 2050 ...	269
Abbildung 107:	Klimaaktives Deutschland: Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf der Importe (Importe in RME), 2015 - 2050 .....	270

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Taxonomie der Rohstoffindikatoren.....	41
Tabelle 2:	Taxonomie der Rohstoffindikatoren.....	82
Tabelle 3:	Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten des Bruttoinlandsprodukts (in konstanten 2010 USD) nach Weltregionen.....	92
Tabelle 4:	Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Bevölkerung nach Weltregionen.....	94
Tabelle 5:	BIP (in Tsd. konstanten 2010 USD) pro Kopf in den Weltregionen ....	95
Tabelle 6:	Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten des BIP (in konstanten 2010 USD) pro Kopf nach Weltregionen .....	96
Tabelle 7:	Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Weltregionen .....	102
Tabelle 8:	Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 15 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	121
Tabelle 9:	Biomasse - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	122
Tabelle 10:	Fossile Energieträger - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 15 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015.....	123
Tabelle 11:	Mineralien - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	124
Tabelle 12:	Metallerze - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	125
Tabelle 13:	Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für privaten Konsum im Inland (RMC privater Konsum) der 15 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	126
Tabelle 14:	Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME), 1995 - 2015.....	130
Tabelle 15:	Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME), 1995 - 2015 .....	131
Tabelle 16:	Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	133
Tabelle 17:	Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	136
Tabelle 18:	Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung, 1995 bis 2015 .....	141

Tabelle 19:	Internationaler Vergleich der Dynamik der Gesamtrohstoffproduktivität, 1995 bis 2015 .....	142
Tabelle 20:	Deutschlands Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) und Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung, 1995 bis 2015 – die 15 wichtigsten Produktgruppen .....	143
Tabelle 21:	Exogene Vorgaben zur Entwicklung der Weltmarktpreise fossiler Energieträger .....	152
Tabelle 22:	„Industrieland Deutschland“, Erneuerbare Energien und Kernenergie in der Stromproduktion in wichtigen Nicht-EU-Ländern (Anteile in %) .....	153
Tabelle 23:	„Industrieland Deutschland“, strukturierte Übersicht der weiteren Szenario-Vorgaben .....	154
Tabelle 24:	„Klimaaktives Deutschland“, Erneuerbare Energien und Kernenergie in der Stromproduktion in wichtigen Nicht-EU-Ländern (Anteile in %) .....	155
Tabelle 25:	„Klimaaktives Deutschland“, strukturierte Übersicht der weiteren Szenario-Vorgaben .....	155
Tabelle 26:	Strukturen der Weltwirtschaft: Wachstumsbeiträge ausgewählter Regionen .....	161
Tabelle 27:	Strukturen der Weltwirtschaft: Regionale Anteile am globalen BIP .....	161
Tabelle 28:	Territoriale CO <sub>2</sub> -Emissionen und Anteile der Regionen am globalen CO <sub>2</sub> -Ausstoß .....	162
Tabelle 29:	Regionale Material-Fußabdrücke (RMC) und Anteile am globalen Primärrohstoffkonsum .....	166
Tabelle 30:	CO <sub>2</sub> -Budgets für die Welt, Deutschland und ausgewählte Länder .....	176
Tabelle 31:	Szenario „Klimaaktives Deutschland“, CO <sub>2</sub> -Emissionen Deutschlands nach Energieträgern .....	179
Tabelle 32:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen (RMC) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 15 wichtigsten Produktgruppen .....	198
Tabelle 33:	Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität der Exporte (Exporte in RME), 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen .....	200
Tabelle 34:	Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Exporte (Exporte in RME) und der Primär-Rohstoffintensitäten der Exporte, 2015 - 2050 – die 15 wichtigsten Länder/Regionen .....	201
Tabelle 35:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität der Importe (Importe in RME) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen .....	203
Tabelle 36:	Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Importe (Importe in RME) und der Primär-Rohstoffintensitäten der Importe, 2015 - 2050 – die 15 wichtigsten Länder/Regionen .....	204

Tabelle 37:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) und Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen .....	207
Tabelle 38:	Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich der Gesamtrohstoffproduktivität (2000 = 100), 2015 bis 2050 .....	208
Tabelle 39:	Ausgewählte Handlungscluster zur konkreten Prüfung der Möglichkeiten zur Politikfolgenabschätzung.....	214
Tabelle 40:	Explorative Anwendungsbeispiele der SimRess-Politikfolgenabschätzung.....	215
Tabelle 41:	Annahmen und Vorgaben zu Umfang und Stärke der produktionsseitigen Systemtransformation in den Simulationsexperimenten.....	218
Tabelle 42:	Gliederungssystematik der Wirtschaftsregionen .....	248
Tabelle 43:	Gliederungssystematik der Gütergruppen .....	249
Tabelle 44:	Gliederungssystematik der Wirtschaftssektoren .....	250
Tabelle 45:	Gliederungssystematik in den Kontensystemen der VGR .....	251
Tabelle 46:	Gliederungssystematik der Energieträger .....	252
Tabelle 47:	Gliederungssystematik der Energieträger in der Strom- und Wärmerzeugung .....	252
Tabelle 48:	Gliederungssystematiken der viehwirtschaftlichen Produktgruppen und landwirtschaftlichen Pflanzenarten.....	253
Tabelle 49:	SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen. Tonnen, 1995 .....	254
Tabelle 50:	SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2000 .....	255
Tabelle 51:	SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2005 .....	255
Tabelle 52:	SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2010 .....	256
Tabelle 53:	SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2015 .....	256
Tabelle 54:	Biomasse - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 5 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	257
Tabelle 55:	Fossile Energieträger - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015.....	258

Tabelle 56:	Mineralien - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 5 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	259
Tabelle 57:	Metallerze - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 5 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	259
Tabelle 58:	Biomasse - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	260
Tabelle 59:	Fossile Energieträger - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	261
Tabelle 60:	Mineralien - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	262
Tabelle 61:	Metallerze - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015 .....	263
Tabelle 62:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität Biomasse von Konsum und Investitionen (RMC Biomasse) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen.....	264
Tabelle 63:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität fossile Energieträger für Konsum und Investitionen (RMC fossile Energieträger) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 15 wichtigsten Produktgruppen .....	265
Tabelle 64:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität Mineralien von Konsum und Investitionen (RMC Mineralien) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen.....	266
Tabelle 65:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität Metallerze von Konsum und Investitionen (RMC Metallerze) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen.....	267
Tabelle 66:	Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität von privatem Konsum (RMC privater Konsum) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 15 wichtigsten Produktgruppen.	268
Tabelle 67:	Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung, 2015 bis 2050 .....	271
Tabelle 68:	Liste der 100 wichtigsten Input-Koeffizienten.....	278

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BIP</b>	Bruttoinlandsprodukt
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
<b>BMUB</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
<b>BRIC</b>	Brasilien, Russland, Indien, China
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CGE</b>	Computable General Equilibrium / Berechenbares Allgemeines Gleichgewicht
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>CLD</b>	Causal Loop Diagram
<b>DEU</b>	Domestic Extraction Used / Inländische verwertete Entnahme
<b>DMI</b>	Direct Material Input / Direkter Material Input
<b>DSGE</b>	Dynamic Stochastic General Equilibrium / Dynamisches Stochastisches Allgemeines Gleichgewicht
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EE-MRIO</b>	Environmentally Extended Multi-Region Input-Output
<b>EREP</b>	European Resource Efficiency Platform
<b>ETS</b>	Emissions Trading System / Emissionshandelssystem
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EUROSTAT</b>	Statistisches Amt der Europäischen Union
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>GINFORS</b>	Global INterindustry FORecasting System
<b>GRAM</b>	Global Resource Accounting Model
<b>GTAP</b>	Global Trade Analysis Project
<b>IEA</b>	International Energy Agency / Internationale Energieagentur
<b>IMF</b>	International Monetary Fund / Internationaler Währungsfonds
<b>INFORUM</b>	Interindustry Forecasting at the University of Maryland
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change / Weltklimarat
<b>ISIC</b>	International Standard Industrial Classification of All Economic Activities
<b>KRU</b>	Ressourcenkommission am Umweltbundesamt
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment / Lebenszyklusanalyse
<b>MF</b>	Material Footprint / Materialfußabdruck
<b>MRIO</b>	Multi-Region Input-Output
<b>MRIOT</b>	Multi-Region Input-Output Table
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Distickstoffoxid
<b>NACE</b>	Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté Européenne / Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft

<b>NH<sub>3</sub></b>	Ammoniak
<b>NMVOC</b>	flüchtiger organischer Verbindungen ohne Methan
<b>NOx,</b>	Stickstoffoxide
<b>OECD</b>	Organisation for Economic Co-operation and Development
<b>PPP</b>	Purchasing Power Parities / Kaufkraftparitäten
<b>PTB</b>	Physical Trade Balance / Physische Handelsbilanz
<b>priv. HH.</b>	Private Haushalte
<b>priv. Org. o. E.</b>	Private Organisationen ohne Erwerbszweck
<b>ProgRess</b>	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
<b>RMC</b>	Raw Material Consumption / Finale Inländische Primärrohstoffverwendung
<b>RME</b>	Raw Material Equivalent /
<b>RMI</b>	Raw Material Input / Primärrohstoffeinsatz
<b>SOx</b>	Schwefeloxide
<b>SRU</b>	Sachverständigenrat für Umweltfragen
<b>SUT</b>	Supply and Use Tables / Aufkommens- und Verwendungstabellen
<b>TMC</b>	Total Material Consumption / Gesamter Inländische Primärrohstoffverwendung
<b>TMR</b>	Total Material Requirement / Gesamter Primärrohstoffeinsatz
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>UGR</b>	Umweltökonomische Gesamtrechnungen
<b>UN</b>	United Nations / Vereinte Nationen
<b>UNEP</b>	United Nations Environment Programme
<b>UNSD</b>	United Nations Statistics Division
<b>USD</b>	US-Dollar
<b>VCI</b>	Verband der Chemischen Industrie
<b>VGR</b>	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen
<b>WBGU</b>	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
<b>WIOD</b>	World Input Output Database
<b>WIOT</b>	World Input Output Table
<b>WZ</b>	Klassifikation der Wirtschaftszweige

## Zusammenfassung

Seit Beginn der Industrialisierung konnte ein ausdauernder Anstieg der globalen Ressourcennutzung beobachtet werden. Dieser Befund wird in der wissenschaftlichen Diskussion als nicht nachhaltig angesehen, da bereits heute die mit der Ressourcennutzung einhergehenden Umweltauswirkungen teilweise planetare Grenzen zu überschreiten scheinen (vgl. hierzu bspw. Steffen et al. 2015 oder Hoekstra und Wiedmann 2014). Nachdem inzwischen Vertreter aus Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Politik eine Entkopplung der Ressourceninanspruchnahme vom Wirtschaftswachstum fordern (vgl. hierzu EREP 2014), stellt bspw. auch das Deutsches Ressourceneffizienzprogramm ProgRess II diesbezüglich fest: „Unsere gelebte Art der Ressourceninanspruchnahme ist nicht weltweit übertragbar. Wir sind deshalb aufgefordert, eine möglichst weitgehende Entkopplung von Ressourceninanspruchnahme und Wirtschaftswachstum anzustreben.“ (BMUB 2016, S. 10).

Das Projekt SimRess widmete sich vor diesem Hintergrund einem vertieften Verständnis der Wirkungszusammenhänge und der empirischen Evidenz zu Niveau und Dynamik von Deutschlands Bedarf an biotischen und abiotischen Rohstoffen. Dabei ist zu beachten, dass der Primärrohstoffbedarf Deutschlands nicht nur aufgrund von mangelnden heimischen Rohstoff-Vorkommen, sondern insbesondere auch infolge immer stärker globalisierter Lieferketten inzwischen zu wesentlichen Teilen durch ausländische Extraktionsaktivitäten gestillt wird. Beispielsweise kann hierzu auf Abbildung 1 verwiesen werden, welche für das Berichtsjahr 2011 entsprechende Abschätzungsergebnisse der WU Wien zusammenfasst. Demnach lag der Anteil der Importe am gesamten deutschen Rohstoffkonsum für die Rohstoffgruppen Biomasse, fossile Energieträger und Mineralien in diesem Jahr bei 67-70%. Metallerze wurden so gut wie gar nicht heimisch extrahiert.

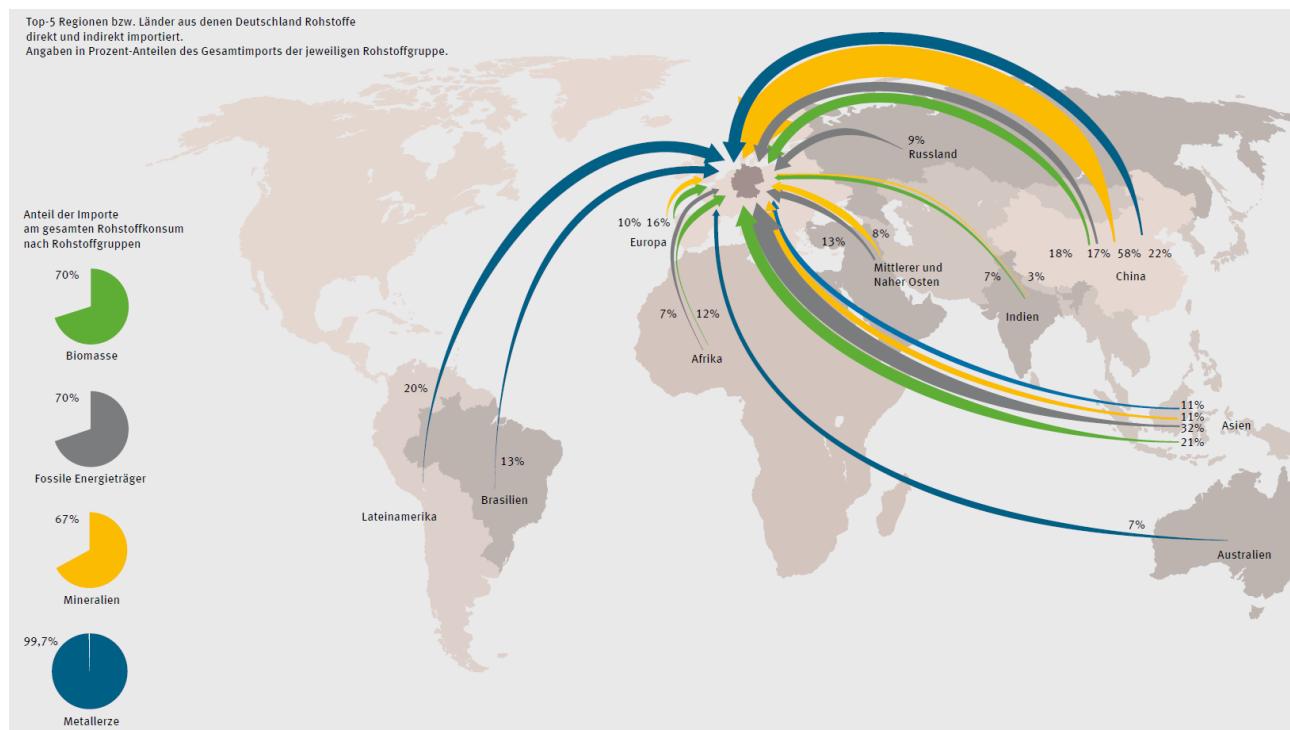
Eine aussagefähige gesamtwirtschaftliche Abbildung der Entwicklung von Primärrohstoff-Bedarf und Wirtschaftswachstum kann daher grundsätzlich nicht in einem nationalen Analyserahmen erfolgen. Die nationale Perspektive genügt nicht den methodischen Ansprüchen eines richtungssicheren Monitorings von Entkopplungsfortschritten und erlaubt keine verlässliche Modellierung von Wirkungszusammenhängen. Wie in diesem Bericht gezeigt wird, sind vielmehr sowohl für das ex-post-Monitoring als auch für die ex-ante Projektion und Simulation globale, multi-regionale Datensätze und Modelle notwendig.

Um die soeben angesprochenen Herausforderungen eines ex-post-Monitorings wie auch einer ex-ante Projektion und Simulation methodisch angemessen zu berücksichtigen, wurde von der GWS in Osnabrück das Modell GINFORS3 entwickelt. GINFORS3 repräsentiert einen globalen Analyseansatz. Das Modell basiert im Wesentlichen auf einem um Umweltstatistiken (Energieverbrauch, Emissionen, Rohstoffextraktionen) ergänzten Multi-Regionalen Input-Output (EE-MRIO) Datensatz: der World Input Output Database (WIOD). Diese detaillierten historischen Beobachtungen werden mittels ökonometrischer Verfahren auf ihre Dynamik und Interdependenzen hin untersucht und dynamisch auf der Grundlage der identifizierten und quantifizierten Systemzusammenhänge in die Zukunft (bis 2050) projiziert. Mittels eines iterativen Lösungsverfahrens werden hierbei die Interdependenzen zwischen den verschiedenen Sub-Systemen berücksichtigt. Das Modell GINFORS3 konnte im Rahmen von SimRess entscheidend weiterentwickelt werden.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Diese Weiterentwicklungen bezogen sich unter anderem auf die Evaluation und Ergänzung der Abschätzungsalgorithmen für Umweltindikatoren (z.B. CO2-Fußabdruck), die Teil-Endogenisierung der Weltmarktpreise für Metallerze auf Grundlage eines soft-links mit dem Modell WORLD6, aber auch auf die Evaluation und Re-Spezifikation einer Vielzahl von Modell-Parametern. Weitergehende Ausführungen zu den methodischen Grundlagen und den in SimRess erzielten Fortschritten können dem Kapitel 2 dieses Berichts entnommen werden.

Abbildung 1: Geografischer Ursprung der Rohstoffgrundlage Deutschlands nach Rohstoffgruppen und Weltregionen, 2011



Quelle: Umweltbundesamt 2016, S. 32-33

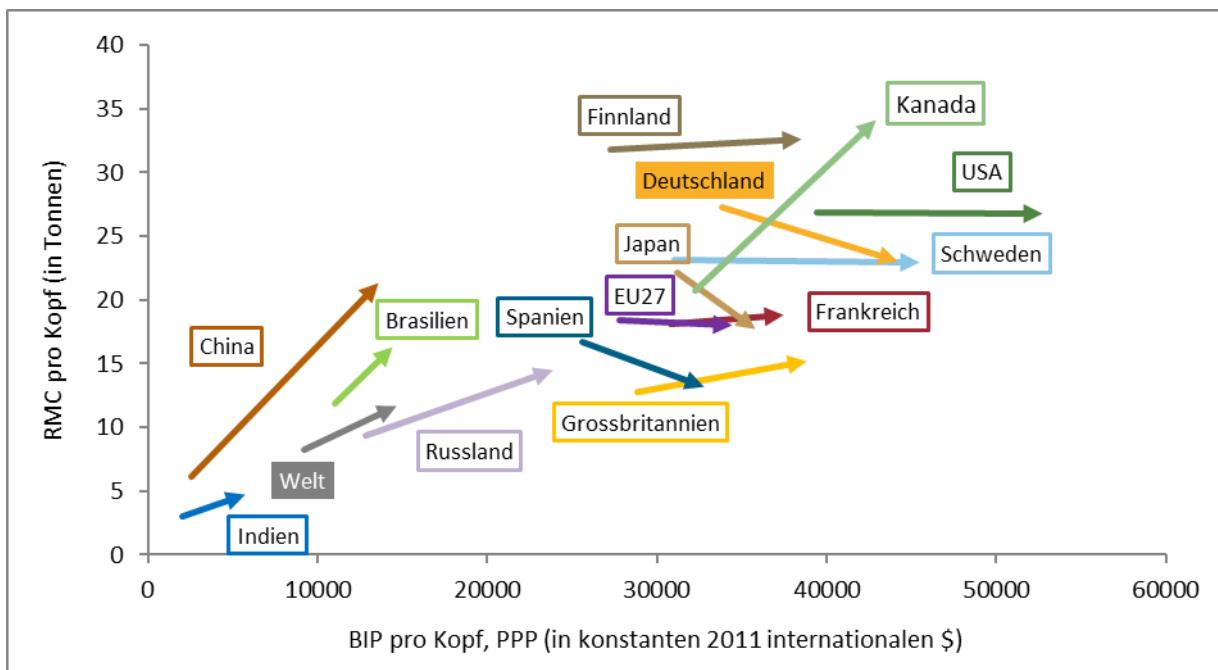
Weitergehende methodische Anmerkungen zu den Modellgrundlagen können Kapitel zwei dieses Berichts entnommen werden. Im Anschluss daran werden aktuelle Befunde aus Anwendungen des Modells GINFORS3 in den Themenfeldern ex-post-Monitoring, ex-ante-Projektion und Simulation in den Kapiteln drei bis fünf vorgestellt. Die wesentlichen Befunde dieser Anwendungen lassen sich dabei folgendermaßen zusammenfassen:

### Ex-post-Monitoring

- (1) Gemäß den GINFORS3-Abschätzungen konnte für den deutschen (pro Kopf-) Primärrohstoffkonsum RMC (im wissenschaftlichen Sprachgebrauch auch häufig als „material footprint“ bezeichnet) in den vergangenen 20 Jahren eine absolute Entkopplung vom Wirtschaftswachstum beobachtet werden (abwärts weisender orangener Pfeil in Abbildung 2). Trotzdem entsprach das deutsche pro Kopf-Niveau des RMC im Jahr 2015 noch ungefähr dem Doppelten des globalen Durchschnitts. Im globalen Durchschnitt ist hingegen der Anstieg der Wirtschaftsleistung mit einem Anstieg der Primärrohstoffanspruchsnahme einhergegangen (grauer Pfeil in Abbildung 1). Eine Umkehr der langfristigen Wachstums-tendenzen der globalen Primärrohstoffanspruchsnahme konnte also bislang nicht erreicht werden.<sup>2</sup> Im internationalen Vergleich zeigen die Abschätzungen zudem, dass Entkopplungsbewegungen (also abwärts weisende Pfeile) relativ selten zu beobachten sind. Zudem sind dabei meist lediglich inkrementelle Fortschritte beobachtbar.

<sup>2</sup> Krausmann et al. (2009) schätzen bspw., dass sich die globale Nachfrage nach Primärrohstoffen zwischen den Jahren 1900 und 2005 absolut ungefähr verachtlicht hat. Siehe bspw. auch folgendes Zitat zur Bedeutung des internationalen Zusammenhangs: „While it is essential and significant for the G7 to champion resource-efficiency, that alone will not be sufficient. Achieving an increase in resource efficiency will require a concerted action by all countries to change the way that resources are produced and consumed across the economic and development spectrum. Genuine and effective international cooperation will make transformation to a resource efficient future a reality.“ (UNEP 2016, Foreword by Achim Steiner)

Abbildung 2: Internationale Entwicklungen des Zeitraums 1995-2015: RMC vs. BIP



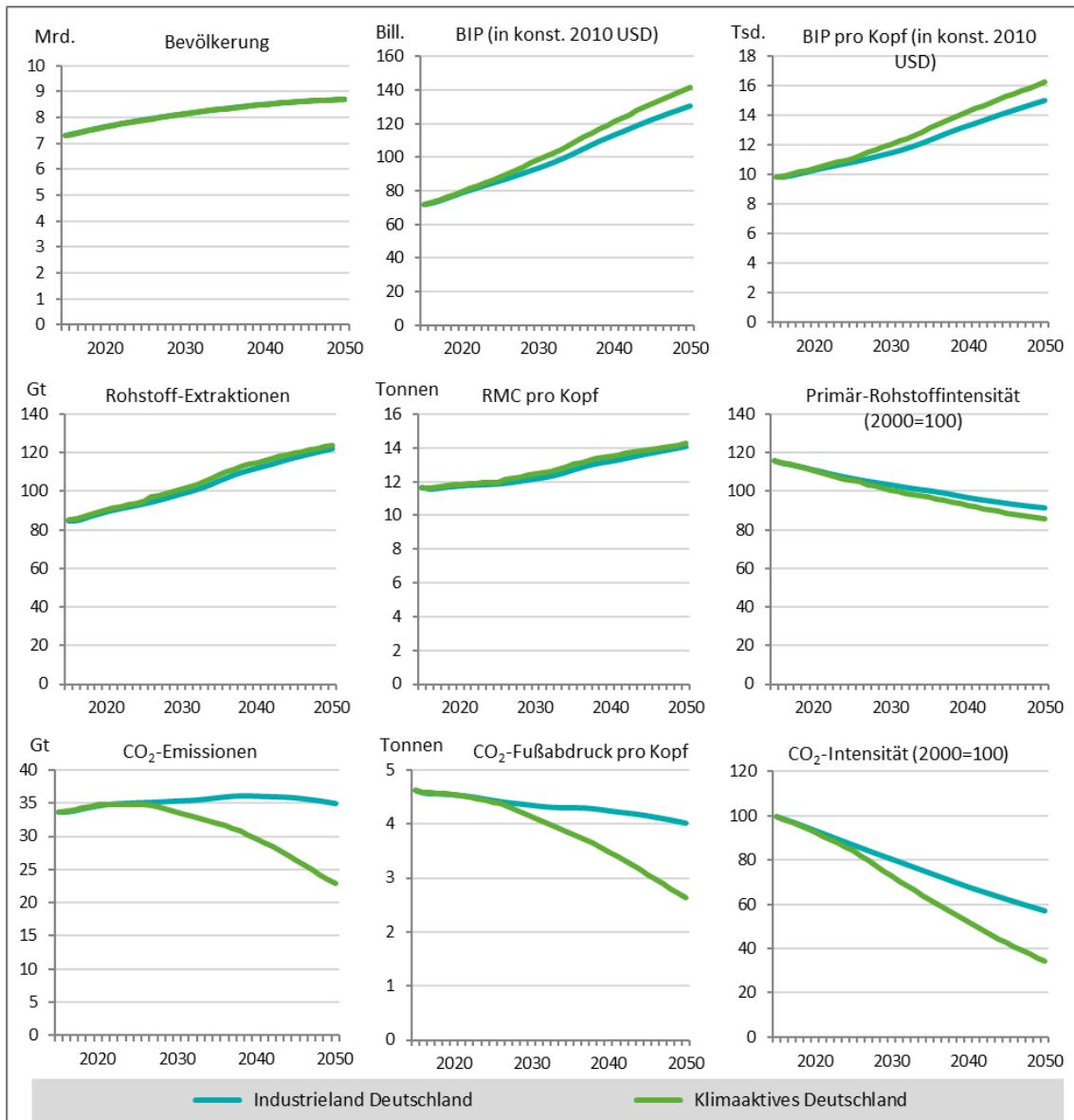
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- (2) Die eigenen ex-post-Abschätzungsergebnisse des deutschen Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC) weisen eine erhebliche Diskrepanz zu den Ergebnissen des Statistischen Bundesamtes auf. Während das Statistische Bundesamt den deutschen RMC pro Kopf für das Jahr 2011 auf 16,2 Tonnen beziffert, kommen die im Rahmen von SimRess durchgeführten Abschätzungen auf einen Wert von 23,4 Tonnen, also einem um 44% höheren Wert. Betrachtet man nur die physische Handelsbilanz in Rohstoffäquivalenten so wird diese Diskrepanz noch frappierender: das Statistische Bundesamt beziffert diese für das Jahr 2011 auf 187 Mio. Tonnen, die SimRess-Abschätzungen auf 818 Mio. Tonnen. Aktuelle Veröffentlichungen, die auf anderen Datengrundlagen als GINFORS basieren, bestätigen grundsätzlich die Dimension der SimRess-Befunde (siehe hierzu UNEP 2017, Giljum et al. 2017, WU Wien 2016, Giljum et al. 2015, Wiedmann et al. 2015) und stellen damit Methodik und Ergebnisse der amtlichen Statistik Deutschlands grundsätzlich infrage.
- (3) Um die wesentlichen Triebkräfte für die historische Dynamik des Primärrohstoffbedarfs einer Volkswirtschaft zu identifizieren, reicht eine Abschätzung von Makro-Indikatoren (RMC, RMI, Gesamtrohstoffproduktivität) alleine nicht aus. Für Deutschland wurden daher von uns weitergehende Detailanalysen durchgeführt, welche eine Abschätzung der Beiträge einzelner Verwendungen, Gütergruppen und Rohstoffgruppen ermöglichen. Hier zeigt sich für den Zeitraum 1995 bis 2015 insbesondere, dass die Nachfrage nach Bauleistungen eine abnehmende Bedeutung für Deutschlands Rohstoffkonsum (RMC) aufweist, wohingegen insbesondere die Nachfrage nach Büromaschinen, DV-Geräten, E-Technik, Feinmechanik u. Optik in deutlich zunehmendem Maße zum RMC beiträgt.

### Ex-ante-Projektionen

Im SimRess-Projekt wurden zwei eigenständige Umfeld-Szenarien in GINFORS3 parametrisiert. Diese Szenarien können als ein „business as usual“ Szenario sowie ein starker Innovations-orientiertes Transformationszenario aufgefasst werden. Das implementierte Szenario „Industrieland Deutschland“ repräsentiert dabei eine „business as usual“ Projektion mit stetigen, aber eher inkrementellen Weiterentwicklungen internationaler energiepolitischer Maßnahmen. Im Vergleich hierzu betrachtet das alternative Szenario „Klimaaktives Deutschland“ die Auswirkungen umfassender energiepolitischer Transformationsbemühungen in einer zweiten Umfeld-Parametrisierung.

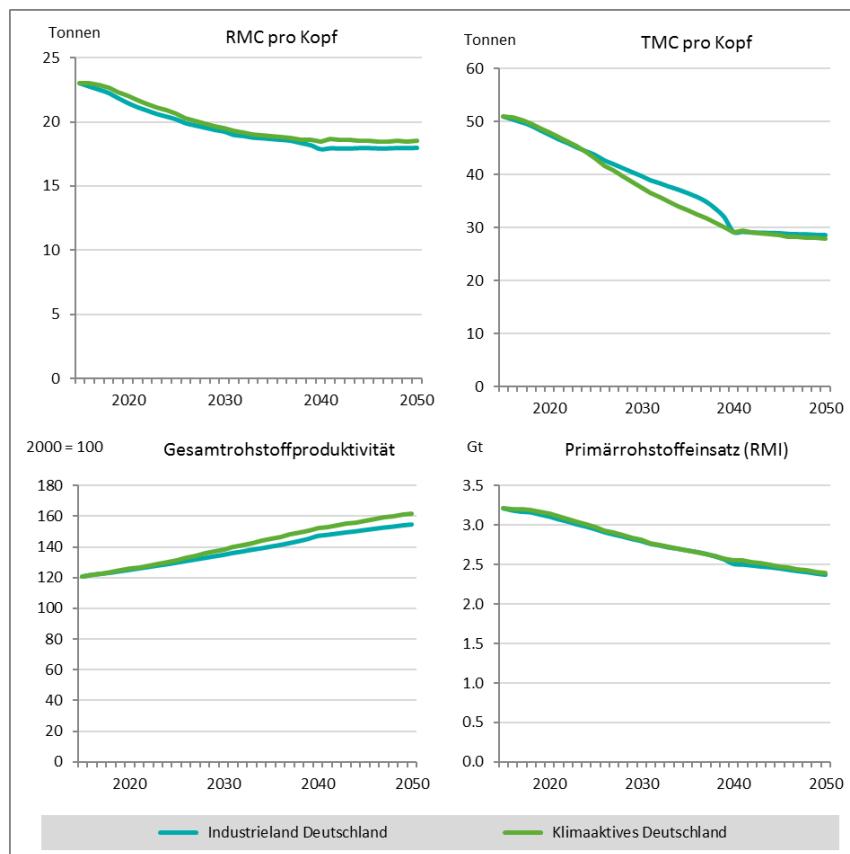
Abbildung 3: Globale Entwicklungen in den SimRess Umfeld-Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- Modellergebnisse zu den Entwicklungspfaden für zentrale globale Indikatoren werden in Abbildung 3 verdeutlicht. In beiden Szenarien wird bis 2050 sowohl ein Anstieg der Weltbevölkerung als auch des BIP pro Kopf erwartet. Projiziert wird, dass sich die globale Wirtschaftsleistung bis zum Jahr 2050 um 82% (Industrieland Deutschland) bzw. 97% (Klimaaktives Deutschland) erhöht. Gleichzeitig wird auch ein weiterer Anstieg der globalen Rohstoff-Extraktionen erwartet. Mit einem Zuwachs um 37 bis 39 Gigatonnen auf etwa 120 Gigatonnen im Jahr 2050 erscheinen diese Steigerungen allerdings relativ moderat im Vergleich zu den historischen Entwicklungen in der jüngeren Vergangenheit. Ein Vergleich mit den Projektionsergebnissen von Hatfield-Dodds et al. (2017) zeigt zudem, dass unsere SimRess-Projektionen durchgehend eine schwächere Entwicklung der globalen Rohstoff-Extraktionsdynamik implizieren. Für die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen wird im Szenario Industrieland Deutschland ein leichter Anstieg bis etwa der 30er-Jahre projiziert, wohingegen im Szenario Klimaaktives Deutschland bis 2050 eine Reduktion um 11 Gigatonnen auf dann 23 Gigatonnen erreicht wird.

Abbildung 4: Entwicklung von ressourcenpolitischen Indikatoren Deutschlands, 2015 bis 2050

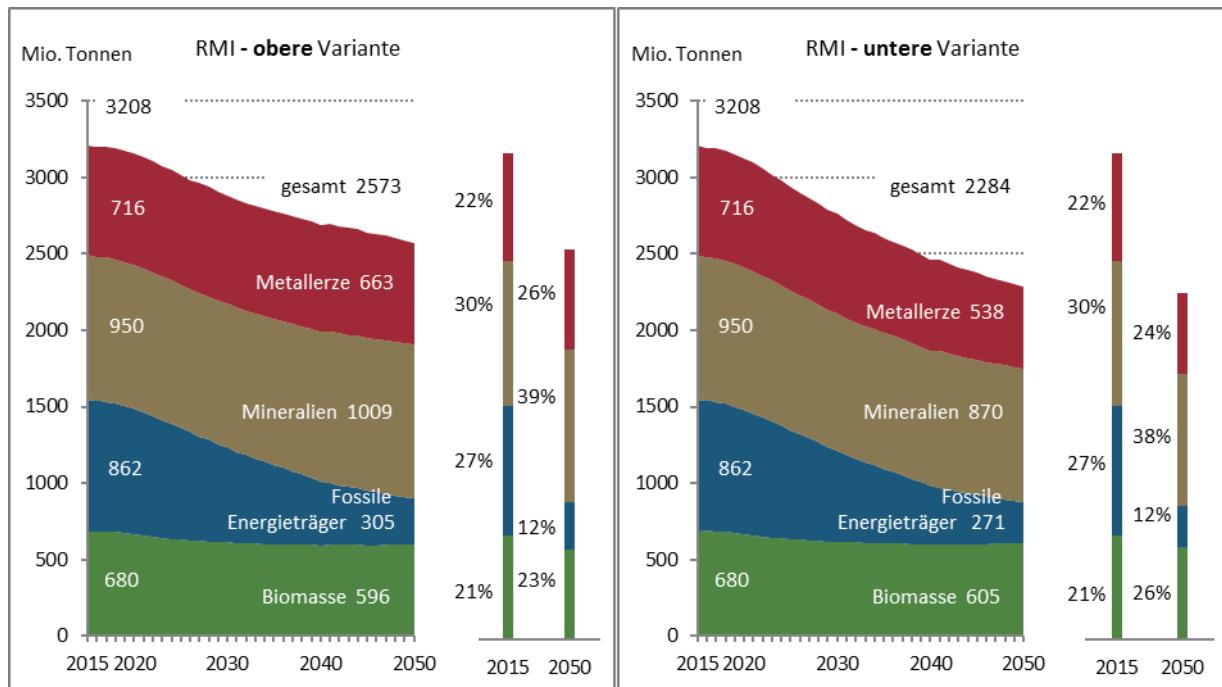


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- (2) Für Deutschland wird in beiden Umfeldszenarien ein moderater Rückgang sowohl des Rohstoffkonsums (RMC) pro Kopf als auch des Primärrohstoffeinsatzes (RMI) projiziert. Für den gesamten Materialkonsum (TMC pro Kopf) wird ein deutlicherer Rückgang erwartet. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass in den Umfeldszenarien von einem langfristigen Ausstieg Deutschlands aus der Braunkohleförderung ausgegangen wird, einer Wirtschafts-Aktivität, die mit extrem hohen ungenutzten Entnahmen verbunden ist. Summa summarum werden für Deutschland Gesamtrohstoffproduktivitäts-Fortschritte in einer Größenordnung von 0,7-0,8 % p.a. projiziert. Der von Golde und Günther, 2016 genannte Zielkorridor von 2-2,5 % p.a. wird demnach deutlich verfehlt. Noch deutlicher fällt die erwartete Diskrepanz zu wissenschaftlich diskutierten Zielwerten (siehe hierzu bspw. Bringezu 2015) jedoch bei dem deutschen RMC pro Kopf aus. Dieser müsste bis zum Jahr 2050 um weitere 70% reduziert werden. Um solch umfassende Verminderungen der Primärrohstoffanspruchnahme realisieren zu können, wird eine weitreichende ökologische Transformation notwendig sein. Anstelle einer Weiterentwicklung vereinzelter Maßnahmen in ausgewählten Handlungsfeldern oder aber individuellen Industriesektoren wird es also zukünftig vermehrt darauf ankommen, das interdependente Zusammenspiel aus soziokulturellen, sozio-technischen und sozioökonomischen Treibern der Ressourcenanspruchnahme nachhaltig zu verändern.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Der Sachverständigenrat für Umweltfragen kommt zu einer ähnlichen Schlussfolgerung: „Eine ökologische Modernisierung wird nicht mehr ausreichen, die [...] verankerte Vision eines ‚guten Lebens innerhalb planetarischer Grenzen‘ zu erreichen. [...] Es bedarf daher einer Erweiterung des Innovationsverständnisses um die Dimensionen kulturellen, gesellschaftlichen und institutionellen Wandels. Vorrangige Aufgabe der Umweltpolitik wird es sein, die Idee entsprechend umfassend ausgerichteter ökologischer Transformationen weiterzuentwickeln und in konkrete Handlungskonzepte umzusetzen.“ (SRU 2016, S. 71).

Abbildung 5: Bandbreite der projizierten Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes (RMI), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- (3) Vergleicht man die Projektionsergebnisse der beiden Umfeldszenarien für die Entwicklung des deutschen Rohstoffkonsums (RMC) in Abbildung 4, so zeigt sich, dass umfassendere energiepolitische Transformationsbemühungen nur marginale Netto-Wirkungen auf den Gesamtindikator haben. Einem verminderten Bedarf an fossilen Energieträgern steht ein vermehrter Rohstoff-Bedarf gegenüber, der sowohl aufgrund des Umbaus der Energieinfrastrukturen als auch aufgrund der ausgelösten Rebound-Effekte zu erwarten ist.
- (4) In komplexen, hochgradig interdependenten Mehrgleichungsmodellen, in denen zentrale Makroindikatoren bottom-up über eine Vielzahl individueller Komponenten bestimmt und nicht direkt erklärt werden, ist ein expliziter Ausweis von Konfidenzintervallen für diese Makroindikatoren ausgesprochen rechenintensiv.<sup>4</sup> Entsprechende Abschätzungen werden daher bei üblichen Modellanwendungen normalerweise unterlassen.

In SimRess wurde allerdings ein alternatives Verfahren zur Abbildung der Sensitivität von Projektionsergebnissen gewählt. Dabei wurden für eine für die globale Wachstumsdynamik wichtige Beobachtung, die Konsumausgaben der privaten Haushalte in der Region „Rest der Welt“, alternative Spezifikationsoptionen für die Trendkomponente in der Erklärung zugrunde gelegt. Abbildung 5 zeigt beispielhaft für die Beobachtung „Primärrohstoffeinsatz Deutschlands (RMI)“ ein Ergebnis dieser Sensitivitätsanalysen. Kommt es in der Region „Rest der Welt“ zu einer höheren als normalerweise im Umfeldszenario „Klimaaktives Deutschland“ projizierten Wachstumsdynamik (= obere Variante) so geht Deutschlands RMI bis zum Jahr 2050 auf 2573 Mio. Tonnen zurück. In der „normalen“ Variante, die nicht in der Abbildung dargestellt ist, wird ein Rück-

<sup>4</sup> Um eine numerische Approximation der Verteilung der geschätzten Modellparameter vorzunehmen, könnten hierzu bspw. umfangreiche Monte Carlo Simulationsstudien durchgeführt werden.

gang auf 2394 Mio. Tonnen projiziert. In der unteren Variante, also bei einer niedrigeren Wachstumsdynamik des privaten Konsums in der Region „Rest der Welt“, wird ein Rückgang auf 2284 Mio. Tonnen projiziert.

### Simulationsexperimente

Eine umfassende Anwendung (einer früheren Version) des Modells GINFORS3 für die nationale, europäische und globale Folgenabschätzung von ambitionierten Maßnahmenbündeln der Klima- und Ressourcenschonungspolitik erfolgte im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts POLFREE („Policy options for a resource efficient economy“).<sup>5</sup> Die dort gewonnenen Erkenntnisse bilden u.a. die Grundlage für eine Stellungnahme der Ressourcenkommission des Umweltbundesamtes (KRU 2016) und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Sollen die langfristigen Umweltziele (der EU) erreicht werden, so bedarf es eines umfassenden Umsteuerns in Politik, Unternehmen und privaten Haushalten und damit der Entwicklung und raschen Implementation eines weitreichenden Instrumenten-Mixes, der ohne eine umfassende ökologische Reform der Steuer- und Abgabensysteme nicht funktionieren wird.
- Eine forcierte Klima- und Ressourcenpolitik (in Europa) würde sich auch wirtschaftlich lohnen.

Vom SimRess-Konsortium wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um aktuelle nationale Politikvorschläge zu identifizieren, welche als erfolgversprechende Bausteine eines entsprechenden Instrumenten-Mixes einer modellbasierten Analyse unterzogen werden sollten. Dieser Literaturüberblick bestätigte allerdings in erster Linie den graduellen Charakter derzeitiger Ansätze im Bereich der Ressourcenpolitik: Bislang werden in der Politik vorwiegend informationsbasierte Instrumente verfolgt. Ökonomische oder aber regulatorische Ansätze werden hingegen bislang nicht ernsthaft diskutiert. Vor diesem Hintergrund nahm das Projektkonsortium daher Abstand von der ursprünglichen Idee, eine praktische makroökonomische Folgenabschätzung für ausgewählte aktuell diskutierte politische Instrumente durchzuführen.<sup>6</sup>

Die in Kapitel 5 vorgestellten modellbasierten Simulationsexperimente zielen somit nicht darauf ab, die individuellen Auswirkungen bei Einführung ausgewählter konkreter Instrumentenansätze abzuschätzen. Stattdessen beleuchten die SimRess-Simulationen die Potenziale und systemischen Implikationen einer umfassenden Ressourceneffizienz-Strategie. Im Sinne einer Potenzialstudie werden dabei weitergehende Detailfragen zunächst ausgeblendet.<sup>7</sup> Unter Beachtung aller dabei involvierten direkten, indirekten und Rebound-Effekte kann auf diesem Wege eine erste Abschätzung zur Beantwortung der folgenden Forschungsfragen hergeleitet werden:<sup>8</sup>

---

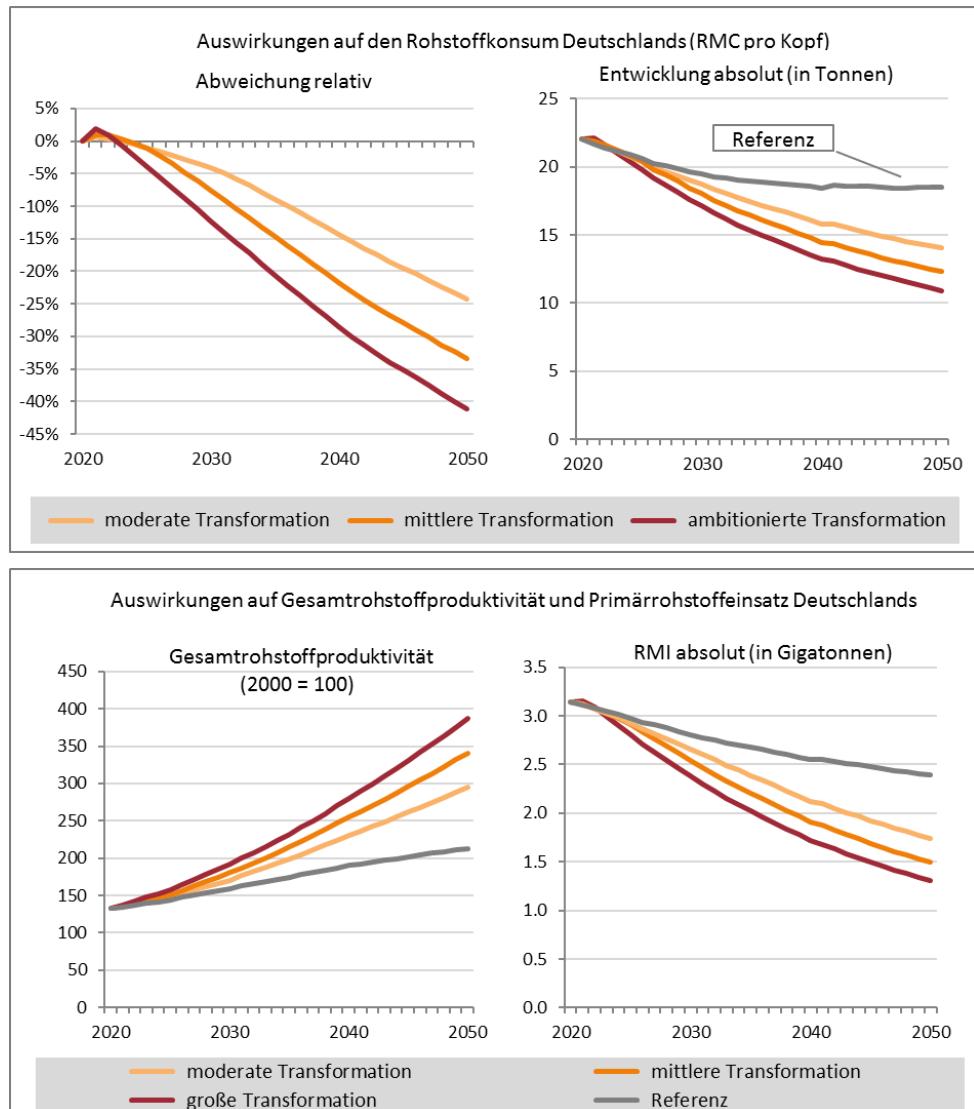
<sup>5</sup> Eine umfassende Ergebnisdokumentation findet sich in Meyer et al. (2015). Zentrale Lehren aus den Modellanwendungen finden sich in Meyer et al. (2016) zusammengefasst. Zentrale Ergebnisse und methodische Fragestellungen werden auch in Distelkamp & Meyer (2017) sowie in Meyer & Ahlert (2017) diskutiert.

<sup>6</sup> Wir möchten betonen, dass diese Entscheidung gemeinsame Bedenken des gesamten Projektteams bezüglich des Ambitionsniveaus bisheriger ressourcenpolitischer Instrumentenansätze widerspiegelt. Insgesamt erscheinen diese Ansätze bislang sämtlich nicht hinreichend, um in einem makroökonomischen Bewertungsrahmen relevante Wirkungen zu erzielen.

<sup>7</sup> So konnte in SimRess weder der Frage nachgegangen werden, welche politischen oder gesellschaftlichen Veränderungen die hier unterstellten transformativen Prozesse auslösen könnten, noch konnte (in Ermangelung entsprechender technischer Expertise im Projektkonsortium) eine detaillierte Abschätzung eventueller technischer Grenzen durchgeführt werden.

<sup>8</sup> Am Rande sei darauf hingewiesen, dass alternativ weitergehende Differenzierungen des Instrumentenmixes sowie der darauf aufbauenden modellbasierten Simulationsstudien des POLFREE-Projekts hätten durchgeführt werden können. Entsprechender verbleibender Forschungsbedarf wurde auch bereits von der Ressourcenkommission festgestellt (KRU 2016, S. 5). Während wir entsprechende Forderungen nach einer Fortführung dieser Art von Grundlagenforschung selbstverständlich unterstützen, sehen wir dennoch auch die Notwendigkeit zu komplementären Potenzialstudien für alternative Politikstrategien. In diesem Sinne verstehen wir unsere SimRess-Simulationen als einen ersten Beitrag zu dieser komplementären Forschungsagenda.

Abbildung 6: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Rohstoffkonsum, Gesamtrohstoffproduktivität und Primärrohstoffeinsatz



Quelle: eigene Darstellung, GWS

Können, allein durch produktionsbezogene Steigerungen der Ressourceneffizienz, in Deutschland bis zum 2050 folgende Ziele erreicht werden:

- Eine Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität um mindestens 120% gegenüber 2010, was einem Wert von mehr als 260 Indexpunkten entspricht?
- Eine Verminderung des pro Kopf Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC) auf ein global nachhaltiges Niveau von 5 bis 8 Tonnen?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden von uns insgesamt drei alternative Simulationsläufe berechnet. Die jeweiligen Experimente unterscheiden sich dabei insbesondere hinsichtlich der unterstellten Annahmen zur Stärke eines autonomen zusätzlichen Ressourceneffizienzfortschritts.<sup>9</sup> In dem als „moderate Transformation“ titulierten Simulationsexperiment beläuft sich dieser auf 1,5% p.a., in der „mittleren Transformation“ auf 2,0% p.a. und im Simulationsexperiment „ambitionierte Transformation“ auf 2,5% p.a. Über einen

<sup>9</sup> Weitere Unterschiede in der Annahmen-Konfiguration der Simulationsexperimente können Kapitel 5 entnommen werden.

Zeitraum von 30 Jahren betrachtet entspricht die ambitionierte Transformation damit in etwa einem (zusätzlichen) Faktor 2. Mit anderen Worten: Durch technischen Fortschritt gelingt im Simulationsexperiment „ambitionierte Transformation“ bis zum Jahr 2050 in etwa eine Halbierung des Bedarfs an rohstoffintensiven Inputs in der Produktion, eine Dimension die nach Meinung der Autoren zumindest für einen Teil der Produktionsprozesse technisch kaum realisierbar sein wird.

Abbildung 6 stellt die zentralen Ergebnisse der Simulationsexperimente dar, die zu folgenden Schlussfolgerungen führen:

- (1) Selbst wenn sich sehr starke und umfassende produktionsseitige Ressourceneffizienzfortschritte realisieren lassen würden, würde sich der Rohstoffkonsum Deutschlands nicht hinreichend reduzieren, sondern den Zielkorridor von 5 bis 8 Tonnen deutlich überschreiten. Soll eine Transformation hin zu einer global nachhaltigen pro Kopf Rohstoffanspruchsnahme in Deutschland gelingen, bedarf zusätzlich eines Umsteuerns seitens der Konsumenten (und Investoren).
- (2) Bereits im Simulationsexperiment „moderate Transformation“ wird eine zielkonforme Entwicklung des Indikators „Gesamtrohstoffproduktivität“ erreicht.

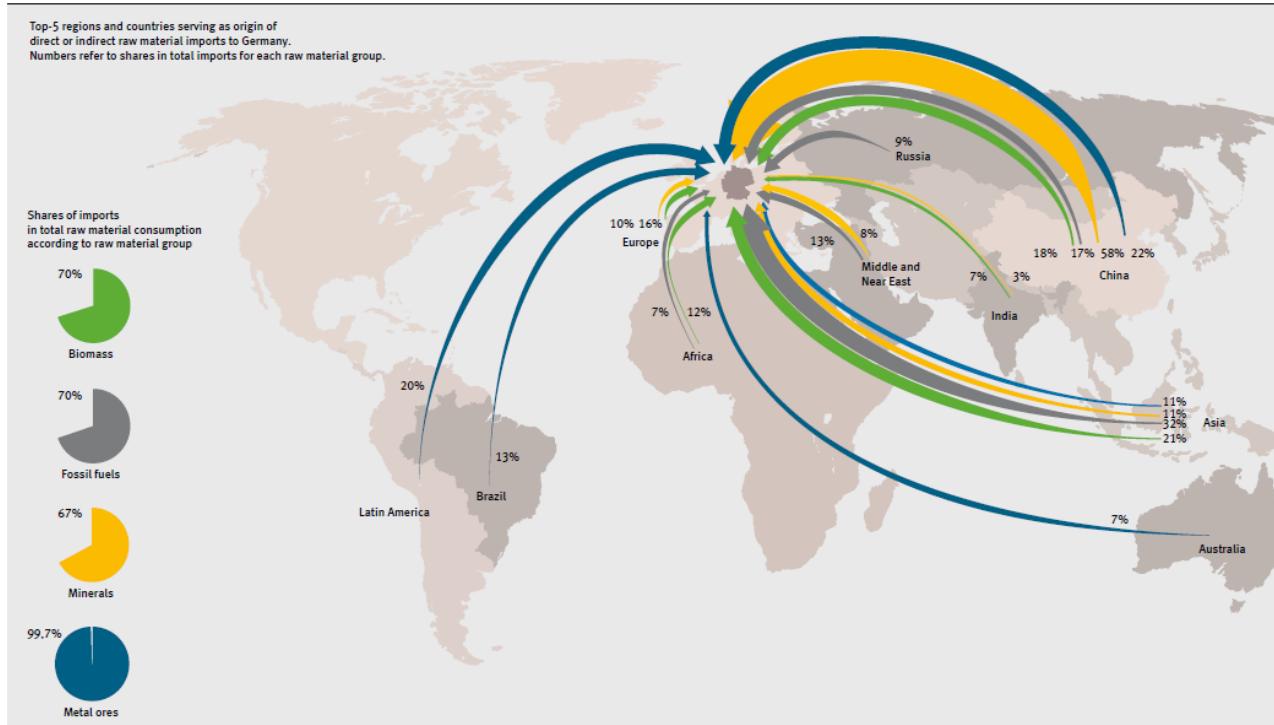
## Summary

Ongoing increases in global resource extractions represent a salient feature of the economic development trends initiating from industrialized production processes. Actually, at least in some cases, the environmental impacts of resource use already seem to exceed planetary limits by now (see, for example, Steffen et al. 2015 or Hoekstra and Wiedmann 2014 in this regard). Following the arguments of representatives from sustainability research, prevailing investment, production and consumption patterns thus have to be reflected critically. Notably in light of an intended decoupling of resource use from economic growth, representatives from business, science, civil society and politics are already demanding for reasonable modifications of contemporary policy frameworks (cf. EREP 2014). And these demands are indeed acknowledged by policy makers. See, e.g., the German Resource Efficiency Program “ProgRess II” in this regard: “Our way of using resources is not transferable worldwide. We are therefore called upon to strive for the widest possible decoupling of resource consumption and economic growth” (BMUB 2016, p. 10).

In this context the SimRess project enabled us to contribute to an enhanced mapping of Germany's global demand for biotic and abiotic raw materials in order to enhance the robustness of empirical assessments of Germany's resource needs. Such assessments are generally challenged by the fact that substantial shares of foreign extraction activities contribute to Germany's total global demand for primary raw materials. See, e.g., in this regard. The illustrated assessment results from the Vienna University of Economics and Business illustrate that in 2011 almost all metal ores required to fulfil Germany's respective raw material needs had been extracted abroad. Considering Germany's raw material needs for the material categories biomass, fossil fuels and minerals, imports contributed to 67-70% to respective total raw material needs. These prominent features emerge not only due to a lack of domestic raw material deposits but, notably, as a result of increasingly globalized supply chains. In light of these globalization effects one can nowadays hardly imagine the case of any industrialized country where a national accounting framework might be deemed sufficient for a solid macroeconomic mapping of its drivers for economic growth and the induced primary raw material demands. At least, this report illustrates that global, multi-regional data sets together with dynamic models which are able to project these data structures into the future, generally offer much better solutions to the tasks of ex-post monitoring assessments and ex-ante scenario simulations.

Being aware of this methodological issue, GWS in Osnabrück has developed GINFORS3; a global, multi-regional dynamic model. The model is essentially based on the World Input Output Database (WIOD), a multi-regional input-output (EE-MRIO) data set supplemented by environmental statistics (energy consumption, emissions, raw material extraction). The model authors analysed the historical development dynamics mapped by this dataset by means of comprehensive applications of econometric methods. Based on statistical findings which have been thoroughly tested against well-established economic theories, the model facilitates global dynamic scenario simulations for projection periods up to the year 2050. Compared to comparative static scenario analyses, GINFORS3 simulations are distinguished by consecutive annual time series results which have been generated in presence of automated control for essential system-interdependencies. With regards to the later, the applied iterative solution procedure also enables GINFORS3 to incorporate interdependencies between various subsystems. A variation of the composition of energy carriers in the energy system does thus, for example, automatically induce corresponding economic reactions on the production side of the model.

Figure 1: Geographical origin of Germany's year 2011 raw material base (according to raw material groups and world regions)



Source: Umweltbundesamt 2016, S. 32-33

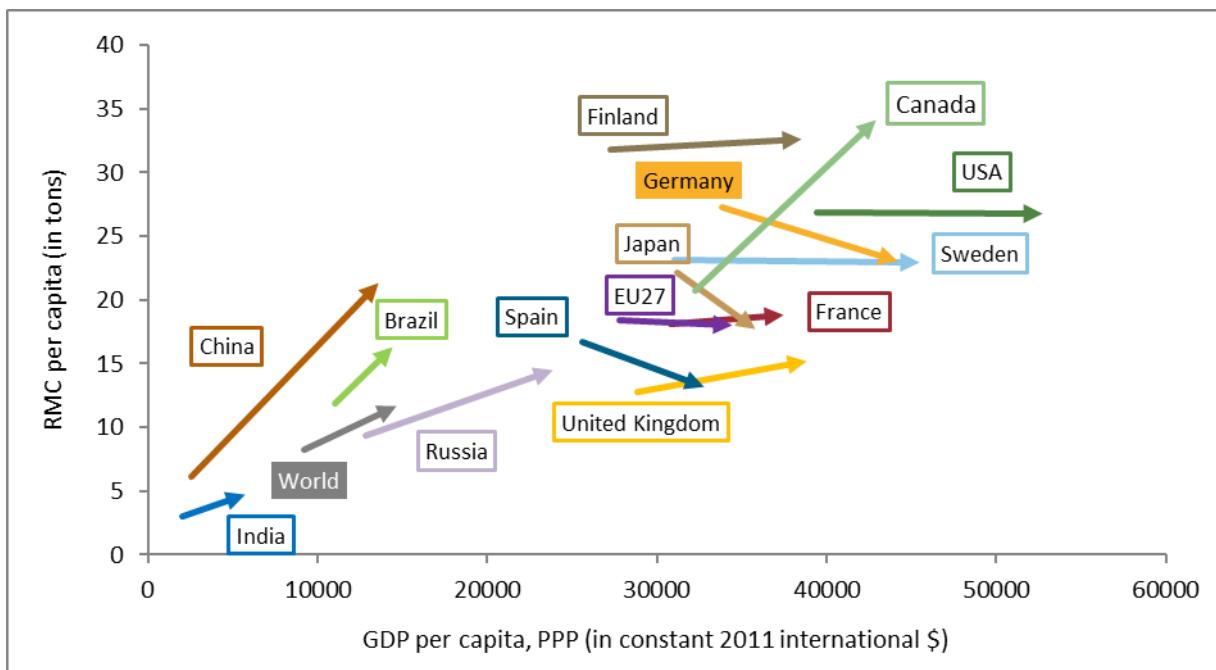
The SimRess project enabled us to realize various methodological advancements of GINFORS3. Compared to previous model versions, these advancements provide deeper insights into the interdependencies between various drivers of the raw material needs of nations. Chapter two of this report elaborates on relevant methodological issues in this regard.<sup>10</sup> Chapters three to five demonstrate the power of this advanced modelling framework in light of selected ex-post-monitoring, ex-ante-projection and simulation applications. The essential findings emerging from these applications might be summarized as follows:

#### Ex-post-Monitoring

- (1) Our GINFORS3 estimates of Germany's per capita "material footprint" (i.e. the consumption of primary raw materials, RMC) indicate an absolute decoupling from economic growth within the past 20 years (downward orange arrow in Figure 2). Nevertheless, in 2015 German per capita RMC-levels did still roughly exceed global average values by about 100%. Globally, economic output increases did on average tend to be accompanied by increased demands for primary raw materials (grey arrow in Figure 1). A reversal of the long-term growth trend in global primary raw material consumption has thus not yet been achieved. In an international comparison, the estimates also show that decoupling (i.e. downward pointing arrows) are relatively rarely observed. In addition, only incremental progress can usually be observed.

<sup>10</sup> Among other things, SimRess facilitated the implementation of complex assessment algorithms for nation-wide environmental indicators like, e. g., CO<sub>2</sub>-footprints in GINFORS3. These modeling activities, which did necessitate significant evaluation and re-specification efforts for many model parameters, might be understood as rather policy-oriented development activities. Apart from that, SimRess did however also advance basic research activities. The partial endogenisation of world market prices for metal ores by means of a soft-link approach to the model WORLD6 might be mentioned as a prominent example in this regard.

Figure 2: International decoupling trends 1995-2015, RMC vs. GDP



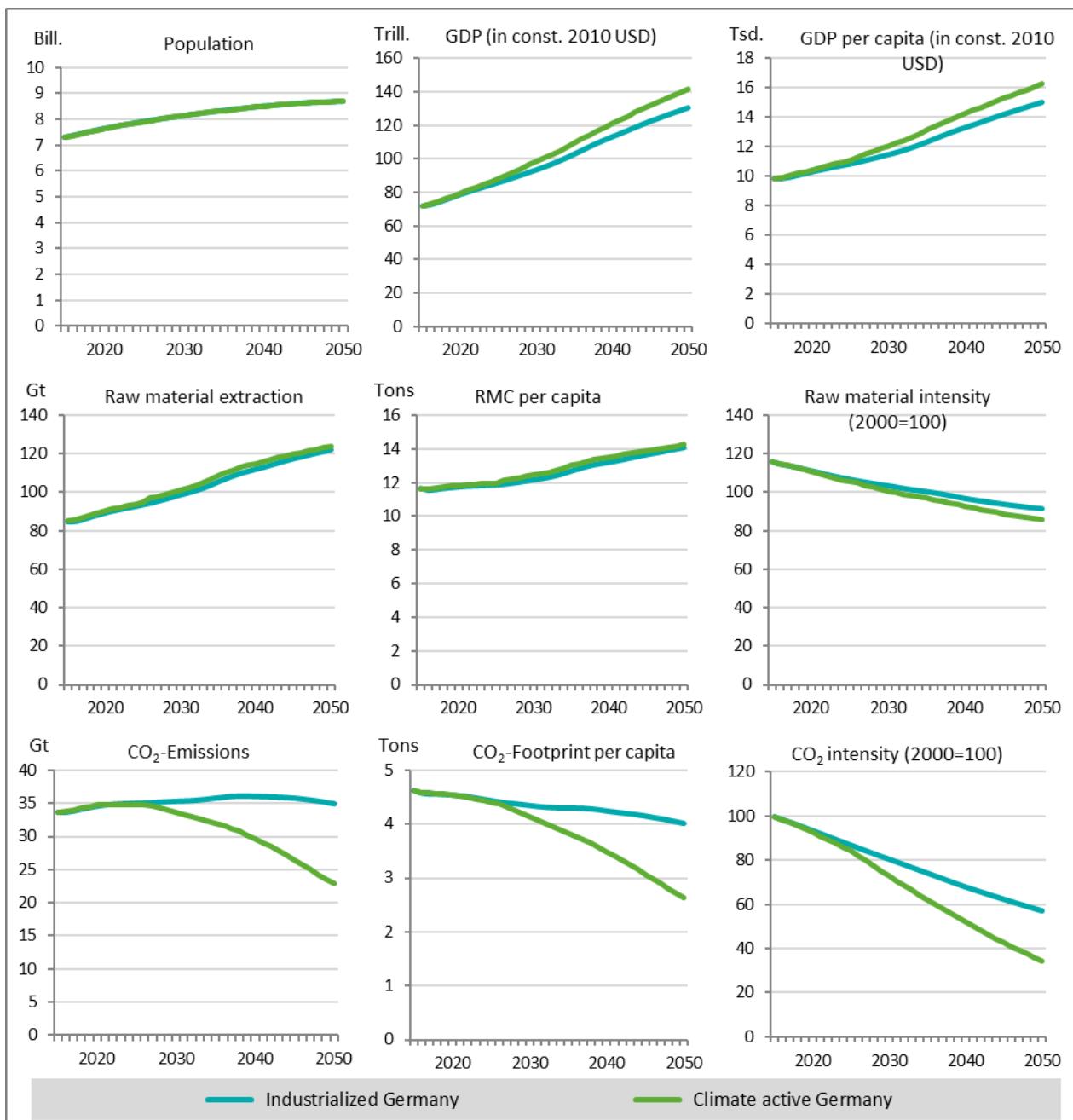
Sources: Own illustration, GWS

- (2) Our own assessment results for Germany's raw material demand for consumption and investment (RMC) deviate to significant degrees from corresponding figures as officially reported by the Federal Statistical Office of Germany. For the reporting year 2011 Germany's Federal Statistical Office estimates Germany's RMC levels to range at about 16.2 metric tonnes per capita. Our estimates for the SimRess project result in 23.4 metric tonnes per capita. This figure exceeds the official metric by 44%. A look at the physical trade balance in raw material equivalents reveals even more striking discrepancies: Whereas the Federal Statistical Office assesses this figure to emerge to 187 million tonnes in 2011, our SimRess estimates result in approximately 818 million tonnes. As recent publications do actually seem to confirm the dimension of our findings (see UNEP 2017, Giljum et al. 2017, WU Wien 2016, Giljum et al. 2015, Wiedmann et al. 2015), currently reported official statistical results have to be put into question.
- (3) A thorough identification of the main drivers of primary raw material demand cannot be achieved by exclusive assessments of usual macro-indicators (RMC, RMI, total raw material productivity). Therefore, we arranged supplemental analyses which enable us to provide detailed estimates of the individual contributions of different uses, product categories and raw material groups to nation-wide primary raw material demands. Applied to the 1995 to 2015 period, this analysis reveals (i.a.) that the demand for construction services is of declining importance for Germany's raw material consumption (RMC), whereas the demand for office machinery, IT equipment, electrical engineering, precision engineering and optics gained more influence on Germany's overall RMC-developments.

### Ex-ante projections

Two self-contained baseline scenarios have been originally parameterized in GINFORS3 for the SimRess project. These scenarios can be understood as a "business as usual" scenario and a more innovation-oriented transformation scenario. The implemented scenario "Germany as an industrialized country" represents a "business as usual" projection with continuous but rather incremental developments of international energy policy measures. In comparison, the second baseline scenario "Climate-active Germany" reproduces the effects of more ambitious transformations of the energy sector.

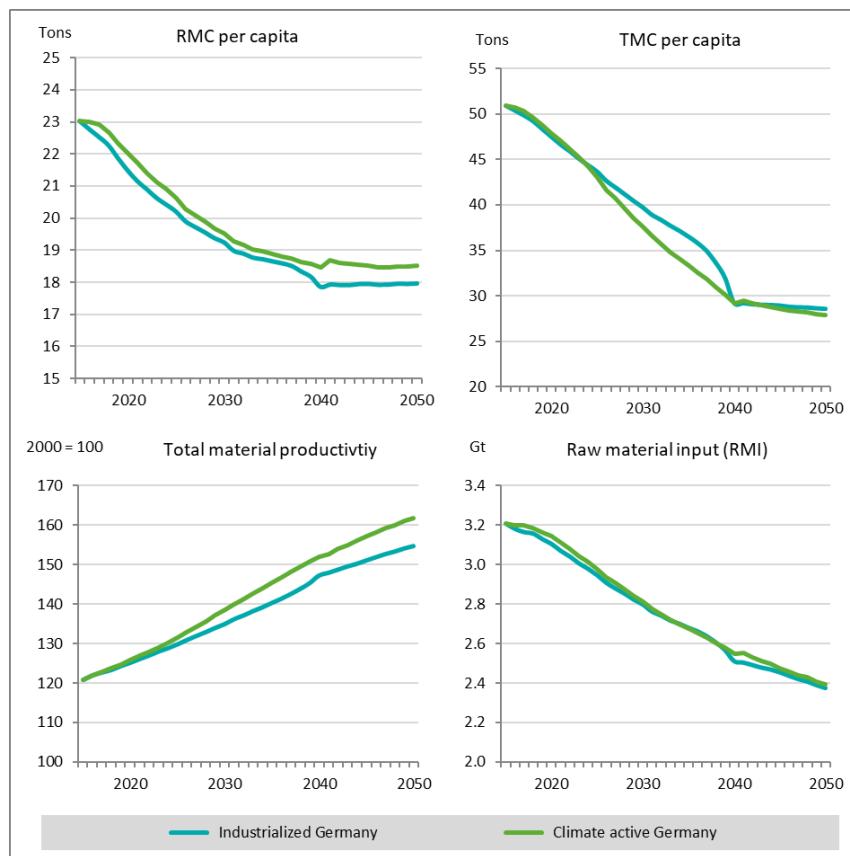
Figure 3: SimRess baseline scenarios, global developments



Source: Own illustration, GWS

- (1) Figure 3 illustrates baseline results for selected key global model indicators. In both baselines, the world's population and per capita GDP are expected to increase by 2050. It is projected that global economic output will increase by 82% (industrialized Germany) and 97% (climate active Germany) by 2050. At the same time, a further increase in global raw material extractions is also expected. However, with overall increases of 37 to 39 gigatonnes to about 120 gigatonnes in 2050, both baseline projections feature relative moderate long-term dynamics. These rather weak global raw material extraction dynamics distinguish the long-term characteristics of our SimRess projections from most recent historical observations as well as comparable projection results (see, e.g., Hatfield-Dodds et al. 2017 who do more or less assume that the most recent historical development patterns might also be perpetuated over the long run). In the scenario for industrialised Germany, global CO<sub>2</sub> emissions are projected to rise slightly until around the 1930s, whereas in the scenario for climate-active Germany, a reduction of 11 gigatonnes to 23 gigatonnes will be achieved by 2050.

Figure 4: SimRess baseline scenarios, results for Germany

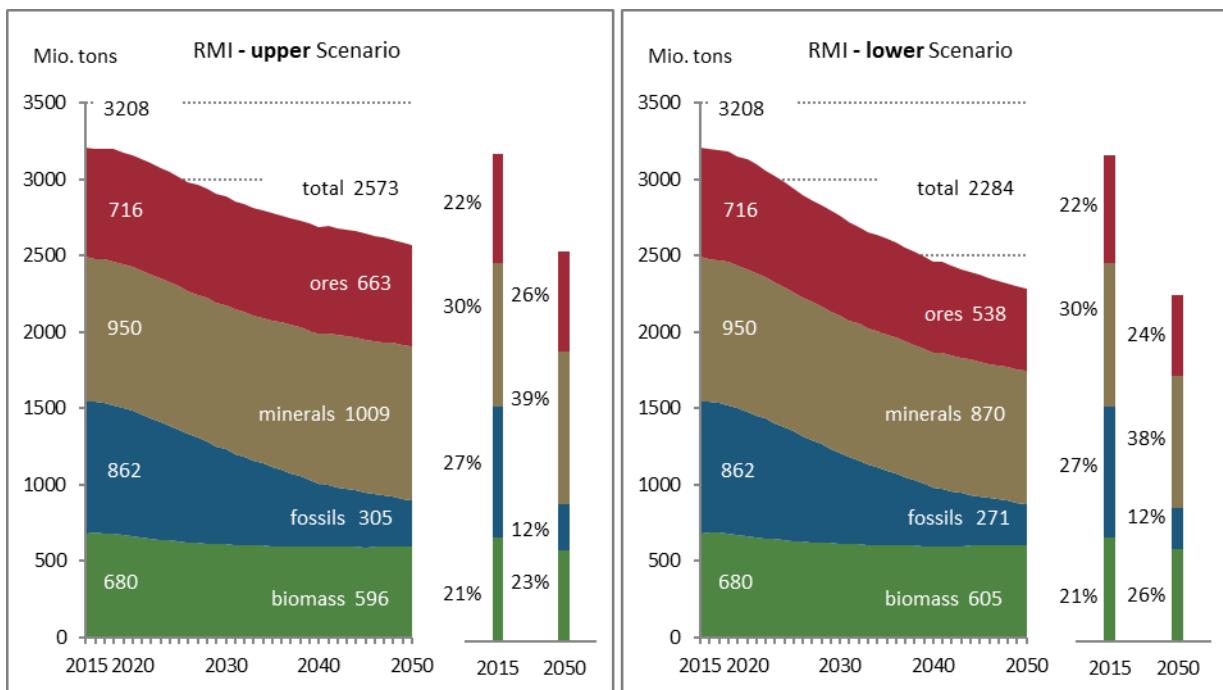


Source: Own illustration, GWS

(2) Considering German resource indicators, both baselines project moderate declines for per capita raw material consumption (RMC) as well primary raw material inputs (RMI). In case of the indicator total material consumption (TMC) these declining long run (per capita) trends are even more pronounced. This finding can be attributed to the fact that both scenarios anticipate an opt-out of German lignite production. Lignite production induces relatively high volumes of unused extractions, which are mapped by the TMC indicator but not by the indicators RMC and RMI. On average, both scenarios expect Germany's overall raw material productivity to grow by about 0.7-0.8% p. a. over the projection period. The reference corridor of 2-2.5 % p. a. (as specified by Golde and Günther 2016) thus cannot be met in both scenarios. However, also Germanys RMC per capita projections imply considerable gaps to scientifically discussed long run target values. Following the arguments of, e.g., Bringezu (2015), Germany's per capita RMC levels should be reduced by a further 70% until 2050. Concerning this matter, both baselines thus illustrate that such comprehensive reductions in the use of primary raw materials might only be achieved by far-reaching ecological transformations. Gradual variations of individual policy measures in selected fields of action (which are considered in our baselines) will not suffice to trigger great transformation processes. Environmental policy is thus challenged to systematically develop extensive policy approaches in order to effectively change the interplay between socio-cultural, socio-technical and socio-economic drivers of resource consumption in a sustainable manner.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> The German Council of Environmental Experts comes to a similar conclusion: "An ecological modernization will no longer suffice to achieve the [...] anchored vision of a' good life within planetary boundaries'. It is therefore necessary to broaden our

Figure 5: German RMI, projection range 2015 - 2050



Source: Own illustration, GWS

- (3) Figure 4 also reveals that comprehensive energy policy transformation efforts (which apply in the scenario "Klimaaktives Deutschland") prove to imply only marginal net impacts on the indicator RMC. Overall, the reduced demand for fossil fuels tends to be roughly offset by an increased demand for construction minerals. This effect mirrors reconstruction needs in the energy sector and associated infrastructure transformation needs as well as rebound effects triggered by involved income shifts.
- (4) The highly interdependent structure of the multi-equation model GINFORS3 features a bottom-up mapping of key macro-indicators by interrelated projections of relevant indicator components. Due to the implied complexity, an explicit disclosure of confidence intervals for projected macro-developments happens to be extremely computationally intensive in such a systemic simulation approach.<sup>12</sup> Corresponding estimates are therefore usually not available in state of the art model applications. In SimRess, however, a complementary approach has been implemented in order to illustrate the sensitivity of projection results. For this, alternative hypotheses about the long run trend dynamics of private household consumption expenditures in the "rest of the world" region have been parametrized. Figure 5 illustrates the resulting findings with a view on Germany's RMI indicator developments in the scenario "Klimaaktives Deutschland". In the "normal" variant (not shown in the figure), a decline to 2394 million tonnes is projected by 2050. However, if the region "Rest of the World" shows a higher growth dynamic (= upper variant), Germany's RMI will only decline to 2573 million tonnes by 2050. In the lower version, i.e. with a lower growth dynamic of private consumption in the "rest of the world" region, a decline to 2284 million tonnes is projected.

understanding of innovation by adding the dimensions of cultural, social and instinctive change. The primary task of environmental policy will be to further develop the idea of correspondingly comprehensive ecological transformations and to translate it into concrete concepts for action "(SRU 2016, p. 71).

<sup>12</sup> Extensive Monte Carlo simulation studies could for example be conducted in order to provide a numerical approximation of the distribution of estimated model parameters.

## Simulation experiments

A former version of GINFORS3 has only recently been applied for a global impact assessment study of various implementations of conceivable ambitious climate and resource conservation policy packages for the European research project POLFREE ("Policy options for a resource efficient economy").<sup>13</sup> The resulting findings have already been adopted by the Resources Commission at the German Environment Agency (KRU 2016) and can be summarised as follows:

- Fundamental changes in policy frameworks, business models and behavioural patterns will be needed in order to fulfil the long-term environmental objectives of the European Union.
- The development and rapid implementation of effectual policy mixes can be understood as mandatory input in this regard. This also demands for a systemic ecological reform of current tax and subsidy systems.
- A forced climate and resource policy (in Europe) would also pay off economically.

The SimRess project organised an extensive literature review in order to perceive contemporary national policy proposals which might contribute significant building blocks to the mandatory transformative policy mix. Given that this review confirmed a gradual character of contemporary approaches in the environmental resource policy domain with a predominant consideration of information-based instruments but rather scant discussions of economic or regulatory instruments, the project consortium finally refrained from the initial idea of operating a practical macroeconomic impact assessment for already adopted policy instruments.<sup>14</sup>

Therefore, the model-based simulation experiments presented in chapter 5 do not intend to measure the impacts of individually selected tangible policy measures. The SimRess simulation setup instead intends to illuminate the potentials and systemic implications of an extensive boost in resource efficiency on the production side. Disregarding the question which political or societal changes might foster such transformative processes and in absence of any detailed exploration of possible technical limitations, our results thus disclose the key effects of a successfully enforced resource productivity strategy.<sup>15</sup> This setup was in particular motivated by the following research question: Might a production-related boost in Germany's resource efficiency be able to achieve by 2050

- a) an increase in overall resource productivity of at least 120% compared to 2010 levels (equivalent to a value of more than 260 index points),
- b) a reduction in the per capita demand for raw materials for consumption and investment (RMC) to a globally sustainable level of 5 to 8 tonnes?

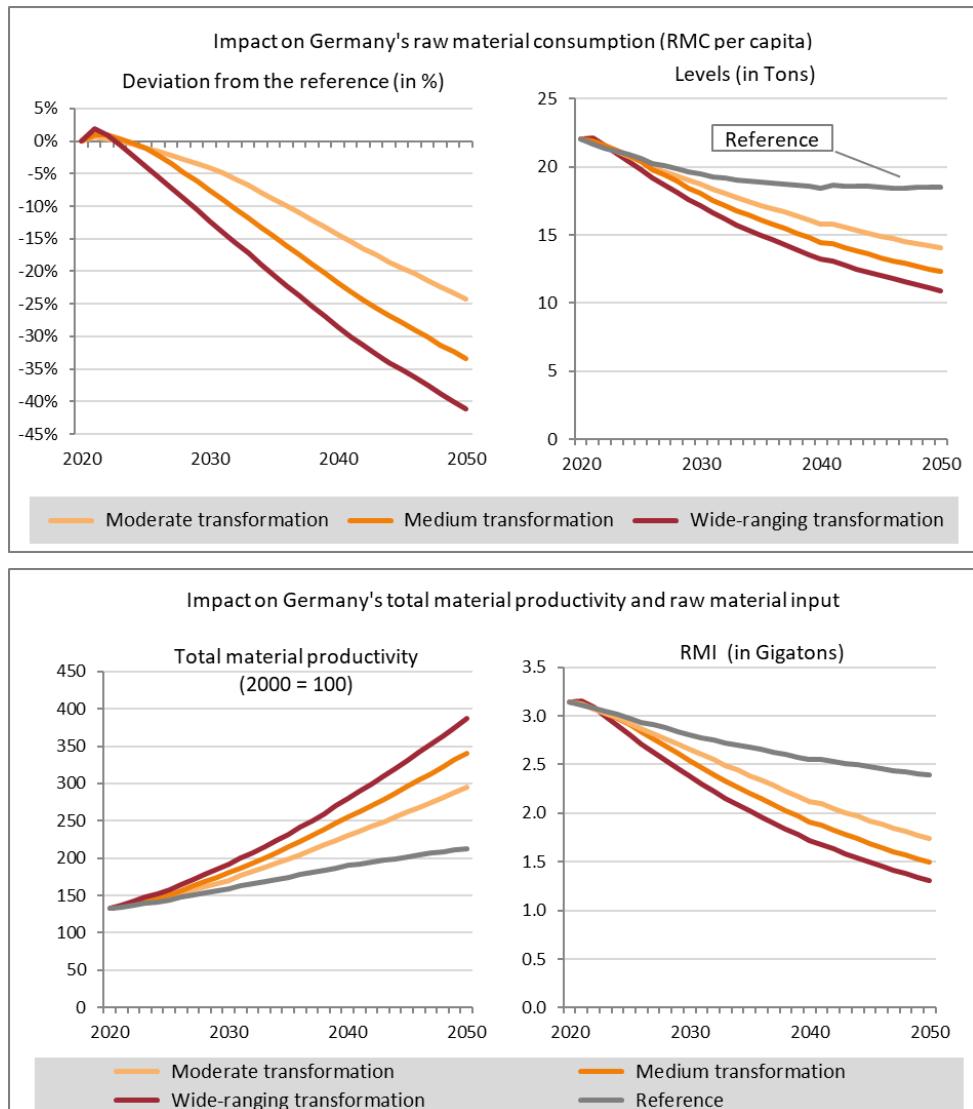
---

<sup>13</sup> A comprehensive documentation of the results can be found in Meyer et al. (2015). Central lessons from model applications are summarized in Meyer et al. (2016). Key findings and methodological issues will also be discussed in Distelkamp & Meyer (2017) and in Meyer & Ahlert (2017).

<sup>14</sup> We would like to emphasise that this decision reflects shared doubts of the project team concerning the ambition levels of already adopted instrument mixes as well as current (policy) elaborations on prospective future instruments. Overall, these approaches simply appear too small in size in order to achieve relevant impacts within a macroeconomic evaluation framework.

<sup>15</sup> It is interesting to note that a further differentiation of the instrument mix and model-based simulation studies of the POLFREE project would have offered another way to proceed. In this regard, remaining research needs have already been identified by the Resource Commission (KRU 2016, p. 5). Whereas we do of course fully support these claims for a continuation of this kind of basic research, we nevertheless recognised the necessity to complement such research activities by tentative assessments of the overall macroeconomic potentials of selected policy strategies. With a focus on resource productivity strategy, our SimRess simulations represent a first contribution to this complementary research agenda.

Figure 6: SimRess simulation results, resource productivity effects on Germany's raw material consumption, overall raw material productivity and primary raw material use



Source: Own illustration, GWS

Three simulation runs with varied assumptions concerning the strength of the analysed autonomous increase in resource efficiency were carried out.<sup>16</sup> In the "moderate transformation" simulation we assumed 1.5% annual increase in resource efficiency. The corresponding figures of the remaining simulation runs entitled "average transformation" and "ambitious transformation" amount to 2.0% and, respectively, 2.5%. Within a 30 years period, the ambitious transformation simulation thus implies an (additional) factor of 2.<sup>17</sup> Judged by Figure 6 we might assess that:

- (1) Even if it were possible to achieve very strong and comprehensive advances in resource efficiency on the production side, Germany's consumption of raw materials would not be reduced sufficiently, but would exceed the target corridor of 5 to 8 tonnes by far. If a transformation towards a

<sup>16</sup> The detailed configurations of individual simulation setups are summarized in chapter 5.

<sup>17</sup> In other words, technical progress in the simulation experiment "ambitious transformation" will approximately halve the demand for raw material-intensive inputs in production by the year 2050. Such substantial technical progress might hardly be technically feasible. Nevertheless, it is justified to analyse such a scenario setting in order to indicate the prospects and limitations of an isolated resource productivity strategy.

globally sustainable per capita consumption of raw materials in Germany is to be successful, isolated resource productivity strategies will not suffice. Such an ambitious target might only be achieved if additional measures targeted also directly on adequate changes in consumers (and investors) behaviour.

- (2) Already in the simulation experiment "moderate transformation", a target-oriented development of the indicator "total raw material productivity" is achieved.

# 1 Die Herausforderungen

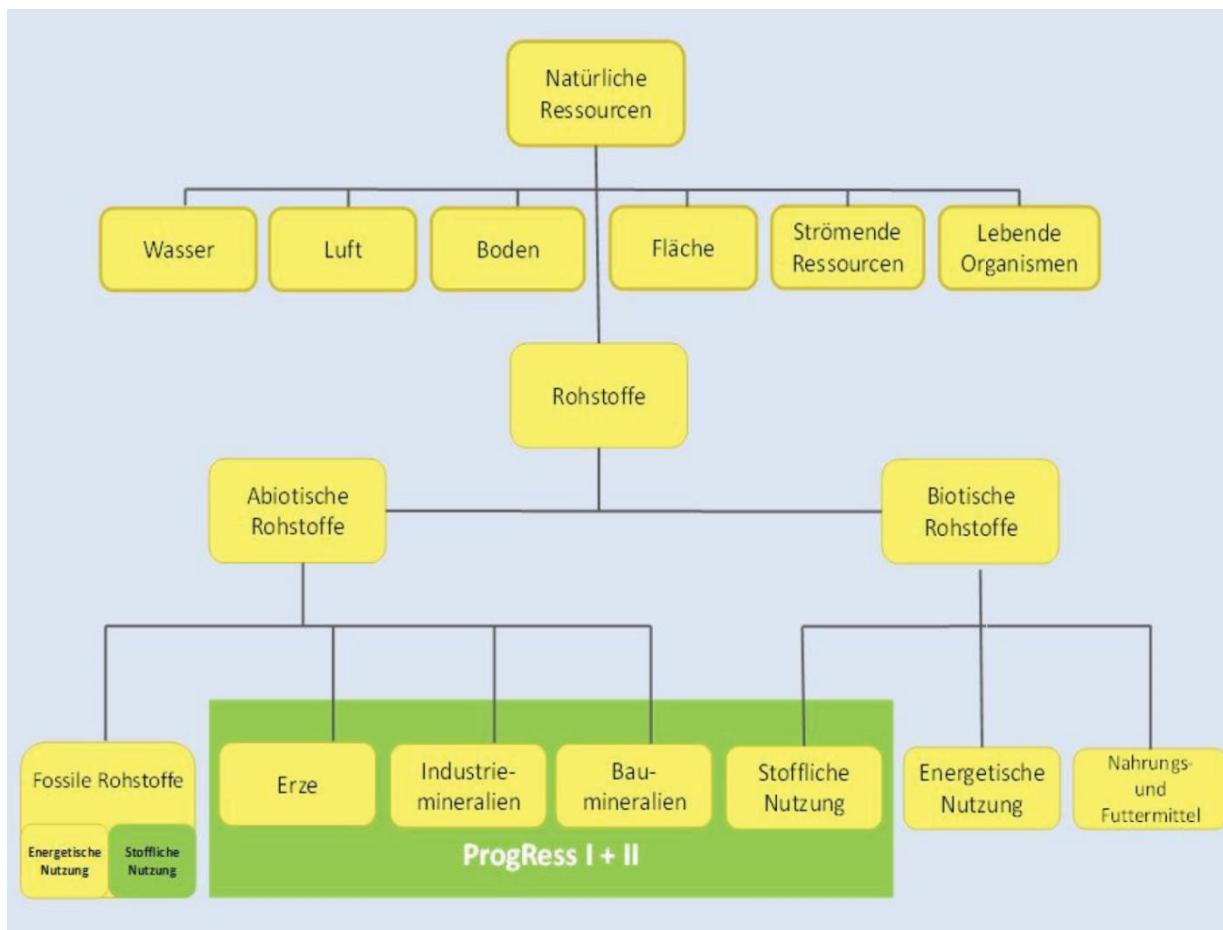
## 1.1 Thematischer Hintergrund

Zur Einordnung des thematischen Hintergrunds unseres Berichts sei zunächst auf Abbildung 7 verwiesen, welche die derzeit durch das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm II (BMUB 2016) fokussierten Rohstoffe hervorhebt. Erklärtes Ziel von ProgRess II ist eine Steigerung der Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wobei die stoffliche Nutzung biotischer sowie abiotischer Rohstoffe im Fokus steht. Zudem wird aber auch der Nexus-Gedanke im Hinblick auf energetische Aspekte angesprochen, indem durch ProgRess II „wo dies sinnvoll ist, verstärkt Energie- und Materialströme gemeinsam betrachtet werden“ sollen (BMUB 2016, S. 35).

Im Hinblick auf die weitere Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms hält ProgRess II folgendes fest: „Des Weiteren werden Modelle auf Makroebene entwickelt, die es erlauben, zentrale Indikatoren zu ergänzen, die die ökonomischen, sozialen und ökologischen Wirkungen der Ressourcenpolitik transparenter machen. Damit können Synergien für andere Umweltbereiche (zum Beispiel Klima, Erhalt der Biodiversität) und für die Gesamtwirtschaft (zum Beispiel Arbeitsplätze, Wettbewerbsfähigkeit, Exporte von Effizienztechnologieanbietern) aufgezeigt werden. [...] Was bisher noch kaum betrachtet wird, ist die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen im Ausland, die durch deutsche Güterimporte verursacht wird. Mit der Zunahme der Importe wird dieser Aspekt der deutschen Ressourceninanspruchnahme immer wichtiger. Daher soll zukünftig auch die mit Produktion und Transport der Importgüter einhergehende Inanspruchnahme von Boden, Wasser, Fläche, Energie und Rohstoffen sowie die Wirkung auf Luftqualität, Klima und Biodiversität ermittelt und einzeln ausgewiesen werden. So können die Größenordnungen der „exportierten“ Ressourceninanspruchnahmen dargestellt und Verlagerungseffekte ins Ausland erkannt werden.“ (BMUB 2016, S. 44).

Der vorliegende Bericht kann vor diesem Hintergrund als ein wesentlicher Beitrag zur makroökonomischen Modellierung zentraler Indikatoren der Rohstoffinanspruchnahme unter umfassender Berücksichtigung gesamtwirtschaftlicher Interdependenzen und Synergien verstanden werden. Insbesondere zeichnet er sich dabei dadurch aus, dass die im obigen Zitat als bisher kaum betrachtet klassifizierten Inanspruchnahmen von Rohstoffen durch Güterimporte sowohl rückblickend für die vergangenen 20 Jahre evaluiert wie auch vorausschauend für die kommenden Dekaden bis zum Jahr 2050 projiziert werden können, wobei auch die energetische Nutzung verschiedener Rohstoffkategorien automatisch mitberücksichtigt wird. Das hierzu im Verlauf des SimRess-Projekts weiterentwickelte dynamische Multi-Regionale (MR) Simulationsmodell GIN-FORS3 berichtet dabei stets über die in Tabelle 1 dargestellten Indikatoren der Primärrohstoffinanspruchnahme für verschiedene biotische wie auch abiotische Rohstoffkategorien.

Abbildung 7: Thematischer Fokus von ProgRess



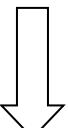
Quelle: BMUB (2016).

## 1.2 Methodischer Hintergrund

Um die Auswirkungen alternativer Maßnahmen zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums von der Ressourceninanspruchnahme umfassend abschätzen zu können, bedarf es einer vollständigen Betrachtung gesellschaftlicher Wirkungszusammenhänge. Hierzu ist die Analyse der direkten Effekte einer Maßnahme (bspw. durch staatliche Investitionsförderung ausgelöste Effizienzsteigerungen industrieller Produktionsaktivitäten) aus einer systemischen Perspektive um eine angemessene Berücksichtigung weitergehender indirekter Auswirkungen (bspw. außenwirtschaftliche Wettbewerbsvorteile aufgrund volkswirtschaftlicher Effizienzsteigerungen) und hieraus im Zeitverlauf resultierender Feedback-Effekte (bspw. durch Einkommenssteigerungen ausgelöste ökonomische Rebound-Effekte) zu ergänzen. Vor diesem Hintergrund diente das SimRess-Projekt dazu, die Entwicklung eines für entsprechende Wirkungsfolgenabschätzungen geeigneten konsistenten Modellrahmens weiter voranzutreiben.

Im Kontext der nationalen Ressourcenschonungspolitik ist dabei zu beachten, dass der Primärrohstoffbedarf der deutschen Volkswirtschaft zu wesentlichen Teilen durch ausländische Extraktionsaktivitäten gestillt wird (vgl. Abbildung 8). Hierzu werden nicht nur Primärrohstoffe zur direkten Weiterverarbeitung im Inland importiert. Neben der gesteigerten Einfuhr von Endprodukten beförderte insbesondere die Globalisierung von Vorleistungslieferketten eine zunehmende Entkopplung inländischer wirtschaftlicher Aktivitäten von heimischen Extraktionsaktivitäten. Der Primärrohstoffbedarf hoch industrialisierter Volkswirtschaften kann daher aufgrund des erreichten Grades wechselseitiger außenwirtschaftlicher Verflechtungen nicht mehr allein durch eine Betrachtung heimischer Extraktionsaktivitäten sowie direkter Primärrohstoffimporte verlässlich abgeschätzt werden.

Tabelle 1: Taxonomie der Rohstoffindikatoren

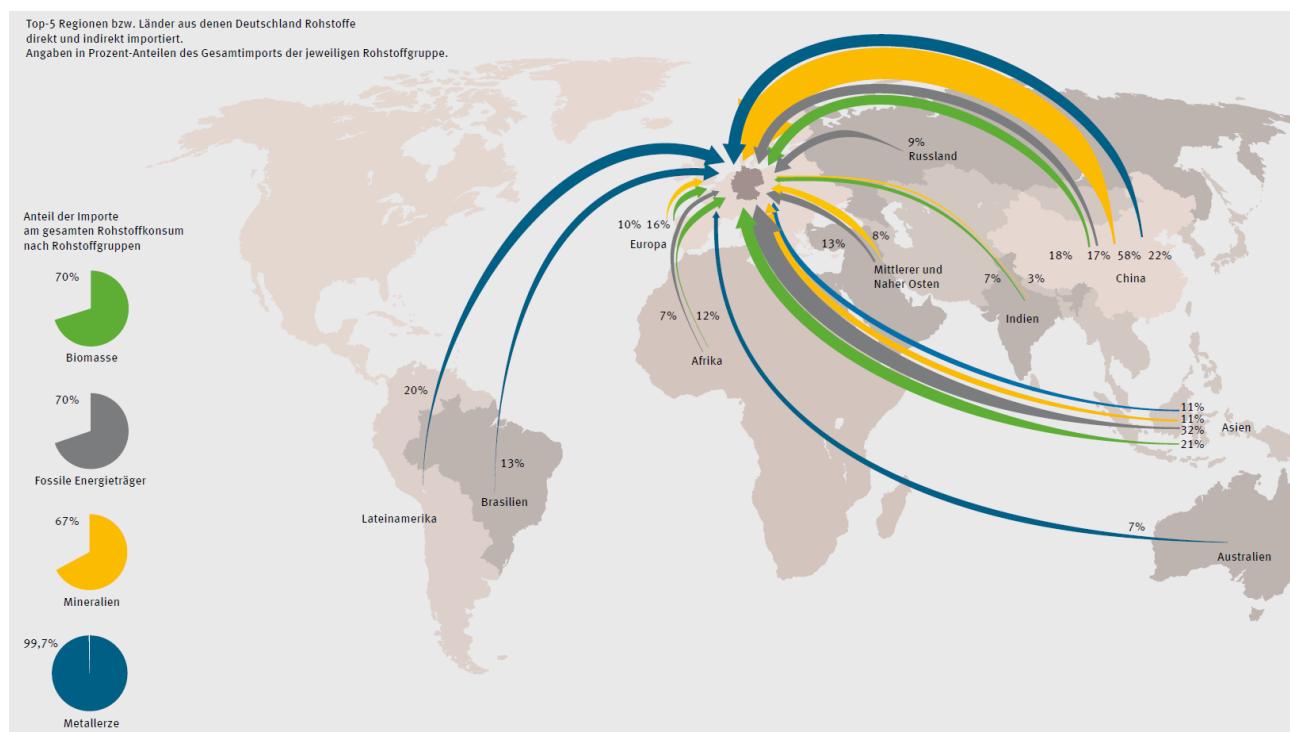
	Definition/Inhalt	Verantwortungsbereich
Rohstoffkonsum ( <b>RMC</b> ) = Materialfußabdruck ( <b>MF</b> )	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> <b>im In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die im Inland <b>für Konsum und Investitionen</b> nachgefragten Güter und Dienstleistungen eingeflossen sind	Verantwortungsbereich der Konsumenten und Investoren im Inland
 + Exporte in RME	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> <b>im In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die im Ausland nachgefragten heimischen Güter und Dienstleistungen ( <b>Exporte</b> ) eingeflossen sind	
= Primärrohstoffeinsatz ( <b>RMI</b> )	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> <b>im In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die Endnachfrage ( <b>Konsum + Investitionen + Exporte</b> ) eingeflossen sind	Verantwortungsbereich der Konsumenten, Investoren und Exporteure im Inland
 - Importe in RME	Gesamte genutzte <b>Rohstoffextraktion</b> <b>im In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die im Inland nachgefragten ausländischen Güter und Dienstleistungen ( <b>Importe</b> ) eingeflossen sind	
= Inländische verwertete Entnahme ( <b>DEU</b> )	Gesamte genutzte <b>Rohstoffextraktion</b> <b>im Inland</b>	Verantwortungsbereich der heimischen Rohstoffextrakteure

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Diese Herausforderungen wurden auch von der Politik bereits erkannt. So wird bspw. durch ProgRes II der aus der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie bereits länger bekannte Indikator „Rohstoffproduktivität“ durch die sogenannte „Gesamtrohstoffproduktivität“ um einen weiteren Indikator ergänzt. Im Gegensatz zur Rohstoffproduktivität werden bei der Gesamtproduktivität sogenannte Rohstoffäquivalente berechnet, wodurch auch für importierte Waren und Dienstleistungen sämtliche benötigten Rohstoffe in die Betrachtung mit eingezogen werden können.<sup>18</sup> Damit gewährleistet dieser Indikator, dass bspw. reine Produktionsverlagerungen ins Ausland nicht fälschlicherweise als Steigerungen der Rohstoffproduktivität interpretiert werden.

<sup>18</sup> Siehe bspw. Günther und Golde (2015) für nähere Erläuterungen der methodischen Hintergründe.

Abbildung 8: Geografischer Ursprung der Rohstoffgrundlage Deutschlands



Quelle: Umweltbundesamt (2016).

Als politische Zielsetzung zur mittelfristigen Entwicklung des Indikators Gesamtrohstoffproduktivität wird von ProgRess II eine Fortschreibung des historischen Trends der Jahre 2000 – 2010 genannt (BMUB 2016). Zur Überprüfung des Grades der Zielerreichung bedarf es kurzfristiger Monitoring-Methoden sowie mittel- bis langfristiger Simulationsrechnungen. Der vorliegende Bericht dient dazu aufzuzeigen, dass zum Abschluss des SimRess-Projekts mit dem globalen dynamischen Simulationsmodell GINFORS3 ein für beide Anwendungsaspekte auch im internationalen Vergleich herausragend geeignetes Werkzeug vorliegt.

GINFORS3 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 Akteursgruppen (Private Haushalte, Unternehmen, Staat sowie Übrige Welt). Angebotsseitig werden 35 Wirtschaftssektoren unterschieden, welche 59 Güter- und Dienstleistungsgruppen produzieren. Im Vergleich zu früheren Modellanwendungen (siehe bspw. Bahn-Walkowiak et al. im Erscheinen, KRU 2016 sowie Distelkamp und Meyer 2016 für jüngste Referenzen aus dem europäischen Forschungsprojekt POLFREE) konnte GINFORS3 im Rahmen des SimRess-Projekts insbesondere um einen detaillierteren Ausweis von Rohstoffäquivalenten sowie der Berechnung globaler CO<sub>2</sub>-Footprints erweitert werden.<sup>19</sup>

Damit wurden bspw. im Vergleich zum Modellstand im Projekt PolRess (Jacob et al. 2015) die Analysemöglichkeiten bei Anwendung des Modells wesentlich verbessert. Im Sinne eines kurzfristigen Monitorings aktueller Entwicklungstendenzen ermöglicht die Verwendung von GINFORS3 nun neben rein historischen Analysen auch ein Nowcasting politikrelevanter Indikatoren bis an den aktuellen Rand. Unter Beachtung

<sup>19</sup> Siehe bspw. Hoekstra und Wiedmann (2014) für eine weiter gefasste Übersicht verschiedener Footprint-Konzepte.

der Tatsache, dass bspw. der amtlichen Statistik in Deutschland derzeit lediglich bis zum Jahr 2011 (vorläufige) Informationen zur Verwendung von Primärrohstoffen in Rohstoffäquivalenten entnommen werden können,<sup>20</sup> erscheint diese Eigenschaft ausgesprochen politikrelevant.

Die damit verbundenen Herausforderungen sind in ihrer Komplexität nicht zu unterschätzen. Um bspw. die Ursachen der durch Rohstoffextraktionen ausgelösten Belastungen planetarer Grenzen sowie Ansatzmöglichkeiten zur Reduktion dieser Belastungen analysieren zu können, bedarf es notwendigerweise einer globalen Betrachtung multi-nationaler und multi-sektoraler Zulieferketten.<sup>21</sup> Im Sinne einer systemischen Analyse sind dabei nicht nur ökonomische Produktionsprozesse darzustellen, sondern auch in ihrer wechselseitigen Interdependenz gemeinsam mit internationalen Konsum- und Investitionsentscheidungen sowie den hieraus resultierenden Beschäftigungs- und Einkommenseffekten abzubilden. In diesem Sinne sollte eine der nachhaltigen Entwicklung verpflichtete Politik der Ressourceninanspruchnahme idealerweise auf einer vollständigen Erfassung sämtlicher globaler makroökonomischer Zusammenhänge unter umfangreicher Abbildung multi-sektoraler Wirtschaftsstrukturen beruhen.<sup>22</sup>

Vor diesem Hintergrund dokumentiert der vorliegende Band des Abschlussberichts zum Projekt SimRess wesentliche methodische Fortschritte zur mittelfristigen Abschätzung zukünftiger nationaler Entwicklungen der globalen Primärrohstoffinanspruchnahme. Damit erfüllt GINFORS3 zentrale Anforderungen im Hinblick auf die für zukünftige Politikfolgenabschätzungen notwendige integrierte Betrachtung ökologischer wie auch sozioökonomischer Entwicklungen.<sup>23</sup> Als ein sog. dynamisches EE-MRIO Modell mit globaler Abdeckung kann GINFORS3 (u.a.) sowohl für biotische wie auch für abiotische Primärrohstoffe als auch für Treibhausgasemissionen die Entwicklung verschiedener globaler Footprint-Konzepte projizieren, wobei gesamtwirtschaftliche Rückkopplungseffekte stets umfassend berücksichtigt werden.

Im Vergleich zu alternativen Anwendungen komparativ-statischer Berechnungsmethoden (bspw. des im Auftrag der Europäischen Union von Schoer et al. (2016) entwickelten Rechentools) sind dabei keine umfassenden exogenen Annahmen (bspw. zur Entwicklung der ökonomischen Aktivität in verschiedenen Weltregionen) notwendig, um eine Baseline-Projektion der interessierenden Modellgrößen herzuleiten. Dank der geschlossenen Totalmodellierung der Wirtschaftskreisläufe sämtlicher abgebildeter Weltregionen können in weitergehenden Szenariosimulationen gesamtwirtschaftliche Rebound-Effekte (Sorrell und Dimitropoulos 2008, Sorrell et al. 2009) systematisch abgebildet werden.

Damit ermöglicht uns jede Anwendung von GINFORS3, (u.a.) eigene MRIO-gestützte Abschätzungen zur zukünftigen globalen Entwicklung der Primärrohstoffextraktionen vorzunehmen. Vor Hintergrund dieser eigenen Expertise, welche unmittelbar auf den grundlegenden Vorarbeiten von Giljum et al. (2008) fußt, erweist sich bspw. das in UNEP (2017) vorgestellte „Existing Trends Scenario“ als ausgesprochen dynamische Projektion der globalen Extraktionsaktivitäten: Während UNEP (2017) davon ausgeht, dass unter Beibehaltung

---

<sup>20</sup> Zudem liegen nur wenige amtliche Beobachtungen vor, da diese Berichterstattung erst im Berichtsjahr 2000 beginnt und keine jährlichen Zeitreihen berechnet wurden (vgl. hierzu bspw. die Darstellung zur Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität in Umweltbundesamt 2016).

<sup>21</sup> Ähnliche Forderungen nach einer systemischen Analyse der Ressourcenfrage finden sich bspw. auch bei UNEP (2016): „It is also highly desirable that policy-makers should attempt to balance a resource- or sector-focused approach with a more cross-sectoral, cross-resource and full supply chain perspective.“ (UNEP 2016, S. 61).

<sup>22</sup> Entsprechende Notwendigkeiten werden bspw. auch vom Deutschen Ressourceneffizienzprogramm ProgRess II anerkannt. Siehe hierzu bspw. folgendes Zitat: „Eine dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung verpflichtete Politik der Ressourceninanspruchnahme muss die Schnittstellen mit anderen Politikfeldern im Blick haben. Neben weiteren Umweltpolitikfeldern, [...] sind dies Gesellschafts- und Sozialpolitik, Industrie- und Wirtschaftspolitik, Wohnungs- und Baopolitik, Verkehrspolitik, Energiepolitik, Ernährungs-, Agrar-, Wald- und Fischereipolitik und Finanzpolitik. So sollen mögliche unerwünschte Nebeneffekte vermieden, Zielkonflikte frühzeitig erkannt und durch ein besseres Zusammenwirken der einzelnen Politiken Synergien erschlossen werden.“ (BMUB 2016, S. 11).

<sup>23</sup> Zur Notwendigkeit einer verstärkten Anwendung integrierter Simulationsansätze in umweltpolitischen Analysen siehe bspw. auch Köhler et al. (2016): „A clear policy need will be for more integrated analysis, stepping away from purely environmental modelling to look at integrated economic, social and environmental analysis“ (Köhler et al., 2016; S. 42).

derzeitiger Entwicklungstrends ein Anstieg der globalen jährlichen Extraktionsaktivitäten auf ca. 185Gt im Jahr 2050 zu erwarten ist, implizieren unsere Modellsimulationen des SimRess-Projekts Steigerungen der globalen jährlichen Extraktionsaktivitäten auf ein Niveau knapp unterhalb von 125 Gt.

Diese Unterschiede lassen sich grundsätzlich relativ klar auf systematische Abweichungen der jeweiligen Projektionsergebnisse für nicht-metallische Mineralien zurückführen. Ein intensiver methodischer Austausch hierzu mit den Autoren der UNEP-Simulationsstudie konnte im Rahmen des SimRess-Projekts nicht umgesetzt werden. Da das für die Modellierarbeiten der UNEP-Studie verantwortliche Forschungsteam (Hatfield-Dodds et al. 2017) zu wesentlichen Teilen in Australien beheimatet ist, erscheint derzeit auch eine zukünftige Förderung entsprechender Forschungskooperationen durch nationale Forschungsprojekte eher unwahrscheinlich. Nachdem die in UNEP (2017) erfolgte Berichterstattung aber auf Initiative der Staats- und Regierungschefs beim G7-Gipfel auf Schloss Elmau erfolgte, bleibt zu hoffen, dass sowohl die G7-Allianz für Ressourceneffizienz, aber auch der jüngst in Hamburg initiierte G20 Resource Efficiency Dialogue, auch zukünftig auf eine kontinuierliche Weiterentwicklung der angewandten Simulationsmethoden und -grundlagen einwirkt. Ansatzpunkte für entsprechende Modellvergleiche können unserem Bericht entnommen werden.

Auf nationaler Ebene konnte im SimRess-Projekt ein sehr konstruktiver Austausch mit den Bearbeitern des parallel durchgeführten UBA-Projekt DeteRess umgesetzt werden (Dittrich et al. im Erscheinen). Unsere Erkenntnis aus diesem Dialog ist, dass der dort verfolgte komparativ-statistische Ansatz im Vergleich zu GINFORS3 wichtige komplementäre Eigenschaften aufweist. Nachdem sich dieser Dialog für uns bereits in der zuvor angesprochenen SimRess-Modellierung der Nachfrage nach nicht-metallischen Mineralien als hilfreich zur Fundierung der Projektionseigenschaften erwies, sind wir davon überzeugt, dass zukünftige gemeinsame Forschungskooperationen darauf abzielen sollten, entsprechende Informationssynergien beider Forschungsansätze umfassend systematisch zusammenzuführen.

Hinsichtlich der implizierten ökonomischen Kausalstrukturen ist GINFORS3 im Vergleich zur überwiegenden Mehrzahl der sonstigen globalen ökonomischen Simulationsmodelle durch einen keynesianischen Charakter gekennzeichnet (siehe hierzu bspw. auch Meyer und Ahlert 2016). Daher werden eventuell denkbare Angebotsrestriktionen derzeit nicht modellendogen abgebildet. Vor Hintergrund altbekannter Diskussionen (Meadows et al. 2004, Meadows et al. 1972) kann diesbezüglich hinterfragt werden, ob über die kommenden Dekaden anhaltende Wachstumsprojektionen ev. global relevante „Limits to Growth“ ignorieren. Um die Relevanz entsprechender Wachstumskritiken eingehend abschätzen zu können, wurde daher in SimRess auch ein intensiver methodischer Austausch mit Anwendern des systemdynamischen Modells WORLD3 verfolgt.

Die Grundstrukturen von WORLD3 wurden zuletzt von Meadows et al. (2004) aktualisiert. Mit einem Umfang von ca. 100 Variablen sowie 80 Parametern (Costanza et al. 2007) ist dieser Modellkern allerdings während der vergangenen 50 Jahre nicht nennenswert weiterentwickelt worden. Nichtdestotrotz wurden auf dieser Basis allerdings in den vergangenen Jahren weitergehende Anstrengungen zur Projektion globaler Extraktionsaktivitäten insbesondere für verschiedene Metallkategorien vorangetrieben.<sup>24</sup> Auch durch SimRess wurden entsprechende Arbeiten an einem WORLD3 ergänzenden Ressourcenmodul gefördert. Wie der entsprechenden Dokumentation entnommen werden kann (Sverdrup und Koca 2017), bezeichnen die Autoren des Ressourcenmoduls das so erweiterte Modell in der Regel als WORLD6.

Neben diesen spezifischen Entwicklungsarbeiten wurde aber, wie bereits erwähnt, im SimRess-Projekt auch explizit den Fragen nachgegangen, ob Informationsflüsse zwischen GINFORS3 und WORLD6 realisiert werden können und ob hieraus relevante Rückwirkungen auf die Projektionseigenschaften beider Modelle re-

---

<sup>24</sup> Siehe hierzu bspw. Sverdrup (2016), Sverdrup und Ragnarsdottir (2016), Sverdrup, Koca und Ragnarsdottir (2015), Sverdrup, Koca, Ragnarsdottir (2014), Sverdrup, Ragnarsdottir, Koca (2014).

sultieren. Hinsichtlich der erstgenannten Frage konnte für Massenmetalle ein explorativer soft-Link zur iterativen Abgleichung von globaler Nachfrage, Weltmarktpreisen und Recyclingaktivitäten zwischen GINFORS3 und WORLD6 realisiert werden. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass im Projektionszeitraum bis 2050 keine signifikanten Anzeichen für potenzielle Angebotsrestriktionen sichtbar wurden. Bis zum Jahr 2050 werden also globale Steigerungen der Extraktionstätigkeiten auch durch eine explizite Berücksichtigung entsprechender Projektionsergebnisse des WORLD-Modells nicht infrage gestellt.

Gleichzeitig wurde hierbei allerdings offenbar, dass die fehlende ökonomische Fundierung der in WORLD unterstellten Kausalstrukturen im Zusammenspiel mit der generell schwachen empirischen Basis dieses Modells keinen weitergehenden methodischen Austausch ermöglichte. In Ermangelung notwendiger empirischer Befunde wurden die in WORLD3 abgebildeten Kausalzusammenhänge gegen Ende der 1960er Jahre lediglich für globale Durchschnittswerte parametrisiert. Die jeweiligen Parameter wurden dabei üblicherweise gemäß Einschätzung der Modellautoren festgelegt und keinen weitergehenden statistischen Falsifikationstests ausgesetzt.<sup>25</sup>

Bei zukünftigen Weiterentwicklungen des Modells GINFORS3 werden wir vor Hintergrund dieser Erfahrungen sicherlich eine weitergehende Abbildung von Bestandsgrößen (wie bspw. „metal stocks in society“) anstreben. Vor Hintergrund unserer Erfahrungen aus dem SimRess-Projekt müssen wir (unter Berücksichtigung üblicher Qualitätsstandards angewandter ökonometrischer Studien) allerdings festhalten, dass die derzeitige Modellierung entsprechender Größen durch WORLD6 nicht den üblichen Ansprüchen wissenschaftlicher Studien genügt.

Insgesamt zielten die soweit eingeführten weitreichenden Zielsetzungen des SimRess-Projekts darauf ab, einen den bisherigen Stand der Technik erweiternden Modellrahmen zur Quantifizierung verschiedener Baselines sowie zur ex ante Abschätzung der Wirksamkeit unterschiedlicher ressourcenpolitischer Maßnahmen in den verschiedenen Baselines zu konstruieren. Alle bisherigen Anmerkungen zusammenfassend können wir festhalten, dass mit der aktuellen Version des dynamischen MRIO-Modells GINFORS3 dieses Projektziel erreicht wurde

Die im Rahmen des SimRess-Projekts seit dem Jahr 2013 durchgeführten Parametrisierungs- und Modellieraktivitäten zur simultanen Berechnung von CO<sub>2</sub>- und Material-Footprints in GINFORS3 markieren auch im internationalen Vergleich einen wesentlichen methodischen Fortschritt. So merken beispielsweise Schandl et al. (2016) zum bisherigen Forschungsstand an: „While research on historical material and energy use has grown over the past couple of decades we know comparatively little about the future trajectories of material and energy use and carbon emissions. So far, a small number of studies have looked at possible trajectories of material use in Europe (Giljum et al., 2008) and globally (Dittrich et al., 2012).“

Hierzu muss erläuternd angemerkt werden, dass mit der im obigen Zitat angesprochene Veröffentlichung von Giljum et al. (2008) die Anwendung einer frühen Version des dynamischen Modells GINFORS angesprochen ist.<sup>26</sup> Die Simulationsfähigkeiten dieser GINFORS3-Vorläuferversionen wurden bereits vor zehn Jahren umfassend gewürdigt (Wiedmann et al. 2007). Im Vergleich zu den von Giljum et al. (2008) durchgeführten dynamischen Simulationsstudien präsentieren Dittrich et al. (2012) lediglich ergänzende statische Extrapolationen verschiedener Trendannahmen, um die Notwendigkeit zur Diskussion ressourcenpolitischer Zielmarken zu veranschaulichen und eine vorläufige Abschätzung globaler Transformationspotenziale vornehmen zu können. Im Vergleich hierzu zeichnen sich die integrierten Simulationsrechnungen von Schandl et al. (2016) durch eine dynamische Fortschreibung der physischen Infrastruktur aus. Da diese dynamische Modellierung aber ausschließlich aus einer naturwissenschaftlichen Perspektive betrieben wird, können

<sup>25</sup> Tatsächlich scheint es so zu sein, dass die konkreten empirischen Grundlagen einzelner Datenreihen sowie der mit ihnen verknüpften Parameter anhand des heutigen Modellcodes auch nicht mehr überprüft werden können, da dieser keine erläuternde Kommentierung enthält.

<sup>26</sup> Für jüngere Anwendungsbeispiele des aktuellen Modells GINFORS3 im Bereich der Ressourcenschonungspolitik siehe bspw. auch Jacob et al. (2015) sowie KRU (2016) oder Distelkamp und Meyer (2016).

elementare Rückkopplungswirkungen zwischen der sozio-technischen und der sozioökonomischen Sphäre von Schandl et al. (2016) nicht analysiert werden.<sup>27</sup>

Auch UNEP (2017) merkt in einem weiter gefassten Literaturüberblick zu den makroökonomischen Effekten der Ressourceneffizienz an, dass im Vergleich zu Aspekten der stofflichen Nutzung bislang wesentlich mehr Studien zu den Effekten bei Effizienzsteigerungen der energetischen Nutzung von Ressourcen vorliegen. Einer generell relativ kritischen Kommentierung orthodoxer CGE-Ansätze werden dabei (sogenannte) makroökonometrische sowie systemdynamische Simulationsmodelle gegenübergestellt.<sup>28</sup> Als Beispiel für Anwendungen eines systemdynamischen Modells wird dabei auf die in UN Environment (2011) präsentierten Ergebnisse des Modells Threshold 21 verwiesen. Der Vergleich des durch UN Environment (2011) dokumentierten Berichtsumfangs des Modells Threshold 21 mit dem in Abbildung 7 vorgestellten thematischen Fokus des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms II verdeutlicht dabei, dass diese Modellversion insbesondere auf eine Abbildung der nicht durch Progress II adressierten Ressourcen (wie bspw. Boden und Wasser) sowie die energetische Nutzung fossiler Rohstoffe abzielte. Als wesentliche Referenzen für Simulationsmodelle mit expliziter Abbildung zukünftiger Entwicklungen der Primärrohstoffanspruchnahme werden von UNEP (2017) hingegen die beiden makroökonometrischen Modelle E3ME und GINFORS3 identifiziert.

Zu der dort referierten Anwendung von E3ME im Auftrag der Europäischen Kommission (CE und Biols 2014) ist allerdings kritisch anzumerken, dass die diese Modellversion keine globale geografische Abdeckung aufweist. Wie Abbildung 8 verdeutlicht, wird aber bspw. der deutsche Rohstoffkonsum überwiegend durch Importe aus außereuropäischen Weltregionen bedient. Da sich dabei in Abhängigkeit von der betrachteten Rohstoffkategorie unterschiedliche Weltregionen mit jeweils unterschiedlichen Produktionsstrukturen als besonders relevant erweisen (vgl. hierzu bspw. die abgebildeten Rohstoffströme aus Brasilien, Russland und Indien), sollten Analysen der globalen Rohstoffanspruchnahme entsprechende regionale Charakteristika möglichst umfassend berücksichtigen können. Ohne an dieser Stelle in eine weitergehende methodische Diskussion einsteigen zu wollen ist zumindest intuitiv verständlich, dass eine ausschließliche Modellierung europäischer Entwicklungen (wie von CE und Biols 2014 vorgenommen) zwangsläufig wesentliche globale Details außer Acht lassen muss und somit auch keine vollständige Betrachtung multinationaler Lieferketten und hieraus resultierender internationaler ökonomischer Feedback-Strukturen aufweisen kann. Im Vergleich hierzu kennzeichnet unsere eigenen Vorarbeiten (KRU 2016, Distelkamp und Meyer 2016) bereits eine globale dynamische Modellierung. SimRess ermöglichte es uns, die dort angewandte GINFORS3-Version insbesondere um einen detaillierteren Ausweis von Ressourcenindikatoren und CO<sub>2</sub>-Footprints zu ergänzen.

### 1.3 Kurzzusammenfassung der aktuellen Modelleigenschaften und Ausblick

Nachdem im vorherigen Unterabschnitt unter Verweis auf thematisch vergleichbare Simulationsansätze dargelegt wurde, dass sich die aktuelle Modellversion GINFORS3 auch im internationalen Vergleich als „state of the art tool“ zur Umsetzung dynamischer Simulationsstudien zur Erforschung des Ressourcen-Nexus erweist, erfolgt an dieser Stelle eine übersichtliche Zusammenfassung des derzeitigen Berichtsumfangs

<sup>27</sup> Bspw. werden in diesem Ansatz keine Rückwirkungen von physischen Veränderungen der Infrastruktur auf ökonomische Investitionsströme berücksichtigt. Dies bedeutet, dass bei einer Simulation von Veränderungen des Kapitalstocks bspw. die hierzu notwendigen Investitionsausgaben nicht abgebildet werden können.

Ein weiteres Beispiel für fehlende Feedback-Effekte ist in diesem Ansatz dadurch gegeben, dass die rein physikalisch simulierten Veränderungen der Materialeffizienz keine Auswirkungen auf die Kosten- und Preisentwicklungen in den durch diese Effizienzänderungen betroffenen Wirtschaftssektoren auslösen können. Damit ist dieser Ansatz bspw. nicht in der Lage, die gesamtwirtschaftlichen Rebound-Risiken von Effizienzstrategien abzubilden.

<sup>28</sup> Ein wesentlicher Kritikpunkt ist dabei insbesondere durch die üblicherweise in CGE-Modellen fehlende Abbildung von Marktvollkommenheiten (wie bspw. unfreiwillige Arbeitslosigkeit) gegeben: „... neither the IEA (2012) modelling of their Efficient World Scenario, nor the Böhringer and Rutherford modelling of the EMF (2015) circular economy report employment changes from the resource efficiency increases. This suggests that these are not significant outputs from the models employed.“ (UNEP 2017, S. 107)

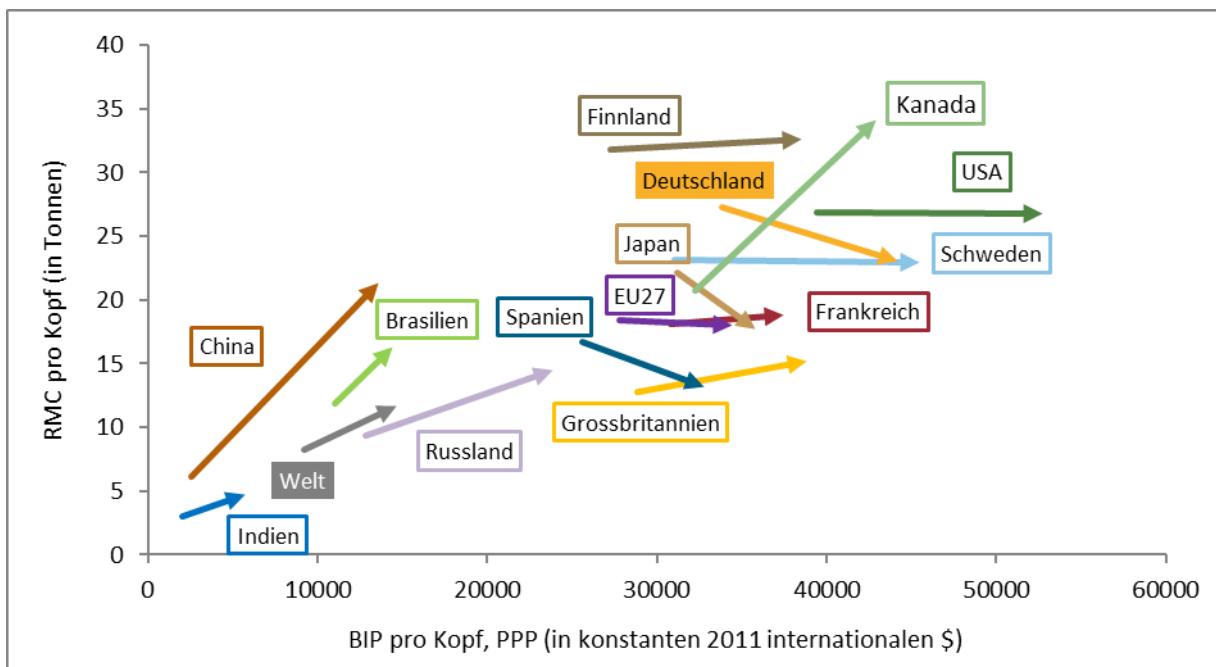
des Modells. Eine weitergehende Darstellung der Modelldetails sowie ergänzende methodische Anmerkungen können darüber hinaus im Kapitel 2.3 dieses Berichts nachgelesen werden.

Der derzeitige Berichtsumfang von GINFORS3 kann inhaltlich folgendermaßen zusammengefasst werden:

1. Die Modellierung beruht auf einer ökonomischen Abbildung
  - a. der wirtschaftlichen Aktivitäten von 35 Industrien in 38 Volkswirtschaften (davon 27 EU Mitgliedsstaaten sowie, u.a., Brasilien, Russland, Indien und China) sowie einer „Rest der Welt“ Region.
  - b. der Konsumausgaben privater Haushalte, der Bruttoinvestitionen sowie der Staatsnachfrage nach 59 Güter- und Dienstleistungsgruppen in 38 Volkswirtschaften sowie der „Rest der Welt“ Region.
  - c. von multinationalen Vorleistungsketten in der Produktion der abgebildeten Güter- und Dienstleistungsgruppen.
  - d. der sektoralen Arbeitsmarktentwicklungen der 35 Industrien in 38 Volkswirtschaften.
  - e. der resultierenden Preis- und Einkommenseffekte, wodurch bspw. auch das verfügbare Einkommen Privater Haushalte sowie das Staatsdefizit abgebildet werden.
2. Einem Energiemodul, insbesondere zur Abbildung
  - a. individueller Entwicklungen der Energienachfrage für 20 unterschiedliche Energieträger (differenziert nach Industrien und Privaten Haushalten) in den jeweils betrachteten Modellregionen.
  - b. des Energieträgermixes in der Elektrizitätserzeugung, wobei individuelle Szenario-Annahmen zur Entwicklung der Anteile verschiedener erneuerbarer Energien im Vergleich zu fossilen Energieträgern unmittelbar berücksichtigt werden können.
  - c. resultierender CO<sub>2</sub>-Emissionen.
3. Einem Ressourcenmodul, welches
  - a. die genutzten und ungenutzten Extraktionen individuell für biotische wie auch abiotische Rohstoffe in 38 Volkswirtschaften und der „Rest der Welt“ Region abbildet.
  - b. umfassende Kalkulationsalgorithmen zur Berechnung historischer wie auch projizierter Rohstoffindikatoren (bspw. RMI, Gesamtrohstoffproduktivität oder RMC) aufweist.
  - c. die Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung projiziert
  - d. und zudem auch die Wasserabstraktion („blue water“) projiziert.

Mit diesen Eigenschaften repräsentiert GINFORS3 ein umfassendes Instrument zur dynamischen Analyse von Systeminterventionen, welches weitreichende quantitative Abschätzungen der direkten- wie auch indirekten sozioökonomischen Effekte alternativer Transformationsszenarien ermöglicht. Besonders erwähnenswert erscheint dabei der hohe Konsistenzgrad der ökonomischen Modellierung. Da für sämtliche modellierten Weltregionen die makroökonomischen Einkommenskreisläufe stets geschlossen abgebildet werden, zeichnen sich sämtliche GINFORS-Simulationen auch durch eine umfassende modellendogene Berücksichtigung von Rebound-Effekten aus.

Abbildung 9: Internationale Entwicklungen 1995-2015: RMC vs. BIP



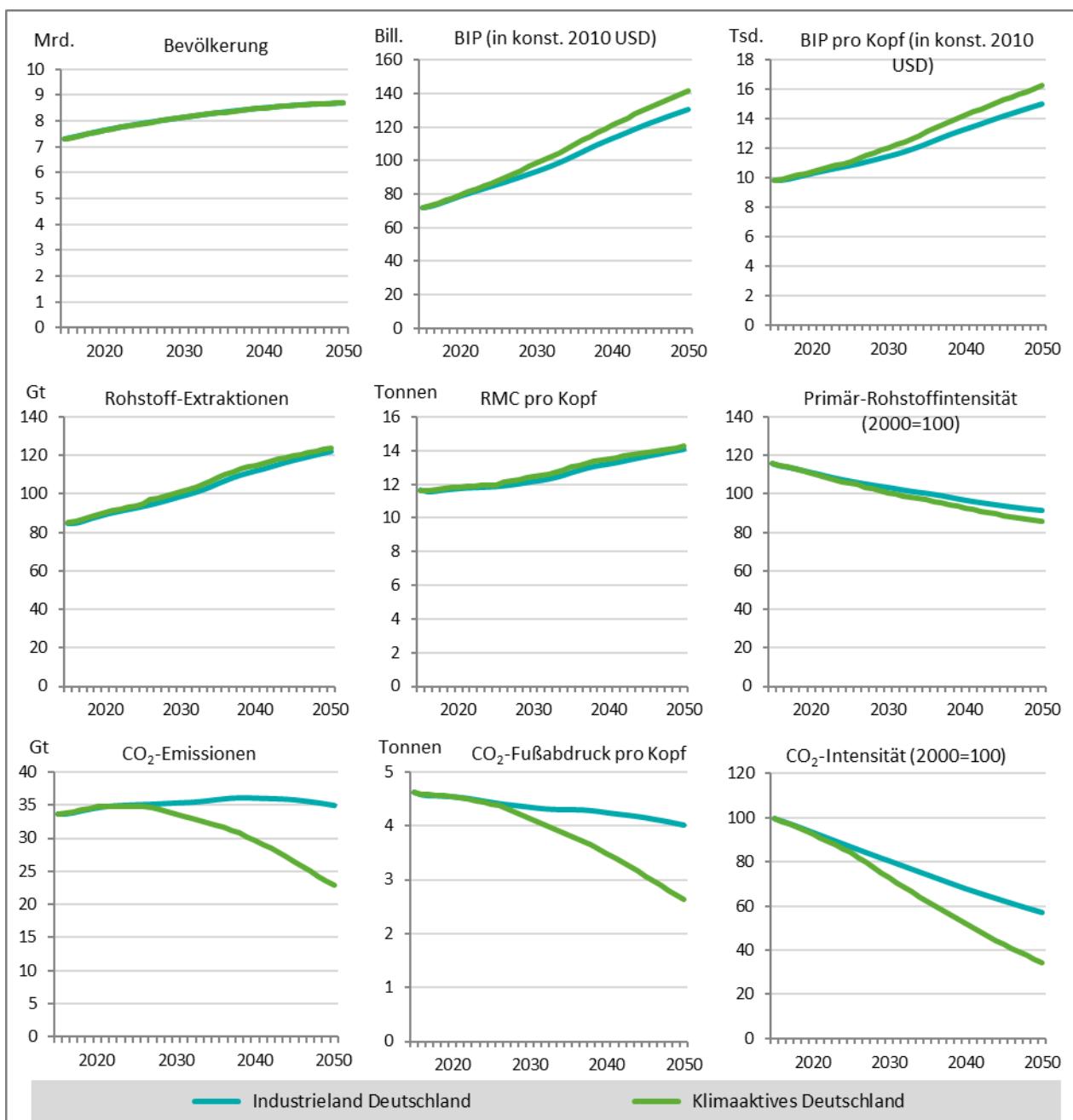
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Insbesondere Umfang und Details der nun verfügbaren Projektionen für bislang beinahe ausschließlich in ex-post Analysen von Rohstoffströmen angewandten Rohstoffindikatoren (siehe bspw. Bruckner et al. 2012, Wiebe et al. 2012, Wiedmann et al. 2015 oder Wood et al. 2015 für entsprechende historische Multi-Regional Input-Output [MRIO] Analysen) repräsentieren dabei ein herausragendes Ergebnis des SimRess-Projekts. Unter Anwendung dieser Modellroutinen ist es uns heute möglich, die historische Entwicklung der Primärrohstoffnachfrage ab 1995 durch international vergleichbare Indikatoren abzubilden. Kapitel 3 dieses Berichts widmet sich einer umfassenden Darstellung der Analysemöglichkeiten entsprechender historischer Auswertungen. Ergänzend sei an dieser Stelle hierzu noch angeführt, dass die Projektionseigenschaften des Modells dabei auch eine zeitnahe Berechnung sog. Nowcasts (also Abschätzungen der aktuellen Entwicklung der Indikatoren, siehe Abbildung 9 für eine entsprechende beispielhafte Darstellung) ermöglichen. Diese Eigenschaft erleichtert die Beurteilung aktueller Entwicklungstrends der Ressourceninanspruchnahme wesentlich, da aufgrund der Komplexität entsprechender Erhebungen in amtlichen Statistiken üblicherweise erst mit mehrjährigen Verzögerungen über entsprechende Entwicklungen berichtet wird.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass unsere Befunde auf eine deutliche Unterschätzung des deutschen RMC in der amtlichen Berichterstattung hinweisen. Ein in Kapitel 3 des vorliegenden Berichts vorgenommener Vergleich der eigenen Berechnungen mit Ergebnissen der amtlichen Statistik offenbart bspw. für das Jahr 2011 (Umweltbundesamt 2016), dass die eigene Abschätzung des deutschen RMC den amtlich gemeldeten Wert um mehr als 40% übersteigt. Die deutlichsten Unterschiede ergeben sich dabei im Hinblick auf Metallerze (224 Millionen Tonnen vs. 25 Millionen Tonnen). Da die Etablierung eines umfassenden und hinreichend robusten Indikatoren-Sets auch ein international anerkanntes Politikziel repräsentiert, scheinen zukünftig weitere intensive methodische Forschungsaktivitäten zur Harmonisierung und Verfestigung des entsprechenden Berichtswesens notwendig.

Zukünftige Entwicklungen werden durch das Modell in globaler Konsistenz bis zum Jahr 2050 projiziert. Im SimRess-Projekt wurde diese Eigenschaft genutzt, um zwei eigenständige Umfeld-Szenarien in GINFORS3 zu parametrisieren. Diese Szenarien können als ein „business as usual“ Szenario sowie ein starker Innovationsorientiertes Transformationsszenario aufgefasst werden.

Abbildung 10: Globale Entwicklungen in den SimRess Umfeld-Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Das implementierte Szenario „Industrieland Deutschland“ repräsentiert dabei eine „business as usual“ Prognose mit stetigen, aber eher inkrementellen Weiterentwicklungen internationaler energiepolitischer Maßnahmen. Im Vergleich hierzu betrachtet das alternative Szenario „Klimaaktives Deutschland“ die Auswirkungen umfassenderer energiepolitischer Transformationsbemühungen in einer zweiten Umfeld-Parametrisierung. Wesentliche Merkmale beider Szenarien werden in Abbildung 10 beispielhaft anhand ausgewählter globaler Indikatoren verdeutlicht. Eine umfassende Erläuterung dieser Ergebnisse, weiterführende Details zu den Befunden für Deutschland sowie die Ergebnisse ergänzender Sensitivitätsanalysen finden sich in Kapitel 4 dieses Berichts.

Im Vergleich zu sonstigen numerischen Tools dienen Simulationsmodelle selbstverständlich nicht nur zur quantitativen Abbildung der implizierten Auswirkungen eines parametrisierten Umfeld-Szenarios. Ihr zent-

rales Merkmal ist vielmehr, dass sie auf Basis dieser Szenarien eine systematische Abschätzung der Auswirkungen von technologischen, ökonomischen oder auch kulturellen Systemveränderungen ermöglichen. Dementsprechend wurden im SimRess-Projekt auch die Simulationsfähigkeiten von GINFORS3 kontinuierlich weiterentwickelt. Zur Durchführung entsprechender Simulationsstudien wurden dabei zwei alternative Vorgehensweisen parallel verfolgt.

Einerseits wurden, aufbauend auf Vorarbeiten des Projektpartners Ecologic Institut, Möglichkeiten der Parametrisierung zur Abbildung aktuell konkret diskutierter ressourcenpolitischer Maßnahmen identifiziert. Unter Berücksichtigung der bislang in den deutschen Ressourceneffizienzprogrammen ProgRess I und ProgRess II genannten politischen Handlungsansätze (BMU 2012, BMUB 2016), wurden hierzu verfügbare Veröffentlichungen bisheriger sowie laufender thematisch verwandter Forschungsprojekte auf konkrete Instrumenten-Vorschläge überprüft.<sup>29</sup>

Dabei wurde deutlich, dass für einen Großteil der theoretisch diskutierten Instrumenten-Vorschläge derzeit keine hinreichend belastbaren Parametrisierungs-Annahmen vorliegen. Dieser Befund lässt sich darauf zurückführen, dass bei der Entwicklung alternativer Politikinstrumente zunächst in aller Regel formal-theoretische Aspekte diskutiert werden. Hingegen werden die zur Wirkungsfolgenabschätzung in einem ökonomischen Totalmodell notwendigerweise zu unterstellenden unmittelbaren Auswirkungen eines Politikinstruments allenfalls durch sporadische empirische Referenzen angedeutet. Damit wird ein deutlicher Forschungsbedarf für zukünftige Evaluationen der durch die Ressourceneffizienzprogramme initiierten Maßnahmen sichtbar, welcher in kommenden Forschungsprojekten idealerweise durch die ergänzende Einbindung dynamischer Partialmodelle in kombinierten Simulationsansätzen mit dem Modell GINFORS3 analysiert werden sollte. Da in SimRess eine Einbindung entsprechender dynamischer Partialmodelle nicht vorgesehen war, wurden von uns in Absprache mit den fachlichen Projekt-Betreuern im Umweltbundesamt daher nicht die individuellen Wirkungen eines spezifischen Politikmixes analysiert.

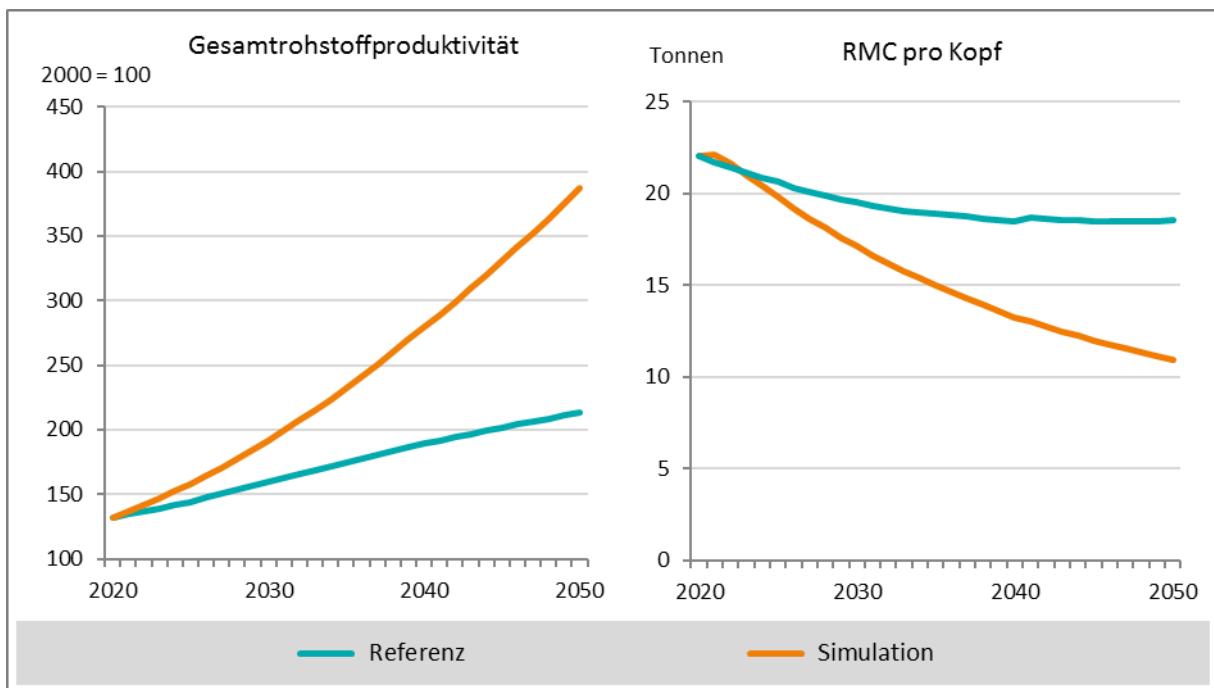
Stattdessen sind wir mit Hilfe umfangreicher Modellsimulationen der Frage nachgegangen, welche Potenziale durch eine Systemtransformation hin zu einem ressourcenschonenderen Wirtschaften grundsätzlich erschließbar erscheinen. Auf Grundlage detaillierter Auswertungen der Indikatorenberechnungen im Ressourcenmodul des Modells GINFORS3 wurden von uns hierzu für die deutsche Volkswirtschaft zunächst diejenigen Produktionstechnologien identifiziert, welche als wesentliche Treiber der Rohstofffinanzspruchnahmen sämtlicher Produktionstätigkeiten in Deutschland angesehen werden können. Daraufhin wurden in alternativen Simulationsexperimenten die gesamtwirtschaftlichen und ökologischen Folgen zusätzlicher Effizienzfortschritte dieser Produktionstechnologien bis zum Jahr 2050 analysiert.

Auch diese Analysen werden in Kapitel 4 des vorliegenden Berichts umfassend dokumentiert. Ein zentraler Befund dieser Simulationsexperimente findet sich bereits in Abbildung 11 dargestellt. Das hier betrachtete Beispiel verdeutlicht, dass umfassende Steigerungen der Gesamtrohstoffproduktivität (linke Zeitreihenplots) in der Regel keine gleichwertigen absoluten Reduktionen des Primärrohstoffkonsums (rechte Zeitreihenplots) auslösen. So kommt es in dem dargestellten Beispiel für Deutschland bis 2050 zu einer Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität gegenüber der Referenz um mehr als 80%. Die im selben Simulationsexperiment erzielte Reduktion des Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen beträgt hingegen nur etwas mehr als 40%. Wenn die Senkung des absoluten Rohstoffbedarfs Ziel der Ressourcenpolitik ist, erscheint es folglich fragwürdig, ob durch ein ausschließliches Monitoring von Effizienzfortschritten auf der Basis von Produktivitätskennzahlen eine hinreichende Informationsbasis zur Beurteilung sämtlicher ressourcenpolitischer Zielsetzungen geschaffen werden kann.

---

<sup>29</sup> Im Kern konnte hierzu auf Ergebnisse folgender Forschungsprojekte zurückgegriffen werden: ÖkonRess (UFOPLAN FKZ 3712 93 105, 2013 – 2016), DYNAMIX (gefördert unter dem 7. EU-Forschungsrahmenprogramm, 2012 – 2016), POLFREE (gefördert unter dem 7. EU-Forschungsrahmenprogramm, 2012 – 2016), PolRess (UFOPLAN FKZ 3711 93 103, 2012 – 2015), MaRess (UFOPLAN FKZ 3707 93 300, 2007 – 2010).

Abbildung 11: Beispiel für Ergebnisse der Simulationsexperimente – Effekte auf Deutschlands Gesamtrohstoffproduktivität und Rohstoffbedarf



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Zur Weiterentwicklung des nationalen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess II raten wir vor diesem Hintergrund dazu, zukünftig neben RMI-basierten Indikatoren auch den Indikator RMC mit in die Berichterstattung aufzunehmen. Wenn sich die Etablierung dieses Indikators in der amtlichen Berichterstattung kurzfristig nicht realisieren lässt, könnten alternativ weitergehende Forschungsansätze zur detaillierten Analyse der Wirkungszusammenhänge sowie relevanter Trade-Offs zwischen beiden Indikatoren erwogen werden.

Ansonsten verdeutlichen diese Befunde, dass sicherlich harmonisierte Politikansätze notwendig sind, um mittelfristig weitreichende Verminderungen der Ressourceninanspruchnahme realisieren zu können. Zumindest deuten unsere Modellanwendungen darauf hin, dass auch sehr optimistische Annahmen zu den Potenziellen technikbasierten Innovationen nicht ausreichend erscheinen, um den deutschen Primärrohstoffkonsum bis 2050 (allein auf Basis von technikbasierten Innovationen) hinreichend zu reduzieren.

Inhaltlich stützen die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsexperimente, die ausschließlich technikbasierte, produktionsseitige Effizienzsteigerungen zum Gegenstand hatten, damit bspw. Forderungen des Sachverständigenrats für Umweltfragen, welcher in seinem Umweltgutachten des Jahres 2016 festhielt: „Eine ökologische Modernisierung wird nicht mehr ausreichen [...]. Ein Wirtschaften innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten erfordert sehr weitreichende Verminderungen der Ressourceninanspruchnahme und der Schadstoffemissionen. Diese sind durch technikbasierte Innovationen alleine nicht erreichbar. Es bedarf daher einer Erweiterung des Innovationsverständnisses um die Dimensionen kulturellen, gesellschaftlichen und institutionellen Wandels. Vorrangige Aufgabe der Umweltpolitik wird es sein, die Idee entsprechend umfassend ausgerichteter ökologischer Transformationen weiterzuentwickeln und in konkrete Handlungskonzepte umzusetzen.“ (SRU 2016, S. 71).

## 2 Methodische Herausforderungen in der Projektion und Simulation von Ressourceneffizienzentwicklungen – Anmerkungen aus ökonomischer Perspektive

Das Forschungsvorhaben SimRess förderte die Weiterentwicklung von zwei globalen Simulationsmodellen: Das systemdynamische Modell WORLD (Meadows et al. 2004, siehe auch Meadows et al. 1972 und Meadows et al. 1993 als Referenzen zu früheren Modellversionen) sowie das auf einer theorie-basierten Modellierung globaler sozioökonomischer Zusammenhänge fußende Modell GINFORS (Meyer et al. 2013, siehe auch Distelkamp et al. 2012 sowie Meyer et al. 2011 oder Lutz 2011 als Referenzen zu früheren Modellversionen). In ihrem Berichtsumfang lassen sich beide Modelle insbesondere dadurch unterscheiden, dass neben globalen Ergebnissen von GINFORS auch disaggregierte Projektionen für individuelle Nationalstaaten und Weltregionen bereitgestellt werden. Entsprechende Informationen sind in World nicht zugängig, da dieses Modell ausschließlich unter Berücksichtigung global aggrgiierter Entwicklungstrends parametrisiert wurde. Weitergehende Details sowie eine Darstellung der Fortschritte von WORLD3 zu WORLD6 (so die Bezeichnung der in SimRess verwandten World-Version) können in einem separaten Band dieses Abschlussberichts nachgelesen werden (Sverdrup und Koca 2017). Im vorliegenden Band des Abschlussberichts erfolgt die eigenständige Dokumentation des aktuellen Modellstands von GINFORS3.

Die Kapitel 3 und 4 fassen zentrale Ergebnisse von Anwendungen des aktuellen Modells im SimRess-Projekt zusammen. Zuvor widmet sich dieses Kapitel der einleitenden Vorstellung zentraler Herausforderungen bei der Modellierung ressourcenpolitisch relevanter Wirkungszusammenhänge. Die nachfolgenden Anmerkungen sind dabei nicht als weitreichender Literaturüberblick intendiert. Vielmehr soll es hierdurch einem möglichst weiten Leserkreis ermöglicht werden, die methodischen Zielsetzungen des SimRess-Projekts sowie die diesbezüglich erreichten Fortschritte nachvollziehbar einzuordnen. Die hierzu vorgestellten Ausblicke auf das Forschungsfeld reflektieren dabei in erster Linie eigene Erfahrungen aus dem Bereich der angewandten empirischen Wirtschaftsforschung sowie persönliche Erkenntnisse aus Diskussionen mit anderen Modellentwicklern, welche im Rahmen des SimRess-Projekts in alternativen Workshop-Formaten intensiviert wurden (siehe hierzu bspw. Biemann et al. 2017).

### 2.1 Stand von Wissenschaft und Technik

#### 2.1.1 Zur Notwendigkeit von Simulationsstudien im Bereich der Ressourcenpolitik

In der Politikberatung wurden im Verlauf des 20. Jahrhunderts zahlreiche computerbasierte Analysemethoden entwickelt.<sup>30</sup> Entsprechende Tools werden umgangssprachlich häufig verallgemeinert als Modell bezeichnet. Dieser Sprachgebrauch muss allerdings als tendenziell verwirrend kritisiert werden. Denn üblicherweise kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich alternative (im umgangssprachlichen Sinne) Modelle ähnlichen Analyseschwerpunkten widmen. Zum besseren Verständnis des methodischen Hintergrunds sei daher zunächst festgehalten, dass SimRess explizit auf eine Weiterentwicklung von *Simulationsmodellen* abzielte. Simulationsmodelle können allgemein als mathematische Abbildungen komplexer multidimensionaler Systeme verstanden werden, welche in Computersimulationen bei Änderung relevanter Einflussgrößen alternative Systementwicklungen unter Berücksichtigung zentraler Systeminterdependenzen projizieren. Da diese Simulationen auf explizit formulierten Kausalitätsannahmen basieren, können weitreichende Wirkungsketten und -feedbacks für alternative auslösende Impulse abgebildet und analysiert werden.

---

<sup>30</sup> Für einen (sicherlich nicht abschließenden und in seiner Terminologie stellenweise von der hier verwendeten Darstellung abweichenden) Versuch zur Kategorisierung diverser Tools im Bereich der Nachhaltigkeitsforschung siehe bspw. Ness et al. (2007).

Im Vergleich zu sonstigen computerbasierten Analysemethoden repräsentieren Simulationsmodelle somit eine eigenständige wissenschaftlich basierte Analysemethode: Sie erlauben die Durchführung virtueller Experimente für Fragestellungen, die sich aufgrund der Komplexität des Analysegegenstands nicht durch rein deduktive Ansätze erschließen lassen. Sie erscheinen zudem unverzichtbar zur Betrachtung von Themenkomplexen, welche (bspw. aus Kosten- und Praktikabilitätsgründen oder unter Berücksichtigung gesellschaftlicher bzw. moralischer Aspekte) nicht in realen Experimenten erforschbar sind. So können bspw. die potenziellen Auswirkungen ökonomischer Instrumente auf Preisentwicklung, Nachfragekomponenten, Staatshaushalt, Beschäftigung, etc. in einem Simulationsmodell abgebildet werden, ohne dass hierfür tatsächlich in das reale Wirtschaftsgeschehen eingegriffen werden muss.<sup>31</sup>

Seine originären Aufgaben kann ein Simulationsmodell nur erfüllen, nachdem

1. die relevanten Einflussgrößen von real beobachtbaren Entwicklungen identifiziert wurden,
2. die diesen Einflussgrößen zugrundeliegenden Kausalitäten konzeptionell abgebildet wurden und
3. dieses Abbild in eine mathematische Struktur überführt wurde.

Der Komplexitätsgrad bei der Bearbeitung dieser Arbeitsschritte wird dabei wesentlich durch die zu analysierende Fragestellung geprägt. So besteht im Bereich der Naturwissenschaften üblicherweise die Möglichkeit, die individuellen Effekte alternativer Einflussgrößen unter Laborbedingungen isoliert zu messen. Wird auf Basis entsprechender Messungen bspw. die Wärmeleitfähigkeit alternativer Dämmstoffe erhoben, ist es offensichtlich relativ einfach, auf Basis dieser Messungen auch den Energiebedarf für Heiz- und Kühlungszwecke in Abhängigkeit von alternativen Dämmniveaus für den deutschen Gebäudebestand zu berechnen. Auf Basis entsprechender naturwissenschaftlicher Erkenntnisse ist es zudem auch möglich, die Eigenschaften neu zu entwickelnder Dämmstoffe bereits im Vorfeld zu berechnen und auf Basis dieser Berechnungen dann die bundesweiten Potenziale des Einsatzes zukünftiger Dämmstoffe zu beziffern.

Im Bereich der Sozialwissenschaften können alternative Einflüsse und deren kausales Zusammenspiel grundsätzlich ebenfalls unter Laborbedingungen identifiziert werden. So haben sich bspw. auch im Fachgebiet der Volkswirtschaftslehre inzwischen experimentelle Forschungsmethoden längst etabliert. Allerdings sind die spezifischen Ergebnisse derartiger Studien in der Regel nicht in direkter Analogie zu naturwissenschaftlichen Parametern übertragbar. Da nicht sämtliche Rahmenbedingungen realer Entscheidungssituationen konkret berücksichtigt werden (können), beruhen die Ergebnisse entsprechender experimenteller Studien häufig auf relativ künstlichen Studienbedingungen. Dies ist sicherlich hinreichend, um die Existenz oder aber auch Nicht-Existenz angenommener Wirkungszusammenhänge im gegebenen Analysekontext nachzuweisen. Die dabei beobachtbaren Phänomene scheinen allerdings in erster Linie zur Abwägung des Erklärungsgehalts alternativer ökonomischer Theorien unter Laborbedingungen relevant.<sup>32</sup> Eine generelle Aussage darüber, ob die in einem solch abstrakten Rahmen gewonnenen Erkenntnisse auch zur Beantwortung konkreter Fragestellungen der evidenzbasierten Politikberatung geeignet sind, ist hingegen grundsätzlich nicht möglich.<sup>33</sup>

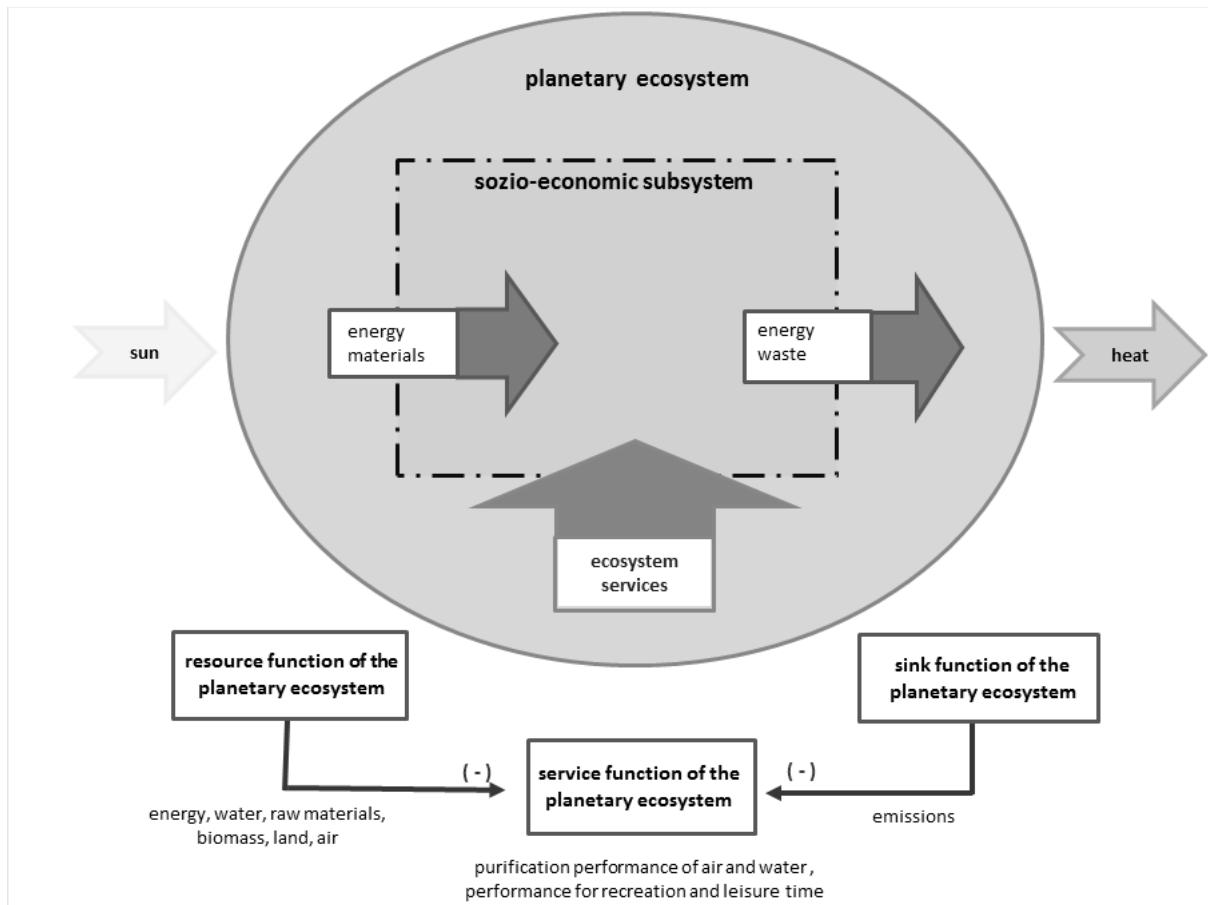
---

<sup>31</sup> Im Vergleich hierzu scheint es gesellschaftlich undenkbar, experimentell für einen begrenzten Zeitraum eine umfassende nationale Steuerreform zu beschließen um auf Basis dieses Experiments Maßnahmen zur zukünftigen Gestaltung des Steuersystems zu gestalten.

<sup>32</sup> Siehe bspw. auch Croson und Gächter (2010) für weitergehende Anmerkungen zur Rolle experimenteller ökonomischer Analysen insbesondere im Zusammenspiel mit ökonomischer Theoriebildung und -prüfung.

<sup>33</sup> Ein solcher Wissenstransfer wird vielmehr auch von den Experten der experimentellen Wirtschaftsforschung als durchaus herausfordernd angesehen: „The extent to which the measurements from experiments can be used to predict behaviors in naturally occurring decision situations is an empirical question.“ (Croson und Gächter 2010, S. 14). Siehe ergänzend bspw. auch Güth und Kliemt (2003), welche in (sicherlich sehr pointierter Form) wissenschaftstheoretisch anmerken: „Die Experimente und ihre Ergebnisse erklären als solche nichts, sondern werfen eine Vielzahl von Fragen auf, die einer Beantwortung nach wie vor harren.“ (Güth und Kliemt, 2003; S. 29)

Abbildung 12: Zu beachtende Systemzusammenhänge in der Analyse umweltpolitischer Maßnahmen



Quelle: Ahlert et al. (2014) in Anlehnung an Daly (1992)

In den Naturwissenschaften kann also häufig ein sehr gradliniges Vorgehen bei der Konstruktion von Simulationsmodellen verfolgt werden. Denn Dank der meist sehr umfassenden Gültigkeitsbereiche der zugrundeliegenden Theorien können die in der Modellierung zu berücksichtigenden Parameter durch unmittelbare Messung unter Laborbedingungen bestimmt werden. Im Vergleich hierzu wird jeder sozialwissenschaftliche Simulationsansatz durch die Notwendigkeit einer umfassenden Prüfung alternativer theoretischer Erklärungsansätze auf Basis empirischer Beobachtungen erschwert. Diese Tatsache impliziert zudem, dass die Güte eines Simulationsmodells nur nach einer individuellen Überprüfung der in der Modellierung abgebildeten Kausaleffekte beurteilt werden kann.

Neben umfassenden methodischen und theoretischen Fachkenntnissen ist häufig ein großer Arbeitsaufwand notwendig, um entsprechende Evaluationen umzusetzen. Für das konkrete Anwendungsfeld umweltpolitischer Fragestellungen sei hierzu beispielhaft auf Abbildung 12 verwiesen, welche eine hoch aggregierte Einordnung der diesbezüglich relevant erscheinenden Systemzusammenhänge vornimmt.

Die in Anlehnung an Daly (1992) konzipierte Darstellung wurde Ahlert et al. (2014) entnommen. Da nähere Erläuterungen Ahlert et al. (2014) sowie den dort referierten Quellen entnommen werden können, soll diese Grafik an dieser Stelle nicht detailliert diskutiert werden. Vielmehr dient uns diese Abbildung an dieser Stelle zur Erinnerung daran, dass im Rahmen des planetaren Ökosystems sozioökonomische Prozesse sowohl für die Ressourceninanspruchnahme wie auch für die Inanspruchnahme von Umweltsenken verantwortlich sind. In global arbeitsteilig organisierten Wirtschaftsstrukturen resultieren dabei sowohl die Ressourceninanspruchnahme wie auch die Inanspruchnahme von Umweltsenken aus unzähligen individuellen Produktions- und Konsumententscheidungen. Um diese Entscheidungen in ihrer Interdependenz verstehen und Ansatzpunkte zur Politikintervention aufzeigen zu können, sollte eine umweltpolitische Analyse daher

im Kern auf einer hinreichend umfassenden Modellierung allgemein akzeptierter ökonomischer Wirkungszusammenhänge beruhen.

Wenn bspw. die globale Kupfernachfrage allein auf Entwicklungen der Wirtschaftsaktivität (Bruttoinlandsprodukt), der Bevölkerung, des Urbanisierungsgrades und langfristiger Trendeinflüsse zurückgeführt wird, bleiben wesentliche Systemzusammenhänge unerklärt. Zwar mag es durchaus sein, dass historisch stabile Korrelationen bspw. zwischen Weltbevölkerung oder auch der Wirtschaftsaktivität und des globalen Kupferverbrauchs identifizierbar sind. Solche Beobachtungen verdeutlichen allerdings lediglich historisch stabile Entwicklungstendenzen der Konsum-, bzw. Produktionsstrukturen. So scheinen bislang u.a. elektronische Bauteile und Kabel aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit von Kupfer relativ konstante Verwendungsanteile dieses Materials aufzuweisen.

Weiterreichende kausale Interpretationen sind auf dieser Basis allerdings kaum möglich, da zentrale Wirkungsketten (welche u.a. durch die Nachfrage von Unternehmen und privaten Haushalten nach Computern, sonstigen elektronischen Geräten und zugehörigen Kabeln getrieben werden) nicht abgebildet werden.

Diese Feststellung mag zunächst trivial klingen, ist aber im Kontext aktueller ressourcenpolitischer Diskussionen keineswegs entbehrlich. So bedienen sich bspw. Elshkaki et al. (2016) exakt jener soeben als unzureichend kritisierten Nachfragemodellierung um (gemäß ihrer Einschätzung im Umfang erstmalige) Szenarien zum globalen Metallangebot und zur globalen Metallnachfrage bis zum Jahr 2050 zu entwickeln. Auf Basis dieser Nachfragemodellierung deuten ihre Simulationsstudien darauf hin, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit die globale Kupfernachfrage bis zum Jahr 2050 das globale Kupferangebot übersteigen wird. Gleichzeitig weisen die Autoren jedoch darauf hin, dass in einem solchen Szenario selbstverständlich ein massiver Anstieg der globalen Kupferpreise zu erwarten sei, die hieraus resultierenden Rückwirkungen aber von ihnen nicht abgebildet werden können, da ja bspw. die soeben angesprochene Nachfragemodellierung keine Preisabhängigkeit aufweist.

Der hier exemplarisch angesprochene Ansatz von Elshkaki et al. (2016) repräsentiert damit lediglich eine Variante unter vielen weiteren Anwendungen der sogenannten „IPAT-equation“ (Ehrlich und Holdren 1971).<sup>34</sup> Mit dieser Bezeichnung werden Erklärungsansätze benannt, welche die analysierten ökologischen Auswirkungen („impacts“, I) konzeptionell auf ein tautologisches Zusammenspiel zwischen Bevölkerungsentwicklung („population“, P), Wohlstandsniveaus („affluence“, A) und Technologiestandards („technology“, T) zurückführen.<sup>35</sup>

Entsprechende Analysen ermöglichen sicherlich eine eingehende Beschreibung langfristig beobachtbarer Entwicklungstendenzen in zentralen Handlungsfeldern, die Potenziale umwelt-ökonomischer Politikinterventionen sowie alternativer zukünftiger Transformationspfade können allerdings auf diesem Abstraktionsniveau nicht abgebildet werden.

Vor diesem Hintergrund zielte das SimRess-Projekt (u.a.) explizit darauf ab, die zur Abschätzung der Auswirkungen von nationalen politischen Maßnahmen im globalen Zusammenhang relevanten sozioökonomischen Wirkungsketten detailliert abzubilden. Mit der zum Abschluss des SimRess-Projekts vorliegenden Version des Simulationsmodell GINFORS3 steht hierfür ein Analyseinstrument zur Verfügung, welches 38 Nationalstaaten sowie eine Region „Rest der Welt“ in ihren ökonomischen Strukturen detailliert simuliert und dabei insbesondere ökonomische Interdependenzen umfassend abbildet: Produktions-, Handels- und Einkommensverwendungsverflechtungen sowie die hieraus resultierenden Beschäftigungseffekte

---

<sup>34</sup> Weitere Anwendungen des IPAT-Ansatzes auf dem Gebiet der Ressourcenschonungspolitik wurden bspw. von Fishman, Schandl und Tanikawa (2015), Schandl und West (2012) oder Steinberger und Krausmann (2011) vorgenommen.

<sup>35</sup> Weitergehende Erläuterungen sowie ein Überblick zu verschiedenen Anwendungsvarianten dieses Ansatzes können bei Chertow (2000) nachgelesen werden.

werden dabei für die jeweiligen Regionen als jährliche Zeitreihen bis zum Jahr 2050 projiziert. Die Ergebnisse dieser Projektionen können mit alternativen Simulationsläufen verglichen werden, bei denen der Verlauf (beliebig auswählbarer) Einflussgrößen (bspw. Bevölkerungsentwicklungen, Steuersätze, Produktions-technologien oder Konsumstrukturen) im Zeitablauf geändert wird. Dank der systematischen Berücksichtigung zentraler Feedbacks zwischen ökonomischen Entwicklungen, Energieverbrauch und weitere Ressourcenanspruchnahmen sowie damit einhergehenden Schadstoffemissionen werden auch globale Umweltinanspruchnahmen umfassend abgebildet.

## 2.1.2 Wesentliche Aspekte des Analyse-Designs: Systemgrenzen, Szenario-Konsistenz und Parametrisierungs-Annahmen

Kapitel 2.3 dieses Berichts widmet sich einer detaillierten Darstellung der wesentlichen Modellstrukturen. Zuvor sei jedoch im Rückgriff auf Abbildung 12 noch darauf hingewiesen, dass es wahrscheinlich unmöglich ist, zumindest aber operativ sehr herausfordernd erscheint, sämtliche politikrelevanten Details der hier skizzierten Systeminterdependenzen in einem eigenständigen, in sich geschlossenen und allumfassenden Simulationsmodell hinreichend abzubilden. Für eine interdisziplinäre Analyse komplexer Systemzusammenhänge erscheint es daher aus praktischen Erwägungen zumeist wesentlich zielführender, thematisch klar abgegrenzte Themenfelder durch Experten der jeweils involvierten Fachdisziplinen modellieren zu lassen. Für integrierte Analysen wechselseitiger Rückwirkungen zwischen den einzelnen Themenfeldern können dann harmonisierte Simulationsrechnungen durchgeführt werden, in welchen ein Informationsaustausch zwischen den jeweils zur Abbildung individueller Themenfelder in die Analyse integrierten Modellen durchgeführt wird. Als ein populäres Beispiel für einen solchen Ansatz zur Kopplung verschiedener Modelle kann u.a. auf OECD (2012) verwiesen werden.<sup>36</sup> Ergebnisse einer jüngeren integrierten Simulationsstudie durch Kopplung eines biophysikalischen Vegetationsmodells (LPJmL, Beringer et al. 2011) mit dem sozio-ökonomischen Modell GINFORS3, wurden beispielsweise von Distelkamp und Meyer (2016) dokumentiert. Auch in SimRess wurde eine Modellkopplung genutzt. Mit einem zentralen Fokus auf ressourcenpolitisch relevante Entwicklungstendenzen wurden dabei die ökonomisch bestimmten Nachfrage-Dynamiken des Simulationsmodells GINFORS3 den ingenieurwissenschaftlich basierten Angebots-Projektionen des Modells WORLD6 gegenübergestellt. Auf Basis dieses Zusammenspiels konnte die Preisdynamik verschiedener Ressourcen bis zum Jahr 2050 in einem iterativen Prozess abgebildet werden. Das Zusammenspiel beider Modelle erlaubte dabei insbesondere eine endogene Berücksichtigung planetarer Grenzen der abiotischen Rohstoffnutzung sowie entsprechender Risikoabwägungen.

Ein weitergefasster Ausblick auf aktuelle Aktivitäten im Bereich der angewandten Politikberatung vermittelt den Eindruck, dass die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Kopplung alternativer Simulationsmodelle inzwischen nahezu unüberschaubar sind. So kann bspw. der deskriptiven Übersicht von Köhler et al. (2016) entnommen werden, dass auf europäischer Ebene beim Joint Research Centre (JRC) zuletzt mehr als 200 Modelle eingesetzt wurden. Da Köhler et al. (2016) generell verfügbare Ansatzmöglichkeiten zur Politikevaluation aufzeigen, kann diese Zahl im Hinblick auf die uns interessierenden Simulationsmodelle wahrscheinlich etwas relativiert werden. Der beachtliche Umfang der von ihnen zur Evaluation von umweltpolitischen Fragestellungen als potenziell geeignet ausgewiesenen Analyseansätze legt aber zumindest die Schlussfolgerung nahe, dass das Analysedesign integrierter Simulationsstudien nicht durch die Verfügbarkeit geeigneter Simulationsmodelle limitiert wird. Als eine zentrale Schlussfolgerung im Hinblick auf zukünftige Simulationsstudien im Bereich der ökologischen Politikfolgenabschätzung wird von den Autoren daher auch festgehalten: „A clear policy need will be for more integrated analysis, stepping away from purely environmental modelling to look at integrated economic, social and environmental analysis“ (Köhler et al., 2016; S. 42).

Die (von uns uneingeschränkt unterstützte) Forderung nach einer forcierten Anwendung integrierter Modellverbünde verweist allerdings unmittelbar auf zentrale Fragestellungen bei der Auswahl des jeweiligen

---

<sup>36</sup> Zur Berechnung des offiziellen OECD Environmental Outlooks bis zum Jahr 2050 wurde hier das ökonomische Modell der OECD („ENV-Linkages“) mit biophysikalischen Modellierungen der IMAGE-Modellgruppe gekoppelt.

Analyserahmens: Lassen sich unterschiedliche Modelle ohne nähere Kenntnis ihrer jeweiligen Strukturen überhaupt sinnvoll miteinander koppeln? Falls ja, welchen Aspekten ist bei Integration von Simulationsmodellen alternativer Fachdisziplinen besondere Aufmerksamkeit zu schenken, um eine möglichst hohe Simulationsgüte zu erzielen? Welche Rahmenannahmen sind dabei zu beachten und in welcher Form können diese Rahmenannahmen harmonisiert werden?

Gemäß unserer Einschätzung ist es wichtig zu betonen, dass entsprechende Fragestellungen zum Design integrierter Simulationsansätze nicht ausschließlich unter methodischen Aspekten diskutiert werden können. Idealerweise wäre es vielmehr wünschenswert, in Abhängigkeit von konkret zu untersuchenden Forschungsfragen diesen Themenkomplex regelmäßig vor Umsetzung eines integrierten Simulationsansatzes individuell zu diskutieren. Hierzu ist es notwendig, dass die Auftraggeber einer Simulationsstudie zunächst ihr Erkenntnisinteresse konkret definieren. Denn während selbstverständlich jede Simulationsstudie auf einem möglichst konsistenten Analysedesign beruhen sollte (also in den Simulationen die wesentlichen Zusammenhänge abgebildet werden sollten), können die zur Etablierung eines konsistenten Simulationsrahmens notwendigen Modellannahmen nur inhaltlich begründet und evaluiert werden. Es bedarf somit eines gemeinsamen konzeptionellen Modellverständnisses (also einer Benennung der im Sinne der konkreten Fragestellung wesentlichen Zusammenhänge), um vor diesem Hintergrund anschließend die Strukturen alternativer Simulationsmodelle kritisch diskutieren und ggf. ergänzende Maßnahmen zur Gewährleistung der Analysekonsistenz umsetzen zu können.

Um in einem solchen Gestaltungsprozess eine zielführende Harmonisierung unterschiedlicher Modellstrukturen erreichen zu können, müssen zudem sämtliche Projektbeteiligte auch über ein zumindest in Grundzügen gemeinsam geteiltes Verständnis methodisch-konzeptioneller Aspekte von Simulationsmodellen verfügen. Hierzu wurde im SimRess-Projekt ein interdisziplinärer Austausch zwischen Experten und Modellbauern unterschiedlicher Fachdisziplinen initiiert. Da dieser Diskurs nicht im unmittelbaren Zentrum der Projektaktivitäten angesiedelt war, können die bislang vorliegenden Dokumentationen (Biemann et al. 2017) in erster Linie als explorative Bestandsaufnahme angesehen werden. Es ist daher zu wünschen, dass weitere Aktivitäten zur Harmonisierung des Rollenverständnisses zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern sowie zur Entwicklung eines hierbei geteilten Begriffsverständnisses auch zukünftig vorangetrieben werden. Als eigenständiger Impuls zur Fortsetzung dieses Dialoges schließt dieses Unterkapitel mit einem komprimierten Ausblick auf zentrale methodisch-konzeptionelle Aspekte, welche im Rahmen dieses Diskurses weiterverfolgt werden sollten. Während es zukünftigen Forschungsaktivitäten vorbehalten bleibt, umfassende Design-Konzeptionen und Evaluationskriterien zur Beurteilung der Güte integrierter Simulationsansätze im interdisziplinären Austausch weiter voranzutreiben, mag dieser Ausblick als Vorschlag zweier Ökonomen im Hinblick auf dabei prioritär zu betrachtende Aspekte angesehen werden.

### **Was ist das primäre Erkenntnisinteresse?**

Der Wissenschaftsphilosoph Marcel Boumans unterscheidet grundsätzlich zwei alternative Fragestellungen als Triebfedern der Entwicklung und Anwendung von Computersimulationen (Boumans 2006): Einerseits das grundsätzliche Erkenntnisinteresse an einer deduktiven Herleitung der Implikationen theoretischer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge („why-questions“), andererseits den Bedarf nach möglichst genauen Messungen und Abbildungen empirischer Beobachtungen („how much-questions“). Anhand dieses Klassifikationsmusters entwickelt Boumans einen Interpretationsansatz für verschiedene historisch beobachtete Entwicklungstendenzen im Forschungsgebiet der Ökonometrie.

Da unserer Einschätzung nach seine weitergehenden Interpretationen durch die Verwendung dieses anschaulich reduzierten Begriffspaars deutlich erschwert werden, verweisen wir an dieser Stelle lediglich auf diese markanten Begriffe, um einen grundsätzlichen Zielkonflikt aufzuzeigen: Modellierungen, welche ausschließlich der Messung von empirischen Zusammenhängen dienen (sich also den „how much-questions“ widmen), können auf eine Abbildung der diesen Beobachtungen zugrundeliegenden Ursache-Wirkungs-

Zusammenhänge im Extremfall vollständig verzichten. Hierzu sei beispielsweise an Prognosemodelle erinnert, welche eine (sicherlich extreme) Unterklasse der „how much“-Anwendungen repräsentieren.<sup>37</sup> Durch zahllose Anwendungen zeitreihenanalytischer Modellierung in der Tradition von Box und Jenkins (1970) hat sich hier längst der Befund etabliert, dass rein statistische Prognosemodelle häufig die tatsächlichen empirischen Entwicklungen besser abbilden als theoriegeleitete Prognoseansätze.

Am anderen Ende des Spektrums finden sich in der wissenschaftlichen Literatur zu verschiedenen Themenaspekten zahlreiche Modellanwendungen, welche ausschließlich als Werkzeuge zum explorativen experimentieren mit ausgewählten theoretischen Kausalbeziehungen konzipiert wurden. Mit Blick auf entsprechende Studien im Bereich der theoretischen Wirtschaftsforschung kritisiert bspw. Pagan (2003) diese von ihm als „Mini-Modelle“ bezeichneten Instrumente als häufig empirisch irrelevant: „Often they are simply devices to produce qualitative insights into the mechanisms at work and do not relate to any specific economy or body of data.“ (Pagan 2003; S. 3).<sup>38</sup>

Es ist daher wichtig festzuhalten, dass sich zu jedem gegebenen Themenfeld in der Regel sehr unterschiedliche Simulationsmodelle identifizieren lassen. Auch wenn das inhaltliche Themenfeld klar definiert wird, ist deshalb nicht im Vornherein davon auszugehen, dass thematisch „ähnliche“ Modelle auch ähnliche Sachverhalte abbilden.

In der angewandten Politikberatung resultiert hieraus ein zentrales Entscheidungsproblem bei der Auswahl eines konkreten Simulationsmodells zur Anwendung. In stilisierter Form kann dieses Entscheidungsproblem am Beispiel der Abbildung 13 verdeutlicht werden. Die abgebildete Kurve umhüllt dabei symbolisch sämtliche im Hinblick auf eine interessierende Fragestellung verfügbare alternative Modelle. Gemäß unserer vorherigen Anmerkungen sind Prognosemodelle daher im unteren Bereich der Abbildung anzutreffen. Explorative Simulationstools, welche lediglich zur numerischen Abbildung der Implikationen alternativer theoretischer Erklärungsansätze dienen, finden sich im oberen Bereich der Abbildung. Im mittleren Bereich der Kurve finden sich Modelle, welche von den Wissenschaftsphilosophinnen Morrison und Morgan als „models for design and intervention“ bezeichnet werden. Im weiteren Verlauf dieses Textes sollen Vertreter dieses Modelltyps daher als Design-Modellierungen bezeichnet werden.

Das typische Erkenntnisinteresse der Zukunftsforschung verlangt sicherlich nach diesen Design-Modellierungen. Gemäß unserer Wahrnehmung können entsprechende Modelltypen aber auch generell als unverzichtbare Mittler zwischen positiven Wissenschaftserkenntnissen und normativen Entscheidungsprozessen angesehen werden.<sup>39</sup> Bei Beauftragung einer entsprechenden Simulationsstudie wird ein Auftraggeber daher intendieren, ein Modell auszuwählen, welches als Punkt im mittleren Bereich dieser Kurve dargestellt werden kann.

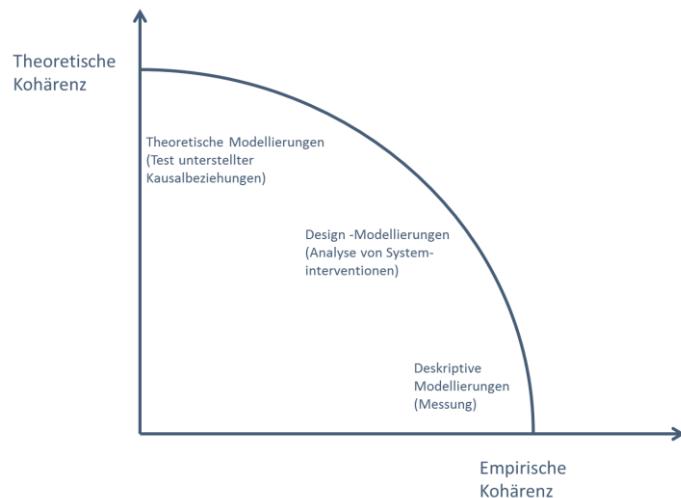
---

<sup>37</sup> Alternativ könnten an dieser Stelle aber bspw. auch Anwendungen disaggregierter Input Output Rechnungen als Beispiele für deskriptive Modellierungen unter Ausblendung zentraler kausaler Erklärungsansätze genannt werden. Im Kontext der Ressourcenschonungspolitik bspw. Wiebe et al. (2012), Schoer et al. (2013), Schaffartzik et al. (2014), Wiedmann et al. (2015).

<sup>38</sup> Als konkrete Beispiel werden dabei von Pagan ökonomische Fachdiskussionen unter konzeptioneller Anwendung des IS/LM Modells, des Mundell-Fleming Modells, von Real Business Cycle Theorien oder der New Keynesian policy genannt.

<sup>39</sup> Auf ökonomische Modellierungen bezugnehmend kann hierzu bspw. auch auf den Butter und Morgan (1998) verwiesen werden: „... the notion of empirical models as a bridge between the positive and normative domains of economics holds in two particular ways. One way is as a knowledge device which spans the two domains. The empirical model embodies the positive scientific object upon which the normative analysis of policy options are based, either directly or via forecasting and simulation outputs. The empirical model therefore plays this dual role of constituting the expertise gained through positive science and enabling normative knowledge to be developed. The other way in which empirical models constitute a bridge is that they provide a clear focus for the people involved – modellers and policy makers – to interact and to share the expertise that each group has. There are, of course, interactions of scientific economics and policy makers without the intermediary of models, but the presence of empirical models allows a specific kind of interaction which involves making explicit and integrating the tacit knowledge of both groups of participants: modellers and policy makers.“ (den Butter und Morgan 1998; S. 472)

Abbildung 13: Entscheidungsoptionen bei Anwendung alternativer Simulationsmodelle



Quelle: Eigene Darstellung, GWS in Anlehnung an Pagan (2003)

Dabei abstrahieren wir von der Tatsache, dass dieses Auswahlproblem in der Realität dadurch erschwert wird, dass selbstverständlich nicht alle konkret existierenden Simulationsmodelle auch als Punkte auf dieser Linie zu interpretieren sind. So kritisiert bspw. Schnell (1990) die damaligen sozialwissenschaftlichen Anwendungen von Simulationsmodellen in weiten Teilen als sowohl ungenügend theoretisch fundiert wie auch mangelhaft empirisch fundiert. Modellierungen, welche sowohl im Hinblick auf ihre empirische Kohärenz wie auch im Hinblick auf ihre theoretische Kohärenz verbessert werden könnten, wären in Abbildung 13 daher als Punkte unterhalb der symbolisch umhüllenden Kurve einzuleichen.

### Wo liegen die Systemgrenzen des konzeptionellen Modells?

Die vorherigen Anmerkungen verdeutlichen, dass die konkrete Auswahl eines angewandten Simulationsmodells zwangsläufig einen stark normativen Charakter aufweist. Dennoch lassen sich durchaus Kriterien benennen, anhand derer die Entscheidung für oder gegen ein Simulationsmodell bzw. die Kopplung ausgewählter Simulationsmodelle zumindest grundsätzlich transparent dargestellt werden kann. Ein erstes Kriterium ist dabei die Frage nach der Notwendigkeit einer integrierten Analyse im Vergleich zu partialanalytischen Modellierungen. Anschaulich ausgedrückt betrifft diese Frage die grundsätzliche Architektur des modellierten Systems: Welche Kausalbeziehungen sollen im Modell berücksichtigt werden? Wo verläuft die Grenze zwischen endogen durch das Modell abgebildete Variable (und deren jeweils zu beachtenden Interdependenzen) und weiteren, die jeweiligen Modellergebnisse mit determinierenden aber nicht mehr im Hinblick auf ihre eigenen Kausalstrukturen abgebildeten relevanten Rahmengrößen (den sogenannten exogenen Variablen)? Welche Wirkungseffekte können also im Kontext einer gegebenen Fragestellung ausgeschaltet werden, ohne dass hierdurch der Interpretationsgehalt der Simulationsergebnisse wesentlich beeinträchtigt wird?

Um zunächst auf die letzte der soeben aufgeführten Fragen einzugehen verweisen wir noch einmal auf das in Abbildung 12 eingeführte konzeptionelle Modell von Ahlert et al. (2014). Wenn das Erkenntnisinteresse einer Simulationsstudie darauf abzielt, wechselseitig relevante Systeminterdependenzen zwischen sozio-ökonomischen Entwicklungen und der damit einhergehenden Inanspruchnahme von Materialien, Ökosystemdienstleistungen, und Umweltsenken aufzuzeigen, bedarf es offenbar einer vollständigen Modellierung dieses konzeptionellen Modells. Ein solcher Simulationsansatz wäre dann als integrierte Analyse, bzw. als Totalmodell zu kennzeichnen. Ein Totalmodell ist dazu angelegt, sämtliche konzeptionellen relevanten Systemzusammenhänge in einem einzelnen Modellansatz zu vereinen. Alternativ könnten aber auch mehrere unterschiedliche Detailmodelle (sogenannte Partialmodelle) in einem integrierten Simulationsansatz ge-

meinsam eingesetzt werden. Bei einer solchen Vorgehensweise würde dann bspw. ein Modell die sozioökonomischen Entwicklungen innerhalb eines Szenarios berechnen und diese Ergebnisse als exogene Rahmenannahme an andere eigenständige Modelle zur Bestimmung der dadurch ausgelösten Primärrohstoffextraktionen, der Inanspruchnahme von Ökosystemdienstleistungen und Umweltsenken übergeben. Wenn deren Simulationsergebnisse dann wiederum in einem iterativen Verfahren von den übrigen Modellen als Input genutzt werden, eignet sich auch dieses Framework zur vollständigen Abbildung des konzeptionellen Modelles.

Ob dieser Anspruch allerdings von einem integrierten Simulationsrahmen tatsächlich erfüllt wird, ist wesentlich dadurch beeinflusst, welche exogenen Größen von den jeweiligen Partialmodellen überhaupt berücksichtigt werden können. Sämtliche in der Analyse integrierte Modelle müssen also klar definierte Schnittstellen aufweisen, welche im Zusammenspiel eine hinreichend konsistente Abbildung der konzeptionell interessierenden Kausalketten und Feedback-Beziehungen ermöglichen.

### **Quantitative Szenario-Techniken: Notwendiges Fundament oder ergänzendes Hilfsmittel einer systemischen Design-Modellierung?**

Diese Darstellung macht bereits deutlich, dass eine Simulationsstudie insbesondere dann zur Versachlichung von Diskussionen beitragen wird, wenn es Auftraggeber wie auch Auftragnehmer gelingt, ein gemeinsam geteiltes Verständnis des konzeptionell zugrundeliegenden Modells zu entwickeln. Im Idealfall würde am Ende eines solchen Prozesses gemeinsam darüber entschieden, wie viele kausale Beziehungen in der Simulation berücksichtigt werden müssen. Zudem würde für jede zu simulierende endogene Variable  $y_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$  ein gemeinsames Verständnis darüber etabliert, welche Einflussfaktoren  $x_j$  zur Beschreibung der Entwicklung dieser Variable berücksichtigt werden müssen. Es wäre also für jede endogene Variable ein allgemein konzeptionelles Verständnis der Kausalbeziehungen etabliert.

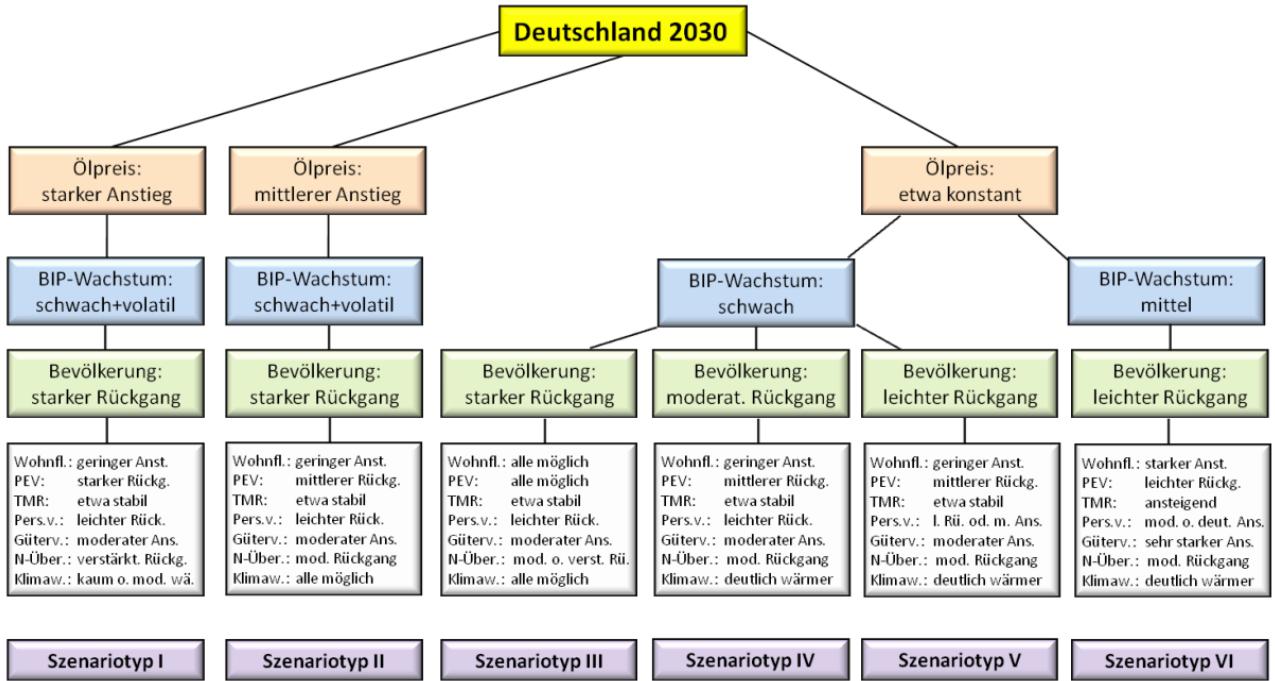
Dieses Ideal wird in der Praxis der angewandten Politikberatung sicherlich selten erreicht. Wichtig ist aber zu betonen, dass diesbezügliche Informationsdefizite wahrscheinlich in erster Linie Zeit- und Budgetrestriktionen widerspiegeln. Von dieser üblichen Praxis abweichend konnten zu Beginn des Forschungsprojekts SimRess partizipative Workshops zur gemeinsamen Entwicklung umfassender qualitativer Konzeptmodellierungen vorgenommen werden. Dabei zeigte sich, dass bspw. Causal Loop Diagramme (also Pfeildiagramme wie sie Ökonomen aus zahlreichen Lehrbüchern zur visuellen Darstellung von Kausalstrukturen in gesamtwirtschaftlichen Kreislaufmodellierungen bekannt sind) zur strukturierten Entwicklung und Dokumentation des konzeptionellen Analyserahmens grundsätzlich geeignet erscheinen.

Anhand des gegebenen konzeptionellen Modells kann dann entschieden werden, welche Simulationsmodelle in welcher Kombination geeignet erscheinen, die interessierenden Systemzusammenhänge gemeinsam abzubilden. Dabei sollte (u.a.) der Unterschied zwischen komparativ-statistischen und dynamischen Modellieransätzen beachtet werden. Dynamische Simulationsmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Entwicklung sämtlicher endogenen Variablen im Zeitablauf projizieren. Im Gegensatz hierzu sind komparativ-statistische Modellierungen vollständig zeitlos. Da in einem solchen Analyserahmen keine Modellierung dynamischer Anpassungsprozesse möglich ist, können komparativ-statistische Ansätze also lediglich dazu genutzt werden, alternative Ergebnissets miteinander zu vergleichen.

Ein komparativ-statistischer Ansatz wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes bspw. im Bereich der Ressourcenschonungspolitik im Projekt DeteRess verfolgt, indem das komparativ-statistische Analyseinstrument URMOD angewandt wurde. URMOD zielt insbesondere darauf ab, direkte und indirekte Rohstoffströme möglichst detailliert abzubilden. Auf Basis einer bemerkenswert tief gegliederten Input-Output-Tabelle (274 Gütergruppen / Produktionsbereiche) kann es (u.a.) die Auswirkungen alternativer gesamtwirtschaftlicher Produktionsniveaus, veränderter Außenhandelsstrukturen oder alternativer Entwicklungen der Materialproduktivität auf die damit verbundenen Rohstoffströme abbilden. Produktionsniveaus, Außenhandelsstrukturen wie auch Materialproduktivität sind allerdings für URMOD jeweils exogene, also in ihrem wechselseitigen Zusammenspiel nicht mehr durch das Modell abgebildete Einflussgrößen. Um eine Interpretation der

Ergebnisse im Kontext eines Zukunftsszenarios zu ermöglichen sind daher für diese sowie weitere exogene Variable konkrete Annahmen zu ihren Ausprägungen in einem zukünftigen Zeitpunkt notwendig.

Abbildung 14: Beispiel konsistenter Bündel für Rahmendaten



Quelle: Lorenz (2017)

In umfassenden Systemanalysen wird die Verwendung komparativ-statistischer Ansätze daher häufig durch einen hohen Aufwand zur Herleitung der Vorgaben für exogene Variable erschwert. Da komparativ-statistische Ansätze im Kern lediglich alternative Rechenergebnisse für veränderte Kombinationen von Merkmalsausprägungen exogener Variablen miteinander vergleichen ist dieser Aufwand notwendig, um die Plausibilität der unterstellten Merkmalsausprägungen im Sinne eines zu analysierenden Szenarios zu begründen. Als besonders herausfordernd muss dabei die Tatsache angesehen werden, dass für exogene Variable per Definition die Plausibilität und interne Konsistenz unterstellter Merkmalsausprägungen nicht auf Basis der von ihnen determinierten Rechenergebnisse beurteilt werden kann. Eventuelle Kausalitäten und Feedbacks werden von den jeweiligen Modellen ja für exogene Einflussfaktoren gerade nicht mitberücksichtigt.

Eine Möglichkeit, um trotzdem ein möglichst hohes Maß an Konsistenz der unterstellten Rahmenannahmen für entsprechende Analysen zu gewährleisten, wird bspw. von Lorenz (2017) in Konsistenzprüfungen unter Anwendungen qualitativer Szenario-Techniken gesehen. Die von ihm übernommene Darstellung in Abbildung 14 verdeutlicht, wie im Rahmen einer systematischen Beurteilung kombinatorisch denkbare zukünftiger qualitativer Entwicklungen zentraler exogener Größen ein kausal strukturierter „Szenarien-Möglichkeitsraum“ generiert werden kann. Die diesen Möglichkeitsraum formierenden individuellen Szenarien sind im Idealfall jeweils durch einen hohen Konsistenzgrad ausgezeichnet. Mit der Auswahl eines entsprechenden Szenarios kann somit bei der Parametrisierung exogener Variablen zumindest eine qualitative Einordnung vorgenommen werden. Sofern die Komplexität der Aufgabenstellung solch eine deduktive Herleitung möglichst widerspruchsfreier (und im Hinblick auf das anzuwendende quantitative Analyseinstrument vollständiger) Beschreibungen einzelner Szenarien erlaubt, können also quantitative Szenario-Techniken komparativ-statistischen Analysen durchaus als tragfähiges Fundament dienen.

In Abgrenzung zu den vorherigen Anmerkungen zeichnen sich dynamische Simulationsmodelle dadurch aus, dass sie (sozusagen „auf Knopfdruck“) eigenständige Szenario-Beschreibungen generieren. Auf Abbildung 14 bezugnehmend wäre es daher ebenfalls möglich, die Auswirkungen alternativer Ölpreis- und Bevölkerungsentwicklungen bis zum Jahr 2030 auf das Wachstum des deutschen Bruttoinlandsprodukts und weiterer Indikatoren (bspw. TMR, CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Verkehrsnachfrage) mit einem dynamischen Simulationsmodell wie GINFORS3 abzubilden und auf Basis dieser Simulationsrechnungen einen modell-gestützten „Szenarien-Möglichkeitsraum“ festzulegen.

Neben qualitativen Szenario-Techniken argumentiert auch Lorenz (2017) für eine zusätzliche Anwendung sogenannter „Mastermodelle“. Bemerkenswert ist dabei, dass er die Anwendung entsprechender Mastermodelle ausschließlich im Hinblick auf konzeptionelle Modellierungen betont. An dieser Stelle möchten wir daher ergänzend festhalten, dass vollständig parametrisierte dynamische Design-Modelle als Instrumente verstanden werden sollten, welche die Anwendung von Mastermodellen auch in der konkreten Umsetzung integrierter Simulationsstudien ermöglichen. Als wichtigste Eigenschaft dynamischer Modelle ist hierbei ihre Fähigkeit zu Abbildung indirekter Effekte zu betonen. Neben der Berechnung direkter Auswirkungen bspw. einer gesteigerten Materialproduktivität auf damit verbundene Rohstoffströme bilden sie auch die hierdurch ausgelösten weitergehenden Anpassungsreaktionen des betrachteten Systems im Zeitablauf ab. Dadurch kann eine vollständige dynamische Modellierung auch vermeintlich kontraintuitive Systemzusammenhänge aufdecken, welche in rein deduktiven Szenario-Ansätzen leicht zu übersehen sind.<sup>40</sup> Unserer Meinung nach ist es daher offensichtlich, dass detaillierte komparativ-statistische Analysen, welche bspw. einer exogenen Vorgabe von Produktionsniveaus, Außenhandelsstrukturen wie auch Materialproduktivitäten bedürfen, nur davon profitieren können, wenn das interdependente Zusammenspiel dieser drei Faktoren in begleitenden dynamischen Simulationsstudien analysiert wird. Denn nur dann wird nicht mehr lediglich eine Annahme getroffen, ob verschiedene Rahmenannahmen inhaltlich widerspruchsfrei wirken. Stattdessen kann nachvollziehbar argumentiert werden, welches Zusammenspiel aus direkten und indirekten Kausalitäten ursächlich dafür ist, dass genau diese Rahmenannahmen der komparativ-statistischen Analyse zu grunde gelegt wurden.

### **Welche Annahmen werden getroffen, um das konzeptionelle Modell zu parametrisieren?**

Die soeben von uns vorgestellte Idee einer konsistenten Generierung von Rahmendaten für integrierte partianalytische Simulationsstudien durch Verwendung dynamischer Mastermodelle kann nur dann erfolgreich umgesetzt werden, wenn die Parametrisierungen der Mastermodelle (also die konkret programmierten Softwarecodes) hinreichend dokumentiert wurden. Um elementaren Missverständnissen vorzubeugen sei hierzu angemerkt, dass dadurch aber keine zusätzlichen Herausforderungen bezüglich der Dokumentationspflichten von Modellentwicklern erwachsen. Auch wenn lediglich ein einziges Simulationsmodell vor Hintergrund einer vollständig dokumentierten Konzeptmodellierung angewandt wird, wird sich bei der Interpretation der Simulationsergebnisse die Konzeptmodellierung in der Regel als nicht hinreichend erweisen.

Wenn für ein Simulationsmodell lediglich eine qualitative Beschreibung der in der Modellierung berücksichtigten Kausalbeziehungen (bspw. in Form der zuvor angesprochenen Causal Loop Diagramme) gegeben ist, sind eindeutige Rückschlüsse auf die dynamischen Eigenschaften dieses Modells grundsätzlich nicht möglich. Denn bei der Parametrisierung eines konzeptionellen Modells für die rechnerische Weiterverarbeitung sind umfassende weitergehende Festlegungen zu treffen. Die Zielsetzung dieses einführenden methodischen Kapitels berücksichtigend, versuchen wir uns an dieser Stelle nicht an einer vollständigen Aufzählung üblicher Parametrisierungs-Schritte. Aber zumindest zwei zentrale Aspekte sollen hierzu noch abschließend detaillierter vorgestellt werden.

---

<sup>40</sup> Als konkretes Beispiel aus dem Themenfeld der gesamtwirtschaftlichen Analysen sei bspw. auf eventuelle Rebound- oder Backfire-Effekte (Sorrell und Dimitropoulos 2007, Sorrell 2009) hingewiesen.

Zunächst möchten wir darauf hinweisen, dass zur Parametrisierung konzeptioneller Kausalbeziehungen stets auch eine konkrete Festlegung der unterstellten funktionalen Form erfolgen muss. Betrachten wir hierzu den Fall einer beliebigen endogenen Variablen und gehen davon aus, dass deren Entwicklung durch zuvor festgelegte beeinflussende Variable  $x_j, j \in \{1, 2, \dots, k\}$  erklärt werden soll, so lässt sich dieser konzeptionelle Zusammenhang in mathematischer Notation übersichtlich ausdrücken als

$$(1) \quad y = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

In Computersimulationen sollen nur die durch Veränderung der beeinflussenden Variablen ausgelösten Veränderungen der endogenen Variablen abgebildet werden. Wenn der funktionale Zusammenhang der obigen Gleichung vollkommen bekannt wäre, könnte hierzu unmittelbar der konkrete numerische Ausdruck des zugehörigen totalen Differentials

$$(2) \quad dy = \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_k} dx_k$$

als Softwarecode niedergeschrieben werden.<sup>41</sup> Bei Betrachtung sozioökonomischer Systemzusammenhänge sind allerdings die interessierenden funktionalen Zusammenhänge in der Regel nicht bekannt. Um eine Abschätzung der benötigten partiellen Ableitungen  $\frac{\partial F}{\partial x_j}$  vornehmen zu können, müssen daher entsprechende Computersimulation grundsätzlich auf Basis ad hoc unterstellter funktionaler Formen vorgenommen werden.

Um unsere Argumentation an dieser Stelle übersichtlich weiterführen zu können sei didaktisch vereinfachend unterstellt, dass lediglich zwei erklärende Variable mit jeweils positivem Einfluss auf die endogene Variable abzubilden sind. Gegeben ist also folgende konzeptionelle Vorgabe

$$(3) \quad y = F(x_1^{(+)}, x_2^{(+)})$$

Zur Parametrisierung dieses Zusammenhangs könnte bspw. ein in den Parametern linearer Zusammenhang unterstellt werden

$$(4) \quad y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2$$

wobei die Parameter  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  nachfolgend noch näher zu bestimmende positive Skalare kennzeichnen.

Bei Parametrisierung des Simulationsmodells GINFORS3 wurden für die implementierten Kausalstrukturen üblicherweise in den Parametern lineare funktionale Zusammenhänge unterstellt. Hierbei ist es interessant anzumerken, dass im allgemeinen systemwissenschaftlichen Sprachgebrauch mitunter argumentiert wird, dass lineare Kausalabhängigkeiten selten anzutreffen seien. Unser Eindruck ist, dass in entsprechenden Diskussionen häufig Linearität synonym zum Begriff der Eindimensionalität verwendet wird. Im Kontext der hier von uns vorgenommenen Darstellung ist dieser Sprachgebrauch natürlich irreführend. Wie unsere Darstellungen der ausgewählten Modellstrukturen in Kapitel 2.3 belegen, scheinen die von uns unterstellten Kausalbeziehungen in der Regel gut durch lineare Approximationen in Analogie zu Gleichung (4) abbildbar zu sein.

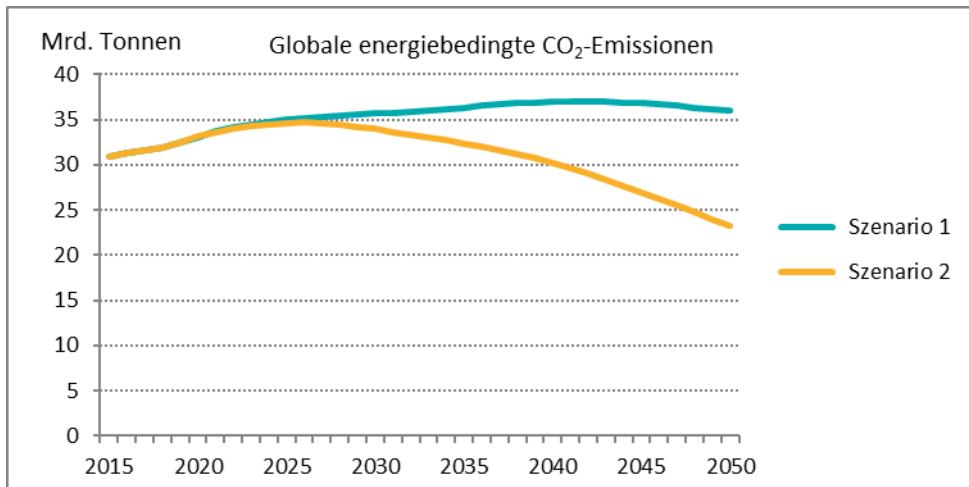
---

<sup>41</sup> Weil für numerische Simulationen von sozioökonomischen Zusammenhängen üblicherweise keine Differentialgleichungen verwendet werden, erinnern wir in diesem Zusammenhang daran, dass das totale Differential (zumindest bei geringen Variationen der erklärenden Variablen) auch als hinreichende Approximation für die aus Veränderungen der erklärenden Variablen resultierenden Veränderungen der endogenen Variable interpretiert werden kann. Es gilt also grundsätzlich:

$$\Delta y \approx \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_k} \Delta x_k$$

Als illustratives Beispiel sei an dieser Stelle kurz auf Abbildung 15 verwiesen, welche alternative Projektionen des Modells GINFORS3 zur zukünftigen Entwicklung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zusammenstellt. Während der obere Kurvenverlauf ein Business as Usual Szenario beschreibt, ist das untere Szenario durch umfassende Weiterentwicklungen globaler klimapolitischer Anstrengungen charakterisiert.

Abbildung 15: Exemplarische Darstellung alternativer Simulationsergebnisse



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Wie in Kapitel 4 näher erläutert wird, werden die hier exemplarisch gezeigten Kurvenverläufe in GINFORS3 jeweils durch die explizite Berücksichtigung mehrdimensionaler Ursache-Wirkungszusammenhänge generiert. Wie diese Darstellung verdeutlichen soll, erlaubt die explizite Berücksichtigung zahlreicher Rückkopplungen dabei eine Abbildung von (in der Systeminteraktion nicht mehr linearen) Ursache-Wirkungszusammenhängen.

In Ergänzung zu den gerade erfolgten semantischen Anmerkungen zur Unterscheidung zwischen den Begriffen Eindimensionalität und Linearität können aber auch formale Argumente zur Verwendung linearer Kausalstrukturen in Form der Gleichung (4) angeführt werden. Als wesentlicher Kritikpunkt ist dabei zu betonen, dass bei allzu flexibler Verwendung funktionaler Formen jeder Versuch einer statistischen Überprüfung der unterstellten Kausalitätsbeziehungen als ein nahezu arbiträres Vorhaben erscheint, welches mit einem hohen „over-fitting“ Risiko einhergeht: Theoretisch ist es ohne weiteres möglich ist, einen empirischen Befund durch eine hinreichend flexible Parametrisierung nahezu beliebig gut abzubilden. Wird allerdings versucht, einen empirischen Verlauf möglichst exakt nachzubilden, steigt hierdurch auch das Risiko, dass vereinzelte statistische Ausreißer die resultierende Parametrisierung überwiegend prägen. Wenn es sich dabei tatsächlich um zufällige, also nicht-systematische Einflüsse handelt, sollten die Projektionen von Design-Modellen aber genau diese Einflüsse rausfiltern. In diesem Sinne leidet die Simulationsgüte von Design-Modellen selbst bei Berücksichtigung korrekter konzeptioneller Zusammenhänge, sobald flexible funktionale Formen möglichst exakt an empirische Beobachtungen angepasst werden.

Während wir diese Argumente hier lediglich auf einem relativ abstrakten Niveau vorbringen, sind wir auf Basis dieser Überlegungen sowie eigener empirischer Erfahrungen davon überzeugt, dass die Verwendung von Parametrisierungs-Ansätzen in Form der Gleichung (4) aufgrund ihrer relativen Robustheit zur Abbildung unterstellter Kausalbeziehungen bevorzugt eingesetzt werden sollte. Dies schließt natürlich nicht grundsätzlich die Wahl alternativer funktionaler Zusammenhänge im Vornherein aus. Allerdings sollte deren Verwendung, bspw. unter Verweis auf weitere verfügbare Informationen eindeutig inhaltlich begründbar sein und dann auch transparent dokumentiert werden. Denn ohne eine diesbezügliche Transparenz ist sicherlich jeder Versuch einer Interpretation der dynamischen Muster von Simulationsergebnissen im Vornherein zum Scheitern verurteilt.

Zur Einordnung dieser Argumentation erscheint es sinnvoll, erneut darauf hinzuweisen, dass konzeptionell unterstellte kausale sozialwissenschaftliche Systemzusammenhänge theoretische Erklärungs-Konstrukte repräsentieren, deren Parameter nicht einfach in Analogie zu naturwissenschaftlichen Forschungsansätzen unter kontrollierten Laborbedingungen gemessen werden können. Da die numerische Festlegung der in den Simulationen angewandten Parameterwerte somit stets unter Unsicherheit erfolgt, können weder die „Wahrheit“ der konzeptionellen Erklärungs-Konstrukte noch die „Richtigkeit“ der zur Parametrisierung gewählten numerischen Werte anhand gegebener empirischer Befunde nachgewiesen werden. Da sich solche Aussagen grundsätzlich nicht auf Basis empirischer Beobachtungen belegen lassen, müssen die Ergebnisse von Simulationsmodellen zwangsläufig zu wesentlichen Teilen anhand ihrer theoretischen Plausibilität beurteilt werden.

Da eine Variation des thematischen Analyseschwerpunkts unterschiedlichen Revisions- oder auch Erweiterungsbedarf gegebener Simulationsmodelle aufzeigen kann, ist grundsätzlich jede individuelle Modellanwendung als ein umfassender Falsifikationstest im Sinne von Popper (1994) interpretierbar. Wird entsprechender Anpassungsbedarf erkannt, so bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass der ursprüngliche Erklärungsansatz „falsch“ war. Im Bereich der Design-Modellierungen kann wesentlich häufiger ein sukzessiver Lerneffekt beobachtet werden, bei dem ursprünglich nicht beachtete (bzw. nicht bekannte) Systemstrukturen erst im Kontext zuvor nicht analysierter thematischen Fragestellungen erklärungsrelevant werden. Daher sollte es in einem lebendigen Forschungsumfeld eher die Regel denn die Ausnahme sein, dass auch die Strukturen von Simulationsmodellen einem stetigen Evolutionsprozess unterliegen.

Wenn die Ergebnisse eines Modells theoretisch plausibel erscheinen und auch nicht im offensichtlichen Widerspruch zu tatsächlichen Beobachtungen stehen, ist das Modell dazu geeignet, konzeptionell hergeleitete multidimensionale Wirkungsketten in einem konsistenten Analyserahmen abzubilden. Damit ist weder das konkret parametrisierte Simulationsmodell noch das dahinterstehende mentale Konzeptmodell als „wahres“ Abbild der Wirklichkeit validiert worden. Denn es ist ein längst etabliertes Faktum, dass für einen gegebenen Analysezweck die Wahl zwischen alternativen, auf unterschiedlichen theoretischen Konzeptionen basierenden Modellierungen nicht allein aufgrund formal-statistischer Aspekte vorgenommen werden kann.<sup>42</sup>

Unabhängig davon, ob numerischen Parameterfestlegungen nach Vorgabe einer externen Expertise gesetzt werden, empirische Kalibrierungs-Ansätze verwendet werden oder aber ökonometrische Schätzungen zum Einsatz kommen, werden sich diese Festlegungen in erster Linie an historischen Erfahrungen orientieren. Diese Vorgehensweise stößt im Bereich der Zukunftsforschung allerdings mitunter zwangsläufig an Grenzen. Betrachten wir wiederum das einfache Beispiel zweier erklärender Größen und unterstellen zudem, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der endogenen Variablen und diesen beiden erklärenden gegeben ist. Das totale Differential zu Gleichung (4) lautet

$$(5) \quad dy = \alpha_1 dx_1 + \alpha_2 dx_2$$

Zur Festlegung der dynamischen Eigenschaften der endogenen Variable sind für eine Simulation in diesem Beispiel also lediglich die Parameter  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  numerisch festzulegen. Wenn wir davon ausgehen, dass in der Vergangenheit Variationen sämtlicher Größen (also der endogenen Variable sowie beider erklärender Variable) beobachtet werden konnten, ist eine solche Festlegung sicherlich relativ einfach durchzuführen. Wie soll nun aber damit umgegangen werden, wenn bspw. für Variable  $x_2$  in der Vergangenheit keine Variationen zu beobachten waren ( $\alpha_2 dx_2 = 0$ )? Ein solcher Fall ist offensichtlich immer dann gegeben, wenn

---

<sup>42</sup> Diesbezüglich kann bspw. der Wirtschafts-Nobelpreisträger Heckman zitiert werden: „An important contribution of econometric thought was the formalization of the notion developed in philosophy that many different theoretical models and hence many different causal interpretations may be consistent with the same data.“ (Heckman 2000; S. 47)

ein Szenario das Aufkommen „neuer“ (bislang nicht beobachtbarer) systematischer Einflüsse in der Zukunft abbilden soll.

In einem Simulationsmodell welches im Sinne der Abbildung 13 als Design-Modell zu charakterisieren ist, muss es selbstverständlich möglich sein, für frei wählbare Parameter (in diesem Beispiel  $\alpha_2$ ) auch beliebige Zahlenwerte zu setzen. Das kennzeichnende Merkmal der Design-Modelle ist schließlich, dass sie nicht in erster Linie zu Beschreibung oder theoretischer Analyse eines bestehenden Systems erschaffen wurden, sondern das Verständnis potenzieller Systemveränderungen befördern sollen. Daher ist es bspw. auch in GINFORS3 grundsätzlich möglich, bislang unbekannte, zukünftig aber neu aufkommende Kausaleffekte in einem simulierten Szenario umfassend zu berücksichtigen.

Eine Möglichkeit wäre es daher, einfach eine beliebige numerische Festsetzung für den Parameter  $\alpha_2$  zu treffen um die dadurch sichtbar werdenden Ergebnismuster zu analysieren. Damit wird aber das uns interessierende Anwendungsfeld der in der Politikberatung notwendigen Design-Modellierungen eindeutig verlassen. Gemäß der in Abbildung 13 vorgenommenen Unterscheidung handelt es sich stattdessen um eine theoretische Modellierung, welche unter gegebenen Annahmen zwar logische Schlüsse von Systemzusammenhängen zulässt, aufgrund mangelnder empirischer Kohärenz aber nicht mehr dazu geeignet ist, die Auswirkungen alternativer Handlungsoptionen konkret zu beurteilen.

Wenn wir davon ausgehen, dass Modellanwendungen in der Politikberatung in erster Linie sachlich interpretierbare Befunde zur Strukturierung häufig widersprüchlicher Diskurse generieren sollten, ließe sich diese Vorgehensweise grundsätzlich sicherlich durch ergänzende Sensitivitätsanalysen rechtfertigen. Durch den Vergleich alternativer Modellergebnisse bei Variation der historisch nicht bekannten Parameterwerte innerhalb eines als plausibel anzusehenden Wertebereichs könnten so zumindest die durch entsprechende Setzungen hervorgerufenen Simulationsunsicherheiten sichtbar gemacht werden. Diese Vorgehensweise kann allerdings im Alltag häufig aufgrund der Komplexität der abgebildeten Systemzusammenhänge nicht zielführend umgesetzt werden.<sup>43</sup>

Inhaltlich überzeugender erscheint jedenfalls eine Vorgehensweise, welche sich darum bemüht, die Entscheidung zur Festlegung eines solchen Parameters unter Berücksichtigung möglichst umfassender Informationen vorzunehmen. Dabei könnten einerseits wiederum Methoden aus dem Bereich der qualitativen Zukunftsforschung angewandt werden, um im Rahmen partizipativer Prozesse gemeinsam geteilte Vorstellungen bezüglich plausibel erscheinender Parameterwerte herzuleiten.<sup>44</sup> Häufig bieten sich aber auch Ansatzmöglichkeiten, die in Totalmodellen notwendigen Parameter auf Basis von Anwendungen partialanalytischer Simulationsmodelle herzuleiten.

Das SimRess-Projekt zielte nicht darauf ab, konkrete Umsetzungen entsprechender Verfahren durchzuführen. Daher kann zum Abschluss dieses Projekts bspw. nicht auf eine eigene exemplarische Integration der Ergebnisse partialanalytischer Simulationsrechnungen verwiesen werden. Unter Verweis auf die von Ditttrich et al. (2017) dokumentierte Verwendung der partialanalytischen Modelle TREMOD (Modellierung des Verkehrsbereichs), GEMOD (Wärme- und Kälteverbrauch in Gebäuden) und SCOPE (Energiewirtschaft) zur Generierung von Abschätzungen des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarfs sowie der nationalen Treibhausgas-Entwicklungen mit einem komparativ-statischen Analyserahmen (URMOD) können wir aber generell festhalten, dass ein vergleichbares Zusammenspiel von TREMOD, GEMOD und SCOPE mit dem dynamischen Simulationsmodell GINFORS3 ebenfalls realisierbar wäre. Der Vorteil eines solch integrierten Ansatzes unter Verwendung des dynamischen Simulationsmodells GINFORS3 wäre dabei dadurch gegeben, dass

---

<sup>43</sup> Wenn bspw. in einer Simulation des Modells GINFORS3 die zukünftige Entwicklung einer neuen, bisher nicht Existierenden, Industrie abgebildet werden soll. So sind für diese Industrie (u.a.) Annahmen zu ihrer Vorleistungsnachfrage im Hinblick auf 59 alternative Güter und Dienstleistungen, ihres Produktionsniveaus sowie der damit verbundenen Arbeitsnachfrage im Zeitablauf zu parametrisieren. Da dabei eine hohe Anzahl zusätzlicher Simulationsparameter numerisch festzulegen wären, ist nicht davon auszugehen, dass ergänzende Sensitivitätsstudien eindeutig interpretierbare Befunde generieren würden.

<sup>44</sup> Siehe hierzu bspw. auch Weimer-Jehle und Kosow (2017).

ein dynamisches Modell Entwicklungsdynamiken im Zeitablauf analysieren und darstellen kann. Im Vergleich zu einer rein komparativ-statistischen Analyse (welche lediglich alternative Systemzustände miteinander vergleicht) werden durch GINFORS3 also auch die Entwicklungswege von der Gegenwart zu zukünftigen Systemzuständen explizit abgebildet.

Während über das konkrete Vorgehen zur numerischen Festlegung ausgewählter Parameter in gegebenen Projektkontexten jeweils im Einzelfall zu entscheiden ist, können wir vor Hintergrund der diesbezüglich sichtbaren Herausforderungen allgemein festhalten, dass nicht nur die konzeptionellen Grundlagen eines eingesetzten Modells nachvollziehbar dokumentiert werden müssen. Insbesondere in dynamischen Modellierungen können Parametervariationen ausreichend sein, um die qualitativen Befunde eines Simulationslaufes deutlich zu ändern.<sup>45</sup> Eine sachliche Interpretation von Simulationsergebnissen kann daher nur gelingen, wenn die angewandten Parametrisierungs-Methoden zumindest umfassend erläutert werden.

## **2.2 Wesentliche Herausforderungen bei der Modellierung umwelt-ökonomischer Systemzusammenhänge**

### **2.2.1 Welche Stellschrauben/Komponenten des (Wirtschafts-) Systems sind unabdingbar?**

Während das vorherige Unterkapitel aus einer generellen Perspektive die Notwendigkeit zur sowie die Herausforderungen bei der Anwendung von Simulationsmodellen im Bereich der Zukunftsforschung vorstellt, wenden wir an dieser Stelle unser Augenmerk auf spezifische Aspekte bei der Umsetzung umwelt-ökonomischer Simulationsansätze. Die uns dabei leitenden Fragen lauten: Inwieweit werden sozioökonomische Systemdynamiken und deren Reaktion auf Politikinterventionen von existierenden ökonomischen Simulationsmodellen abgebildet? Welche Rolle spielen dabei unterschiedliche theoretische Konzeptionen? Und inwie weit reflektieren die Modelle historische Erfahrungen?

Im Hinblick auf klimaökonomische Simulationsstudien diskutieren Scriciu et al. (2013) vergleichbare Fragestellungen. Wir orientieren uns daher an der von ihnen vorgeschlagenen Klassifikationssystematik, indem wir zuerst auf die gängige Unterscheidung zwischen Bottom-Up und Top-Down Modellen eingehen. Bottom-Up Modelle sind Partialmodelle einzelner Wirtschaftssektoren, die eine sehr detaillierte Beschreibung der Technik des betrachteten Sektors vornehmen (im Kontext klimaökonomischer Analysen wird dabei üblicherweise der Energiesektor modelliert). Gesamtwirtschaftliche Rahmendaten sowie Annahmen zur Entwicklung übriger Sektoren müssen bei alleiniger Anwendung eines Bottom-Up Modells exogen vorgegeben werden. In einer eigenständigen Partialanalyse ist es somit nicht möglich, Interdependenzen zwischen der Entwicklung des betrachteten Sektors und der Entwicklung übriger Wirtschaftszweige, bzw. weitergehende gesamtwirtschaftliche Rückwirkungen abzubilden.

Im Vergleich hierzu beruhen Top-Down Modelle auf einem gesamtwirtschaftlichen Analyserahmen. Im Hinblick auf den von ihnen jeweils abgebildeten Informationsumfang können Top-Down-Modelle dabei deutliche Unterschiede aufweisen. So werden bspw. in Neoklassischen Wachstumsmodellen üblicherweise keine sektoralen Differenzierungen vorgenommen. Auf dieser Aggregationsebene ist es offensichtlich unmöglich, Wechselwirkungen innerhalb des sozioökonomischen Systems näher zu analysieren. Im Bereich der Resourcenpolitik ist aber gerade die Analyse des komplexen Zusammenspiels zwischen unterschiedlichen, einander in der Regel überlagernden Einflüssen und deren interdependente Auswirkungen innerhalb wie auch außerhalb des sozioökonomischen Systems weitergehend zu erforschen.<sup>46</sup> Die Eignung ökonomischer

---

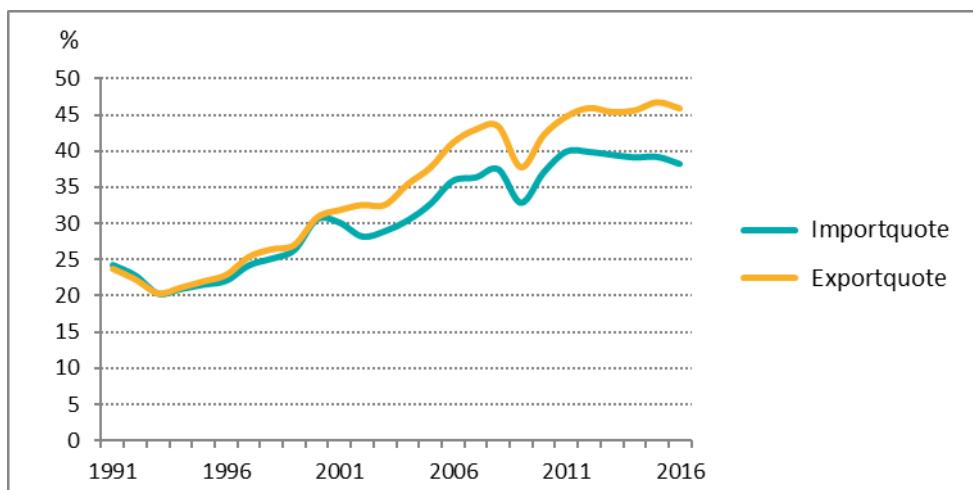
<sup>45</sup> Gemäß Schnell (1990) lässt sich bspw. häufig beobachten, „dass die von einer Theorie behaupteten Konsequenzen nur beim Vorliegen bestimmter dieser bisher nicht explizit genannten zusätzlichen Annahmen auftreten und selbst dann nur bei bestimmten Parameterwerten.“ (Schnell 1990; S. 118)

<sup>46</sup> Siehe hierzu bspw. Hirschnitz-Garbers et al. (2016): „More research is needed to disentangle the complex network of drivers and to better understand the cumulative effect of interrelations between drivers and resource use.“ (Hirschnitz-Garbers et al. 2016; S. 28)

Top-Down Modelle zur Anwendung in ressourcenpolitischen Analysen nimmt daher mit deren Aggregationsgrad stetig ab.

Dieser Aspekt ist nicht nur im Hinblick auf eine disaggregierte Betrachtung von einzelnen Wirtschaftssektoren und den von ihnen bereitgestellten Gütern und Dienstleistungen relevant: Die deutsche Importabhängigkeit (Anteil der Importe am BIP) hat sich seit 1993 nahezu verdoppelt und rangiert heute nahe 40% (vgl. Abbildung 16). Für die Exporte zeigte sich in der jüngeren Vergangenheit eine noch dynamischere Entwicklung: Der Anteil der Exporte am Bruttoinlandsprodukt ist von 20,4% in 1993 auf 45,9% in 2016 gestiegen.

Abbildung 16: Entwicklung der deutschen Import- und Exportquote



Quelle: Statistisches Bundesamt (2017)

Die dadurch abgebildete Tendenz zur zunehmenden Internationalisierung von Vorleistungs- und Endnachfragerketten beförderte eine regionale Trennung zwischen ursächlichen Lebensstilen und Konsummustern und den zur Befriedigung dieser Konsumnachfrage notwendigen Produktionsaktivitäten. Um unter Anerkennung des Konzepts planetarer Grenzen (Rockström et al. 2009) Umweltbelastungstendenzen durch geeignete Indikatoren abzubilden genügt es daher nicht, lediglich nationale Entwicklungen (bspw. territoriale Extraktions- oder Emissionstendenzen) zu beobachten. Unter Nachhaltigkeits- sowie Gerechtigkeitsaspekten müssen vielmehr die globalen Auswirkungen nationaler Handlungen in den Fokus der Berichterstattung rücken.

Zur Erfassung dieser globalen Auswirkungen wurden im Bereich der angewandten Nachhaltigkeitsforschung in jüngerer Vergangenheit zahlreiche sogenannte „Footprint“-Konzepte für thematisch unterschiedliche Umweltindikatoren entwickelt.<sup>47</sup> Die empirische Anwendung dieser Kalkulationsroutinen wird allerdings institutionell dadurch erschwert, dass eine hierfür notwendige globale Harmonisierung der Berichterstattung nationaler statistischer Ämter bislang nicht etabliert wurde. Wie im folgenden Unterkapitel am Beispiel der Multi-Regionalen Input-Output Rechnungen (MRIO) näher dargestellt wird, konnten erst in den vergangenen Jahren erste MRIO-Datensätze von unabhängigen Forschungsprojekten erstellt und zur weiteren Analyse der Öffentlichkeit zugängig gemacht werden.

<sup>47</sup> Siehe bspw. Hoekstra und Wiedmann (2014) für einen Literaturüberblick.

## 2.2.2 Welche Datenquellen stehen für eine solche Modellierung zur Verfügung?

Während nationale statistische Ämter üblicherweise die wechselseitigen Vorleistungsverflechtungen zwischen den Sektoren eines Wirtschaftsgebiets relativ regelmäßig in Form von Input-Output Tabellen erfassen, existiert bislang keine vergleichbare institutionalisierte Rechnungslegung auf multinationaler Ebene.<sup>48</sup> Einigen wenigen internationalen Forschungsteams gelang es aber in den vergangenen Jahren, die verfügbaren nationalen amtlichen Input-Output Rechnungen in sogenannten Multi-Regionalen Input-Output Rechnungen (MRIO) aufeinander abzustimmen. Mit diesen MRIO-Datensätzen liegen nun erstmals die notwendigen Informationen für sektoral- wie auch regional disaggregierte Analysen multinationaler Wertschöpfungsstrukturen in harmonisierten Strukturen vor.<sup>49</sup>

Abbildung 17: Konzeptionelle Darstellung einer Multi-Regionalen Input Output Tabelle

		Use by country-industries				Final use by countries		Total use
		Country 1		Country M		Country 1	Country M	
		Industry 1	Industry N	Industry 1	Industry N	...	...	
Supply from country-industries	Country 1	Industry 1						
	...							
	Industry N							
	.....							
	Country M	Industry 1						
	...							
Value added by labour and capital								
Gross output								

Quelle: Timmer et al. 2015; S. 577

Das wesentliche konzeptionelle Merkmal einer global harmonisierten Input-Output Rechnung verdeutlicht Abbildung 17. Werden diese monetären Statistiken um umwelt- und energiebezogene Statistiken ergänzt, spricht man von sogenannten „Environmentally Extended“-MRIO Datenbanken (EE-MRIO). Die Grundidee in der Anwendung von EE-MRIO Tabellen besteht darin, physische Indikatoren der Umweltbelastung (bspw. Emissionen oder Primärrohstoffextraktionen) in ihren jeweiligen Relationen zu monetären Produktionsaktivitäten zu erfassen. Auf Basis dieser sogenannten Rohstoffkoeffizienten ist es dann bspw. möglich, die durch nationale Konsumentwicklungen ausgelösten Primärrohstoffextraktionen über global geschlossene Vorleistungslieferketten zurückzuverfolgen.

Anzumerken ist, dass MRIO-Statistiken nicht nur unmittelbar für ex post-Analysen im Sinne von (u.a.) Bruckner et al. (2012), Wiebe et al. (2012), Wiedmann et al. (2015) oder Wood et al. (2015) eingesetzt werden können. Unter Einführung einiger zusätzlicher Annahmen ermöglicht eine MRIO-Tabelle auch bereits eigenständige komparativ-statistische Szenario-Analysen. Unter Vorgabe hypothetischer Parameterveränderungen für Elemente der Endnachfrage (also bspw. der Konsumstrukturen oder dem Investitionsniveau), der Inputkoeffizienten sowie der Rohstoffkoeffizienten können alternative Systemzustände simuliert werden, welche auf einer konsistenten Beschreibung globaler Vorleistungslieferketten beruhen.<sup>50</sup>

<sup>48</sup> Für eine eigenständige Einführung in Grundlagen der Input-Output Rechnungen sowie weitergehenden Anmerkungen zur Praxis der Input-Output Rechnungen in Deutschland sei auf Statistisches Bundesamt (2010) verwiesen.

<sup>49</sup> Unter Verweis auf Tukker und Dietzenbacher (2013) sowie Wiedmann und Barrett (2013) sind derzeit insbesondere die folgenden fünf Datensätze in der wissenschaftlichen Fachcommunity international anerkannt: EORA (siehe bspw. Lenzen et al. 2013), EXIOBASE (Wood et al. 2015), WIOD (Dietzenbacher et al. 2013), GTAP-MRIOT (Peters et al. 2011) sowie GRAM (Wiebe et al. 2012).

<sup>50</sup> Für eine detaillierte Darstellung eines entsprechenden Anwendungsbeispiels kann (u.a.) auf Schoer et al. (2017) verwiesen werden.

Entsprechende Ansätze werden in der Ökonomie üblicherweise als Anwendungen eines statischen offenen Mengenmodells bezeichnet. Als statisch werden solche Analysen gekennzeichnet, da für die in den Tabellen abgebildeten Produktionszusammenhänge keine endogene Abbildung der zeitlichen Entwicklungsdynamik erfolgt. Der Begriff „offen“ reflektiert die Tatsache, dass die Entwicklung der Endnachfrage exogen vorgegeben werden muss. Durch Veränderungen der Faktornachfrage ausgelöste Feedbacks auf Einkommensstrukturen und deren Auswirkungen auf die Entwicklung der Endnachfrage können in diesem Analyserahmen also nicht berücksichtigt werden. Der Begriff „Mengenmodell“ weist darauf hin, dass entsprechende Analysen nicht dafür konzipiert sind, die direkten und indirekten Effekte von Preisveränderungen abzubilden.

Wenn die durch diese Begriffsklärung deutlich gewordenen Restriktionen eines solchen Ansatzes überwunden werden sollen, müssen in der Modellierung weitere Datenquellen berücksichtigt werden. Die zur Abbildung von Einkommensstrukturen notwendigen Details der Einkommensverteilung und Einkommensverwendung werden von nationalen statistischen Ämtern regelmäßig im Rahmen international weitgehend harmonisierter Inlandsprodukts- und Nationaleinkommensberechnungen zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Informationen können Kreislaufanalysen des gesamtwirtschaftlichen Geschehens unter expliziter Be- trachtung zentraler ökonomischer Wirkungszusammenhänge zwischen den Akteuren Unternehmen, Staat, Private Haushalte und Ausland in die Analysen integriert und der Analyserahmen somit geschlossen werden.<sup>51</sup> Wenn zudem die berechneten MRIO-Tabellen eine Unterscheidung zwischen Mengen- und Preisef- fektiven zulassen, ist es selbstverständlich ebenfalls möglich, die Modellierung von Produktions- und Nach- fragemengen durch ein komplementäres Preismodell zu ergänzen. Hierdurch wird es (u.a.) ermöglicht, die Strukturen von Vorleistungs- und Endnachfrage unter Berücksichtigung kosteninduzierter Substitutionsbe- ziehungen zu endogenisieren. Erst unter Einbeziehung dieser zusätzlichen Datenquellen kann somit ein dy- namischer Simulationsansatz entwickelt werden, welcher bspw. eine systematische Abbildung von Rebound Effekten (siehe hierzu bspw. Sorrell und Dimitropoulos 2008, Sorrell et al. 2009) auf Basis der ge- schlossenen Totalmodellierung des Wirtschaftskreislaufs gewährleistet.

### 2.2.3 Wahl des Modellierungsansatzes

Das vorherige Unterkapitel konkretisierte die notwendigen Datenanforderungen zur Umsetzung eines dy- namischen Simulationsansatzes im Vergleich zu komparativ-statischen Modellrechnungen. Während zuvor bereits darauf hingewiesen wurde, dass gute Argumente dafürsprechen, Design-Modellierung unter An- wendung dynamischer Simulationsmodelle durchzuführen, sei an dieser Stelle darauf eingegangen, dass im Bereich der ökonomischen Modellierung dabei sehr unterschiedliche Vorgehensweisen verfolgt werden können. Wie bspw. von Scricciu et al. (2013) mit Blick auf Top-Down Modellierungen diskutiert wird, impli- zieren unterschiedliche konzeptionelle Ansätze dabei weitreichende Auswirkungen im Hinblick auf die je- weils resultierenden dynamischen Modelleigenschaften. Gemäß der von ihnen vorgeschlagenen Untertei- lung sollten konventionelle neoklassische Ansätzen (u.a. Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle, CGE-Modelle; Optimale Wachstumsmodelle sowie Dynamische Stochastische Allgemeine Gleichgewichts- modelle, DSGE-Modelle) von einer weiten Gruppe „unorthodoxer“ Ansätze unterschieden werden.

Die zweite Gruppe ist dabei dadurch charakterisiert, dass ihre Vertreter auf konzeptionelle Modellierungen zurückgreifen, welche nicht von Vornherein das Verhalten des sozioökonomischen Systems im Sinne kon- ventioneller ökonomischer Axiome restriktieren. Allgemein kann hierzu hinterfragt werden, ob ein Modellansatz auf der Annahme repräsentativer rationaler Agenten beruht, deren Verhalten dann in den Simulati- onen als Optimierungsprozess beschrieben wird. Wenn die Konstruktion eines Simulationsmodells auf die- ser (gemäß der Wortwahl von Scricciu et al. 2013 konventionellen ökonomischen Modellierung) beruht,

---

<sup>51</sup> Siehe bspw. auch Frenkel und John (2011) für weiterführende Anmerkungen zur grundsätzlichen Bedeutung der Kreislaufdar- stellung in der makroökonomischen Theorie sowie zur Entwicklungsgeschichte konzeptioneller Ansätze der Inlandsprodukts- und Nationaleinkommensberechnungen.

muss infrage gestellt werden, ob damit sozioökonomische Systemdynamiken hinreichend abgebildet werden. Scricciu et al. plädieren daher ausdrücklich für eine Verwendung nicht-optimierender („unorthodoxer“) Simulationsmodelle in der Nachhaltigkeitsforschung.<sup>52</sup>

Allgemein lässt sich festhalten, dass eine auf den Axiomen der neoklassischen Wirtschaftstheorie beruhende Modellierung grundsätzlich unterstellt, dass in Abwesenheit weiterer politischer Maßnahmen alle Ressourcen bereits optimal genutzt werden. Vor diesem Hintergrund impliziert jede zusätzliche umweltpolitische Maßnahme in einem neoklassischen Analyserahmen generell gesamtwirtschaftliche Kosten. Im Gegensatz hierzu schließen nicht-optimierende Simulationsmodelle wie GINFORS nicht im Vornherein die Möglichkeit aus, dass Ressourcen suboptimal genutzt werden. Sie sind daher (u.a.) auch in der Lage, makroökonomische Unterbeschäftigungssituationen abzubilden oder Aspekte der Einkommensverteilung als Ergebnisse sozialer Verhandlungsprozesse abzubilden. Bezugnehmend auf die stilisierte Darstellung in Abbildung 13 scheinen entsprechende Ansätze wesentlich besser zur Umsetzung einer Design-Modellierung des sozioökonomischen Systems geeignet zu sein.<sup>53</sup>

Um einen solchen Modellierungsansatz umzusetzen sind im Vergleich zu typischen CGE-Modellen allerdings wesentlich umfassendere empirische Analysen notwendig. So wurden bspw. zur Parametrisierung von GINFORS umfassende Zeitreihen- und Querschnittsanalysen auf Basis empirischer Beobachtungen vorgenommen. Im Umfeld der Politikberatung werden Modelle mit einer solch aufwendigen empirischen Fundierung daher häufig auch als ökonometrische Modelle bezeichnet.<sup>54</sup>

Wir schließen an dieser Stelle unsere Anmerkungen zur Wahl des ökonomischen Parametrisierungs-Ansatzes mit einem Verweis auf ein jüngst von Meyer und Ahlert (2017) diskutiertes Anwendungsbeispiel. Für eine gegebene ressourcenpolitische Fragestellung vergleichen Meyer und Ahlert Simulationsergebnisse des GINFORS3-Modells (als Beispiel für ein neoklassisches, nicht optimierendes Simulationsmodell) mit Ergebnissen des EXIOMOD-Modells (als Beispiel für ein neoklassisches, optimierendes CGE-Modell). Zusammenfassend stellen sie fest, dass beide Modellanwendungen bei der Modellierung identischer Politikansätze vollkommen unterschiedliche makroökonomische Anpassungsreaktionen nahelegen: „The structural change towards a resource efficient economy induces strong investment, which in the case of GINFORS – at least partly – is additional investment compared with the reference, which drives GDP and employment. [...] EXIOMOD has a so-called neoclassical closure, which means that macroeconomic investment is determined by savings. Therefore, a rise in investment in new technologies is by assumption accompanied by a fall of other investments, which totally compensates the first effect. Since the labor market is cleared, there are also no effects on employment.“ (Meyer und Ahlert 2017; in press) Zudem zeigt sich, dass die unterschiedlichen konzeptionellen Abbildungen gesamtwirtschaftlicher Wirkungszusammenhänge dazu führen, dass der modellierte Politikmix in GINFORS3 weitreichende Effekte zur Erreichung umweltpolitischer Ziel-

---

<sup>52</sup> „Nonoptimizing simulation models are arguably in a better position to capture socioeconomic system dynamics and the role of macroeconomic policies for sustainability governance“ (Scricciu et al. 2013, p. 251).

<sup>53</sup> CGE-Modelle (wie auch andere konventionelle Ansätze) werden zumindest von Scricciu et al. (2013) als zu stark abstrahierende theoretische Modellierungen kritisiert. Im Vergleich hierzu erkennen sie: „[...] there is a need for structural macroeconomic models that portray capital and trade flows across countries and across time, and accommodate for the existence of resource unemployment and their suboptimal use that respond endogenously to climate mitigation policies.“ (Scricciu et al. 2013; S. 262). Vergleichbare Argumentationen finden sich aber bspw. auch bei Rezai et al. (2013).

<sup>54</sup> Nur am Rande sei hierzu angemerkt, dass diese Bezeichnung nicht der in der Lehrbuchliteratur allgemein üblichen Definition eines ökonometrischen Modells entspricht. In Fachdiskussionen könnte vielmehr wissenschaftsphilosophisch hinterfragt werden, ob die zur Konstruktion eines für die Politikberatung relevanten Design-Modells notwendigen theoretischen Strukturannahmen im Widerspruch zu „reinen“ ökonometrischen Forschungsansätzen stehen. Eine weitergehende Erörterung dieses Aspekts kann unter Berücksichtigung der Zielsetzung dieses Dokuments sicherlich hier unterlassen werden. Daher weisen wir an dieser Stelle nur aus Gründen der Vollständigkeit darauf hin, dass der Begriff eines ökonometrischen Modells von unterschiedlichen Anwenderkreisen tendenziell mit sehr unterschiedlichen Analyseansätzen assoziiert wird.

setzungen freisetzt. In den EXIOMOD-Simulationen können keine vergleichbaren Effekte aufgezeigt werden. Weitergehende Simulationsdetails können jeweils umfassenden eigenständigen Dokumentation entnommen werden (Meyer et al. 2015, Hu et al. 2015).

## 2.3 Das Modell GINFORS3

### 2.3.1 Wie lässt sich GINFORS methodisch einordnen?

GINFORS3 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 Akteursgruppen (Private Haushalte, Unternehmen, Staat sowie Übrige Welt). Angebotsseitig werden 35 Wirtschaftssektoren unterschieden, welche 59 Güter- und Dienstleistungsgruppen produzieren.

Zur Simulation der jeweiligen Verhaltensweisen der Akteure werden dynamisch spezifizierte Reaktionsfunktionen verwendet. Dabei ist in der Regel unterstellt, dass die Akteure ihre heutigen Entscheidungen auf der Basis adaptiver Erwartungen über die Zukunft treffen. Die hieraus resultierenden zeitlichen Reaktionsverzögerungen bei der Anpassung bisheriger Verhaltensmuster an veränderte Systemzustände bilden in ihrer Interaktion komplexe sozioökonomische Feedback-Strukturen ab.

Da die durch die konzeptionellen Strukturen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen definierten makroökonomischen Systemzusammenhänge geschlossenen abgebildet werden, erfüllt GINFORS3 die Ansprüche einer globalen ökonomischen Totalmodellierung. Dabei können in 36 Wirtschaftsgebieten für jeden institutionellen Akteur die interdependenten Prozesse der Einkommensentstehung, -verteilung und -verwendung geschlossen abgebildet werden.<sup>55</sup> Neben vielen Details der Umverteilung zwischen Staat, Unternehmen und Privaten Haushalten durch das Steuersystem und die Sozialversicherung kann hierdurch für jeden Akteur die Entwicklung des verfügbaren Einkommens sowie des Finanzierungssaldos betrachtet werden. Da das verfügbare Einkommen (im Zusammenspiel mit im Zeitablauf variablen Relativpreisrelationen) eine wesentliche Bestimmungsgröße unterschiedlichster Nachfragekomponenten repräsentiert, können in sämtlichen Simulationsrechnungen makroökonomische Rebound Effekte (siehe hierzu bspw. Sorrell und Dimitropoulos, 2008; Sorrell et al., 2009) konsistent abgebildet werden. Ferner erlaubt die endogene Bestimmung des Finanzierungssaldos des Staates die Berechnung des Schuldendandes und damit die Berücksichtigung von Maßnahmen zur Schuldenbegrenzung.

Der generellen INFORUM-Philosophie folgend (Almon, 1991), werden die soeben angesprochenen makroökonomischen Kreislaufzusammenhänge um eine komplementäre Abbildung nationaler wie auch internationaler Produktionsverflechtungen zwischen unterschiedlichen Wirtschaftssektoren ergänzt. 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.

Für die hierzu notwendigen Modellparametrisierungen dienten die Ergebnisse des World Input Output Database Projektes (WIOD) als Ausgangsdatensatz.<sup>56</sup> Diese Entscheidung war insbesondere dadurch be-

---

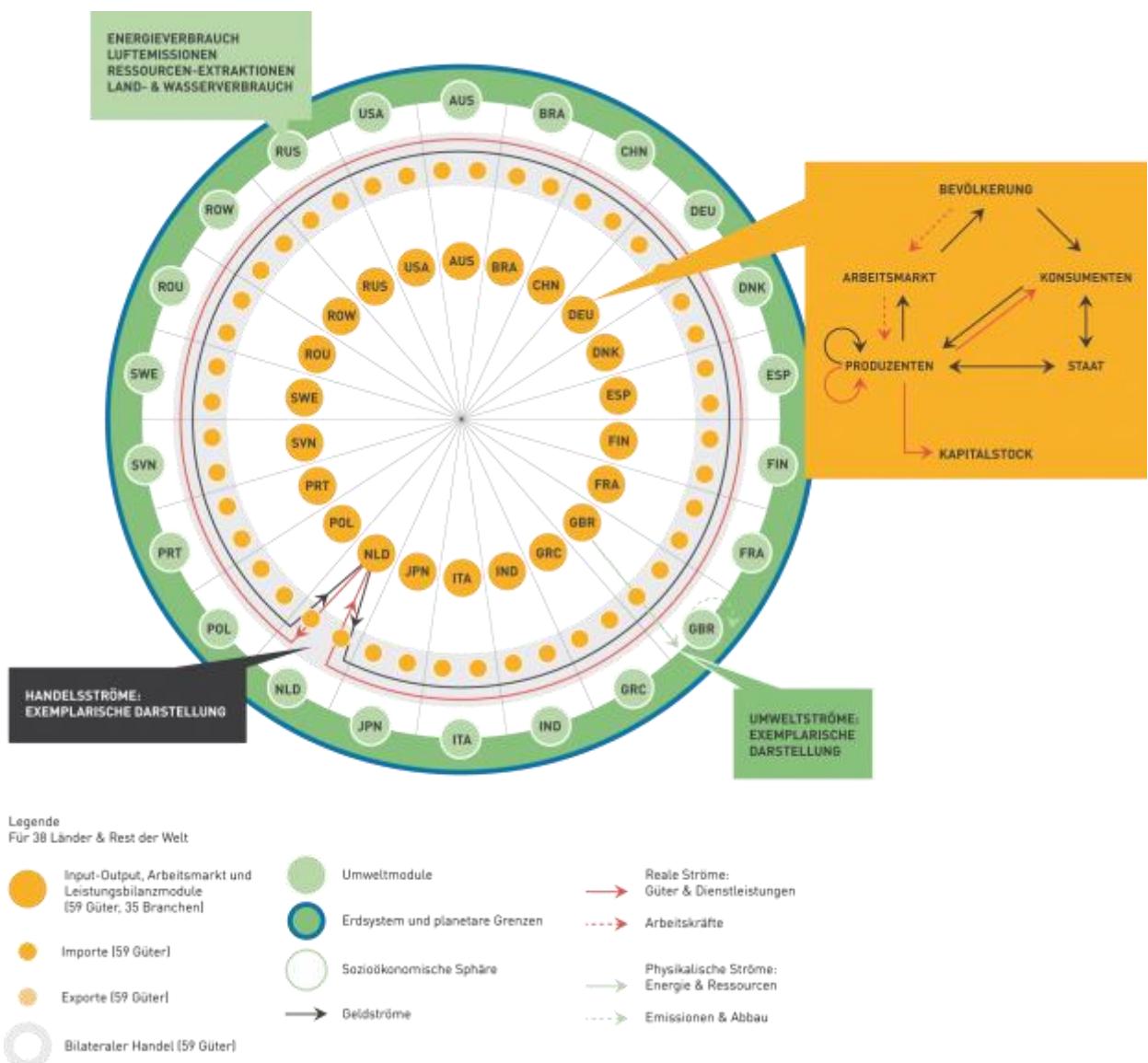
<sup>55</sup> Für die Region „Rest der Welt“ kann eine solche Unterteilung nicht sinnvoll vorgenommen werden, da bspw. die institutionelle Einheit „Staat“ auf diesem Aggregationsniveau nicht definiert ist. Für Malta und die Türkei kann zudem (aufgrund lückenhafter amtlicher Berichterstattungen) keine im Sinne der restlichen Modellstrukturen vollständige Unterteilung der makroökonomischen Transaktionen für sämtliche Akteure vorgenommen werden.

<sup>56</sup> siehe auch <http://www.wiod.org/>.

gründet, dass vom WIOD-Konsortium erstmals eine international vollständig harmonisierte Zeitreihe nationaler Aufkommens- und Verwendungstabellen (supply and use tables, SUT) erstellt wurde, welche zudem zusätzlich um umwelt- und energiebezogene Informationen ergänzt wurden. Weitergehende Details sowie exemplarische Anwendungen dieses Datensatzes finden sich bspw. bei Dietzenbacher et al. (2013) oder Timmer et al. (2015).

Konzeptionell lässt sich somit der Berichtsumfang des dynamischen Simulationsmodells GINFORS3 wie in Abbildung 18 visualisiert darstellen. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden in dieser schematischen Darstellung dabei lediglich für 22 Wirtschaftsregionen (innerer gelber Punktekreis) die im Modell berücksichtigten Auswirkungen des internationalen Wettbewerbs durch eine explizite Modellierung bilateraler Handelsstrukturen (äußerer gelber Punktekreis) berücksichtigt. Die über die soeben angesprochenen EE-MRIO Be- rechnungsmodulen ausgewiesenen Umweltindikatoren (Ressourcenextraktionen, Energieverbrauch, Luf temissionen, Land und Wasserverbrauch) werden durch den äußeren Ring grüner Kreise symbolisiert.

Abbildung 18: GINFORS3 – schematische Übersicht der Systemgrenzen und Systemstrukturen



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Detaillierte Übersichten der in den jeweiligen Systemsphären bestimmten Beobachtungen und Zusammenhänge werden im nachfolgenden Unterkapitel zusammengestellt. An dieser Stelle sei daher nur generell

angemerkt, dass GINFORS3 als globales Totalmodell sozioökonomischer Zusammenhänge durch einen sehr hohen Endogenitätsgrad gekennzeichnet ist. 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.

Die Modellparameter werden unter Anwendung (panel-)ökonometrischer Methoden der Zeitreihenanalyse empirisch geschätzt. Die Modellierung der ökonomischen Kausalzusammenhänge erfolgt dabei stets theoriegeleitet. Diese, auf einem positiven Wissenschaftsverständnis beruhende Vorgehensweise steht in enger Tradition zu dem im Umfeld der sogenannten Cowles Commission (siehe hierzu bspw. Christ, 1994) in den 30er bis 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts etablierten ökonometrischen Wissenschaftsverständnisses. So werden bei Spezifikation der Modellgleichungen stets alternative Erklärungsansätze auf Basis der beobachteten Daten überprüft. Die Parametrisierung ist somit stets mit einem Test alternativer theoretischer Kausalstrukturen verbunden. Bei der Parametrisierung der jeweiligen Reaktionsfunktionen in GINFORS3 wurde dabei, neben der statistischen Signifikanz der geschätzten Modellparameter, insbesondere der Wahl einer validen funktionalen Form sowie der Konsistenz der geschätzten Modellparameter hohe Aufmerksamkeit geschenkt. Für sämtliche zu schätzende Reaktionsparameter kann auf Basis ökonomischer Theorien in der Regel bereits im Vorfeld ein sinnvoll interpretierbarer Wertebereich definiert werden. Sofern Schätzergebnisse außerhalb dieses Wertebereichs liegen, werden die getesteten Spezifikationen verworfen.

Um diese Parametrisierungen vornehmen zu können, wurde der bereits erwähnte WIOD-Datensatz von uns im Zuge umfassender interner Konsistenzprüfungen unter Verwendung aktueller Veröffentlichungen der amtlichen Statistik notwendigen Revisionen unterworfen und um Angaben der Statistikabteilung der Vereinten Nationen (UN) zur Bevölkerung und zum Kontensystem der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) sowie um vom Internationalen Währungsfonds (IMF) veröffentlichte Daten zur finanziellen Lage (u.a. Öffentliche Verschuldung) ergänzt. Da sämtliche soeben genannten Datensätze auf Basis international anerkannter Buchungssystematiken erstellt wurden (siehe hierzu bspw. im europäischen Kontext EUROSTAT 2008), ist die empirische Datenbank des GINFORS3-Modells insgesamt durch ein hohes Maß an Objektivität, Reliabilität und Validität gekennzeichnet.

### 2.3.2 Welche Systemkomponenten sind wie detailliert abgebildet?

Dieses Unterkapitel ergänzt unsere vorherige einleitende methodische Kurzbeschreibung um eine übersichtliche Zusammenstellung weitergehender konzeptioneller Modelldetails. Die Darstellung basiert dabei im Wesentlichen auf der Modellbeschreibung von Meyer (2016). Wie detailliert die einzelnen Systemkomponenten abgebildet werden (können), wird ganz wesentlich durch die entsprechenden Datenverfügbarkeiten determiniert. Als zentrale Datenbasis für GINFORS3 fungiert der im Jahr 2012 veröffentlichte WIOD-Datensatz, der seinerseits auf eine Vielzahl von Daten nationaler und supranationaler statistischer Ämter (insbesondere Eurostat & UNSD) zurückgreift. Dieser Datensatz umfasst für alle Beobachtungen Zeitreiheninformationen für die Jahre 1995 bis 2009 und ist, soweit Wirtschaftsbereichs- oder Gütergruppenklassifikationen angesprochen sind, WZ03 bzw. ISIC Rev. 3 basiert.<sup>57</sup> Neben dem WIOD-Datensatz sind als zentrale Datenquellen von GINFORS3 zudem die Materialflows-Datenbank der WU Wien<sup>58</sup>, die Statistikabteilung der

<sup>57</sup> Ursprünglich war im Rahmen des Forschungsprojektes SimRess geplant, die Gütergruppendifferenzierung in den multiregionalen Input-Output-Tabellen im Bereich der Rohstoffe weiter zu differenzieren. Analysen zu den hierfür notwendigen Datenverfügbarkeiten haben jedoch dazu geführt, dass dieser Plan auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Ressourcen und Daten nicht hinreichend valide Abschätzungen geliefert hätte. Zudem hat sich parallel ein internationales Forschungs-Konsortium u.a. im Rahmen des EU-Forschungsprojektes CREEA (Compiling and refining environmental and economic accounts) diesem Ziel gewidmet. Ein entsprechend weitergehend differenzierter MRIO-Datensatz im Zeitreihenformat für die 1995 bis 2011 (Exiobase 3) ist der interessierten Fachöffentlichkeit seit Ende 2016 / Anfang 2017 zugänglich, konnte im Rahmen von SimRess jedoch nicht mehr berücksichtigt werden.

<sup>58</sup> Für Daten zur verwerteten inländischen Rohstoffentnahme und zu den ungenutzten Entnahmen in den Jahren 1980 bis 2013.

Vereinten Nationen<sup>59</sup>, die Eurostat-Datenbank<sup>60</sup> und die Datenbank der FAO<sup>61</sup> zu nennen. Zudem wurde nicht unerheblicher Aufwand betrieben um offensichtliche Datenfehler im WIOD-Datensatz zu identifizieren und zu eliminieren ohne hierbei die Konsistenz-eigenschaften des VGR-Systems zu verletzen.

## **Länder und Regionen**

Das Modell GINFORS3 unterscheidet 38 Länder und eine Region „Rest der Welt“. Für jedes dieser Länder und die Region „Rest der Welt“ sind soweit wie möglich die nachstehend beschriebenen interdependenten sozioökonomischen und Umwelt-Module implementiert. Die Liste der Länder (vgl. Tabelle 42 im Anhang) umfasst alle EU-Mitgliedsstaaten mit Ausnahme von Kroatien. Zudem sind mit den USA, Japan, Kanada, Südkorea und Australien die wichtigsten außereuropäischen Industrieländer durch eigenständige Module abgebildet. Dies gilt zudem für die Türkei, Russland, Brasilien, Mexiko und Indien.

Die durch die WIOD-Datenbank für sämtliche soeben aufgezählten Volkswirtschaften sowie die verbleibende Region „Rest der Welt“ in harmonisierter Form verfügbaren sozio-ökonomischen Detailinformationen haben die Möglichkeiten zur Durchführung multi-regionaler Analysen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene sicherlich erheblich verbessert. So wird heute durch GINFORS3 beispielsweise für jede individuelle Volkswirtschaft wie auch die Region „Rest der Welt“ die Produktions-Seite durch regional-spezifische Input-Output-Strukturen vollständig abgebildet. Dieses Merkmal markiert einen erheblichen Entwicklungsfortschritt von GINFORS3 im Vergleich zu früheren Modellversionen. Aus einer ressourcenpolitischen Perspektive wären gleichwohl zukünftig auch weitergehende Verbesserungen der Datenbasis wünschenswert. Entsprechende Arbeiten sollten insbesondere auf eine nähere Betrachtung der Region „Rest der Welt“ abzielen. Die Region „Rest der Welt“ umfasst derzeit ganz Afrika, weite Teile Lateinamerikas, den gesamten Nahen und Mittleren Osten (ohne Türkei) und eine Vielzahl von kleineren Volkswirtschaften in Asien, Europa und Ozeanien. Damit fasst dieses Aggregat aktuell die Entwicklungen für viele heterogene Länder und Regionen, darunter eine Vielzahl von bedeutenden Rohstofflieferanten, zusammen. Nachdem das SimRess-Projekt nicht darauf abzielte, entsprechende Datenarbeiten eigenständig voranzutreiben, bleibt es zukünftigen Forschungsaktivitäten vorbehalten, verbesserte Datenverfügbarkeiten zu evaluieren um weitergehende Detailmodellierungen (zumindest für ressourcenpolitisch relevante Regionen) zu entwickeln. Entsprechende Arbeiten setzen jedoch die Verfügbarkeit von umfassenden und hinreichend validen historischen Daten (in Zeitreihenformat) voraus, die zum Zeitpunkt der Bearbeitung des hier dokumentierten Forschungsprojektes nicht gegeben war.<sup>62</sup>

### **2.3.2.1 Die sozioökonomischen Systemkomponenten**

Die Grundstruktur der abgebildeten sozioökonomischen Systeminterdependenzen in den einzelnen Ländern findet sich in nachstehender Abbildung 19 veranschaulicht. Auf der Endnachfrageseite der Gütermärkte werden die Konsumausgaben der privaten Haushalte, die Konsumausgaben der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck, Konsumausgaben des Staates und die Bruttoanlageinvestitionen, jeweils differenziert nach 59 Gütergruppen (siehe Tabelle 43 im Anhang), erklärt. Die Endnachfragekomponente „Exporte“ wird durch die Interaktion mit den anderen Ländermodellen über das bilaterale Handelsmodul (s.u.) determiniert.

Als Erklärende für die Konsumausgaben dienen hierbei das jeweilige verfügbare Einkommen, der Preis der jeweiligen Gütergruppe in Relation zum durchschnittlichen Konsumpreis, das relative Konsumniveau im

---

<sup>59</sup> U.a. für Daten für die Konten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung.

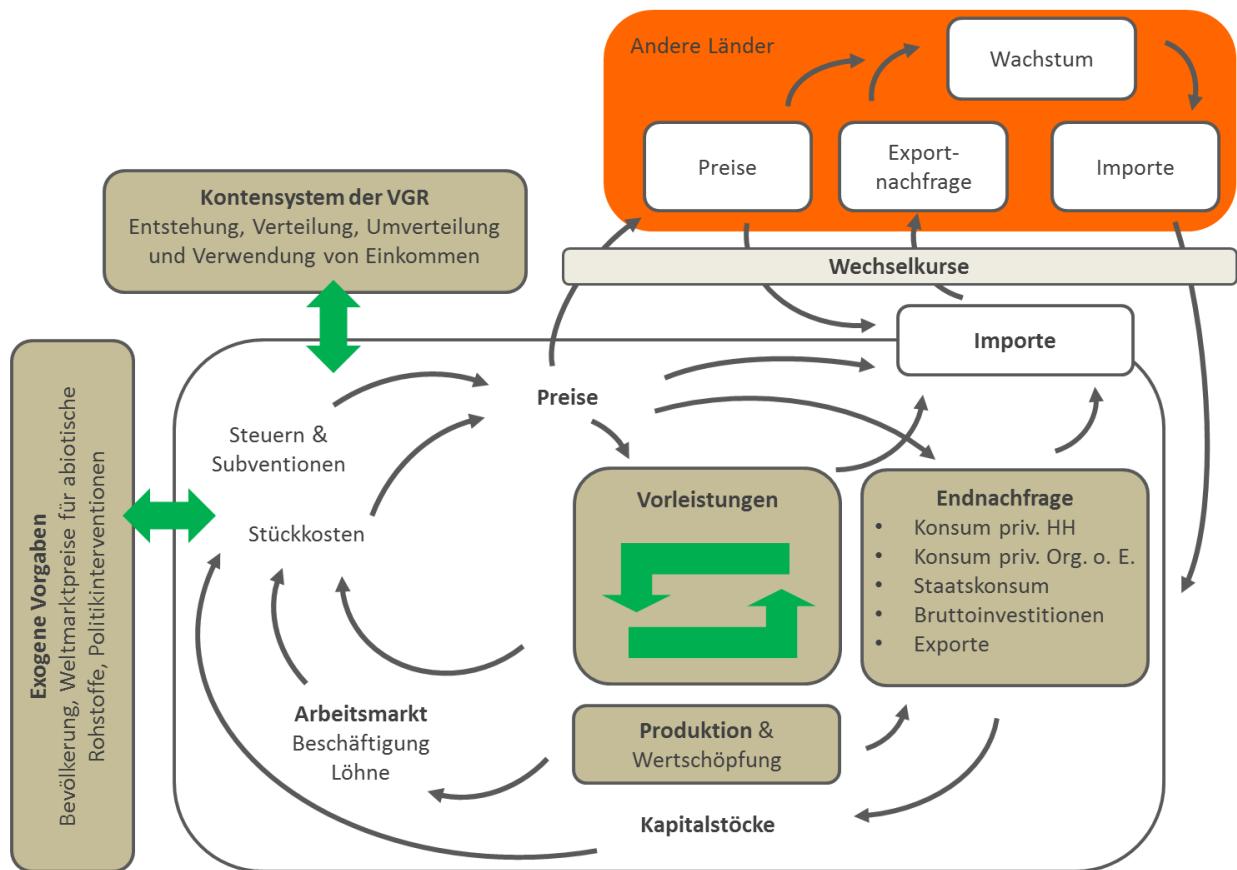
<sup>60</sup> U.a. für Daten zur Energieinfrastruktur.

<sup>61</sup> U.a. für Daten zu Nachfrage, Angebot und Flächenbelegung agrarischer Erzeugnisse.

<sup>62</sup> Inzwischen könnte beispielsweise konkret geprüft werden, inwiefern die im EXIOBASE-Datensatz angelegte weitergehende Differenzierung in 5 Rest of World-Regionen (RoW Asia & Pacific, RoW America, RoW Europe, RoW Africa und RoW Middle East) eine solche Option für weitergehende Modellverbesserungen darstellt.

Land<sup>63</sup> und Trends. Bei der Überprüfung der Stärke der einzelnen Einflussfaktoren zeigt sich beispielsweise, dass die Preiselastizität der Nachfrage der privaten Haushalte für Nahrungsmittel (-0,35) deutlich geringer ist, als diejenige der Nachfrage nach Fahrzeugen (-0,66). Ein anderes Beispiel zeigt, dass sowohl im Zeitablauf als auch mit zunehmendem relativem Konsumniveau der Anteil der Konsumausgaben der privaten Haushalte der für E-Technik<sup>64</sup> aufgewendet wird, zugenommen hat.

Abbildung 19: GINFORS3 – Übersicht der sozioökonomischen Systeminterdependenzen



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Als Erklärende für die Bruttoanlageinvestitionen nach 35 Wirtschaftsbereichen (siehe Tabelle 44 im Anhang) dienen der Kapitalstock und die Produktion der Vorperiode, der wirtschaftsbereichsspezifische Preis der Bruttoanlageinvestitionen in Relation zum allgemeinen Preisniveau sowie die Ersparnisse des Unternehmenssektors in Relation zum Bruttoinlandsprodukt in der Vorperiode.<sup>65</sup> Bei der Überprüfung der Stärke der einzelnen Einflussfaktoren zeigt sich durch das Zusammenspiel von Kapitalstock- und Produktionselastizität ein langfristiger Trend zu mehr Kapitalproduktivität. Zudem zeigen sich die Bruttoanlageinvestitionen vergleichsweise preissensibel. Die Bruttoanlageinvestitionen nach 35 Wirtschaftsbereichen werden an-

<sup>63</sup> Pro Kopf Konsumausgaben im Land im Verhältnis zum globalen Durchschnitt

<sup>64</sup> Computer, Handys & Smartphones, TV-Geräte, etc.

<sup>65</sup> Die Investitionen, der aus dem internationalen Handel resultierende Beitrag zu Angebot bzw. Nachfrage und die gesamtwirtschaftliche Ersparnis sind voneinander unabhängige Größen, die im Kreislaufgleichgewicht, das gleichzeitig Kapitalmarktgleichgewicht ist, aufeinander abgestimmt werden. Es gibt somit im Gegensatz zur neoklassischen Modellierung keine Dominanz der Ersparnis über die Investitionen.

schließend auf Grundlage von Investitionsverflechtungsmatrizen in Bruttoanlageinvestitionen nach 59 Gütergruppen umgerechnet. Zudem werden die Kapitalstücke der Wirtschaftsbereiche mit Hilfe der Bruttoanlageinvestitionen fortgeschrieben. Eine Sonderstellung im Rahmen der Bruttoanlageinvestitionserklärung nehmen die Wirtschaftsbereiche Energie- und Wasserversorgung sowie Grundstücks- und Wohnungswesen ein. Bei ersterem erfolgt die Erklärung unter Berücksichtigung der im Energiemodul determinierten Entwicklung der Kapazitäten von EE-Anlagen. Beim Grundstücks- und Wohnungswesen ist eine Erklärung der Bruttoanlageinvestitionen auf Grundlage der Ersparnisse des Unternehmenssektors sowie durch eine langfristige Tendenz zu einer höheren Kapitalproduktivität weder inhaltlich sinnvoll noch empirisch belegbar. Hier zeigt sich vielmehr eine direkte Erklärung durch die Produktionsleistung (die ihrerseits ganz wesentlich durch die Konsumausgaben der privaten Haushalte fürs Wohnen determiniert ist) in Kombination mit einem länderspezifischen Zeittrend deutlich besser empirisch fundiert.

Auf Seite der intermediären Verwendung, also quasi dem Herzstück der Input-Output-Module, werden die realen Inputkoeffizienten (35 Wirtschaftsbereiche, 59 Gütergruppen) über gütergruppenspezifische Preiselastizitäten und Trends erklärt. Die Preiselastizität in diesen Spezifikationen bezieht sich dabei auf den Preis des Vorleistungsgutes in Relation zum Produktionspreis des Wirtschaftsbereichs, der dieses Vorleistungsgut einsetzt. Damit ist im Modell sowohl preisinduzierter als auch autonomer technischer Fortschritt abgebildet. Bei der Überprüfung der Stärke der Zusammenhänge zeigt sich beispielsweise, dass die Preiselastizität des Inputs von verarbeiteten Steinen und Erden -0,34 beträgt und Produktionsprozesse im Hinblick auf den Einsatz dieses Inputs pro Jahr um 0,4% effizienter werden. Bei Metallen und Halbzeug daraus ist die spezifizierte Preiselastizität -0,44 und der autonome technische Fortschritt liegt bei 1,1% p.a.

Eine Sonderrolle sowohl bei der intermediären Verwendung der 35 Wirtschaftsbereiche als auch beim Konsum der privaten Haushalte nehmen die Energie-Gütergruppen (Kohle, Öl & Gas, Mineralölerzeugnisse, Strom & DL der Energieversorgung) ein. Da für diese Gütergruppen auf der einen Seite detailliertere Informationen und Interdependenzen im Energiemodul (s.u.) abgebildet sind und auf der anderen Seite Konsistenz zwischen den monetären und physischen Sphären zu gewährleisten ist, werden diese Nachfrageelemente direkt durch die Verwendung der verschiedenen Energieträger erklärt.

Sowohl die Erklärung und Fortschreibung der inländischen Endnachfrage als auch diejenige der inländischen intermediären Verwendung erfolgt zunächst ohne Unterscheidung nach heimischen und importierten Produkten. Daher wird in einem nächsten Schritt nach der Entwicklung der Importquoten (differenziert nach 59 Gütergruppen) gefragt. Als Erklärende für diese Entwicklungen dienen gütergruppenspezifische Relativpreise sowie länderspezifische Trends. Der Relativpreis gibt hierbei den (dollar-basierten) Preis des Importgutes<sup>66</sup> in Relation zum (dollar-basierten) Preis des entsprechenden Gutes bei heimischer Produktion wieder. Kommt es zu einem Preisanstieg im Inland, so führt dies in Projektionen und Simulationen mit dem Modell somit ceteris paribus zu einem Anstieg der Importe und einem Rückgang der heimischen Produktion. Bei der empirischen Spezifikation der Stärke der Systemzusammenhänge zeigt sich, dass eine Berücksichtigung von hyperbolischen Trends, die eine im Zeitablauf zurückgehende Dynamik abbilden, der Berücksichtigung von linearen Trends überlegen ist. Dies führt in den Langfristprojektionen mit dem Modell dazu, dass die Globalisierung der Waren- und Dienstleistungsströme zwar nicht zurückgeht, aber doch deutlich weniger dynamisch weiterentwickelt als dies in der jüngeren Historie zu beobachten war.

Mit der Endnachfrage, den Inputkoeffizienten und den Importquoten liegen somit alle Informationen vor um mittels Input-Output-Analyse die Produktion und Bruttowertschöpfung, jeweils differenziert nach 35 Wirtschaftsbereichen zu bestimmen. An dieser Stelle liegen bereits alle Informationen für dynamisches offenes IO-Modell vor. Wie vorab eingeführt ist der Anspruch von GINFORS jedoch weitergehend. In einem offenen IO-Modell müsste die Dynamik der Endnachfrage letztlich exogen vorgegeben werden und es wäre

---

<sup>66</sup> Bei der Bestimmung des Preises der Importgüter werden auf Grundlage der bilateralen Handelsmatrizen (siehe weiter unten) die Herkunft des jeweiligen Importgutes und die Preisentwicklung in der Produktion in den Herkunfts ländern berücksichtigt.

der berechtigten Kritik ausgesetzt, dass einseitig eine Marktseite (die Nachfrage) dominiert. Doch wie erfolgen eine balancierte Berücksichtigung von nachfrage- und angebotsseitigen Determinanten des Wirtschaftsgeschehens und eine endogenisierte Berücksichtigung der Einkommenskreisläufe in GINFORS3?

Dazu betrachten wir in einem nächsten Schritt die Modellierung des Arbeitsmarktes. Für jedes der 38 explizit gegebenen Länder wird, differenziert nach 35 Wirtschaftsbereichen (1.) die Arbeitsnachfrage in Stunden und Personen sowie (2.) der Lohnsatz bestimmt. Die Arbeitsnachfrage wird dabei durch die Produktionsentwicklung und den Reallohn getrieben, der als Relation von sektoralem Lohnsatz und Preis des Sektors gegeben ist. Der sektorale Lohnsatz wird durch den durchschnittlichen gesamtwirtschaftlichen Lohnsatz sowie die sektorale Produktivitäts- und Preisentwicklung im Verhältnis zur gesamtwirtschaftlichen Entwicklung bestimmt. Die Bruttolöhne und -gehälter ergeben sich definitorisch durch Multiplikation des Arbeitseinsatzes in Stunden mit dem Lohnsatz.

In einem Phillips-Kurven- Ansatz ist der durchschnittliche gesamtwirtschaftliche Lohnsatz eines Landes als Ergebnis der Verhandlungen zwischen den Tarifparteien durch die gesamtwirtschaftliche Produktivitäts- und Preisentwicklung sowie den Anteil der Beschäftigten an der Gesamtzahl der 15 bis 65-jährigen Personen des Landes determiniert. Der Arbeitsmarkt ist somit nicht geräumt.

Die Erzeugerpreise der einzelnen Wirtschaftsbereiche sind durch die Stückkosten bestimmt, die sich aus dem nominalen Faktoreinsatz und der Produktionsmenge berechnen lassen. Ferner wird die Preissetzung der Unternehmen durch ihre Inflationserwartungen bestimmt, die aus der gesamtwirtschaftlichen Preisentwicklung folgen. Zusammen mit Informationen zu den Gütersteuern und Gütersubventionen<sup>67</sup> werden in einem nächsten Schritt die Preisentwicklungen im Anschaffungspreiskonzept bestimmt, die wiederum eine der Grundlagen für die Nachfrageentscheidungen bilden.

Für 36 Länder wird das vollständige Kontensystem der VGR mit den Akteursgruppen Unternehmen, Staat, Private Haushalte, Ausland sowie den funktionellen Konten Einkommensentstehung, Verteilung des Primäreinkommens, sekundäre Einkommensverteilung, Einkommensverwendung sowie Vermögensänderung erklärt und unter Berücksichtigung der konsistenten Buchungssystematik des Systems fortgeschrieben.<sup>68</sup> Dieses Kontensystem enthält u.a. die Sozialversicherung und die Abbildung des Steuersystems. Es ermöglicht die Berechnung wichtiger Variablen wie der verfügbaren Einkommen von Privaten Haushalten und Staat und der Staatsverschuldung bzw. der Vermögensentwicklung bei den Privaten Haushalten und anderen Transakteuren.

Der internationale Handel wird bilateral zwischen der jeweils exportierenden und der importierenden Wirtschaftsregion auf der Ebene der Gütergruppen abgebildet. Das Modell unterscheidet hierbei bilaterale Handelsverflechtungen für Fertigprodukte und bilaterale Handelsverflechtungen für Vorleistungsgüter. Der Anteil einer exportierenden Wirtschaftsregion an den Importen einer anderen Wirtschaftsregion wird durch die Relation zwischen dem Exportpreis und dem durchschnittlichen Importpreis des betrachteten Gutes in der importierenden Region bestimmt. Für jede der Gütergruppen und jede der 39 Regionen gibt es somit 39 sogenannte Trade-share Funktionen für Fertigprodukte und 39 Trade-share Funktionen für Vorleistungsgüter. Bilaterale Wechselkurse sind gemäß dem langfristig wirkenden Kaufkraftparitäten-Theorem von der Relation zwischen den Preisindizes des Bruttoinlandsprodukts beider Regionen bestimmt.

Aus den Informationen über Importe und Tradeshares können die Exporte einer jeden Region für jede Gütergruppe konsistent definitorisch berechnet werden. Der durchschnittliche Importpreis einer Region für eine Gütergruppe ergibt sich definitorisch aus den Exportpreisen der einzelnen Wirtschaftsregionen und

---

<sup>67</sup> Die gütergruppenspezifischen Steuer- und Subventionssätze stellen eine der zentralen Stellschrauben des Modells für Politiksimulationen dar. In Referenzszenarien wird in der Regel eine Konstanz der Steuer- und Subventionssätze unterstellt.

<sup>68</sup> Eine vollständige Liste der in den Kontensystemen der VGR abgebildeten Buchungspositionen findet sich in Tabelle 45 im Anhang dokumentiert.

dem Anteil, den die Exporte der einzelnen Regionen an den Importen der betrachteten Gütergruppe der importierenden Region haben.

Gütermarktgleichgewicht: Im Unterschied zum neoklassischen Konkurrenzmarktgleichgewicht agieren die Unternehmen nicht als Mengenanpasser, sondern als Preissetzer. Die Nachfrager reagieren auf die Preissetzung und die Unternehmen produzieren die nachgefragte Menge. Dabei reagieren wiederum die Stückkosten und damit auch die Preise auf jede Produktionsanpassung. Die Lösung des Modells impliziert die Räumung aller Gütermärkte.

### 2.3.2.2 Die umwelt-ökonomischen Systemkomponenten

#### Die Energiemodule

Die Energiemodule der 39 Länder/Regionen erklären die Energienachfrage in TJ für 35 Sektoren und die Privaten Haushalte für die Verwendungszwecke: (1.) Prozessenergie, (2.) Mobilität, (3.) Heizung und Kühlung. Die Intensität der Energienachfrage (physischer Verbrauch in Relation zu einer Aktivitätsvariablen) hängt dabei vom Relativpreis der jeweiligen Energieverwendung im betreffenden Sektor und Trends ab. Die Struktur der Energienachfrage nach Energieträgern für die unterschiedlichen Verwendungszwecke wird durch deren relative Preise bestimmt. Hierbei wird nach 20 Energieträgern differenziert (vgl. Tabelle 46 im Anhang).<sup>69</sup>

Das Angebot an Sekundärenergie in Form von Mineralölen wird durch die Produktion des betreffenden Sektors aus dem Rohstoff Rohöl bestimmt.

Die Strom- und Wärmeerzeugung erfolgt durch die Inputs fossiler Energieträger, Kernenergie und verschiedenen erneuerbaren Energien (siehe Tabelle 47 im Anhang für Details). Der Anteil der Kernenergie und der Summe der verschiedenen erneuerbaren Energieträger sind Politikvariablen. Die Struktur der erneuerbaren Energieträger wird unter Berücksichtigung länderspezifischer Eigenheiten fortgeschrieben. Die Summe der in der Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzten fossilen Energieträger ist als Rest definiert. Dessen Aufteilung wiederum in Strom- und Wärmeerzeugung auf Grundlage von Kohle, Öl oder Gas wird durch Preisrelationen zwischen diesen Energieträgern determiniert.

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ergeben sich über physische Koeffizienten beim Verbrennen der fossilen Energieträger. Die Emissionen von 6 weiteren Luftschadstoffen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, NMVOC, NH<sub>3</sub>) sind in der Modellierung vorgesehen, aber zurzeit noch nicht aktiviert.

#### Die Ressourcenmodule

GINFORS3 leitet aus der globalen wirtschaftlichen Entwicklung die Nachfrage nach den abiotischen Materialien Öl, Gas, Kohle, Erzen und nichtmetallischen Mineralien sowie nach Wasser, Landwirtschaftsflächen, 3 viehwirtschaftlichen Produktgruppen und 13 verschiedenen Pflanzenarten (siehe Tabelle 48 im Anhang) ab. Das Angebot an Ressourcen ist in einem rein ökonomischen Modell zunächst nicht restriktiv. Im SimRess-Projekt konnte aber gezeigt werden, wie durch Interaktion mit dem systemdynamischen Modell WORLD6 die globale Verfügbarkeit abiotischer Rohstoffe in einem integrierten Simulationsansatz endogenisiert werden kann. Bei den biotischen Rohstoffen wird die Begrenztheit der Expansionsmöglichkeiten von landwirtschaftlichen Flächen sowie die begrenzte Wasserverfügbarkeit (für Bewässerung) berücksichtigt. Entsprechende Expertise und Datenverfügbarkeiten wurde diesbezüglich im EU-Projekt POLFREE generiert (siehe hierzu auch Distelkamp und Meyer 2016 sowie die dort angegebenen Referenzen).

(1) Abiotische Materialien: Die heimische genutzte Extraktion der Materialien Kohle, Gas, Öl, Erze sowie Bau- und Industriemineralien in Tonnen wird für sämtliche Wirtschaftsregionen durch die Produktion der entsprechenden Gütergruppen in konstanten Preisen bestimmt. Ferner werden die physischen Importe und Exporte der genannten Materialien durch die entsprechenden monetären Importe und Exporte in konstanten Preisen erklärt.

(2) Wasserentnahme: GINFORS3 beschreibt die Wasserentnahme in den 39 Regionen für die Wirtschaftsbereiche Landwirtschaft, Öffentliche Wasserversorgung, Elektrizitätswirtschaft und Rest (vorwiegend Grundstoffindustrien), die durch die Produktion der Bereiche in konstanten Preisen getrieben wird.

---

<sup>69</sup> Die in den Energiemodulen als Erklärende für die Energienachfrage sowie die Strom- und Wärmeproduktion (siehe unten) dienenden Preise für Energieträger werden konsistent aus den exogen vorgegebenen Weltmarkt-Preisentwicklungen für die fossilen Energieträger Kohle, Öl und Gas und unter Berücksichtigung klima-politischer Interventionen (Energie- und/oder CO<sub>2</sub>-Steuern, Preise für CO<sub>2</sub>-Emissionsrechte) abgeleitet.

(3) Agrarwirtschaftliche Landnutzung: In jeder Wirtschaftsregion determiniert das ökonomische System mit der Konsumnachfrage der Privaten Haushalte und der Vorleistungsnachfrage der Nahrungsmittelindustrie und der anderen Wirtschaftszweige die Gesamtnachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten in monetären Einheiten. Dabei wird die Nachfrage nach Fleisch und nach pflanzlichen Produkten unterschieden. Die Nachfrage nach Fleisch in monetären Einheiten zu konstanten Preisen treibt dann die Nachfrage nach Futtermitteln in Tonnen.

Die Gesamtnachfrage nach Futtermitteln, Nahrungsmitteln, industrielle Verwendung und Aussaat in Tonnen erklären dann die Nachfrage für jeweils 13 Pflanzengruppen in Tonnen, wobei die Preisrelationen eine wichtige Rolle spielen. Für jede Pflanzengruppe wird die globale monetäre Nachfrage dem globalen Angebot gegenübergestellt und der Preis in Dollar pro Tonne ermittelt, der den jeweiligen globalen Markt räumt.

In den einzelnen Ländern steht der Produktionsmenge die dem globalen Marktpreis zugehörige Nachfragemenge gegenüber. Die Differenz zwischen beiden Größen wird durch internationalen Handel geschlossen, so dass die nationalen Märkte für die 13 Pflanzengruppen geräumt sind.

Auf der Basis der so generierten Pflanzenpreise und der Nachfrageentwicklung treffen die Landwirte in den 39 Wirtschaftsregionen ihre Entscheidung für die Landnutzung bezüglich des Anbaus der 13 Pflanzengruppen für die Folgeperiode. Wenn das Ergebnis für die totale Landnutzung eine vorgegebene maximale Expansionsrate übersteigt, werden die Flächen proportional angepasst.

Der Ernteertrag pro Hektar ist bei den 13 Pflanzenarten und in den 39 Wirtschaftsregionen sehr unterschiedlich und hängt von klimatischen Entwicklungen und der Verfügbarkeit von Wasser in der Landwirtschaft ab. In der GINFORS-Version, die im Rahmen von Sim-Ress genutzt wurde, wird die Produktivität der landwirtschaftlichen Böden durch langfristig beobachtete länder- und pflanzenartenspezifische Trends erklärt.

(4) Die für die importierten Halb- und Fertigwaren insgesamt extrahierten Primär-Rohstoffe sowie die mit der jeweiligen Extraktion verbundenen ungenutzten Entnahmen lassen sich über die Handelsverflechtungen und die in den jeweiligen Ländern genutzten Technologien, die mit den sich dynamisch entwickelnden Input-Output Tabellen gegeben sind, zurückverfolgen. Somit ist es möglich, für jede Region und jede Materialart die Indikatoren zum Rohstoffkonsum (RMC, TMC) und zur Rohstofffinanzspruchnahme (RMI) abzuschätzen. Da diese Abschätzungen in den folgenden Ergebnisdarstellungen eine zentrale Rolle einnehmen ist nachstehend dieser Thematik ein eigenständiges Unterkapitel gewidmet.

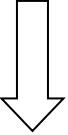
### **2.3.3 Wie wird die direkte und indirekte Rohstoffnutzung in GINFORS abgeschätzt?**

Die Ressourcenindikatoren Rohstoffkonsum (RMC) und Primärrohstoffeinsatz (RMI) sowie daraus abgeleitete Produktivitätskennziffern wie die Gesamtrohstoffproduktivität stehen im Zentrum der folgenden Berichterstattung. Daher gilt es in einem ersten Schritt kurz den Inhalt und Aussagegehalt dieser Indikatoren möglichst präzise zu definieren. Üblicherweise wird bei der Taxonomie der Ressourcenindikatoren eine Darstellung gewählt, die den Weg von der genutzten inländischen Entnahme zum Rohstoffkonsum nachzeichnet.<sup>70</sup> Für die Darstellung in Tabelle 2 wurde diese Darstellungsform umgedreht, wobei der rechten Spalte der Tabelle ergänzend eine erläuternde Anmerkung zu den durch die jeweiligen Konzepte abgebildeten Verantwortungsbereiche entnommen werden kann. Die wesentlichen Erkenntnisse im Hinblick auf die etablierten Indikatorkonzepte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

---

<sup>70</sup> Inländische verwertete Entnahme + Importe in RME = Primärrohstoffeinsatz (RMI)  
Primärrohstoffeinsatz (RMI) – Exporte in RME = Rohstoffkonsum (RMC)

Tabelle 2: Taxonomie der Rohstoffindikatoren

	Definition/Inhalt	Verantwortungsbereich
Rohstoffkonsum ( <b>RMC</b> ) = Materialfußabdruck ( <b>MF</b> )	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> im <b>In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die im Inland <b>für Konsum und Investitionen</b> nachgefragten Güter und Dienstleistungen eingeflossen sind	Verantwortungsbereich der Konsumenten und Investoren im Inland
 + Exporte in RME	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> im <b>In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die im Ausland nachgefragten heimischen Güter und Dienstleistungen ( <b>Exporte</b> ) eingeflossen sind	
= Primärrohstoffeinsatz ( <b>RMI</b> )	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> im <b>In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die Endnachfrage ( <b>Konsum + Investitionen + Exporte</b> ) eingeflossen sind	Verantwortungsbereich der Konsumenten, Investoren und Exporteure im Inland
 - Importe in RME	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> im <b>In- und Ausland</b> , die unter Berücksichtigung der gesamten globalen Lieferketten in die im Inland nachgefragten ausländischen Güter und Dienstleistungen ( <b>Importe</b> ) eingeflossen sind	
= Inländische verwertete Entnahme ( <b>DEU</b> )	Gesamte genutzte Rohstoff <b>extraktion</b> im <b>Inland</b>	Verantwortungsbereich der heimischen Rohstoff-extrakteure

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- Der Rohstoffkonsum (RMC) beziffert den Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen im Inland. Dieser ist nicht deckungsgleich mit dem Verantwortungsbereich der Inländer. So werden beim RMC der Rohstoffkonsum der Inländer durch Konsumausgaben im Ausland (auf Reisen) nicht berücksichtigt, wohingegen der Rohstoffkonsum der nicht Gebietsansässigen (insbesondere Touristen) durch Konsumausgaben im Inland enthalten ist. In Ländern mit einem hohen Ungleichgewicht zwischen den Konsumausgaben der Inländer im Ausland und den Konsumausgaben der nicht Gebietsansässigen im Inland ist ein nicht unerheblicher Unterschied zwischen dem „normalen“ RMC nach dem Inlandskonzept und einem RMC nach dem Inländerkonzept zu vermuten.
- Der Primärrohstoffeinsatz (RMI) beziffert den Primär-Rohstoffbedarf für Konsum, Investitionen und Exporte. Er fragt also nach der Verantwortung der Konsumenten, Investoren und Exporteure im Inland. In ressourcenpolitischen Diskussionen wird aber häufig nach dem Primär-Rohstoffbedarf der heimischen Produktion bzw. der Verantwortung der heimischen Produzenten für die globale Primär-Rohstofffinanzspruchnahme gefragt. Diese Fragestellung lässt sich jedoch auf Grundlage der etablierten Ressourcenindikatoren nicht exakt beantworten.

## Datengrundlagen und Abschätzungsmethoden

Üblicherweise nutzt die GWS in ihren Modellen Ergebnisse der statistischen Ämter (national/international) zur historischen Entwicklung von wirtschaftlichen und umweltökonomischen Beobachtungen und erklärt/projiziert deren zukünftige Entwicklung im Modellzusammenhang. Im Falle der Ressourcen-Indikatoren RMI und RMC wird durch die hier vorgestellten eigenen Ergebnisse von diesem Grundsatz abweichen.

Die im Rahmen des SimRess-Projektes von der GWS angewandte Methodik zur Abschätzung der Materialflüsse und Rohstoffindikatoren nutzt einen reinen MRIO-Ansatz (zur Einordnung verschiedener Ansätze der Indikatoren-Berechnung vgl. Ecologic & WU Wien 2014). Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass weder die Anwendung der sogenannten „Domestic Technology Assumption“ noch die Verwendung von LCA-Koeffizienten zum Tragen kommt. Diese beiden in hybriden Abschätzungsmethoden (u.a. vom Statistischen Bundesamt angewandt) genutzten Methoden weisen jedoch aus methodischer Sicht fundamentale Widersprüche zum Ziel und Wesen der Rohstoffindikatoren RMI und RMC/MF auf:

- (1) Eines der zentralen Ziele bei Weiterentwicklung der Ressourcenindikatoren vom „domestic“ (DMC, DMI) zum „raw material“ (RMC, RMI) Konzept war es, dass sich die Auslagerung von besonders rohstoff-intensiven Produktionsaktivitäten ins Ausland nicht in einer Steigerung der nationalen Rohstoffproduktivität niederschlagen sollte. Wenn nun aber bei der Abschätzung unterstellt wird, dass im Ausland genauso effizient produziert und extrahiert wird wie im Inland („domestic technology assumption“), geht ein Großteil der intendierten Ziele des RMC/RMI-Konzepts verloren. Das Statistische Bundesamt führt in Bezug auf den „Domestic Technology“-Ansatz aus, dass „mit diesem Ansatz nicht geschätzt [wird], wie viel Rohstoff für die Produktion eines bestimmten Gutes aufgewendet wurde, sondern wie viel Rohstoff für die Produktion dieses Gutes im Inland notwendig wäre. Bei Importgütern beschreibt er also nicht den Rohstoffaufwand im Ausland, sondern die theoretische Einsparung gegenüber einer Herstellung im Inland.“ (Kaumanns, Lauber 2016, S. 28)
- (2) Gegen eine Verwendung von LCA-Koeffizienten in der Abschätzung spricht aus Sicht der Autoren insbesondere, dass diese in der Regel keine Dynamik abbilden, sondern lediglich für einen historischen Zeitpunkt bestimmt wurden. Eines der primären Ziele des Monitorings auf Grundlage von (Umwelt-) Indikatoren ist es jedoch gerade Fort- oder Rückschritte im zeitlichen Ablauf aufzuzeigen.

Zentrale Datengrundlagen für die Indikatoren-Berechnung in SimRess/GINFORS sind der WIOD-Datensatz (Timmer et al. 2015) sowie im Hinblick auf die Ressourcenextraktionen in physischen Einheiten die Global Material Flows Database von der WU Wien. Der Aufbau einer globalen multiregionalen Input-Output-Tabelle wurde bereits in Kapitel 2.2.2 verdeutlicht. Im Unterschied zu einer nationalen Input-Output-Tabelle zeigt eine solche WIOT folglich nicht nur welche Strukturen in der Produktion und beim Konsum zu beobachten waren, sondern quasi als dritte Dimension die jeweilige Provenienz dieser Aktivitäten.

Durch Anwendung des Leontief-Ansatzes  $x = (I - A)^{-1} * f$  lässt sich auf Grundlage einer WIOT für jeden beliebigen Endnachfrage-Eintrag die über alle Fertigungsstufen hinweg benötigte Produktion, differenziert nach Sektoren und Ländern/Regionen ermitteln. Aus Ressourcengesichtspunkten ergibt sich hierdurch auch die in der jeweiligen Endnachfrage enthaltene Produktion der extrahierenden Sektoren (Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bergbau), differenziert nach Ländern/Regionen in monetären Einheiten. Multipliziert man diese Produktion in monetären Einheiten mit der im jeweiligen Ursprungsland beobachteten Extraktion in Tonnen je Einheit monetärer Produktionsleistung, so ergibt sich der physische Primärmaterialeinsatz der jeweiligen Endnachfrage.

Dieses Zurückverfolgen und Zurechnen von Ressourcenströmen auf Grundlage eines multiregionalen Input-Output Datensatzes in Kombination mit physischen Daten zu Extraktionen oder Emissionen wird auch als GRAM-Ansatz (Global Resource Accounting Model) bezeichnet (Giljum et al. 2008). Bisherige Arbeiten der GWS in diesem Kontext beruhten jedoch auf Vorgängerversionen von GINFORS3 mit anderen Datengrundlagen und Klassifikationen.

Der in GINFORS3 hinterlegte WIOT-Datensatz im Gegensatz zum auf OECD-Daten basierenden GRAM-Datensatz vollständig im globalen Input-Output-Zusammenhang geschlossen, da auch für die Region „Rest der Welt“ eine eigenständige Verflechtungsmatrix explizit abgebildet wird und somit die gesamte Weltwirtschaft im globalen Input-Output-Zusammenhang auf der detaillierten Sektor- und Produktebene nachvollzogen werden kann.

Weitere Verbesserungen im Hinblick auf die Berechnung von Ressourcenindikatoren auf Grundlage der in GINFORS3 hinterlegten Datenverfügbarkeiten beziehen sich auf den in Ecologic 2014, S. 28 angeführten Nachteil von reinen Input-Output-Ansätzen in der Indikatoren-Berechnung, nämlich die „assumption of a homogenous product output for aggregated economic sectors and product groups, leading to distortions of results, in particular when price to weight ratios are very different for various products aggregated into one sector“. Während in älteren GINFORS-Versionen lediglich die drei Rohstoff-Gütergruppen „Land- und Forstwirtschaftliche Erzeugnisse, Fische und Fischereierzeugnisse“, „Bergbauerzeugnisse, Energieträger“ und „Bergbauerzeugnisse, Mineralien“ unterschieden wurden, enthält der WIOD-Datensatz bzw. GINFORS3 nunmehr die kompletten Input-Output-Strukturen für die acht Rohstoff-Gütergruppen: (1) Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd, (2) Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und DL, (3) Fische und Fischereierzeugnisse, (4) Kohle und Torf, (5) Erdöl, Erdgas; DL f. Erdöl-, Erdgasgewinnung, (6) Uran- und Thoriumerze, (7) Erze und (8) Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse.

Diese weitergehende Differenzierung stellt einen deutlichen Fortschritt dar, da sich der Materialgehalt der ökonomischen Aktivitäten zwischen diesen Gütergruppen erheblich unterscheidet und eine Durchschnittsbetrachtung schnell zu fehlerhaften Abschätzungen führen kann. Zudem wird erst durch die Differenzierung von Rohstoff-Gütergruppen in den ökonomischen WIOT-Datensätzen die Berechnung von nach Materialkategorien differenzierten (Sub-) Indikatoren ermöglicht. Dass die angewandte Gütergruppen-Differenzierung insbesondere im Hinblick auf die Position „Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse“ immer noch zu grob ist und zu deutlichen Überschätzungen der Importe und Exporte in Rohmaterialäquivalenten führen kann wird im folgenden Unter-Abschnitt näher untersucht.

#### **Sonderfall: Industrie- und Baumineralien**

Die Materialkategorie Industrie- und Baumineralien bzw. nicht-metallische Mineralien stellt nicht nur die wichtigste Komponente in den Ressourcenindikatoren RMC und RMI, sondern auch diejenige mit dem höchsten Grad an Unsicherheit dar (UNEP 2016, S. 157). Hintergrund für diese Unsicherheit ist, dass diese Materialkategorie mit Blick auf den Materialgehalt (die Extraktion) je ökonomischer Aktivität in monetären Größen sehr unterschiedliche Rohstoffe umfasst: von Sand und Kies über Kalkstein und Gips bis hin zu Diamanten.

Wird dieser Unsicherheit in der Abschätzung von Ressourcenindikatoren auf Grundlage eines MRIO-Ansatzes, der keine Differenzierung der Gütergruppen „Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse“ sowie „Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden“ enthält, nicht Rechnung getragen, so wird implizit unterstellt, dass der Materialgehalt je monetärer Einheit dieser Gütergruppen identisch für alle Verwendungen ist.<sup>71</sup>

Vor diesem Hintergrund gilt es im Folgenden zunächst zu dokumentieren, wie in SimRess vorgegangen wurde, um unterschiedliche Materialgehalte bei den Industrie- und Baumineralien zu berücksichtigen.

<sup>71</sup> Dem Umstand, dass insbesondere bei den Bau- und Industriemineralien die Annahme von identischen Materialgehalten in allen Verwendungen kritisch ist, wurde bereits in frühen Bearbeitungsphasen des Projektes SimRess Rechnung getragen. Aufgrund einer mangelnden empirischen Fundierung wurde jedoch im weiteren Verlauf zunächst von der im Folgenden dargestellten Verfahrensweise einer hypothesen-gestützten Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten in der MRIO-Analyse wieder Abstand genommen. Nicht zuletzt aufgrund des fachlichen Austauschs mit Monika Dittrich und Karl Schoer im Rahmen eines gemeinsamen DeteRess/SimRess-Workshops im Dezember 2016 wurde jedoch der Abschätzungsfehler identischer Materialgehalte klar identifiziert und im Anschluss wieder die Verfahrensweise mit unterschiedlichen Materialgehalten in den MRIO-Abschätzungsalgorithmus für die Bestimmung von Exporten und Importen in RME implementiert.

Anschließend wird anhand von Abschätzungsergebnissen für die Exporte und Importe in RME aufgezeigt, welche Implikationen diese Vorgehensweise im Vergleich zu der Nichtberücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten bei den Industrie- und Baumineralien hat.

Bei der Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten bei den nicht-metallischen Mineralien wird in einem ersten Schritt für alle Länder/Regionen angenommen, dass sich diese je nach Verwendung wie folgt von dem durchschnittlichen Materialgehalt (dMG) unterscheiden:

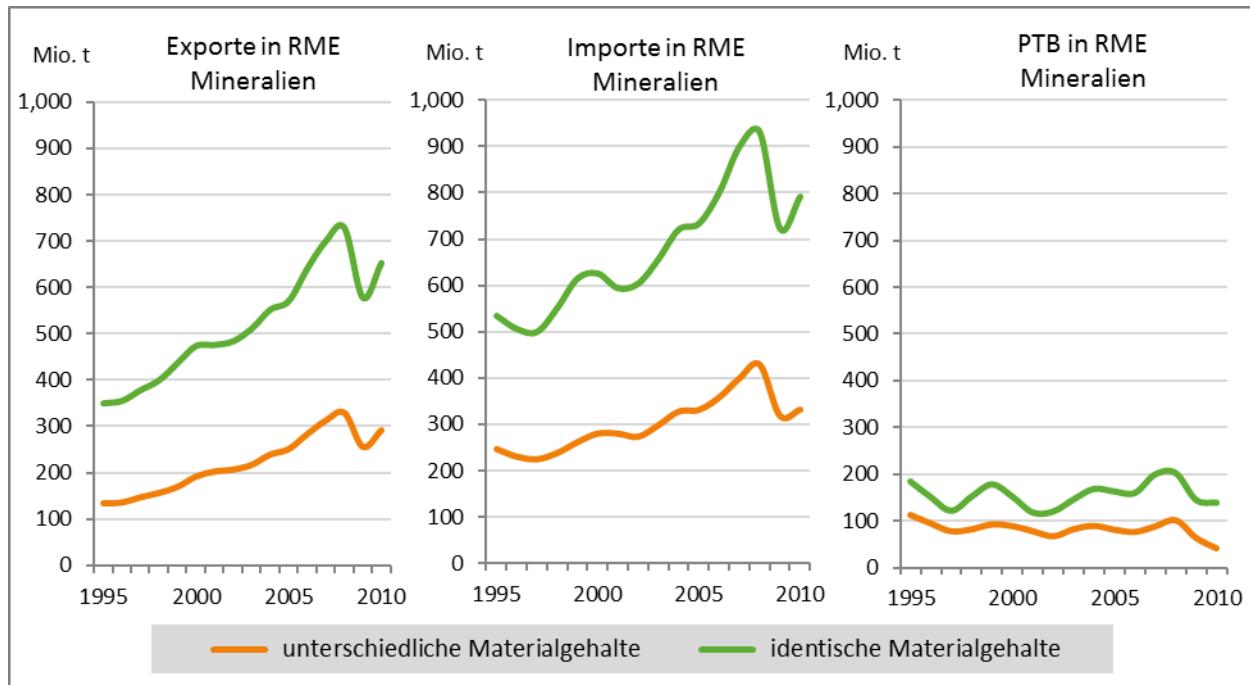
- bei direkter Verwendung von unverarbeiteten oder verarbeiteten Steinen und Erden im Baugewerbe =  $dMG * 2$
- bei direkter Verwendung von unverarbeiteten oder verarbeiteten Steinen und Erden in der Verarbeitung von Steinen und Erden =  $dMG * 1,5$
- bei direkter Verwendung von unverarbeiteten oder verarbeiteten Steinen und Erden in anderen Wirtschaftsbereichen oder für die inländische Endnachfrage =  $dMG * 0,5$
- bei direkter Verwendung von unverarbeiteten oder verarbeiteten Steinen und Erden für Exporte =  $dMG * 0,33$

In einem zweiten Schritt wird für alle Länder/Regionen sichergestellt, dass die gesamte physische Verwendung von nicht-metallischen Mineralien auch nach dieser Adjustierung dem gesamten Aufkommen (= Extraktion) entspricht.

Bis dato erfolgt diese Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten weitestgehend auf Grundlage von Plausibilitätsüberlegungen und stichprobenartigen Vergleichen zwischen den Materialgehalten von Exporten und den durchschnittlichen Materialgehalten. Wie anhand der im Folgenden dargestellten Ergebnisvergleiche verdeutlicht wird, führt jedoch bereits diese relativ simple annahmengestützte Vorgehensweise dazu, dass sich die Abschätzungsergebnisse für die Importe und Exporte in RME (und damit auch die physische Handelsbilanz und der RMC) für Mineralien nicht nur deutlich verändern, sondern nunmehr in Dimensionen bewegen, die eine große Nähe zu Abschätzungsergebnissen aufweisen, die auf eine differenziertere Unterteilung der Produktgruppen zurückgreifen.

Doch bleiben wir zunächst beim Vergleich der eigenen Abschätzungsergebnisse bei Berücksichtigung von identischen oder unterschiedlichen Materialgehalten bei den Bau- und Industriemineralien. Abbildung 20 zeigt, dass die Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten zu einer deutlichen Reduktion der direkt und indirekt exportierten Mineralien führt (linkes Diagramm). Bei identischen Materialgehalten steigt dieser Materialfluss von 351 Mio. Tonnen in 1995 auf 653 Mio. Tonnen in 2010 an. Bei Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten reduziert sich die Dimension des Materialflusses auf weniger als die Hälfte. Es kommt zu einem Anstieg von 134 Mio. Tonnen auf 291 Mio. Tonnen im Zeitraum von 1995 bis 2010. Ganz ähnliche Beobachtungen können auch für die Importe in RME gemacht werden (mittleres Diagramm). Bei identischen Materialgehalten kommt es zu einem Anstieg von 534 Mio. Tonnen in 1995 auf 791 Mio. Tonnen in 2010. Bei Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten fallen die entsprechenden Zahlen für 1995 und 2010 mit 246 Mio. Tonnen bzw. 331 Mio. Tonnen ebenfalls um mehr als die Hälfte niedriger aus. Die Auswirkungen auf physische Handelsbilanz (PTB) in RME, also der Differenz aus Importen und Exporten in RME, findet sich im rechten Diagramm der Abbildung dargestellt. Es zeigt sich, dass auch die physische Handelsbilanz für Bau- und Industriemineralien bei Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialgehalten deutlich niedriger ausfällt.

Abbildung 20: Identische oder unterschiedliche Materialgehalte bei den Industrie- und Baumineralien - Auswirkungen auf die Abschätzungsergebnisse für Deutschland



Quellen: Eigene Darstellung, GWS

Alternativ zur Vorgehensweise in GINFORS/SimRess wurden in der jüngeren Vergangenheit Ressourcenindikatoren für Deutschland bzw. global auch auf Grundlage von Datensätzen abgeschätzt, die eine weitgehende Differenzierung der Materialkategorie Industrie- und Baumineralien und der entsprechenden Produktgruppen und Produktionsbereiche enthalten:

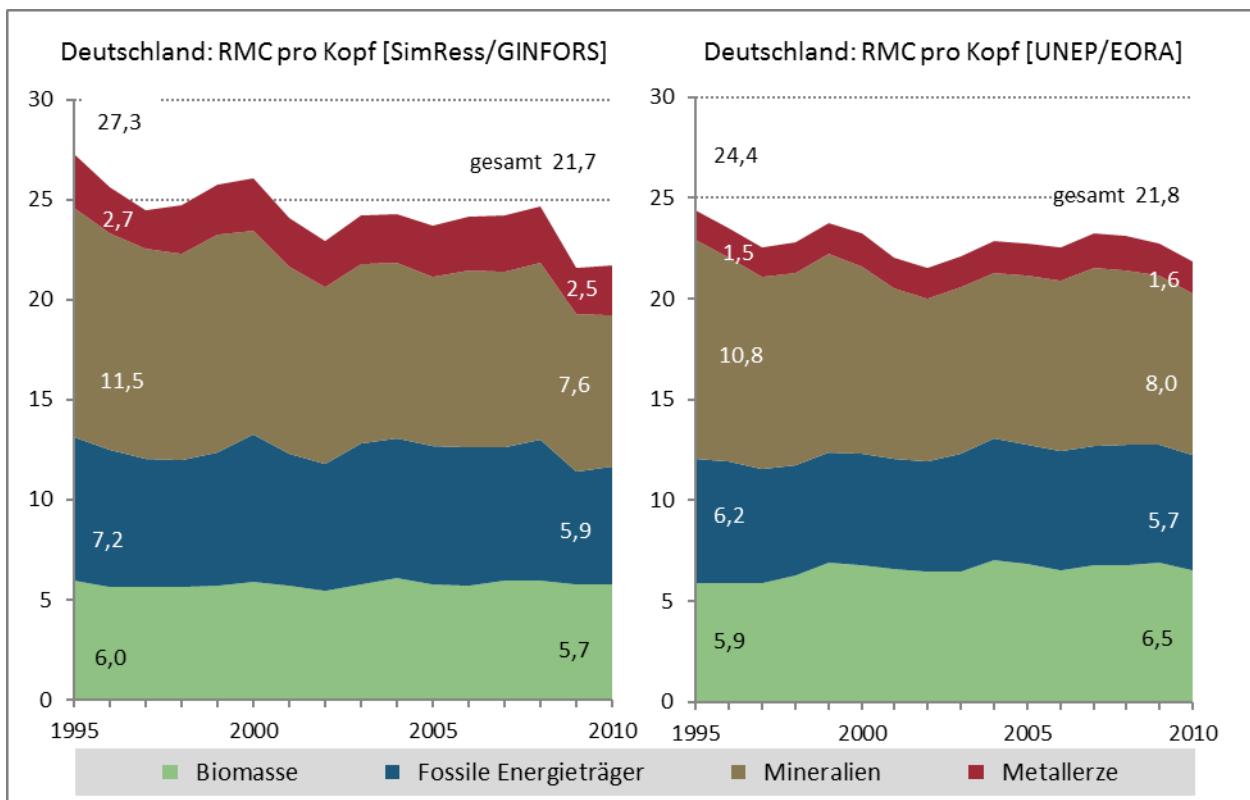
- Im Ufoplan-Vorhaben „DeteRess – Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz“ (FKZ 3712 93 321) erfolgen die Abschätzungen auf Grundlage eines 3-Regionen-Modells, mit einer hohen sektoralen Auflösung (274 Produktgruppen, 52 Rohmaterialkategorien).
- In der UNEP-Studie „Global material flows and resource productivity - Assessment Report for the UNEP International Resource Panel“ (UNEP 2016) erfolgen die Abschätzungen auf Grundlage der MRIO-Datenbasis EORA, in der die sektorale Auflösung in den 129 abgebildeten Ländern/Regionen zwischen minimal 26 und maximal 511 variiert.
- Im Ufoplan-Vorhaben DeuRess wurden durch die WU Wien Abschätzungen für Deutschland auf Grundlage der MRIO-Datenbasis EXIOBASE durchgeführt, welche 200 Produktgruppen und 49 Länder und Ländergruppen differenziert.

Die Ergebnisse der Exiobase-basierten Abschätzungen in DeteRess waren mit Ausnahme des Verhältnisses von BIP zu RMC für ausgewählte Länder im Jahr 2011 zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht öffentlich verfügbar. Der Bericht „Die Nutzung natürlicher Ressourcen – Bericht für Deutschland 2016“ zielt vielmehr darauf ab, die offiziell verfügbaren Daten des Statistischen Bundesamts übersichtlich zusammenzufassen. Die Ergebnisse weiterführender Abschätzungen können daher dem Bericht „Die Nutzung natürlicher Ressourcen – Bericht für Deutschland 2016“ nicht unmittelbar entnommen werden.

In der folgenden Abbildung werden daher den SimRess/GINFORS Abschätzungsergebnisse lediglich vergleichbare UNEP-Ergebnisse gegenübergestellt. Betrachtet werden pro Kopf RMC Abschätzungen der

Materialkategorie Mineralien wie auch der weiteren Materialkategorien Metallerze, fossile Energieträger und Biomasse. Für beide Ansätze wird jeweils der Zeitraum 1995 bis 2010 betrachtet. Es zeigt sich, dass die beiden MRIO-basierten Abschätzungen für Deutschlands RMC Mineralien nicht nur ähnliche Dimensionen, sondern auch eine ähnliche Dynamik aufweisen.

Abbildung 21: Vergleich der Abschätzungsergebnisse für Deutschlands RMC pro Kopf – SimRess/GINFORS vs. UNEP/EORA



Quelle: Für UNEP/EORA: <http://uneplive.unep.org/downloader>, eigene Darstellung, GWS

Beim RMC Metallerze fallen die SimRess/GINFORS-Abschätzungen um rund eine Tonne pro Kopf höher aus als diejenigen in der UNEP-Studie. Beim Rohstoffkonsum fossile Energieträger kommt es im Zeitablauf zu einer immer stärkeren Übereinstimmung zwischen den Abschätzungen SimRess/GINFORS und denjenigen in der UNEP-Studie. Beim Rohstoffkonsum Biomasse zeigen sich ebenfalls starke Übereinstimmungen der Dimension. Während jedoch die Abschätzungsergebnisse in SimRess/GINFORS einen im Zeitablauf leicht zurückgehenden RMC Biomasse zeigen, kommen die UNEP/EORA-Abschätzungen zu einem Anstieg von 5,9 Tonnen in 1995 auf 6,5 Tonnen in 2010.

Vergleicht man die beiden MRIO-basierten Abschätzungen hingegen mit den Abschätzungen des Statistischen Bundesamtes zeigen sich deutliche Dimensionsunterschiede, die im Bereich des Rohstoffkonsums Biomasse am Größten ausfallen. So berichtet das Statistische Bundesamt für das Jahr 2010 einen RMC pro Kopf von lediglich 15,6 Tonnen. Hiervon entfallen 0,6 Tonnen auf Metallerze, 6,8 Tonnen auf Mineralien, 5,1 Tonnen auf fossile Energieträger und 3,1 Tonnen auf Biomasse.

Als Zwischenfazit auf Grundlage dieser Analysen lässt sich festhalten, dass Abschätzungsmethoden, welche keine ausgeprägte Differenzierung der Produktgruppen/Materialkategorien enthalten und von identischen Materialgehalten in allen Verwendungen ausgehen zu einer deutlichen Überschätzung der Export- und Importströme in Rohmaterialäquivalenten tendieren. Bereits durch relativ simple Annahmen

zu Unterschieden in den Materialgehalten kann jedoch in der MRIO-basierten Abschätzung gewährleistet werden, dass eine große Nähe zu Abschätzungsergebnissen auf Grundlage differenzierter Datengrundlagen erzielt wird.

Unter dem Aspekt der Robustheit der ressourcenpolitischen Berichterstattung wird damit die Forschungsfrage einer optimalen Differenzierung von Produktgruppen und Materialkategorien aufgeworfen: Um im Detail über mehrere hundert Produktgruppen/Materialkategorien oder aber Wirtschaftssektoren berichten zu können, müssen für jede zu berücksichtigende Berichtseinheit hinreichend disaggregierte Kosten- und Absatzstatistiken gegeben sein. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, können daraufhin in einem arbeitsintensiven Prozess auf Basis dieser Beobachtungen entsprechend unterteilte Input-Output Datenbanken erstellt werden. Bei der Erstellung umfassend disaggregierter MRIO-Datensätze kann diese Vorgehensweise allerdings in der Regel nicht unmittelbar umgesetzt werden, da nicht für sämtliche Regionen einheitlich disaggregierte Rohdaten verfügbar sind, bzw. sich der notwendige Arbeitsaufwand zur expliziten Herleitung von MRIOTs auf Basis vollständig disaggregierter Kosten- und Absatzstatistiken als zu aufwändig erweist. Stattdessen werden bereits bei Erstellung der MRIO-Datenbanken üblicherweise auch statistische Modellierungen vorgenommen, welche eine Hypothesen-basierte Berechnung derjenigen Einträge ermöglicht, welche ansonsten nicht oder nur unter großen zusätzlichen Aufwendungen möglich wäre. Grundsätzlich kann dabei davon ausgegangen werden, dass eine MRIO-Datenbank mit höherem Differenzierungsgrad auch einen höheren Anteil entsprechend „weicher“ (im Sinne von nicht originär beobachteten, sondern berechneten) Beobachtungen aufweist. Vor diesem Hintergrund kann zunächst festgehalten werden, dass bspw. eine MRIO-Datenbank mit über 500 Produktgruppen nicht automatisch einen höheren Informationsgehalt (im Sinne verlässlich überprüfbarer originärer Beobachtungen) als eine MRIO-Datenbank mit 59 Produktgruppen verkörpern muss. Weitergehende Differenzierungen der Produktgruppen/Materialkategorien einer MRIO-Datenbank erlauben selbstverständlich differenziertere Indikatorberechnungen. Da aber mit zunehmender Differenzierung auch zunehmend beobachtbare Entwicklungen durch Hypothesen-basierte Zuschätzungen ersetzt werden, stellt sich die Frage, welcher Differenzierungsgrad im Rahmen einer „üblichen“ Analyse notwendig erscheint, bzw. inwieweit die Ergebnisgüte aggregierter Indikatorabschätzungen durch entsprechende methodische Differenzen beeinflusst wird. Gemäß unserer Wahrnehmung wurden entsprechende methodische Aspekte der MRIO-basierten Materialflussrechnung bislang nicht systematisch evaluiert.

Unabhängig von dieser bisher ungelösten Forschungsfrage, gilt es aber an dieser Stelle nochmals die beiden zentralen Vorteile einer Abschätzung von Ressourcenindikatoren auf Grundlage von globalen MRIO-Datensätzen zusammenzufassen:

- Nur auf Grundlage von globalen MRIO-Datensätzen lässt sich gewährleisten, dass sich jede irgendwo auf der Welt extrahierte Tonne Rohstoff über die globalen Produktketten derjenigen letzten Verwendung zuordnen lässt, für die sie letztlich „bestimmt“ ist.
- Für eine gute Qualität der Abschätzungsergebnisse ist nicht nur eine hinreichende Differenzierung der Produktgruppen/Materialkategorien ausschlaggebend. Mindestens genauso ausschlaggebend ist eine hinreichende räumliche Differenzierung, da sich sowohl Produktionstechnologien (IO-Koeffizienten) als auch Materialgehalte in der Extraktion in nicht unerheblicher Weise in den Ländern/Regionen unterscheiden.

### 2.3.4 Welche Fragen lassen sich mit dem Modell beantworten?

Als EE-MRIO Modell mit globaler Abdeckung kann GINFORS3 für historische Analysen der Entwicklung globaler Wirtschaftsstrukturen seit 1995 sowie als Evaluations- und Impact Assessment-Tool für ex post wie auch ex ante Analysen mit einem Simulationszeitraum bis zum Jahr 2050 eingesetzt werden.<sup>72</sup> Für 38 explizit simulierte Volkswirtschaften werden dabei sozio-ökonomische Strukturentwicklungen in ihrer internationalen Interdependenz detailliert abgebildet. Diese 38 Volkswirtschaften repräsentieren insgesamt ca. 85% der derzeitigen globalen Wirtschaftsleistung. Insgesamt erfolgt eine geschlossene globale Abdeckung, da auch das 39. „Land“, die Region „Rest der Welt“, dynamisch und endogen abgebildet wird. Erst durch diese Aggregation kann im Modellkontext die systematische Erfassung globaler Wirkungszusammenhänge ermöglicht werden. Dabei ist als besonderes Merkmal hervorzuheben, dass wesentliche Systemelemente von GINFORS3 auch für die Region „Rest der Welt“ explizit modelliert werden (Input-Output-Modul, bilaterales Handelsmodul, Energie- und Ressourcenmodul). Wie bereits zuvor angesprochen wurde, erscheint es aus ressourcenpolitischer Perspektive aber dennoch wünschenswert, die Konstruktion dieser „Mischregion“ in zukünftigen Forschungsaktivitäten weiter zu untergliedern. Denn es ist sicherlich davon auszugehen, dass bspw. die Implikationen einer globalen Ressourcenwende verschiedene Rohstofflieferanten dieser Mischregion sehr unterschiedlich tangieren würden. Hieraus resultierende Feedbacks auf das globale System können aber erst dann individuell nachgezeichnet werden, wenn die entsprechenden Volkswirtschaften auch eigenständig in GINFORS3 erfasst wurden.<sup>73</sup> Die derzeit verwendete Aggregationsebene der „Rest der Welt“ Region reflektiert in diesem Sinne ausschließlich bisherige Datenverfügbarkeiten.

In den vergangenen Jahren wurde auf Basis unterschiedlicher historischer „Footprint“-Berechnungen der wissenschaftliche Befund etabliert, dass zur nachhaltigen Einhaltung globaler planetarer Grenzen eine weitreichende Transformation globaler Wirtschaftsstrukturen notwendig sein wird.<sup>74</sup> Bislang konnten aber die diesen historischen Entwicklungen zugrundeliegenden internationalen Interdependenzen noch nicht vollständig abschließend evaluiert werden. Großer Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der gemeinsamen inhaltlichen Bewertung aktueller Entwicklungstendenzen sowie weitergehender Impact Assessments hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung globaler Emissions- und Extraktionspfade. Die im Rahmen des SimRess-Projekts seit dem Jahr 2013 durchgeführten Parametrisierungs- und Modellieraktivitäten zur simultanen Berechnung von CO<sub>2</sub>- und Material-Footprints in GINFORS3 markieren diesbezüglich einen auch im internationalen Vergleich wesentlichen methodischen Fortschritt.<sup>75</sup> Während die Simulationsfähigkeiten von GINFORS3-Vorläuferversionen bereits vor zehn Jahren umfassend gewürdigt wurden (siehe Wiedmann et al. 2007), weist GINFORS3 insbesondere durch seine globale Abdeckung sowie die im Zuge des SimRess-Projekts endogenisierte Berechnung von Rohstoffäquivalenten des Außenhandels ein markantes Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zu sonstigen dynamischen ökonomischen Simulationsmodellen auf.

Vor Hintergrund der vorab eingeführten Typologie ist GINFORS3 als ein umfassendes Instrument zur Analyse von Systeminterventionen einzuordnen. Es ermöglicht eine quantitative Abschätzung weitreichender direkter – wie auch indirekter sozioökonomischer Effekte alternativer Transformationsszenarien. Im Vergleich zu offenen komparativ-statischen Input-Output-Analysen sind GINFORS3-Modellrechnungen dabei

<sup>72</sup> Siehe bspw. Jacob et al. (2015) sowie KRU (2016) oder Distelkamp und Meyer (2016) für jüngere Anwendungsbeispiele im Bereich der Ressourcenschonungspolitik.

<sup>73</sup> So wäre es sicherlich wünschenswert, zukünftig eigenständige Berichtsmodule zu Ländern wie Saudi-Arabien, Chile oder ausgewählte afrikanische Staaten zu etablieren.

<sup>74</sup> Vgl. hierzu bspw. Hoekstra und Wiedmann (2014): „Assessing land, water, energy, material, and other footprints along supply chains is paramount in understanding the sustainability, efficiency, and equity of resource use from the perspective of producers, consumers, and government. [...] Ultimately, major transformative changes in the global economy are necessary to reduce humanity's environmental footprint to sustainable levels.“ (Hoekstra und Wiedmann 2014; S. 1114).

<sup>75</sup> Siehe hierzu auch die Einschätzung von Schandl et al. (2016) zum gegenwärtigen Forschungsstand: „While research on historical material and energy use has grown over the past couple of decades we know comparatively little about the future trajectories of material and energy use and carbon emissions. So far, a small number of studies have looked at possible trajectories of material use in Europe (Giljum et al., 2008) and globally (Dittrich et al., 2012).“

durch einen wesentlich höheren Konsistenzgrad gekennzeichnet, da Vorleistungs- wie auch Endnachfrageentwicklungen im Zeitablauf in Abhängigkeit von empirisch geschätzten Preis- und Einkommenselastizitäten endogen projiziert und dabei auch die makroökonomischen Einkommenskreisläufe geschlossen abgebildet werden.

Als Design-Modell erfüllt GINFORS3 eine originäre Vermittlerrolle zwischen Theorie und Realität. Da das Modell von den Autoren dieses Beitrags persönlich programmiert wurde, können aus technischer Perspektive letztlich sämtliche Parameter und Systemzusammenhänge des Modells zur Berücksichtigung externer Szenario-Informationen modifiziert werden. In diesem Sinne eignet es sich auch hervorragend zum komplementären Einsatz neben, sowie zur detaillierten ökonomischen Konsistenzprüfung der Ergebnisse qualitativer Szenario-Techniken.

### 3 Blick zurück – Analysen und Abschätzungen zur deutschen Ressourcenanspruchnahme im globalen Kontext

Formal wurde bereits in Kapitel 2 argumentiert, dass komplexe Datenbanken sowie aufwendige Kalkulationsmethoden notwendig sind, um die globale Ressourcenanspruchnahme individueller Volkswirtschaften abzubilden. Die einführende Betrachtung globaler Durchschnittswerte kann sicherlich hilfreich sein, um ein grundsätzliches Problembewusstsein zu etablieren. Zur Identifikationen von Gestaltungsansätzen bedarf es aber inhaltlicher Analysen, welche die globalen Triebfedern der Primärrohstoffanspruchnahme angemessen berücksichtigen. Gemäß unserer Einschätzung bedarf es hierzu simultan einer (möglichst weitgehenden) disaggregierten Betrachtung einzelner Wirtschaftssektoren unter systematischer Berücksichtigung ihrer jeweiligen binnenn- wie außenwirtschaftlichen Einflussfaktoren im Zeitverlauf. Erst durch eine Analyse der dabei abbildbaren wechselseitigen Wirkungsinterdependenzen können bspw. Produktivitätsentwicklungen von Wachstums- oder Struktureffekten unterschieden werden. Und ein kausales Verständnis der historisch beobachteten makroökonomischer Entwicklungstrends kann nur auf Basis entsprechender Dekompositionen sowie deren inhaltliche Einordnung in globale Wirkungszusammenhänge entwickelt werden. Die entsprechenden methodischen Anmerkungen des Kapitels 2 werden durch eine Präsentation eigener empirischer Befunde in den folgenden Abschnitten exemplarisch verdeutlicht.

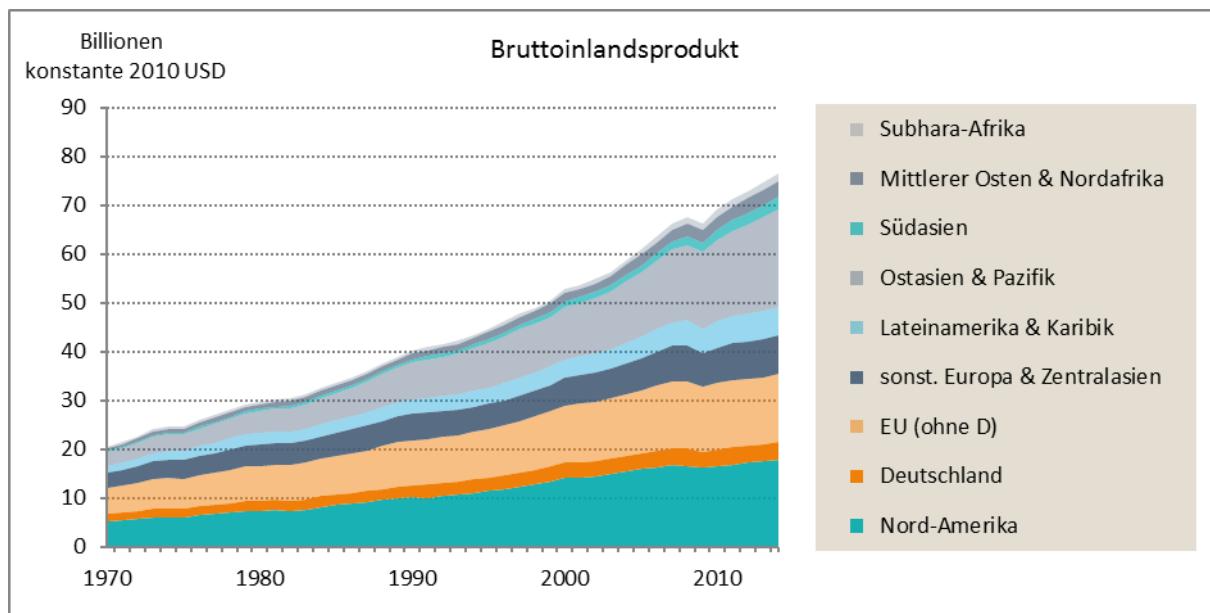
Für eine möglichst abgeschlossene Darstellung globaler Entwicklungstendenzen dient dabei Abschnitt 3.1 der einleitenden Zusammenfassung globaler makroökonomischer Befunde seit Beginn der 1970er Jahre. Vor diesem Hintergrund präsentiert daraufhin Abschnitt 3.2 den zusätzlichen Informationsgehalt von ex post Analysen unter Anwendungen des Modells GINFORS3. Drei exemplarische Leitfragen werden dabei beispielhaft evaluiert (Wieviel Primär-Rohstoffe wurden in Deutschland eingesetzt? Wieviel Primär-Rohstoffe wurden für Konsum und Investitionen verwendet? Wieviel Primär-Rohstoffe wurden für Exporte und Importe verwendet?). Soweit durchführbar, erfolgt hierbei auch ein Abgleich der eigenen Berechnungsergebnisse mit verfügbaren Abschätzungen der amtlichen Statistik. Hierbei zeigt sich, dass unsere Abschätzungen der historischen Entwicklungen der Rohstoffäquivalente des Außenhandels mitunter deutlich von denen der amtlichen Statistik abweichen. Dieser Befund mahnt zu einer kritischen Überprüfung der derzeit in der amtlichen Statistik angewandten Berechnungsansätze, welche die international teilweise deutlich variierenden Primärrohstoffproduktivitäten bislang nicht umfassend berücksichtigen.

#### 3.1 Globale und nationale Makro-Entwicklungen seit 1970/1980

##### 3.1.1 Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaftsdynamik

Ziel dieses Unterkapitels ist es aus einer längerfristigen globalen Perspektive einige zentrale Vergangenheits-Entwicklungen im Nexus „Bevölkerung, Wirtschaftswachstum, Ressourcenanspruchnahme und CO<sub>2</sub>-Emissionen“ aufzuzeigen. Hierbei wird jeweils der Frage nachgegangen, ob bereits die historische globale Wachstumsdynamik Zeichen einer Abschwächung aufweist und damit die von Meadows et al. 1972 aufgezeigten Gefahren eines exponentiellen Wachstums in den letzten 4 ½ Jahrzehnten tendenziell abgenommen haben. Die Analyse und Darstellung von globalen Durchschnittswerten alleine reicht aber nicht aus, um einen hinreichend fundierte Antwort auf diese Frage zu gewinnen. Erst durch die Unterscheidung von Weltregionen (Nord-Amerika, EU, sonst. Europa & Zentralasien, Lateinamerika & Karibik, Ostasien & Pazifik, Südasien, Mittlerer Osten & Nordafrika, Subsahara-Afrika) ergibt sich ein differenziertes Bild der im Folgenden zu diskutierenden Vergangenheitsentwicklungen.

Abbildung 22: Wirtschaftswachstum nach Weltregionen seit 1970



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Abbildung 22 verdeutlicht, dass sich im Zeitraum von 1970 bis 2014 das globale reale Bruttoinlandsprodukt (BIP, gemessen in konstanten 2010 US-Dollar) von 18,9 Billionen auf 72,8 Billionen nahezu vervierfacht hat. Gleichzeitig kam es aber auch zu deutlichen Gewichtsverschiebungen in der regionalen Verteilung. Trugen zu Anfang der 70er-Jahre Nord-Amerika und die EU noch 64% zum globalen BIP bei, so hat sich dieser Anteil bis 2014 auf unter 49% reduziert. Besonders stark gestiegen ist das reale BIP in der Region Ostasien & Pazifik (von 2,8 Billionen auf 19,8 Billionen). In 2014 entfiel auf diese Region 27% des globalen BIP. 45 Jahre zuvor lag dieser Anteil noch unter 15%.

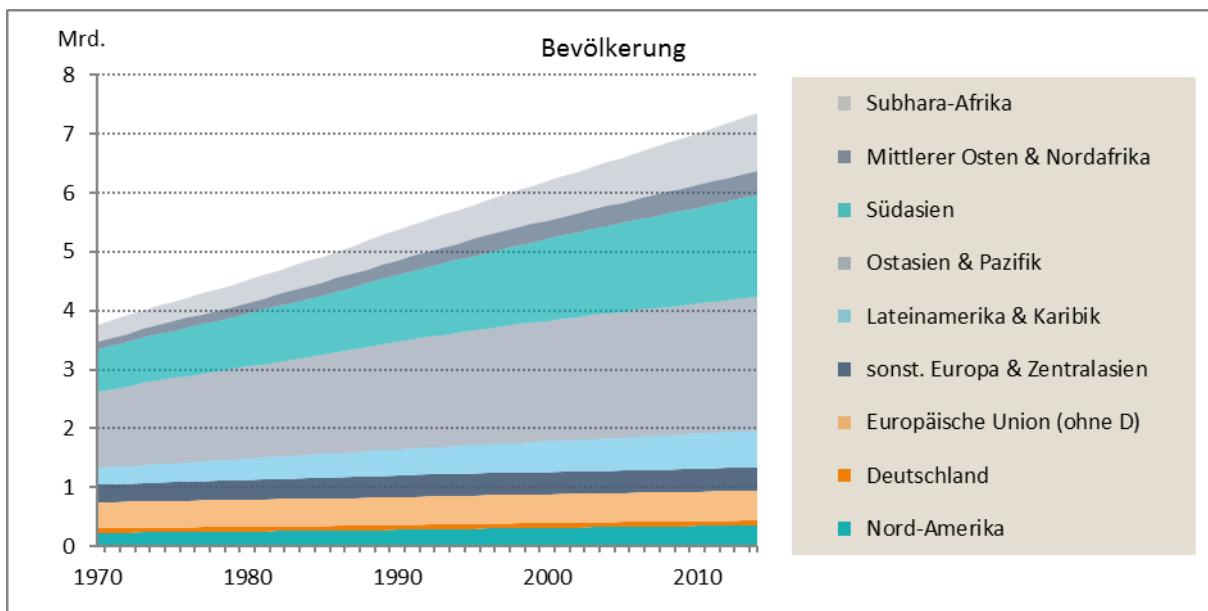
Aufschlussreich im Hinblick auf divergierende Dynamiken des Wirtschaftswachstums ist auch nachstehende Tabelle. Es zeigt sich, dass sich die globale Wirtschaftsdynamik in den dargestellten 11-Jahres-Zeiträumen kaum abgeschwächt hat. Sehr wohl lässt sich eine solche Abschwächung jedoch für die Regionen Nord-Amerika und Europa & Zentralasien beobachten. Die Region Südasien weist hingegen sogar eine unbremst steigende Wachstumsdynamik auf. Im Zeitraum von 2003 bis 2014 ist dort das reale BIP jährlich um durchschnittlich mehr als 7% gewachsen.

Tabelle 3: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten des Bruttoinlandsprodukts (in konstanten 2010 USD) nach Weltregionen

	1970 - 1981	1981 - 1992	1992 - 2003	2003 - 2014
Welt	3,7%	3,0%	2,9%	2,9%
Subsahara-Afrika	3,4%	1,0%	3,1%	5,6%
Mittlerer Osten & Nordafrika	5,1%	1,8%	3,5%	5,0%
Südasien	3,3%	5,1%	5,5%	7,2%
Ostasien & Pazifik	4,9%	5,1%	3,6%	4,8%
Lateinamerika & Karibik	5,5%	1,9%	2,5%	3,7%
sonst. Europa & Zentralasien	3,0%	1,8%	1,1%	2,4%
EU (ohne D)	3,0%	2,4%	2,5%	1,1%
Deutschland	2,7%	2,7%	1,3%	1,3%
Nord-Amerika	3,2%	3,0%	3,3%	1,7%

Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Abbildung 23: Bevölkerungswachstum nach Weltregionen seit 1970



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Im Zeitraum von 1970 bis 2014 konnte aber nicht nur eine starke Zunahme der globalen Wirtschaftsleistung beobachtet werden, gleichzeitig hat sich auch die Weltbevölkerung von 3,7 Milliarden auf 7,3 Milliarden nahezu verdoppelt. Auch diese Entwicklung vollzog sich nicht in allen Regionen der Welt in gleichem Maße (vgl. hierzu Abbildung 23).

Von dem gesamten Bevölkerungszuwachs um 3,6 Milliarden entfielen jeweils rund eine Milliarde auf die beiden Regionen Südasien sowie Ostasien & Pazifik. In der Region Subsahara-Afrika hat sich die Bevölkerung von 0,29 Milliarden auf 0,97 Milliarden mehr als verdreifacht. In der Region Lateinamerika & Karibik kam es zu einem Bevölkerungszuwachs um 0,34 Milliarden auf heute rund 0,63 Milliarden. Die Regionen Nord-Amerika, EU und sonstiges Europa & Zentralasien wiesen hingegen zusammen lediglich einen Zuwachs der Bevölkerung um 0,3 Milliarden auf (von 0,96 Milliarden Einwohner in 1970 auf 1,26 Milliarden Einwohner in 2014).

Wie schon für die Wirtschaftsleistung finden sich in Tabelle 4 für die Bevölkerungsdynamik die historischen durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten für vier 11-Jahres-Zeiträume differenziert nach Weltregionen dargestellt. Aus globaler Perspektive zeigt sich eine kontinuierlich zurückgehende Bevölkerungsdynamik von durchschnittlich 1,9% p.a. in den siebziger Jahren auf durchschnittlich 1,2% p.a. im Zeitraum 2003 bis 2014. Besonders deutlich zurückgegangen ist das Bevölkerungswachstum in den Regionen Ostasien & Pazifik sowie Lateinamerika & Karibik. In der Region Subsahara-Afrika hingegen lag die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate der Bevölkerung auch im letzten 11-Jahres-Zeitraum unverändert bei 2,8%. In den Regionen Nord-Amerika, EU sowie sonst. Europa & Zentralasien lag das Bevölkerungswachstum durchgehend niedriger als im globalen Durchschnitt.

Tabelle 4: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Bevölkerung nach Weltregionen

	1970 - 1981	1981 - 1992	1992 - 2003	2003 - 2014
Welt	1,9%	1,7%	1,4%	1,2%
Subsahara-Afrika	2,8%	2,9%	2,7%	2,8%
Mittlerer Osten & Nordafrika	2,8%	2,9%	2,5%	2,5%
Südasien	2,4%	2,3%	1,9%	1,5%
Ostasien & Pazifik	1,9%	1,5%	1,1%	0,7%
Lateinamerika & Karibik	2,4%	2,0%	1,6%	1,2%
sonst. Europa & Zentralasien	1,1%	1,0%	0,1%	0,5%
EU (ohne D)	0,5%	0,3%	0,2%	0,3%
Deutschland	0,0%	0,3%	0,2%	-0,2%
Nord-Amerika	1,1%	1,0%	1,1%	0,9%

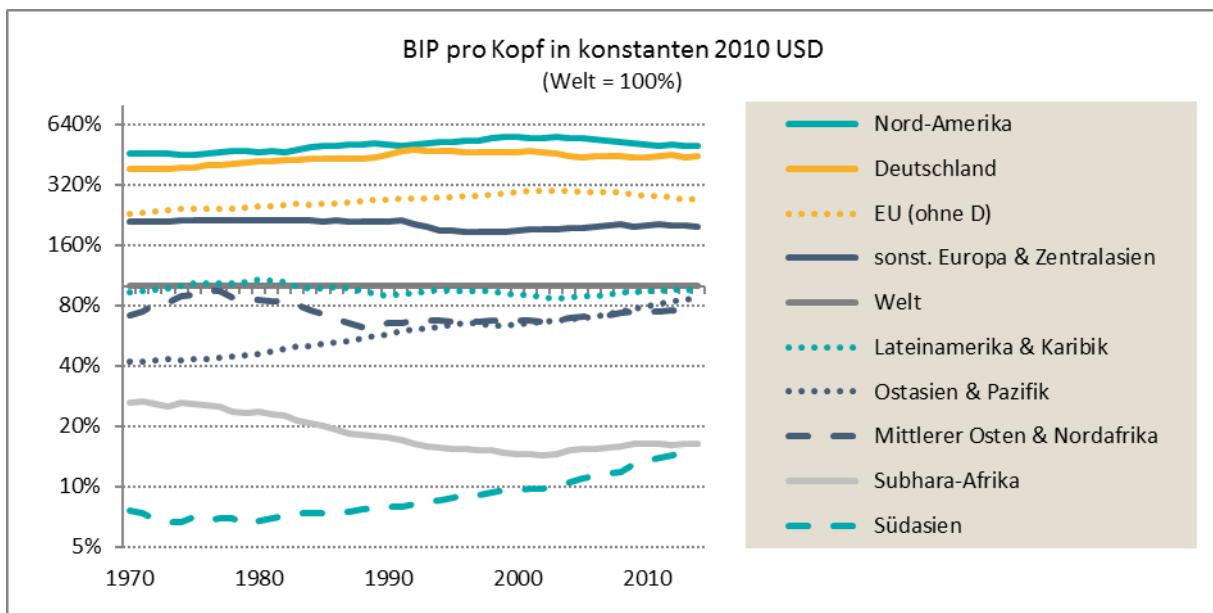
Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Doch führten diese regionalen Unterschiede in Bevölkerungs- und Wirtschaftsdynamik seit 1970 zu einer Konvergenz der Wirtschaftsleistung pro Kopf? Abbildung 24 sowie Tabelle 5 und Tabelle 6 verdeutlichen, dass dies zumindest nicht durchgehend gilt. In der nachstehenden Abbildung wird das BIP pro Kopf (in konstanten 2010 USD) in den verschiedenen Weltregionen im Verhältnis zum globalen Durchschnitt dargestellt. Vor dem Hintergrund, dass erhebliche Niveau-Unterschiede zu beobachten sind (vgl. Tabelle 5) wurde in der Abbildung auf der Y-Achse eine logarithmische Skalierung gewählt, so dass sowohl die Entwicklungen am unteren Rand (Südasien) als auch am oberen Rand (Nord-Amerika, Deutschland, EU) sichtbar bleiben.

Es zeigt sich, dass die Region Ostasien & Pazifik ihren Rückstand gegenüber dem globalen Durchschnitt nahezu komplett aufgeholt hat. Betrug das BIP pro Kopf in dieser Region 1970 lediglich 42% des globalen Durchschnitts, so konnte dieses Verhältnis bis 2014 auf 87% gesteigert werden. Aufgeholt, wenn auch auf deutlichem niedrigerem Niveau, hat auch die Region Südasien. Für die Region Subsahara-Afrika zeigte sich hingegen kein Angleichen, sondern sogar ein Rückgang der pro Kopf Wirtschaftsleistung in Relation zum globalen Durchschnitt. Betrug das BIP pro Kopf in dieser Region in 1970 noch 26% des globalen Durchschnitts, so ist diese Relation bis 2002 auf unter 15% zurückgegangen. Erst in den letzten Jahren war wieder ein leichter Anstieg auf über 16% zu beobachten.

Sowohl für Nord-Amerika als auch für die EU ist etwa zur Jahrtausendwende ein stärkerer Anstieg der pro-Kopf Wirtschaftsleistung als im globalen Durchschnitt zu beobachten gewesen. Erst in der jüngeren Vergangenheit kam es zu einer leichten Konvergenz in Richtung globalem Durchschnitt.

Abbildung 24: BIP pro Kopf nach Weltregionen in Relation zum globalen Durchschnitt



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Tabelle 5: BIP (in Tsd. konstanten 2010 USD) pro Kopf in den Weltregionen

	1970	1981	1992	2003	2014
Welt	5,1	6,2	7,1	8,4	10,0
Subsahara-Afrika	1,3	1,4	1,2	1,2	1,6
Mittlerer Osten & Nordafrika	3,7	5,2	4,8	5,7	7,5
Südasien	0,4	0,4	0,6	0,9	1,6
Ostasien & Pazifik	2,2	3,0	4,3	5,7	8,8
Lateinamerika & Karibik	4,8	6,6	6,6	7,3	9,5
sonst, Europa & Zentralasien	10,8	13,2	14,5	16,2	20,0
EU (ohne D)	11,8	15,5	19,5	25,1	27,3
Deutschland	19,6	26,2	34,1	38,2	44,8
Nord-Amerika	23,4	29,5	36,4	46,2	50,6

Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Tabelle 6: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten des BIP (in konstanten 2010 USD) pro Kopf nach Weltregionen

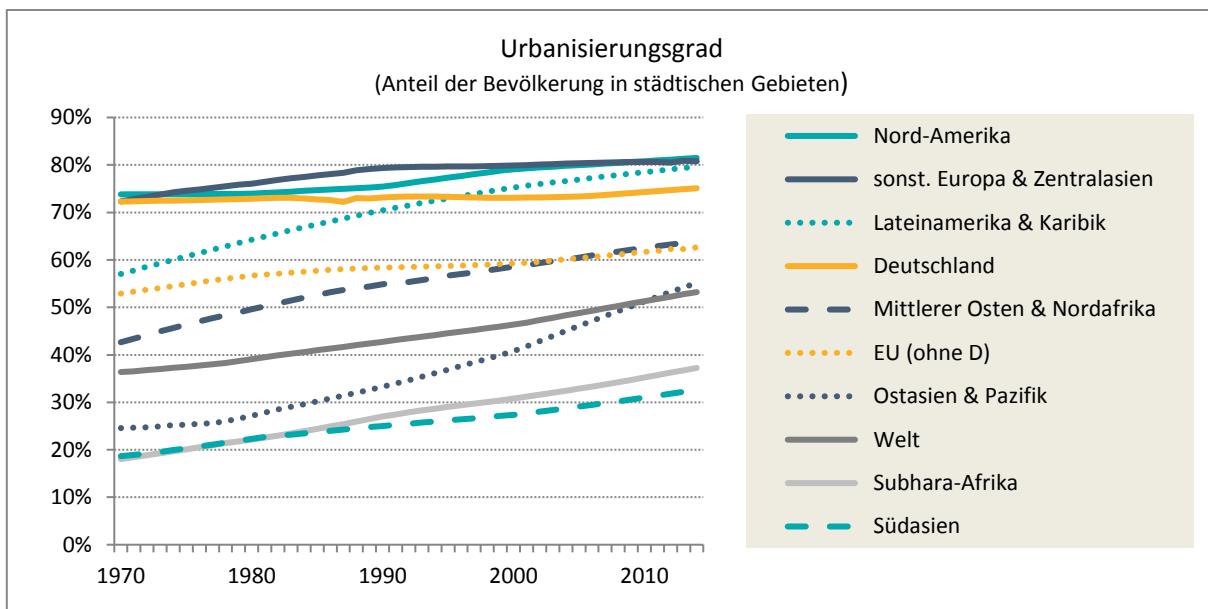
	1970 - 1981	1981 - 1992	1992 - 2003	2003 - 2014
Welt	1,8%	1,2%	1,5%	1,7%
Subsahara-Afrika	0,6%	-1,8%	0,3%	2,8%
Mittlerer Osten & Nordafrika	3,2%	-0,8%	1,5%	2,5%
Südasien	0,9%	2,7%	3,5%	5,6%
Ostasien & Pazifik	2,9%	3,5%	2,5%	4,0%
Lateinamerika & Karibik	3,0%	-0,1%	0,9%	2,4%
sonst. Europa & Zentralasien	1,9%	0,8%	1,0%	1,9%
EU (ohne D)	2,5%	2,1%	2,3%	0,8%
Deutschland	2,6%	2,4%	1,0%	1,4%
Nord-Amerika	2,1%	1,9%	2,2%	0,8%

Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Ein neben Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum im Ressourcennexus häufig diskutierter Megatrend ist die zunehmende Urbanisierung. Abbildung 25 zeigt, dass sich aus globaler Perspektive seit 1970 der Anteil der Bevölkerung in städtischen Gebieten von 36,4% auf 53,2% im Jahr 2014 erhöht hat. Die urbane Bevölkerung ist somit innerhalb von 44 Jahren um 2,5 Milliarden gestiegen, wohingegen die Bevölkerung in ländlichen Gebieten „nur“ um 1,1 Milliarden zugenommen hat. Ein Blick auf die sechs unterschiedenen Weltregionen zeigt, dass die Dynamik der Urbanisierung in der Vergangenheit in der Region Ostasien & Pazifik besonders ausgeprägt war. Dort ist der Anteil der städtischen Bevölkerung von unter 25% auf heute über 55% gestiegen. Auch in den Regionen Südasien, Subsahara-Afrika sowie Mittlerer Osten & Nordafrika, in denen in 2014 knapp 43% der Weltbevölkerung lebten, war eine zunehmende Urbanisierung zu beobachten. So-wohl Subsahara-Afrika als auch Südasien wiesen aber auch 2014 noch einen unterdurchschnittlichen Urbanisierungsgrad auf (32,6% in Südasien, 37,2% in Subsahara-Afrika).

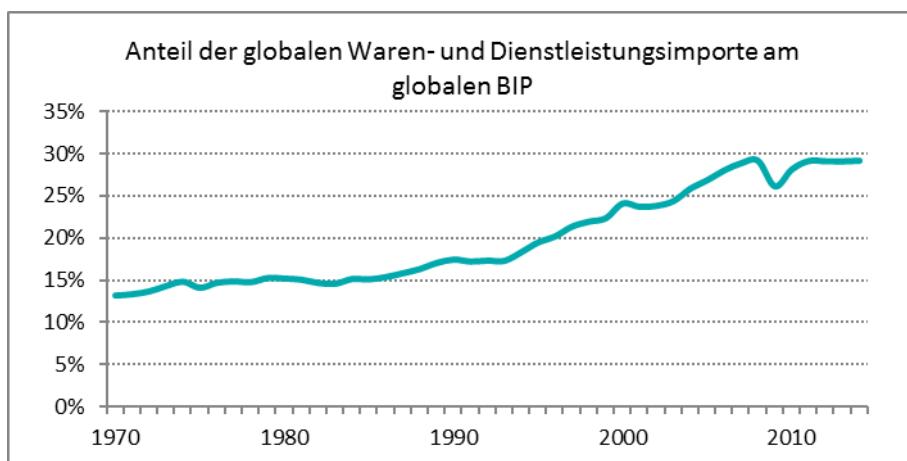
Unser letzter Blick auf sozioökonomische globale Megatrends der letzten Jahrzehnte gilt der zunehmenden Globalisierung im Waren- und Dienstleistungsverkehr. Abbildung 26 zeigt die Entwicklung des Anteils der Importe von Gütern und Dienstleistungen an der Wirtschaftsleistung (BIP) für die Welt. Von 1970 bis etwa Mitte der 80er Jahre kann kaum eine Intensivierung des internationalen Waren- und Dienstleistungsaustauschs beobachtet werden. Ende der 80er Jahre kam es dann zu einem Anstieg des Importanteils von 15% auf 17,4%. Nach einer kurzen Stagnation setzte ab 1993/1994 eine bis 2008 anhaltende starke Dynamik im internationalen Waren- und Dienstleistungsverkehr ein, in deren Folge der Anteil der Importe am globalen BIP auf fast 30% anstieg. In der jüngsten Vergangenheit konnte zwar der krisenbedingte Rückgang in 2009 wieder aufgeholt werden. In den Jahren 2011 bis 2014 kam es jedoch zu einer Stagnation des Importanteils auf einem Niveau von 29,1% und es wird bereits die Frage nach einem „peak trade“ analysiert und diskutiert (Timmer et al, 2016).

Abbildung 25: Urbanisierungstrends nach Weltregionen seit 1970



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Abbildung 26: Intensivierung des globalen Waren- und Dienstleistungsaustauschs seit 1970

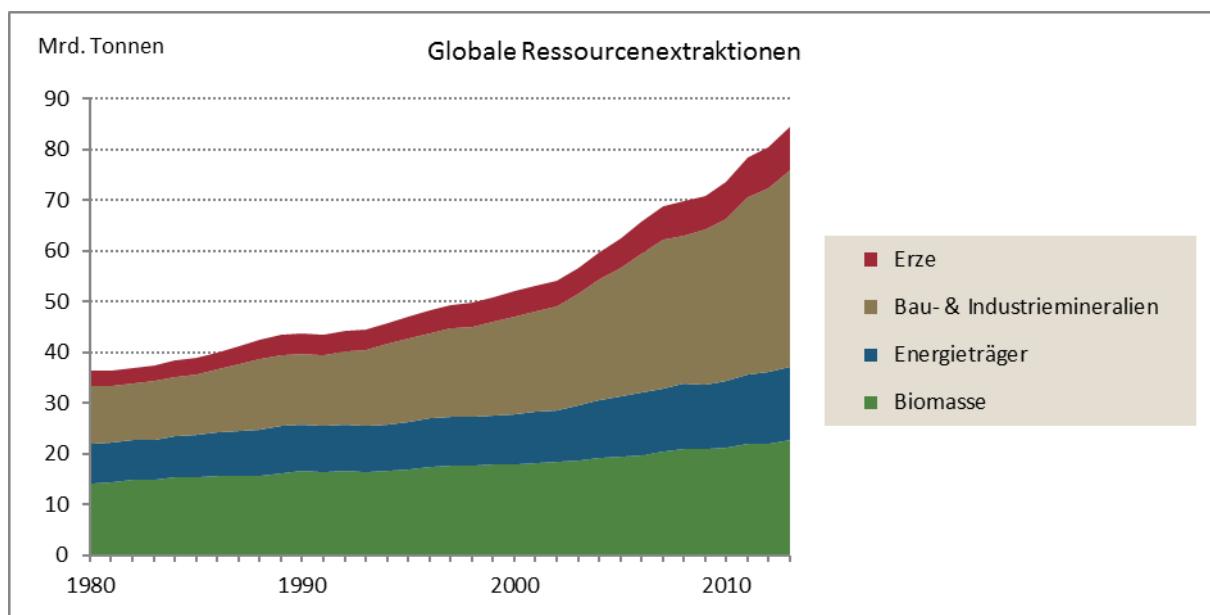


Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

### 3.1.2 Ressourcenextraktionen und globale Rohstoffproduktivität

Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der globalen Ressourcenextraktionen seit dem Jahr 1980. Diese sind innerhalb von nur 33 Jahren von 36,3 Milliarden Tonnen auf 84,4 Milliarden Tonnen gestiegen, was einem Faktor von 2,3 entspricht. Die Abbildung zeigt aber auch, dass dies ganz wesentlich auf einen Anstieg bei den Bau- & Industriemineralien zurückzuführen ist. Für diese Materialkategorie war im Zeitraum von 1980 bis 2013 ein Anstieg der globalen Extraktionen um 27,3 Milliarden Tonnen bzw. 242% zu beobachten. Bei den Erzen betrug der absolute Zuwachs zwar „nur“ 5,6 Milliarden Tonnen. Dies entsprach aber einem relativen Zuwachs von 182% und somit einer nahezu Verdreifachung innerhalb der relativ kurzen Zeitspanne. Bei den Energieträgern und der Biomasse kam es zwar ebenfalls zu einer Ausweitung der globalen Extraktionen. Diese fielen aber deutlich weniger dynamisch aus: für Energieträger +6,5 Milliarden Tonnen bzw. +82% und für Biomasse +8,6 Milliarden Tonnen bzw. +61%.

Abbildung 27: Entwicklung der globalen Ressourcenextraktionen seit 1980



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: WU Wien, Global Material Flows Database

Wie bereits im Hinblick auf Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaftsdynamik gilt es auch bei den Ressourcenextraktionen in einem nächsten Schritt für die vier unterschiedenen Materialkategorien nach den Weltregionen zu fragen, in denen die Extraktionen stattgefunden haben. Eine hierzu geeignete Übersicht auf Grundlage von Daten der Wirtschaftsuniversität Wien (Global Material Flows Database) findet sich in Abbildung 28.

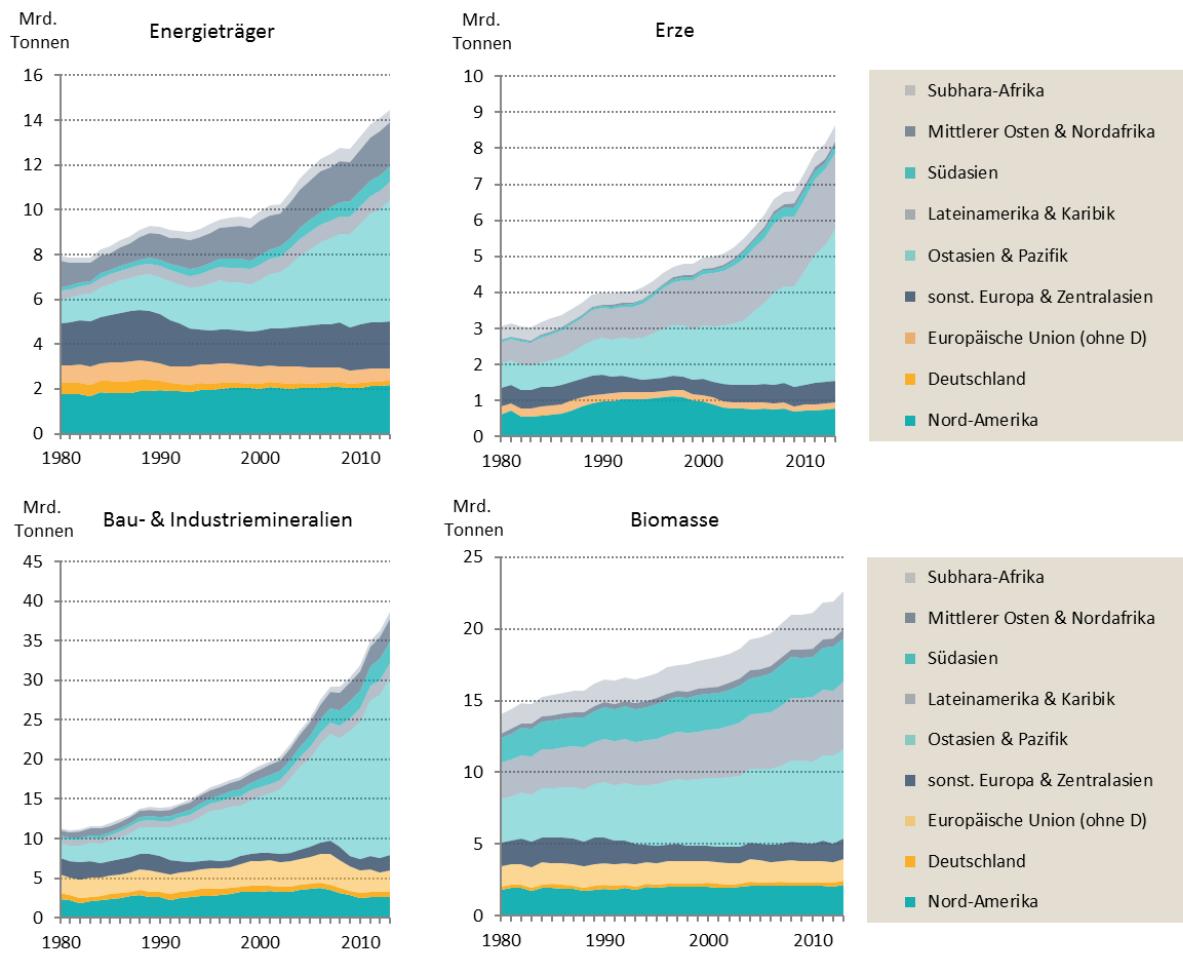
Für die Energieträger zeigt sich, dass zwei Drittel des globalen Zuwachses von 1980 bis 2013 auf die Region Ostasien & Pazifik entfällt. Sowohl in Deutschland als auch in der übrigen EU kam es hingegen zu einem Rückgang der Extraktion von Energieträgern. Die Region sonstiges Europa & Zentralasien erlebte insbesondere in Folge des Zusammenbruchs des Ostblocks einen deutlichen Rückgang.

Auch bei den Erzextraktionen ist der deutlichste Zuwachs in der Region Ostasien & Pazifik zu beobachten gewesen (+3,5 Milliarden Tonnen bzw. +526%). Weitere bedeutende Abbauregion für Erze ist Lateiname-rika & Karibik wo es ebenfalls zu einem erheblichen Anstieg der Extraktion von Roherzen kam (+1,5 Milliarden Tonnen bzw. +254%).

Auf die Materialkategorie Bau- & Industriemineralien entfallen heute fast 46% aller globalen Ressourcenextraktionen und sie stellt somit aus physischer Perspektive die mit Abstand bedeutendste Kategorie dar. Auch hier dominiert die Region Ostasien & Pazifik das Bild des beobachteten Anstiegs der globalen Extraktionen. Allein in dieser Region kam es zu einem Anstieg der Extraktionen von 1,8 Milliarden Tonnen in 1980 auf 22,5 Milliarden Tonnen in 2013. Damit entfielen 75% des globalen Anstiegs allein auf diese Region. Weitere Weltregionen in denen es seit 1980 zu einem erheblichen Zuwachs der Extraktion von Bau- & Industriemineralien kam sind Südasien (+2,5 Milliarden Tonnen bzw. +1027%) und Mittlerer Osten & Nordafrika (+2,2 Milliarden Tonnen bzw. +371%).

Ein deutlich anderes Bild im Hinblick auf regionale Dynamiken bei den Ressourcenextraktionen seit 1980 zeigt sich im Hinblick auf die Materialkategorie Biomasse. Dort war in allen Regionen außer Nord-Amerika, Europa & Zentralasien ein Anstieg der Extraktionen zwischen 74% und 104% zu beobachten.

Abbildung 28: Ressourcenextraktionen nach Materialarten und Weltregionen seit 1980

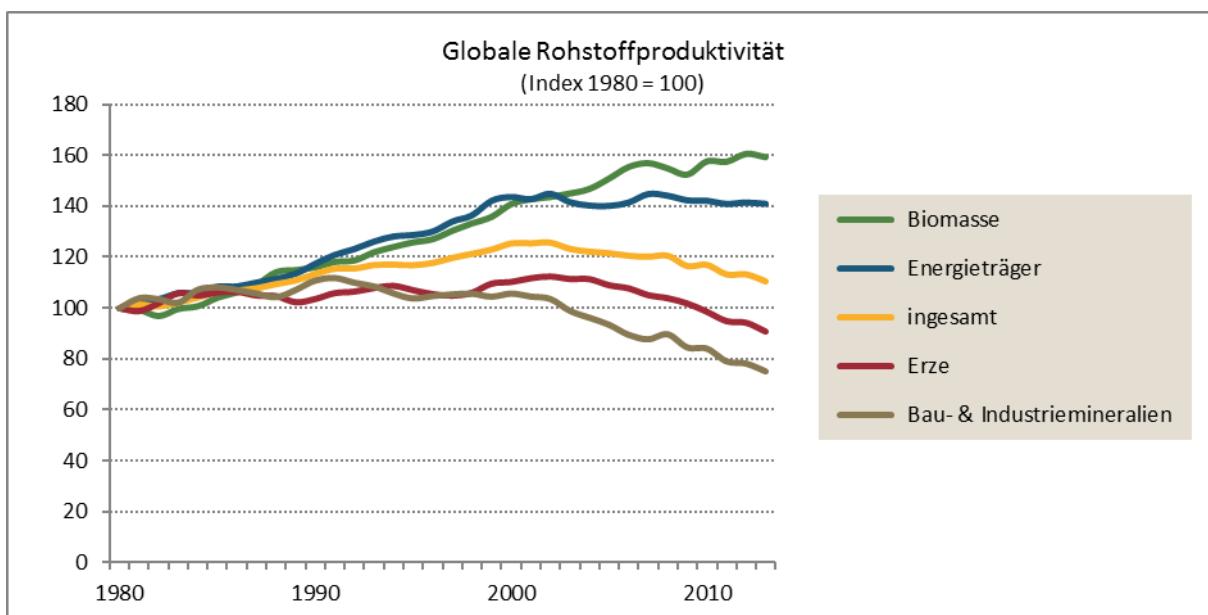


Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: WU Wien, Global Material Flows Database

Da Ressourcen sowohl direkt als auch indirekt über Vorleistungsketten Gegenstand des globalen Handels sind, erlauben diese Analysen noch keine Identifikation der globalen Treiber von Ressourceninanspruchnahme sowie Rohstoffproduktivität für einzelne Länder oder Weltregionen. Sehr wohl erlauben die bis dato analysierten Beobachtungen jedoch Aussagen zur Entwicklung der globalen Rohstoffproduktivität (= globales BIP in konstanten 2010 USD / globale Ressourcenextraktion). Wie Abbildung 29 verdeutlicht, konnte im Zeitraum von 1980 bis 2013 lediglich eine sehr schwache relative Entkopplung der globalen wirtschaftlichen Aktivität von der Ressourceninanspruchnahme beobachtet werden. Die Rohstoffproduktivität konnte innerhalb von 33 Jahren lediglich um gut 10% gesteigert werden. Seit 2002 ist sogar ein Rückgang der globalen Rohstoffproduktivität zu beobachten. Auch hier lohnt ein Blick auf einzelne Materialkategorien.

So ist die globale Rohstoffproduktivität Biomasse (= globales BIP in konstanten 2010 USD / globale Ressourcenextraktion Biomasse) relativ kontinuierlich um etwa 1% p.a. gestiegen und lag in 2013 um knapp 60% höher als in 1980. Ähnlich positiv entwickelte sich in den 80er und 90er Jahren die globale Rohstoffproduktivität Energieträger. Seit der Jahrtausendwende stagniert diese jedoch. Sowohl für Erze als auch für Bau- & Industriemineralien ist aus globaler Perspektive hingegen noch nicht einmal eine relative Entkopplung von Wirtschaftsleistung und Ressourceninanspruchnahme zu beobachten. Im Jahr 2013 wurden pro USD globales BIP (in konstanten 2010 USD) mehr Erze sowie Bau- & Industriemineralien extrahiert als im Jahr 1980.

Abbildung 29: Globale Rohstoffproduktivität seit 1980



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators & WU Wien, Global Material Flows Database

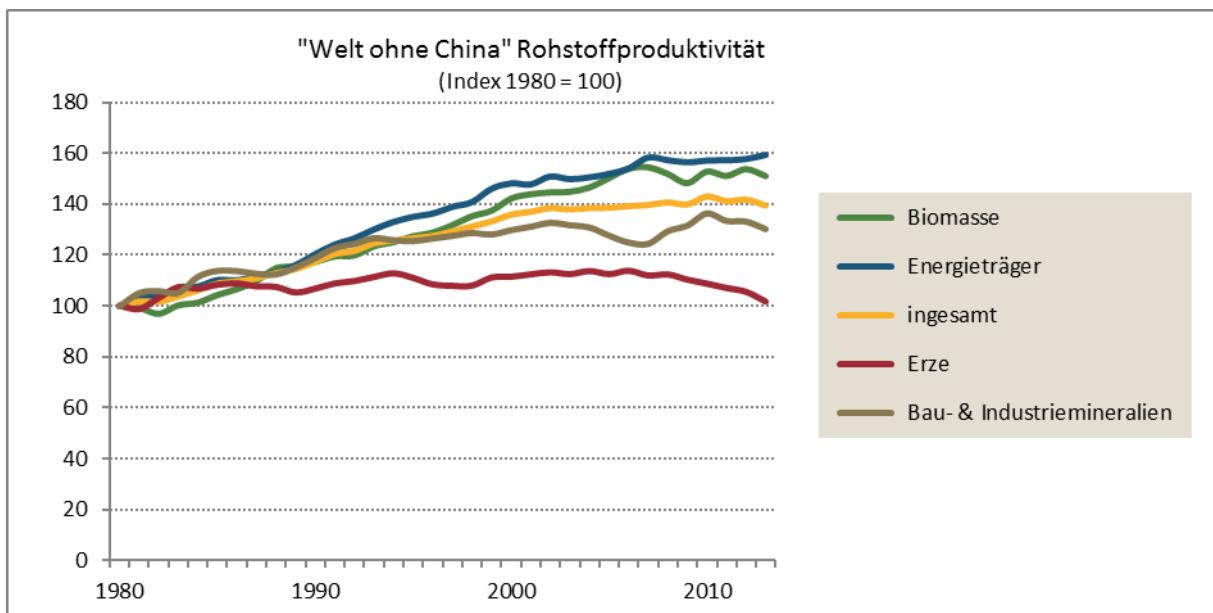
Während dieses Kapitel in erster Linie dazu intendiert ist, aus einer globalen Perspektive zentrale Entwicklungstendenzen der letzten Jahrzehnte deskriptiv vorzustellen, sei an dieser Stelle zunächst näher auf die angesprochenen globalen Rohstoffproduktivitätsentwicklungen seit der Jahrtausendwende eingegangen. Die Frage nach zentralen Hintergründen für diese Beobachtungen verweist in erster Linie auf einen „China-Effekt“: Aufgrund der exorbitanten Wirtschaftsdynamik in Kombination mit einer rasanten Urbanisierung haben sich in China seit der Jahrtausendwende die heimischen Ressourcenextraktionen von 9,3 Gigatonnen innerhalb von nur 13 Jahren mehr als verdreifacht (28,9 Gigatonnen in 2013).

Frage man vor diesem Hintergrund nach der hypothetischen Rohstoffproduktivitätsentwicklung einer Welt ohne China, kann hierzu auf Abbildung 30 verwiesen werden. In dieser fiktiven Welt wäre demnach auch seit der Jahrtausendwende ein leichter Anstieg der Rohstoffproduktivität zu beobachten gewesen. Die deutlichsten Unterschiede zur tatsächlichen Entwicklung in Abbildung 29 ergeben sich für die Bau- & Industriemineralien. Während hier in der tatsächlichen Entwicklung seit der Jahrtausendwende ein Rückgang der globalen Rohstoffproduktivität um mehr als 20% zu beobachten war, hätte sich in einer Welt ohne China sogar ein leichter Produktivitätsfortschritt ergeben.

Im Vorgriff auf entsprechende Analysen in Kapitel 3.2 lässt sich neben dem China-Effekt ein weiterer zentraler Hintergrund für die schwache globale Rohstoffproduktivitätsentwicklung identifizieren: Die beobachteten Unterschiede in der globalen Wachstumsdynamik. Während in der jüngeren Vergangenheit Länder und Regionen mit einer vergleichsweise geringen Rohstoffintensität der Wirtschaftsleistung (wie beispielsweise Deutschland oder das Vereinigte Königreich) eine im internationalen Vergleich niedrige Wachstumsdynamik aufgewiesen haben, haben insbesondere rohstoffintensive Länder und Regionen (wie Indien, China oder die Region „Rest der Welt“) hohe Wachstumsraten des BIP aufgewiesen. Wenn sich der Anteil der vergleichsweise rohstoffintensiven Länder und Regionen am globalen BIP erhöht, so führt dies ceteris paribus zu einem Rückgang der globalen Rohstoffproduktivität.

Ob hierzu zudem weitere „Globalisierungstendenzen“ beigetragen haben, indem bspw. vermehrt Zwischenprodukte aus rohstoffintensiv produzierenden Ländern anstelle vergleichbarer Produkte aus weniger rohstoffintensiver Herstellung bezogen wurden kann auf Basis dieser ersten Befunde nicht eindeutig festgestellt werden. Es wäre daher spannend, diesen Themenkomplex in zukünftigen Forschungsaktivitäten eingehender zu analysieren.

Abbildung 30: „Welt ohne China“ Rohstoffproduktivität seit 1980



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators & WU Wien, Global Material Flows Database

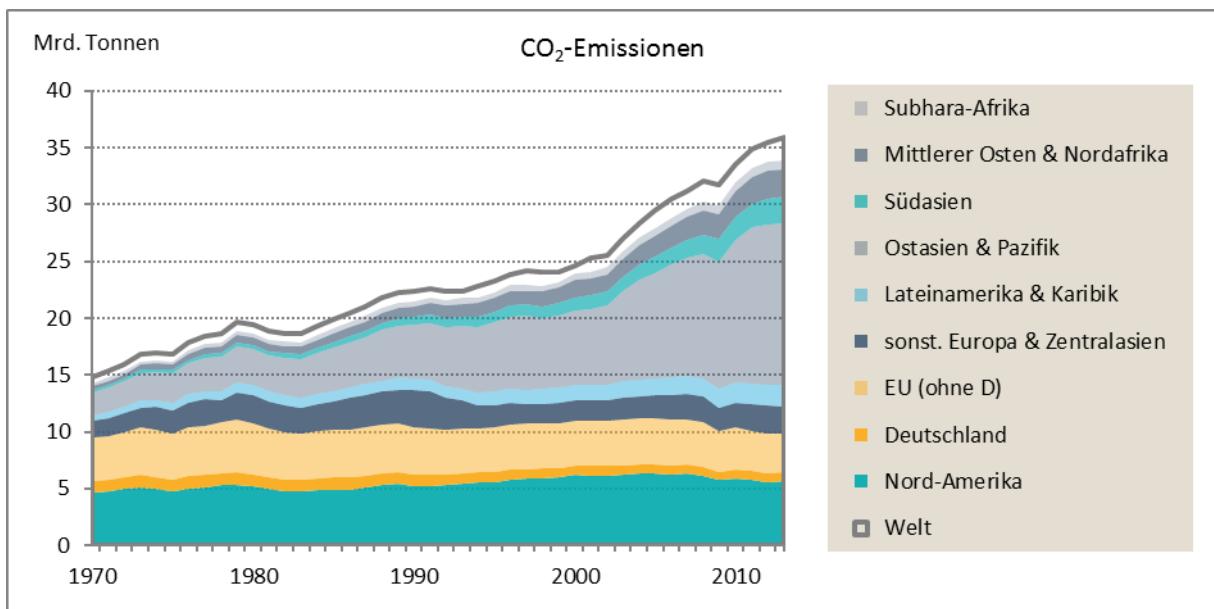
### 3.1.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Intensität der Wirtschaftsleistung

Seit 1970 haben sich auch die weltweiten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr als verdoppelt (siehe hierzu Abbildung 31). Bis zum Jahr 2013 stiegen diese auf 35,8 Mrd. Tonnen. Der global beobachtbare Zuwachs im Zeitraum von 1970 bis 2013 (21,1 Mrd. Tonnen) wurde dabei wiederum wesentlich durch territoriale Emissionen der Region Ostasien & Pazifik (+12,3 Mrd. Tonnen) getrieben.

Tabelle 7 ergänzt diese grafische Darstellung um eine Übersicht durchschnittlicher jährlicher Wachstumsraten der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Weltregionen für vier historische Zeitabschnitte (1970 bis 1981, 1981 bis 1992, 1992 bis 2003 und 2003 bis 2013). Es zeigt sich, dass bis zum Jahr 2013 aus globaler Perspektive keine Abschwächung der Wachstumsdynamik bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen zu beobachten war. Im Gegenteil: Die Dekade von 2003 bis 2013 war sogar derjenige Zeitraum seit 1970 mit den höchsten durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten (2,9% p.a.). Die höchsten jährlichen Zuwächse waren in der jüngeren Vergangenheit in Asien zu beobachten.

Abbildung 32 verdeutlicht, dass die beobachteten Entwicklungen der regionalen CO<sub>2</sub>-Emissionen neben ökonomischen Wachstumseffekten auch unterschiedlichen Struktureffekten unterliegen. Insbesondere für Europa und Nord-Amerika sind seit Beginn der 1970er Jahre anhaltende Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Intensität (in Relation zum BIP) beobachtbar. Im Vergleich hierzu scheint die CO<sub>2</sub>-Intensität in Südasien sowie dem Mittleren Osten & Nordafrika seit Mitte der 1980er Jahre langfristig eher zu stagnieren. In der Region Ostasien & Pazifik konnten zudem seit der Jahrtausendwende steigende Intensitäten beobachtet werden. Im Vergleich zum globalen Durchschnitt sind die drei soeben genannten Regionen damit derzeit durch wesentlich höhere CO<sub>2</sub>-Intensitäten gekennzeichnet. In der wissenschaftlichen Literatur wird dieser Befund häufig vor Hintergrund der sogenannten „Environmental Kuznets Curve“ (EKC)-Hypothese diskutiert. Insbesondere die empirischen Studien von Grossman und Krueger (1995) sowie Selden und Song (1995) erzeugten eine hohe Aufmerksamkeit für diese Hypothese, welche unterstellt, dass in frühen Entwicklungsphasen einer Volkswirtschaft ökonomische Wachstumsprozesse Verschlechterungen des ökologischen Umweltzustands hervorrufen, diese allerdings später nach Erreichung eines höheren Einkommensniveaus durch dann einsetzende Verbesserungen des ökologischen Umweltzustands wiederum abgemildert werden.

Abbildung 31: CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Weltregionen seit 1970



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Tabelle 7: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Weltregionen

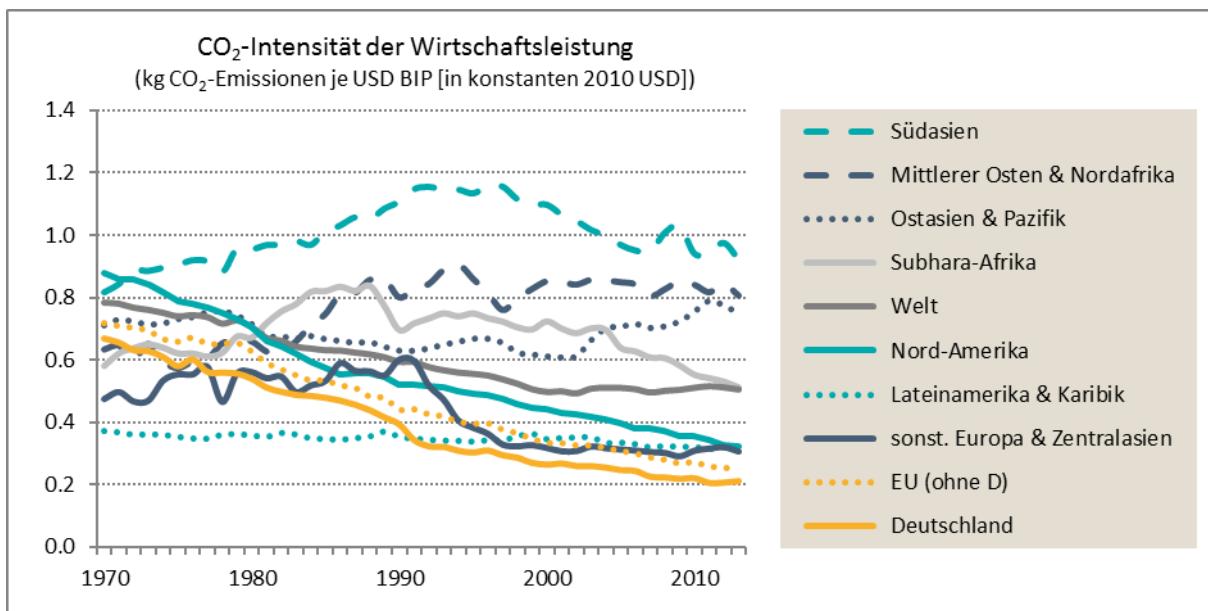
	1970 - 1981	1981 - 1992	1992 - 2003	2003 - 2013
Welt	2,2%	1,6%	1,7%	2,9%
Subsahara-Afrika	5,4%	1,2%	2,7%	2,4%
Mittlerer Osten & Nordafrika	6,2%	5,0%	3,8%	4,2%
Südasien	4,9%	6,8%	4,3%	6,1%
Ostasien & Pazifik	4,4%	4,6%	3,9%	6,1%
Lateinamerika & Karibik	5,0%	1,7%	2,7%	3,0%
sonst. Europa & Zentralasien	4,2%	1,4%	-3,1%	2,0%
EU (ohne D)	1,2%	-0,6%	0,1%	-1,7%
Deutschland	0,2%	-1,5%	-0,7%	-0,8%
Nord-Amerika	0,6%	0,7%	1,4%	-1,0%

Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

Da die methodische Robustheit der angewandten empirischen Tests der EKC-Hypothese häufig kritisch hinterfragt werden muss, verweisen wir auf diesen Literaturzweig hier lediglich als Beleg für umfassende Forschungsaktivitäten, welche in den vergangenen 20 Jahren den Befund global divergierender Entwicklungen regionaler CO<sub>2</sub>-Emissionen weitreichend dokumentierten.<sup>76</sup>

<sup>76</sup> Weitergehende Literaturverweise können den thematisch einschlägigen Veröffentlichungen entnommen werden. Die globale Entwicklung territorialer CO<sub>2</sub>-Emissionen wurde bspw. jüngst von Özokcu und Özdemir (2017) im Kontext der EKC-Hypothese analysiert. Neben einer panel-ökonometrischen Untersuchung der Entwicklungen in 26 OECD Staaten sowie 52 Entwicklungsländern (welche die EKC-Hypothese zu verwerfen scheint), präsentieren diese Autorinnen auch einen kurzen aktuellen Literaturüberblick.

Abbildung 32: CO<sub>2</sub>-Intensität der Wirtschaftsleistung nach Weltregionen seit 1970



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: The World Bank Group 2016, World Development Indicators

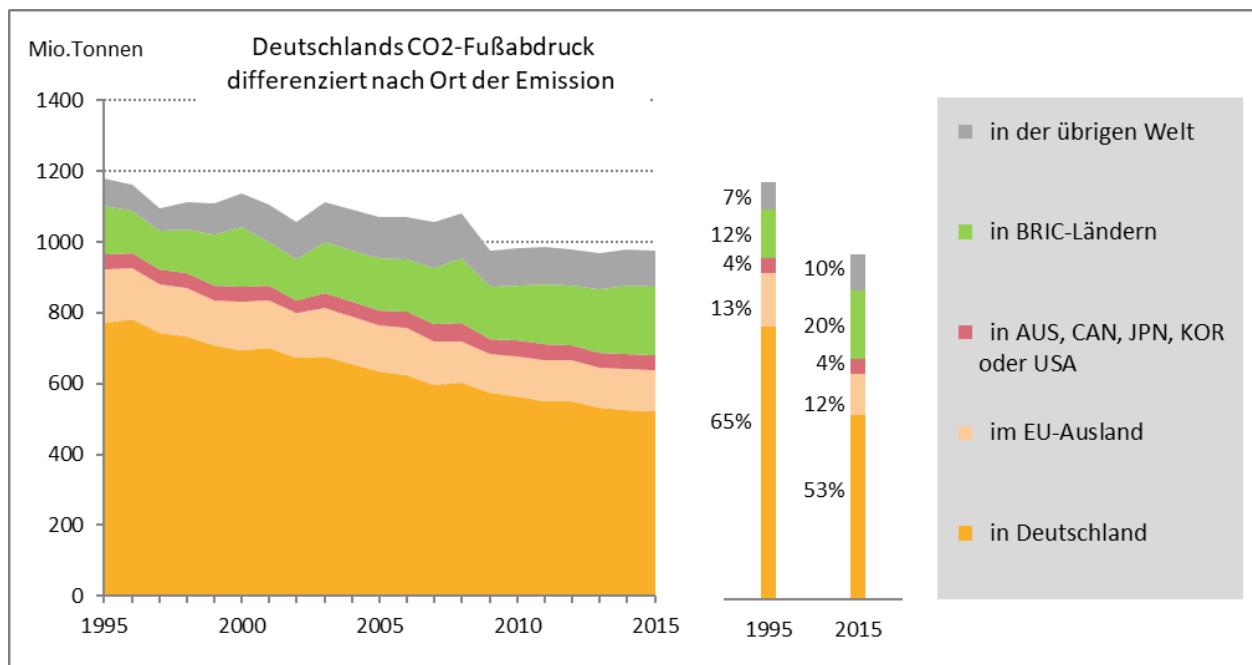
Die mangelnde Robustheit von traditionellen Analysen der EKC-Hypothese ist in erster Linie auf den hohen Abstraktionsgrad der jeweiligen Studien zurückzuführen. Während es grundsätzlich sicherlich unstrittig ist, dass der Umfang der Umweltverschmutzung stets zahlreichen, regional differierender und einander überlagernder Einflüsse unterliegt (wie bspw. dem legislativen Ordnungsrahmen, der institutionellen Umsetzung und Überwachung dieses Ordnungsrahmens, regional unterschiedlichen Konsumentenpräferenzen, Produktionstechnologien und Einkommensverteilungen), können diese Effekte in den jeweiligen empirischen Untersuchungen üblicherweise nicht abgebildet werden. Denn diese beruhen üblicherweise auf Korrelationsanalysen hoch-aggregierter Einzelzeitreihen. Die politisch hoch-relevante Frage nach kausalen Ursachen der beobachteten Entwicklung regionaler CO<sub>2</sub>-Intensitäten muss dabei zwangsläufig unbeantwortet bleiben.<sup>77</sup>

In jüngerer Zeit wurden daher auch auf dem Gebiet der angewandten zeitreihenökonomischen Analyse weitergehende Analysedesigns angewandt, welche zur Prüfung inhaltlicher Erklärungsansätze zumindest prinzipiell geeignet erscheinen. Beispielhaft seien hierzu Pao und Tsai (2011) erwähnt, welche die sogenannte „pollution haven“-Hypothese im Vergleich zu einfachen Skaleneffekten sowie der „pollution halo“-Hypothese auf Basis historischer Entwicklungen der BRIC-Staaten seit Beginn der 1990er Jahre durchführen.<sup>78</sup> Für ihren empirischen Test dieser Hypothesen erweitern Pao und Tsai (2011) den zuvor angesprochenen Analyserahmen um zwei zusätzliche (Panel-) Zeitreihen.

<sup>77</sup> Eine ähnliche Kritik an den von Anhängern der EKC-Hypothese üblicherweise verwendeten Analysedesigns wurde bereits von Ekins (1997) folgendermaßen zusammengefasst: „The studies themselves are unable to shed any light on the causation, as opposed to the correlation, that might be embodied in the relationships. However, my discussion of the issues, as well as that of the researchers of the studies, suggests that any improvements in environmental quality as incomes increase are likely to be a result of the enactment of environmental policy rather than endogenous changes in economic structure or technology.“ (Ekins, 1997; S. 826).

<sup>78</sup> Die „pollution haven“-Hypothese unterstellt, dass in einem betrachteten Land ausländische Direktinvestitionen durch geringere Umweltstandards befördert werden, da hierdurch ausländischen Unternehmen eine Möglichkeit geboten wird, die Kosten zur Erfüllung höherer regulativer Vorgaben in ihren Heimatländern einzusparen. Im Gegensatz dazu unterstellt die „pollution halo“-Hypothese, dass multinational operierende Konzerne einheitliche Umweltstandards anwenden. Ausländische Direktinvestitionen aus hoch entwickelten Volkswirtschaften in aufstrebenden Weltregionen tragen demnach tendenziell dazu bei, dass fortschrittliche „grüne“ Produktionstechnologien global diffundieren. Weitergehende Literaturverweise zu diesen Wirkungshypothesen können bspw. auch Hoffmann et al. (2005) entnommen werden.

Abbildung 33: Entwicklung des deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Neben der historischen Entwicklung ausländischer Direktinvestitionen in den BRIC-Staaten können sie dadurch auch den individuellen Einfluss der Energienachfrage auf die jeweiligen territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen abbilden. Während Pao und Tsai (2011) nicht in der Lage sind, ihre zentrale Forschungsfrage nach dem Einfluss ausländischer Direktinvestitionen auf die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den BRIC-Länder eindeutig zu beantworten,<sup>79</sup> scheinen in der Vergangenheit sowohl „pollution haven“-Effekte wie auch „pollution halo“- und Skaleneffekte simultan zur Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in aufstrebenden Weltregionen beigetragen zu haben.

Im Rückblick auf die von uns in Kapitel 2 zusammengestellten methodischen Anmerkungen ist es interessant anzumerken, dass die soeben angesprochenen Befunde insgesamt als ein Beleg für die Notwendigkeit struktureller Analysen in der angewandten Politikberatung interpretiert werden können. Denn nur, wenn das in der traditionellen Zeitreihenökonomie übliche Aggregationsniveau verlassen wird (die Analyse also nicht auf eine reduzierte Betrachtung des Zusammenspiels von bspw. Entwicklungen von BIP, Energienachfrage und Emissionen beschränkt bleibt), können strukturelle Wirkungsinterdependenzen in ihrem simultanen Zusammenspiel abgebildet werden.

Zumindest sei darauf hingewiesen, dass bspw. eine weitergehende Analyse der in GINFORS3 berechneten CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke für Deutschland darauf hinweist, dass die in den BRIC-Staaten für Konsum- und Investitionszwecke in Deutschland freigesetzten Emissionen zwischen 1995 und 2015 relativ an Gewicht gewonnen haben. Wie Abbildung 33 verdeutlicht, verkörperten die heimischen Emissionen im Jahr 1995 annähernd zwei Drittel (65%) des gesamten deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Der aus Tabelle 7 bereits bekannte rückläufige Trend der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen seit Beginn der 1980er Jahre ist allerdings zumindest teilweise auf eine Substitution heimisch produzierter Güter durch Importe aus den BRIC-Staaten sowie der Rest der Welt Region zurückzuführen: Gemäß unserer Berechnungen stieg der Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den

<sup>79</sup> Die Ergebnisse der von ihnen durchgeführten Granger-Kausalitätstests weisen nicht darauf hin, dass einzelne der zuvor angesprochenen Wirkungshypothesen verworfen werden müssten.

BRIC-Staaten sowie in der Rest der Welt Region am gesamten deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von ca. 19% im Jahr 1995 auf ungefähr 30% im Jahr 2015 an.

### 3.2 Wieviel Primär-Rohstoffe nutzt Deutschland?

Dieses Kapitel widmet sich einer detaillierten Analyse eigener Abschätzungs-Ergebnisse zu Umfang und Dynamik der Primär-Rohstoffanspruchnahme Deutschlands unter Berücksichtigung globaler Lieferketten. Die Ergebnisdarstellung widmet sich zunächst der inländischen Nachfrage, also der Frage, wie viele Rohstoffe für den inländischen Konsum und die Investitionen in Anspruch genommen werden. In diesem Kontext werden zunächst die Gesamtergebnisse für Deutschland vorgestellt und mit den entsprechenden Ergebnissen für andere Länder verglichen.

In einem weiteren Schritt wird der Frage nach der Rohstoffanspruchnahme für die deutschen Exporte nachgegangen, um anschließend die aus diesen beiden Schritten resultierende gesamte Rohstoffanspruchnahme (RMI) und Gesamtrohstoffproduktivität zu diskutieren. In einem abschließenden Abschnitt werden Ergebnisse für die Importe in Rohmaterialäquivalenten und die resultierende physische Handelsbilanz vorgestellt und diskutiert.

Um einen Vergleich mit thematisch verwandten Forschungsergebnissen sowie der amtlichen Berichterstattung zu ermöglichen werden von uns in jedem Themenfeld zunächst aggregierte Indikatorbefunde vorgestellt. Da eine ausschließliche Betrachtung dieser Gesamtindikatoren allerdings keine konkreten Ansatzpunkte für eine weitergehende Identifikation prioritärer Handlungsfelder der Ressourcenpolitik aufzeigen kann, ergänzt unser Bericht die übliche aggregierte Darstellung auch jeweils um eine zusammenfassende Übersicht eigener Detailergebnisse. Wir berichten dabei stets über die Entwicklung der absoluten Primär-Rohstoffanspruchnahme für ausgewählte Produktgruppen. Auf Basis eigenständiger Abschätzungen der relativen Beiträge einzelner Produktgruppen zu den jeweiligen Gesamtbefunden können somit zentrale Treiber der aggregierten Primär-Rohstoffanspruchnahme für weitergehende inhaltliche Analysen identifiziert werden. Um dabei auch abwägen zu können, ob sich in erster Linie die (monetäre) Nachfrage dynamisch entwickelt hat, oder ob die nachgefragte(n) Produktgruppe(n) im Zeitablauf mehr oder weniger rohstoffintensiv produziert wurden, werden die Detaildarstellungen zur Entwicklung der Primär-Rohstoffintensität als Primär-Rohstoffanspruchnahme je monetärer Einheit dokumentiert.<sup>80</sup>

#### 3.2.1 Wieviel Primär-Rohstoffe wurden für Konsum und Investitionen verwendet? – Abschätzungsergebnisse für RMC und TMC

##### Wie unterscheiden sich Abschätzungsergebnisse für Deutschland?

Abbildung 34 zeigt in der oberen Hälfte einen Vergleich der Werte für den deutschen DMC und RMC gemäß amtlicher Statistik. Es zeigt sich, dass sich beide Indikatoren weder in der Höhe noch in der Struktur deutlich unterscheiden. Wieso die RMC-Werte in der amtlichen Statistik lediglich hypothetische Werte sind (die Auskunft darüber geben, wieviel Rohstoffe für Konsum und Investitionen entnommen worden wären, wenn die importierten Güter in Deutschland produziert worden wären) und keineswegs die tatsächliche globale Rohstoffanspruchnahme für die heimische letzte Verwendung wiedergeben, lässt sich am deutlichsten anhand des Wertes für Metallerze verdeutlichen:

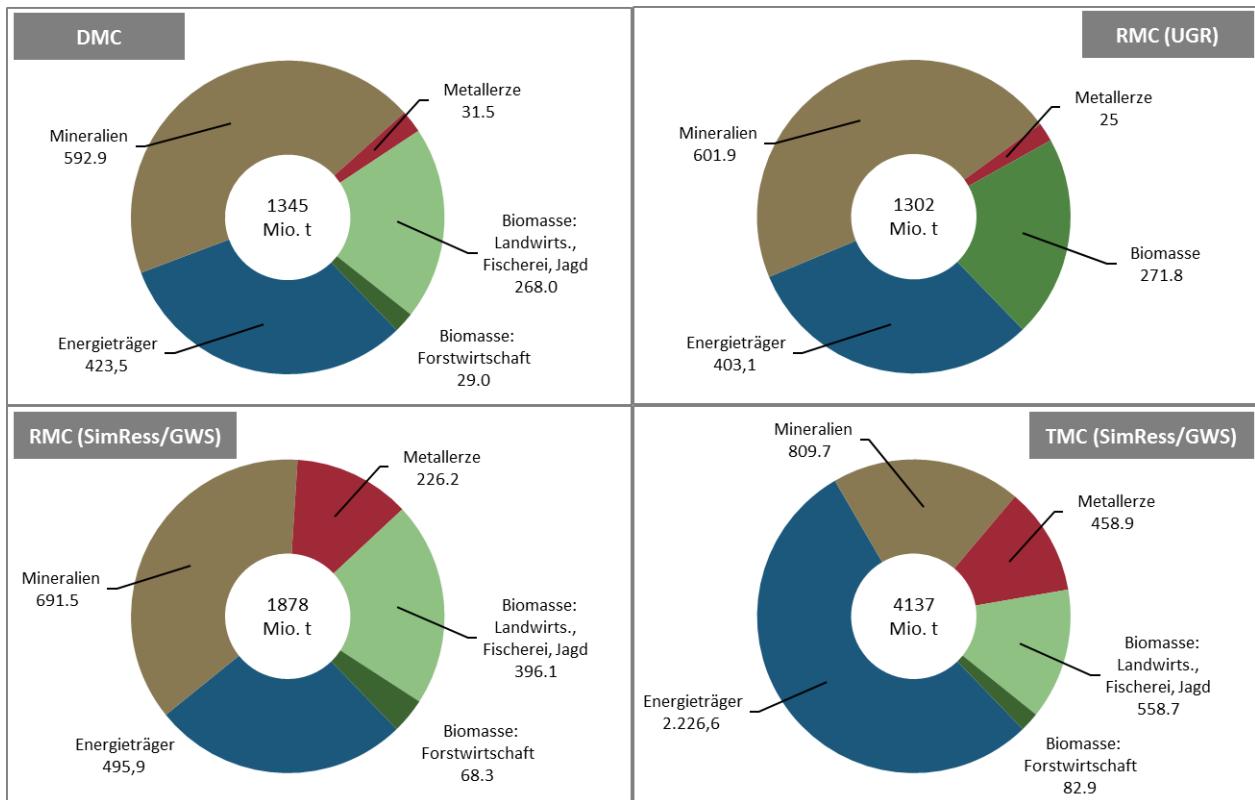
Laut dem Statistischen Bundesamt belief sich der deutsche RMC Metallerze im Jahr 2011 auf 25 Millionen Tonnen, was einem Wert von 0,31 Tonnen pro Einwohner entspricht. Gleichzeitig wissen wir aber, dass im

---

<sup>80</sup> Bei den Analysen der Primär-Rohstoffintensität und der Gesamtrohstoffproduktivität ist darauf zu achten, dass weder Verzerrungen durch unterschiedliche Preisdynamiken noch Verzerrungen durch Wechselkursentwicklungen zum Tragen kommen. Bei den intranationalen Analysen wird vor diesem Hintergrund die Primär-Rohstoffintensität in kg je preisbereinigte monetäre Größe in heimischer Währung (in 2010€) betrachtet. Bei internationalen Vergleichen wird die Primär-Rohstoffintensität in kg je preisbereinigte monetäre Größe in konstanten Wechselkursen (in 2010US-\$) betrachtet.

Jahr 2011 global 7,8 Milliarden Tonnen Metallerze extrahiert wurden. Damit wurden folglich bei einer Weltbevölkerung von 7 Milliarden im globalen Durchschnitt pro Einwohner 1,11 Tonnen Metallerze extrahiert.

Abbildung 34: Abschätzungsergebnisse für Deutschlands DMC, RMC und TMC im Jahr 2011 im Vergleich



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: Umweltbundesamt 2016 & eigene Berechnungen

Dass in Deutschland, einem Land das ein mehr als viermal so hohes BIP pro Kopf wie im globalen Durchschnitt aufweist, gleichzeitig für Konsum und Investitionen pro Kopf lediglich weniger als ein Drittel des globalen Durchschnitts benötigt wurden, ist zumindest unplausibel.

Als Begründung für das niedrige Abschätzungsergebnis des Statistischen Bundesamtes wird häufig darauf verwiesen, dass bei den Metallerzen in Deutschland in erheblichem Maße Sekundärrohstoffe zum Einsatz kommen und diesem Umstand in den Abschätzungen des Statistischen Bundesamtes, nicht aber in den Abschätzungen auf Grundlage von MRIO-Analysen, adäquat Rechnung getragen wird. Dieser Argumentation ist aus Sicht der Autoren in zweierlei Hinsicht zu widersprechen:

- (1) Die vom Statistischen Bundesamt vorgenommene Subtraktion der Sekundärrohstoffe (SER) zur Abschätzung des Rohstoffbedarfs für inländischen Konsum und Investitionen ( $RMC = DEU + IMP_{RME} - EXP_{RME} - SER$ ) verstößt aus Sicht der Autoren gegen die Systematik des indikator-basierten Monitorings der Materialinanspruchnahme auf Basis von Input-Output Tabellen. Kommt es aufgrund eines vermehrten Einsatzes von Sekundärrohstoffen zu einem vermindernden Bedarf an Primärrohstoffen, so manifestiert sich dies bereits in den Input-Output-Tabellen in Form verminderter Input-Koeffizienten der Rohstoff-Gütergruppen. Eine nochmalige Subtraktion der Sekundärrohstoffe stellt eine Doppelzählung und damit eine unzulässige Verzerrung des Indikators dar.
- (2) Dass in einem Land mehr (oder weniger) auf Sekundärrohstoffe zurückgegriffen wird, ist in den MRIO-Datensätzen dadurch berücksichtigt, dass auf der ersten Verarbeitungsstufe des jeweiligen Rohstoffs, wie beispielsweise in der Metallerzeugung, weniger (oder mehr) Primärrohstoffe je Out-

puteinheit eingesetzt werden. Wenn nun in Deutschland Produkte wie beispielsweise Kraftfahrzeuge oder E-Technik-Produkte von Konsumenten oder Investoren nachgefragt werden, so ist dieser Nachfrage auch der Primärrohstoffaufwand entlang der gesamten globalen Lieferketten dieser Produkte unter Berücksichtigung der spezifischen Rohstoff-Intensitäten im Herkunftsland der einzelnen Komponenten zuzurechnen. Genau dies, kann aber nur auf Grundlage von globalen EEMRIO-Datensätzen erfolgen.

Im unteren Teil der Abbildung werden die Ergebnisse der amtlichen Statistik mit den eigenen Abschätzungsergebnissen kontrastiert. Es zeigt sich, dass sich für das Jahr 2011 auf Grundlage der in SimRess angewandten Abschätzungsmethode ein um mehr als 40% höherer RMC Deutschlands ergibt. Die deutlichsten Unterschiede ergeben sich im Hinblick auf die Metallerze (224 Millionen Tonnen vs. 25 Millionen Tonnen). Demnach wurden nach unseren Abschätzungsergebnissen für Konsum und Investitionen in Deutschland pro Kopf 2,7 Tonnen Metallerze extrahiert und somit mehr als im globalen Durchschnitt. Auch für Biomasse zeigt sich eine erhebliche Diskrepanz (464 Millionen Tonnen vs. 272 Millionen Tonnen).<sup>81</sup>

Als weiteren Aspekt zeigt Abbildung 34 eigene Abschätzungsergebnisse des deutschen TMC, also den direkten und indirekten Rohstoffflüssen für den deutschen Endverbrauch inklusive ungenutzter Entnahmen. Ein Vergleich dieser Abschätzungsergebnisse mit denjenigen für den RMC zeigt, dass sich einerseits das absolute Volumen bei zusätzlicher Berücksichtigung der mit Konsum und Investitionen einhergehenden ungenutzten Entnahmen deutlich erhöht, nämlich von 1,88 Mrd. Tonnen auf 4,15 Mrd. Tonnen. Gleichzeitig zeigt sich aber auch eine deutliche Verschiebung der Beiträge der verschiedenen Materialkategorien. Während beim RMC nur 26% auf die fossilen Energieträger entfielen, machte diese Materialkategorie beim TMC knapp 54% aus.

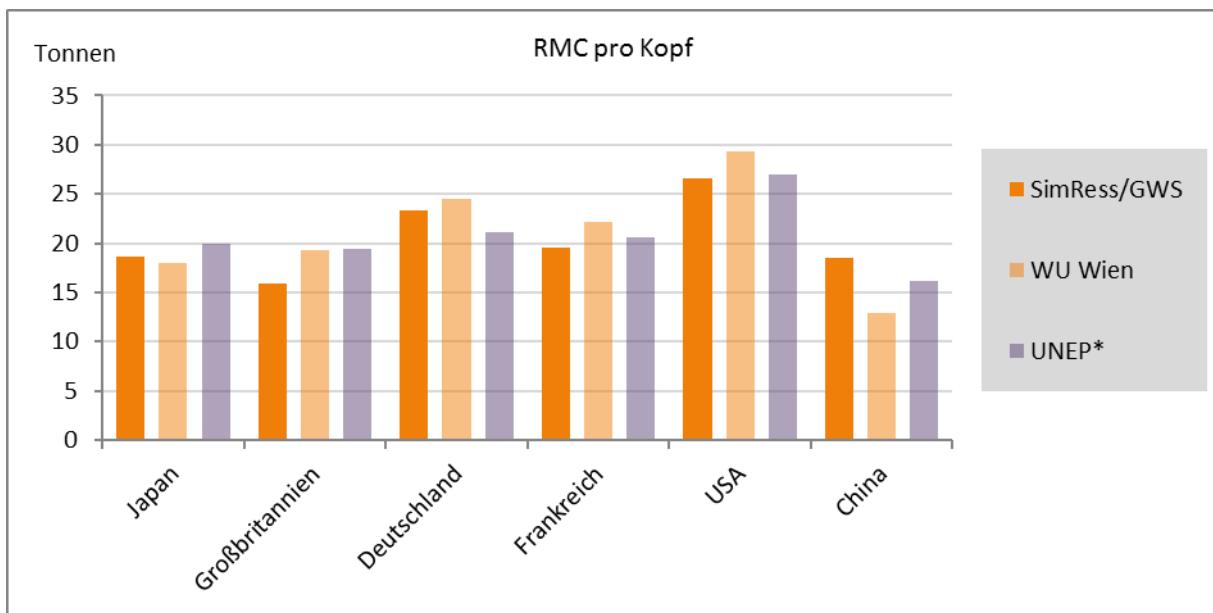
Auf die methodischen Hintergründe für die Divergenzen zwischen RMC-Abschätzungen in der amtlichen Statistik und den eigenen Ergebnissen, wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt eingegangen. Neben diesen bereits angeführten Aspekten des Umgangs mit Sekundärrohstoffen und der Anwendung bzw. Nicht-Anwendung der „domestic technology assumption“ sei an dieser Stelle aber auch auf weitergehenden Forschungsbedarf im Hinblick auf einen dritten, bisher nicht angeführten Aspekt verwiesen: die Differenziertheit (Gütergruppengliederung, räumliche Gliederung) des genutzten Datensatzes. So zeichnet sich der von uns zugrunde gelegte Datensatz und Abschätzungsalgorithmus im Vergleich zu demjenigen im Forschungsvorhaben DeteRess durch eine höhere räumliche Differenzierung aber eine geringere Gütergruppendifferenzierung aus.

Aus Sicht der Autoren stellen die identifizierten Diskrepanzen im Niveau des deutschen Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC) zwischen amtlicher Statistik und den eigenen MRIO-basierten Abschätzungen eines der zentralen Ergebnisse von SimRess dar. Damit stellt sich aber auch die Frage nach der Robustheit dieser Abschätzungsergebnisse. Bereits in Kapitel 2.3.3 wurde in diesem Zusammenhang aus rein deutscher Perspektive ein Vergleich unserer RMC-Abschätzungsergebnisse mit denjenigen für das UNEP vorgenommen mit dem Ergebnis, dass die SimRess/GWS-Ergebnisse eine deutlich höhere Übereinstimmung mit UNEP als mit denjenigen in der amtlichen Statistik aufweisen.

---

<sup>81</sup> Bereits in Kapitel 2.3.3 wurde gezeigt, dass die Abschätzungen für UNEP für Deutschland einen RMC Metallerze von 125 Millionen Tonnen bzw. 1,5 Tonnen pro Kopf im Jahr 2010 ausweisen und damit auf der einen Seite einen deutlich niedrigeren Wert als in unseren Abschätzungen, auf der anderen Seite aber, wie in unseren Abschätzungen, einen pro Kopf Wert der größer als der globale Durchschnitt ist. Für Biomasse kommt UNEP mit einem Wert von mehr als 500 Millionen Tonnen sogar zu einer noch größeren Diskrepanz zu den Abschätzungen des Statistischen Bundesamtes.

Abbildung 35: Vergleich von Abschätzungsergebnissen für den RMC pro Kopf im Jahr 2011 für ausgewählte Länder



\* UNEP-Wert für Großbritannien, Deutschland, Frankreich und die USA für das Jahr 2010

Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: eigene Berechnungen, Umweltbundesamt (2016) S. 39 und uneplive.org

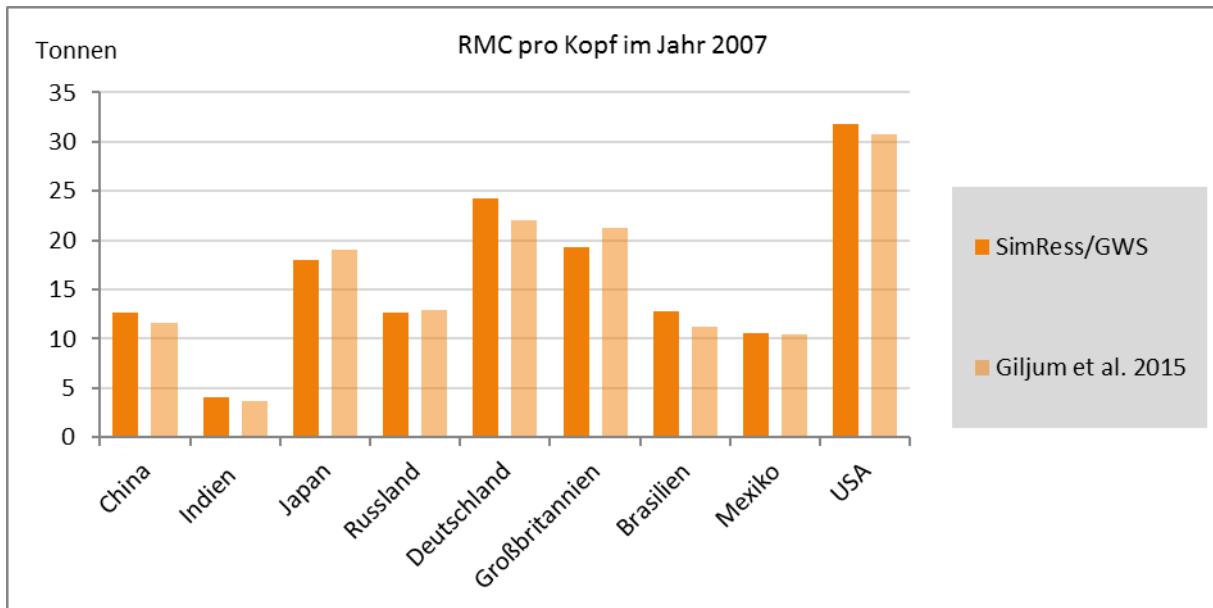
Doch gilt dies auch für andere Länder und unter Einbeziehung weiterer verfügbarer RMC-Abschätzungsergebnisse? Unser erster diesbezüglicher Vergleich gilt hierbei den Abschätzungsergebnissen der WU Wien, die im Rahmen von DeuRess auf Grundlage von Exiobase 2.0 erzielt wurden. Diese Abschätzungen berichten für das Jahr 2011 für Deutschland einen Wert von 1,74 US-Dollar (BIP in Kaufkraftparitäten) pro Kilogramm Rohstoffkonsum (RMC). Dies entspricht einem RMC in Höhe 1,97 Mrd. Tonnen bzw. 24,5 Tonnen pro Kopf. Damit wird von der WU Wien für Deutschlands RMC ein um rund 5% höherer Wert abgeschätzt als in unseren Abschätzungen (23,4 Tonnen pro Kopf). Die Diskrepanz zum Abschätzungsergebnis des Statistischen Bundesamtes (16,2 Tonnen pro Kopf) ist folglich noch größer.

In Abbildung 35 werden zudem entsprechende Vergleiche der Abschätzungsergebnisse für fünf weitere Länder (Japan, Großbritannien, Deutschland, Frankreich, USA und China) dargestellt. Für Japan zeigt sich ebenfalls eine Diskrepanz der Abschätzungsergebnisse von weniger als 5%. Sowohl für Frankreich als auch für die USA wird seitens der WU ein gut 10% höherer Wert abgeschätzt. Für Großbritannien ergibt sich eine Diskrepanz von mehr als 20%. Dies gilt auch für China jedoch in die andere Richtung. Hier wird seitens der WU Wien ein um fast 30% niedrigerer Wert als in unseren Abschätzungen ausgewiesen.

Als zweiter Vergleichsmaßstab dienen in der Abbildung die auf uneplive.org verfügbaren Abschätzungsergebnisse. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass für Großbritannien, Deutschland, Frankreich und die USA in diesem Datenportal bis dato lediglich Abschätzungen für die Jahre bis 2010 verfügbar sind und der dargestellte Vergleich für diese Länder daher leicht verzerrt ist. Hier zeigen sich insbesondere für Frankreich und die USA nahezu identische Abschätzungsergebnisse wie in SimRess/GWS.

Für Japan wird seitens UNEP ein gut 7% höherer RMC pro Kopf und für Deutschland ein um knapp 10% niedriger RMC pro Kopf abgeschätzt. Für Großbritannien kommt UNEP wie auch die WU Wien zu gut 20% höheren Werten als auf Grundlage der in SimRess angewandten Daten und Methoden. Für China schätzt UNEP einen Wert von 16,1 Tonnen ab. Dieser Wert liegt, wie derjenige der WU Wien (12,9 Tonnen), niedriger als in unseren Abschätzungen (18,5 Tonnen).

Abbildung 36: Vergleich von Abschätzungsergebnissen für den RMC pro Kopf im Jahr 2007 für ausgewählte Länder



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: eigene Berechnungen und Giljum et al. (2015) S. 796

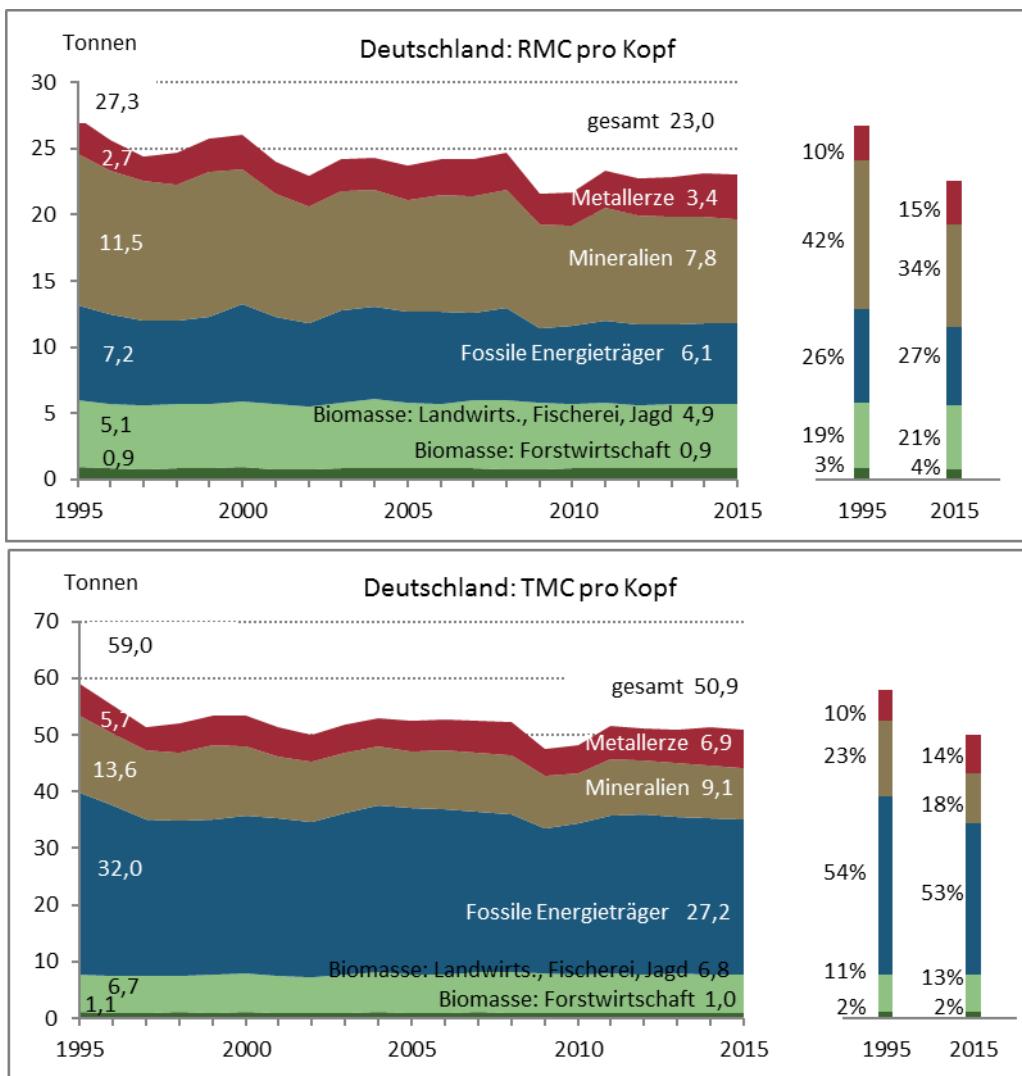
Um den Exkurs zum Ergebnisvergleich eigener Abschätzungsergebnissen abzurunden zeigt Abbildung 36 einen weiteren Ergebnisvergleich für RMC pro Kopf Abschätzungen, diesmal für das Jahr 2007. Als Vergleichsmaßstab für unsere Abschätzungen dient in diesem Vergleich eine Veröffentlichung von Giljum et al. aus dem Jahr 2015, in der der Material-Fußabdruck (RMC) von Kontinenten und ausgewählten Ländern auf Grundlage von GTAP-Daten abgeschätzt wurde. In diesem Vergleich ergibt sich die größte relative Diskrepanz zwischen den beiden Abschätzungen für Brasilien (12,8 vs. 11,2 Tonnen), gefolgt von Großbritannien (19,3 vs. 21,2 Tonnen).

Als Zwischenfazit kann damit festgehalten werden, die sich die in SimRess erarbeiteten Abschätzungsergebnisse für den Material-Fußabdruck von Deutschland und anderen Ländern im Gegensatz zu den Abschätzungen des Statistischen Bundesamtes gut in das Bild anderer bis dato verfügbarer Abschätzungen einfügen.

#### Wie dynamisch hat sich der Rohstoffkonsum Deutschlands entwickelt?

Neben dem Niveau ist für ein Monitoring von Fortschritten beim sparsamen Umgang mit den natürlichen Ressourcen insbesondere auch die Dynamik von Interesse. Abbildung 37 zeigt diesbezüglich die Abschätzungsergebnisse für den deutschen RMC und TMC pro Kopf in den Jahren 1995 bis 2015. Hierbei wird jeweils auch gezeigt, aus welchen Materialkategorien (Biomasse, fossile Energieträger, Mineralien, Metallerze) sich die jeweiligen Gesamtwerte zusammensetzen. Es zeigt sich, dass der RMC pro Kopf in dem dokumentierten Zeitraum von 20 Jahren um 4,3 Tonnen bzw. 15,6% reduziert hat.

Abbildung 37: Entwicklung des Rohstoffkonsums (RMC und TMC) pro Kopf in Deutschland, 1995 - 2015



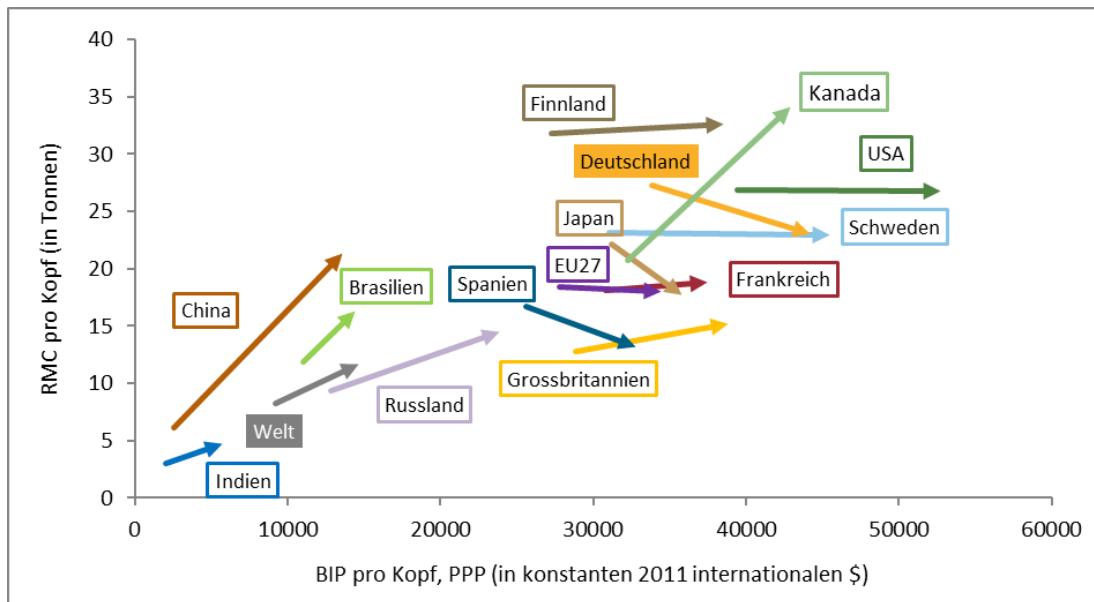
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Deutlich zurückgegangen ist insbesondere die globale Entnahme von Bau- und Industriemineralien für Konsum und Investitionen in Deutschland (von 11,5 Tonnen pro Kopf in 1995 auf 7,8 Tonnen pro Kopf in 2015). Demgegenüber hat sich die globale Entnahme von Metallerzen für Konsum und Investitionen in Deutschland deutlich erhöht (von 2,7 Tonnen pro Kopf in 1995 auf 3,4 Tonnen pro Kopf in 2015). Damit hat sich die Materialzusammensetzung des RMC im Zeitraum 1995 bis 2015 deutlich verändert. Entfielen in 1995 lediglich 10% des deutschen RMC auf Metallerze, so hat sich dieser Anteil bis 2015 auf 15% erhöht. Beim TMC pro Kopf kam es nach unseren Abschätzungsergebnissen im Zeitraum von 1995 bis 2015 ebenfalls zu einem Rückgang (von 59 Tonnen pro Kopf auf 51 Tonnen pro Kopf).

In der Abbildung nicht dargestellt ist ein Vergleich der eigenen Abschätzungsergebnisse zur historischen Dynamik des RMC pro Kopf mit entsprechenden Ergebnissen der amtlichen Statistik. Diesbezüglich zeigt sich jedoch, dass im Gegensatz zum Niveau, beide Methoden/Datengrundlagen zum gleichen Ergebnis kommen: Der RMC pro Kopf ist im Zeitraum 2000 bis 2011 um 2,7 Tonnen zurückgegangen. Aufgrund der Niveau-Unterschiede in den Abschätzungen bedeutet dies jedoch, dass es lt. Statistischem Bundesamt zu einem Rückgang um 14% kam, während unsere Abschätzungen den relativen Rückgang auf 10% beziffern.

## Wie stellt sich der Rohstoffkonsum Deutschlands im internationalen Vergleich dar?

Abbildung 38: Internationaler Vergleich des Rohstoffbedarfs für inländischen Konsum und Investitionen (RMC) pro Kopf, 1995 - 2015



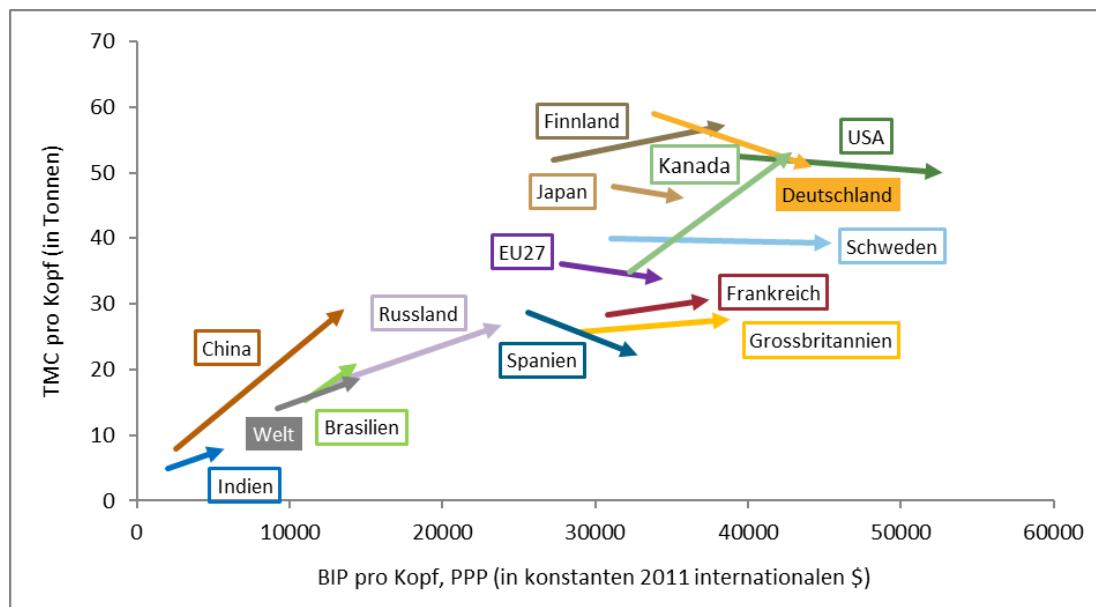
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Bevor wir uns im folgenden Unterkapitel weitergehenden Detailanalysen des deutschen RMC widmen, stellt sich die Frage wie sich Niveau und Dynamik des deutschen Rohstoffkonsums für Konsum und Investitionen (RMC) im internationalen Vergleich darstellen.

In einem nächsten Schritt widmen wir uns einem internationalen Vergleich der Dynamik des Rohstoffbedarfs pro Kopf für Konsum und Investitionen. Abbildung 38 zeigt auf der Y-Achse für Deutschland, die EU, 12 ausgewählte Länder und die Welt die Veränderung des RMC pro Kopf von 1995 (Beginn des Pfeils) bis 2015 (Ende des Pfeils). Um diese Abschätzungsergebnisse besser vergleichbar zu machen, finden sich auf der X-Achse die jeweiligen Werte für das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf (in PPP, konstanten 2011 internationalen \$) abgetragen.

Es zeigt sich, dass Deutschland nicht zuletzt aufgrund der hohen pro-Kopf-Wirtschaftsleistung, vergleichsweise viel Rohstoffe für Konsum und Investitionen nutzt. Von den ausgewählten Ländern weisen lediglich die USA, Kanada und Finnland höhere Werte auf. Gleichzeitig ist Deutschland jedoch auch von ausgewählten Ländern eines der Länder mit dem höchsten prozentualen Rückgang des RMC pro Kopf. Noch deutlicher fiel dieser Rückgang beispielsweise in Spanien aus, wo es jedoch bekanntermaßen zu einem deutlichen Rückgang der Bautätigkeit gekommen ist. Auf der anderen Seite zeigt die Abbildung aber auch wie teils dramatisch der Rohstoffkonsum für Konsum und Investitionen in einigen Transformationsländern angestiegen ist. In China kam es innerhalb von nur 20 Jahren zu einem Anstieg von 6,1 auf 21,3 Tonnen pro Kopf. Damit liegt China in 2015 beim Rohstoffkonsum pro Kopf höher als der EU-Durchschnitt (18,0 Tonnen pro Kopf). Und dies obwohl das BIP pro Kopf (in PPP) in China in 2015 lediglich knapp 40% des Wertes für die EU27 ausmachte.

Abbildung 39: Internationaler Vergleich des gesamten Rohstoffkonsums (TMC) pro Kopf, 1995 - 2015



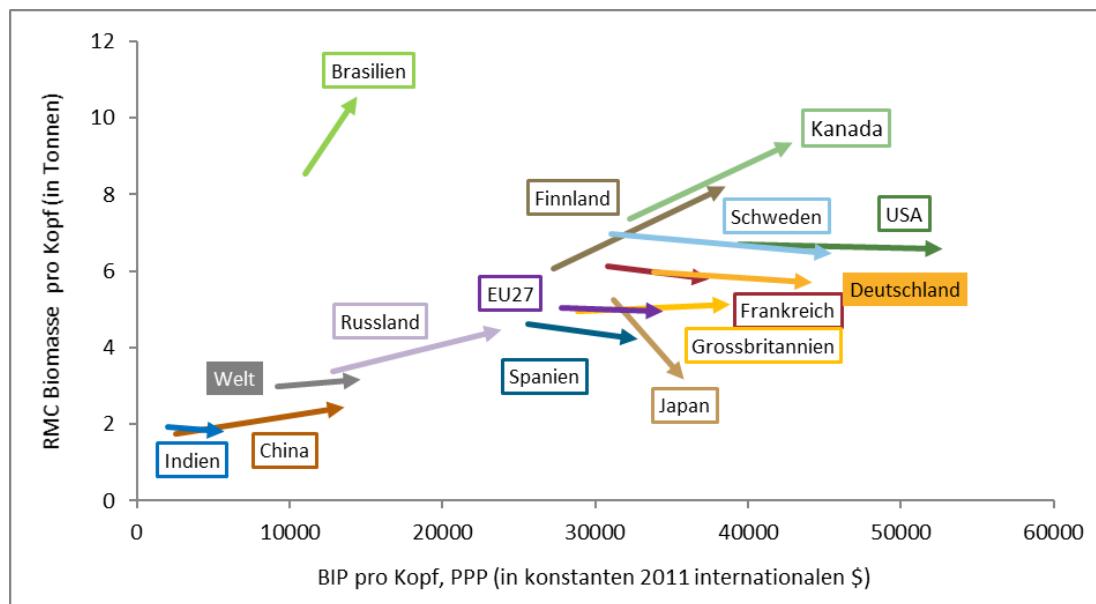
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Dieselbe Analyse wie für den RMC pro Kopf findet sich in Abbildung 39 für den gesamten Rohstoffkonsum (TMC) pro Kopf, also den Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen unter Berücksichtigung der ungenutzten Entnahmen. Es zeigt sich, dass auch hier Deutschland mit seinem Niveau von rund 50 Tonnen pro Kopf sowohl höher als der EU-Durchschnitt als auch höher als eine Vielzahl der ausgewählten Industrieländer (Spanien, Großbritannien, Frankreich, Japan, Schweden) rangiert.

Einen interessanten Unterschied zu den Abschätzungsergebnissen für die Dynamik des RMC pro Kopf zeigen die TMC pro Kopf-Werte für China: Auch der TMC pro Kopf Chinas ist exorbitant gestiegen (von 7,8 Tonnen in 1995 auf 29,2 Tonnen in 2015). Das pro Kopf Niveau lag damit jedoch in 2015 immer noch deutlich unter demjenigen in der EU27 (33,8 Tonnen). Ein entscheidender Hintergrund für diese Unterschiede zwischen einer RMC- und einer TMC-Betrachtung ist, dass es in China in der jüngeren Vergangenheit in Folge der Urbanisierung und dem damit einhergehenden Entstehen von neuen Megacities in besonderem Maße zu einem Anstieg des Rohstoffbedarfs von Mineralien für Bauinvestitionen kam. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Materialkategorie, die mit verhältnismäßig wenig ungenutzten Entnahmen einhergeht.

In den folgenden vier Abbildungen kehren wir zurück zum RMC-Konzept und fragen nach Niveau und Dynamik des deutschen Rohstoffbedarfs für inländischen Konsum und Investitionen im internationalen Vergleich für einzelne Materialarten. Die Abschätzungsergebnisse für den Biomassebedarf (siehe Abbildung 40) zeigt zunächst, dass die Niveau-Unterschiede zwischen Entwicklungs-, Transformations- und Industrieländern bei dieser Materialart deutlich niedriger als beim Gesamt-RMC ausfallen. Der höchste Biomasse-Rohstoffbedarf pro Kopf in den ausgewählten Ländern war demnach sogar nicht in einem hoch industrialisierten Land, sondern mit Brasilien in einem Transformationsland zu beobachten. Deutschland rangiert mit seinem Rohstoffbedarf von rund 5,7 Tonnen pro Kopf im Mittelfeld der Industrieländer. Im Vergleich zum globalen Durchschnitt wurden in Deutschland damit etwa 2,5 Tonnen mehr Biomasse für inländischen Konsum und Investitionen verbraucht als im globalen Durchschnitt. Der deutlichste Fortschritt in Richtung weniger Biomasseanspruchnahme wurde gemäß unseren Analyseergebnissen in Japan erzielt.

Abbildung 40: Internationaler Vergleich des Biomassebedarfs für inländischen Konsum und Investitionen (RMC Biomasse) pro Kopf, 1995 - 2015



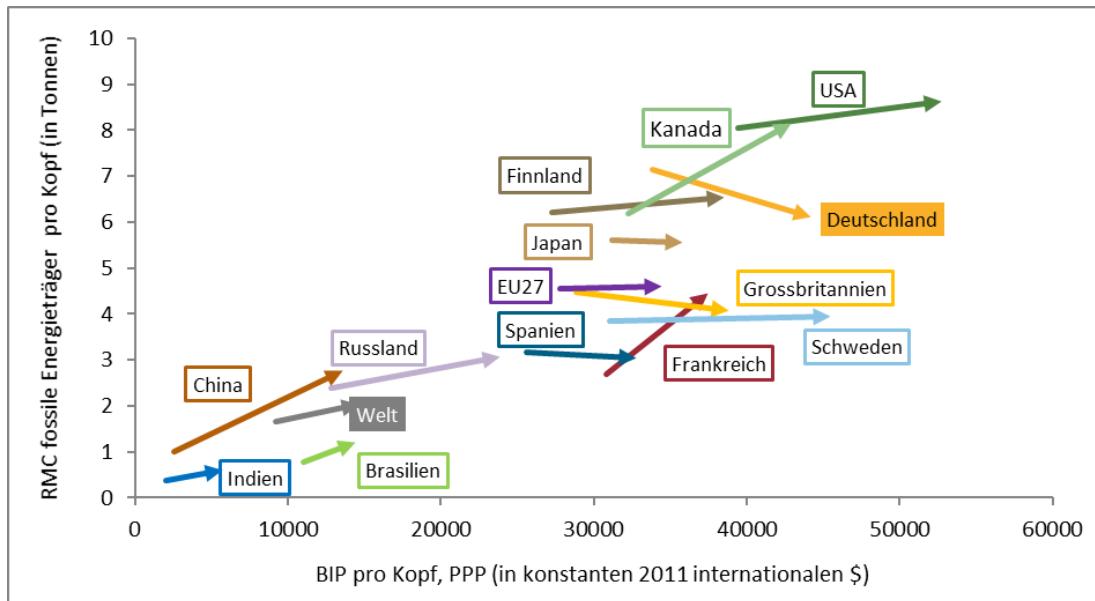
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Da eine international vergleichende Studie der jeweiligen Ursachen der beobachteten Entwicklungstrends nicht Gegenstand des SimRess-Projekts war, können wir zur näheren Interpretation der hier angesprochenen Beobachtungen nur auf thematisch verwandte weitere Studien verweisen. Wu et al. (2017) verwenden ebenfalls die WIOD-Datenbank, um Fußabdrücke der Rohstoffanspruchnahme für die BRIC-Staaten zu berechnen. In der pro Kopf-Betrachtung stellen sie dabei fest, dass die brasilianischen Futter- und Nahrungsmittel-Fußabdrücke bereits im Jahr 2008 aufgrund des bedeutenden Anteils der Biomasse in der heimischen Energieerzeugung außergewöhnlich hoch waren. Als ein expliziter Treiber dieser Entwicklungen wird dabei von ihnen (u.a.) die weitreichende Verwendung Ethanol-basierter Treibstoffe im brasilianischen Verkehrswesen genannt. Zudem wird gemäß deren Berechnungen der brasilianische Fußabdruck für Biomasse beinahe vollständig (97%) durch heimische Extraktionen gedeckt. Gemäß dieser Darstellung scheint somit in jüngerer Vergangenheit in Brasilien eine Intensivierung der Nutzung heimischer Biomassepotenziale zur energetischen Verwendung deutlich zum Anstieg des Primärrohstoffbedarfs Biomasse beigetragen zu haben.

Unter Verwendung der GTAP Datenbank dokumentieren Giljum et al. (2014), dass der Anteil der Biomasse am gesamten brasilianischen RMC von 65% im Jahr 1997 auf ca. 70% im Jahr 2007 anstieg. Ohne weitergehende Detailerläuterungen wird dabei von den Autoren auf die in diesem Zeitraum insgesamt gestiegene Bedeutung Biomasse-produzierender Wirtschaftszweige für die brasilianische Volkswirtschaft verwiesen. Gleichzeitig weisen Giljum et al. (2014) darauf hin, dass die Entwicklung der Nachfrage nach Biomasse als eine wesentliche Triebfeder für den von ihnen in Japan auch insgesamt beobachteten Rückgang des RMC um ca. 11% zwischen 1997 und 2007 identifiziert werden kann. Eine nähere Erörterung der grundlegenden Hintergründe der in Japan beobachteten Entwicklungen verbleibt allerdings auch bei ihnen für zukünftige Forschungsaktivitäten.<sup>82</sup>

<sup>82</sup> Ergänzend sei angemerkt werden, dass die japanischen Befunde eventuell auch als ein Beispiel der Notwendigkeit weitergehender internationaler Forschungskooperationen im Bereich der Harmonisierung unterschiedlicher Multi Regionaler Datenbanken angesehen werden kann. So berichten bspw. Wiedemann et al. (2015) auf Basis der EORA-Datenbank einen relativ konstanten Biomasse-Fußabdruck für Japan bis zum Jahr 2008. Eine nähere Klärung der Ursachen dieser qualitativen Unterschiede war im Rahmen des SimRess-Projekts allerdings nicht möglich.

Abbildung 41: Internationaler Vergleich des Bedarfs an fossilen Energieträgern für inländischen Konsum und Investitionen (RMC fossile Energieträger) pro Kopf, 1995 - 2015

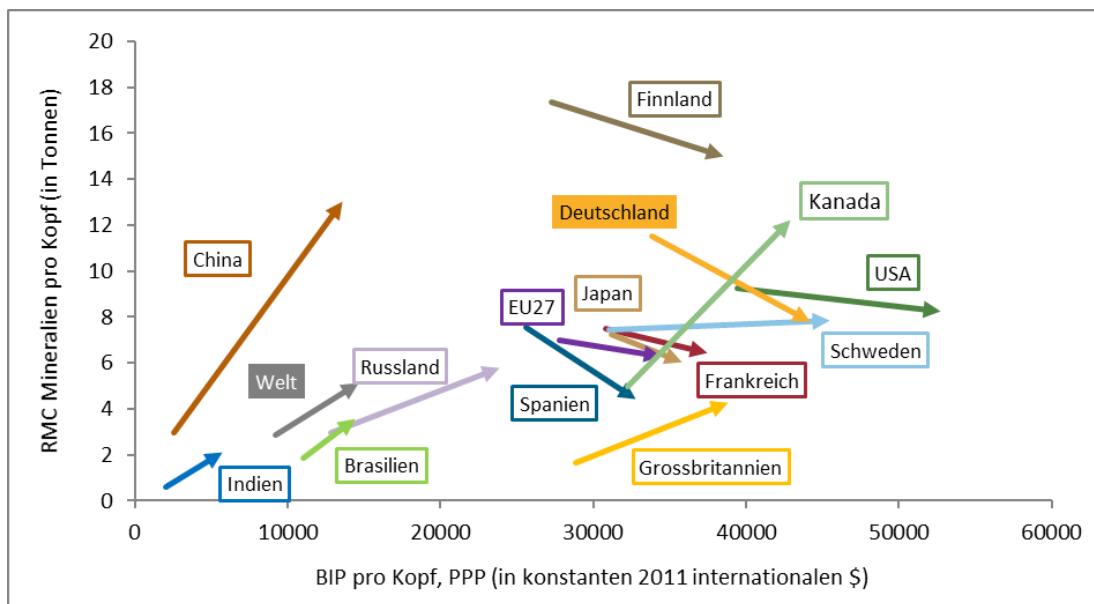


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Im Hinblick auf den Bedarf an fossilen Energieträgern für inländischen Konsum und Investitionen (siehe Abbildung 41) rangiert Deutschland mit 6,1 Tonnen pro Kopf (Wert für 2015) im oberen Mittelfeld der analysierten Länder und Regionen. Gleichzeitig ist Deutschland bei den fossilen Energieträgern jedoch eines der wenigen Länder in dem überhaupt ein Rückgang des pro Kopf Bedarfs im Zeitraum seit 1995 zu beobachten war. Den später erfolgenden Detailauswertungen (siehe hierzu Tabelle 10) kann entnommen werden, dass dieser Rückgang in erster Linie auf Reduktionen der durch die Nachfrage nach Produkten der Gütergruppe „Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas“ (also der direkten Nachfrage nach fossilen Energieträgern), sowie die durch energie-intensive Güter und Dienstleistungen (insb. „Erzeugnisse der Energie- und Wasserversorgung“) ausgelöste Inanspruchnahme fossiler Energieträger zurückzuführen ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass den steigenden Anteilen erneuerbarer Energien in der deutschen Stromerzeugung dabei eine zentrale Bedeutung zuzusprechen ist.

Wie bereits herausgearbeitet wurde, stellen die Bau- und Industriemineralien trotz der abnehmenden Tendenz nach wie vor diejenige Rohstoffart innerhalb des RMC mit dem höchsten Anteil dar. Dies gilt nicht nur für Deutschland (34% des gesamten RMC in 2015), sondern auch global (44%) und besonders ausgeprägt in China (61%). Abbildung 42 zeigt, dass Deutschland im Jahr 1995 lediglich durch eines der ausgewählten Länder und Regionen (Finnland) im Hinblick auf den pro Kopf Bedarf an Bau- Industriemineralien für inländischen Konsum und Investitionen übertroffen wurde. Da es jedoch in Deutschland (und Spanien) im Zeitraum bis 2015 zu einem deutlichen Rückgang des pro Kopf Bedarfs an Mineralien kam und es gleichzeitig in vielen anderen Ländern und Regionen zu einem teils deutlichen Anstieg kam, hat sich die Position Deutschlands im internationalen Vergleich wesentlich verbessert. Somit wurden in 2015 in Deutschland für Konsum und Investitionen nur noch rund 1 ½ Mal so viele Mineralien in Anspruch genommen wie im globalen Durchschnitt. Im Jahr 1995 war es noch 4 Mal so viel.

Abbildung 42: Internationaler Vergleich des Bedarfs an Bau- und Industriemineralien für inländischen Konsum und Investitionen (RMC Mineralien) pro Kopf, 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

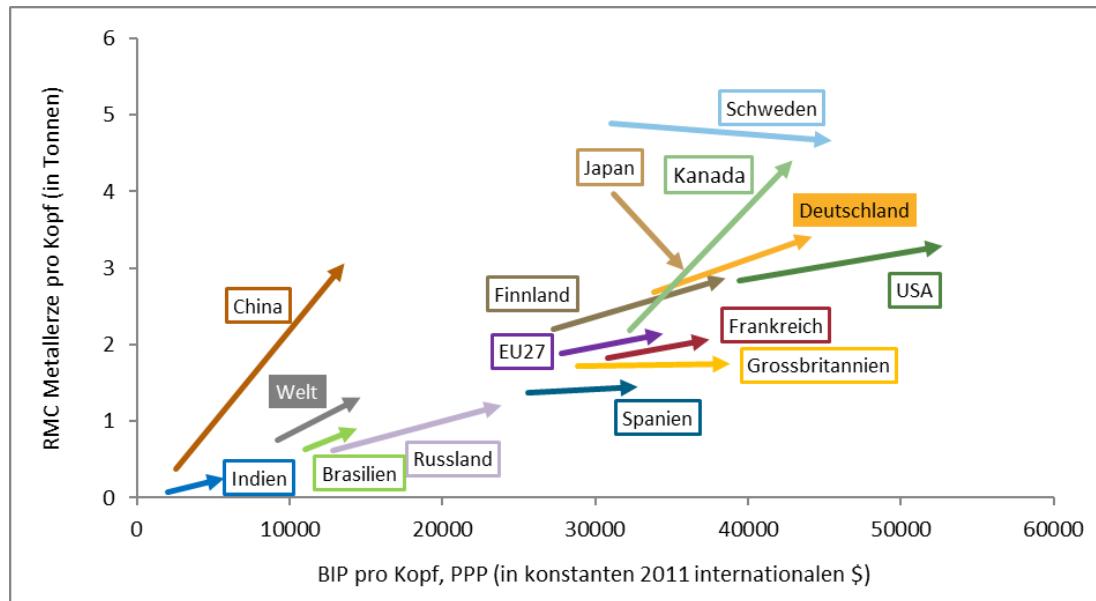
Ein deutliches anderes Bild zeigt sich im Hinblick auf die Metallerze (siehe Abbildung 43). Im Hinblick auf den pro Kopf Bedarf an Metallerzen hat sich Deutschland nicht besser als andere Industrieländer entwickelt. Wie schon bei den Mineralien erweist sich auch bei den Metallerzen China als Land mit der höchsten Dynamik des pro Kopf Bedarfs für Konsum und Investitionen. Japan erweist sich hingegen als positiver Ausreißer mit einem Rückgang von 4,0 auf 3,0 Tonnen pro Kopf. Während zukünftige Forschungsaktivitäten auch der Robustheit dieses Befundes unter Vergleich der Berechnungsergebnisse bei Anwendung unterschiedlicher Datenbanken nachgehen sollten,<sup>83</sup> kann festgehalten werden, dass Japan international als ein wichtiger Initiator politischer Maßnahmen zur Förderung der Ressourceneffizienz angesehen wird.

Während es naheliegend erscheint zu vermuten, dass die langanhaltende wirtschaftliche Stagnation der japanischen Volkswirtschaft hierbei wesentliche strukturelle Entwicklungen befördert hat, scheint das Zusammenspiel dieser Faktoren bislang noch wenig erforscht zu sein.<sup>84</sup> Bevor wir uns dem nächsten Thema widmen, der Bedeutsamkeit der verschiedenen Verwendungskategorien und Produktgruppen für den deutschen Rohstoffkonsum, wollen wir den internationalen Vergleich des Rohstoffbedarfs für inländischen Konsum und Investitionen mit einer – sicher nicht vollständigen – Interpretation der gezeigten Ergebnisse abschließen:

<sup>83</sup> Auch beim Metall-Fußabdruck scheinen Weidmann et al. (2015) auf Basis der EORA-Datenbank für Japan relativ konstante pro Kopf-Werte zu kalkulieren.

<sup>84</sup> Vgl. hierzu bspw. auch Schandl und West (2012; 361): „These ambitious policies are likely to have contributed to Japan's success in reducing natural resource use, but it is important to note that Japan has also endured a long period of economic stagnation, which in itself must have helped it achieve these ambitious environmental goals.“

Abbildung 43: Internationaler Vergleich des Bedarfs an Metallerzen für inländischen Konsum und Investitionen (RMC Metallerze) pro Kopf, 1995 - 2015



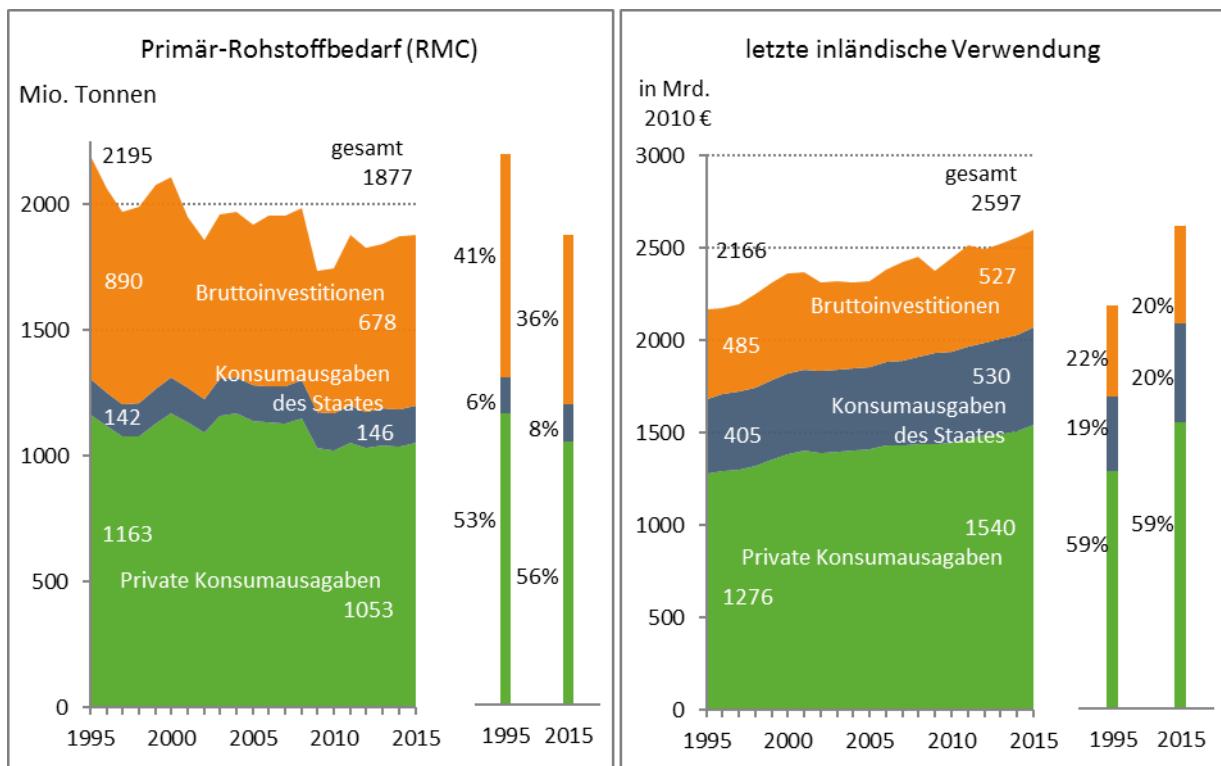
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- Erst durch den Vergleich mit anderen Ländern und Regionen lassen sich Niveau und Dynamik des deutschen Rohstoffbedarfs sinnvoll interpretieren.
- Deutschland ist zwar eines der wenigen Länder weltweit für die in den letzten 20 Jahren ein Rückgang des pro Kopf Rohstoffkonsums (RMC) zu beobachten war, weist aber nach wie vor einen auch im Vergleich mit vielen anderen Industrieländern vergleichsweise hohes Niveau auf.
- Wenn überhaupt ein Land, dann kann allenfalls Japan als Vorbild für andere Länder im Hinblick auf eine umfassende, auch den Bedarf an Metallerzen, reduzierende Nation identifiziert werden. Dieser Befund sollte allerdings in Zukunft weiter hinsichtlich seiner methodischen Robustheit wie auch seiner inhaltlichen Hintergründe näher evaluiert werden.
- Auch im Hinblick auf eine sich abzeichnende Entkopplung des materiellen Wohlstands von Primärrohstoffbedarf an Metallerzen sollten die Befunde für Japan zukünftig intensiv evaluiert werden. Denn weder in Deutschland noch anderswo auf der Welt konnten ansonsten in den letzten 20 Jahren Fortschritte erzielt werden. Hierin spiegeln sich u.a. Tendenzen wie immer kürzere Produktlebenszyklen für viele Technikprodukte, die fortschreitende Technisierung und Digitalisierung weiter Lebensbereiche (mit einem exorbitanten Anstieg der Nachfrage nach der metallintensiven Gütergruppe „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]“) und die fortschreitende SUVisierung der PKW-Flotten wieder (welche grundsätzlich auch in Japan wirken sollten).

### Welche Verwendungskategorien und Produktgruppen sind wie bedeutsam für Deutschlands Rohstoffkonsum?

Im Hinblick auf den deutschen Primär-Rohstoffbedarf für inländischen Konsum und Investitionen stellt sich in einem nächsten Schritt die Frage, welche Verwendungskategorien (privater und öffentlicher Konsum, Investitionen) in welchem Maße zum RMC beigetragen haben. Abbildung 44 zeigt diesbezüglich, dass im Jahr 1995 die Bruttoinvestitionen mit 890 Millionen Tonnen bzw. 41% am deutschen RMC beteiligt waren. Bis 2015 hat sich dieser Beitrag auf 678 Millionen Tonnen bzw. 36% reduziert.

Abbildung 44: Deutschlands letzte inländische Verwendung, physisch (Primär-Rohstoffbedarf) und monetär (in Mrd. 2010 €), 1995 - 2015



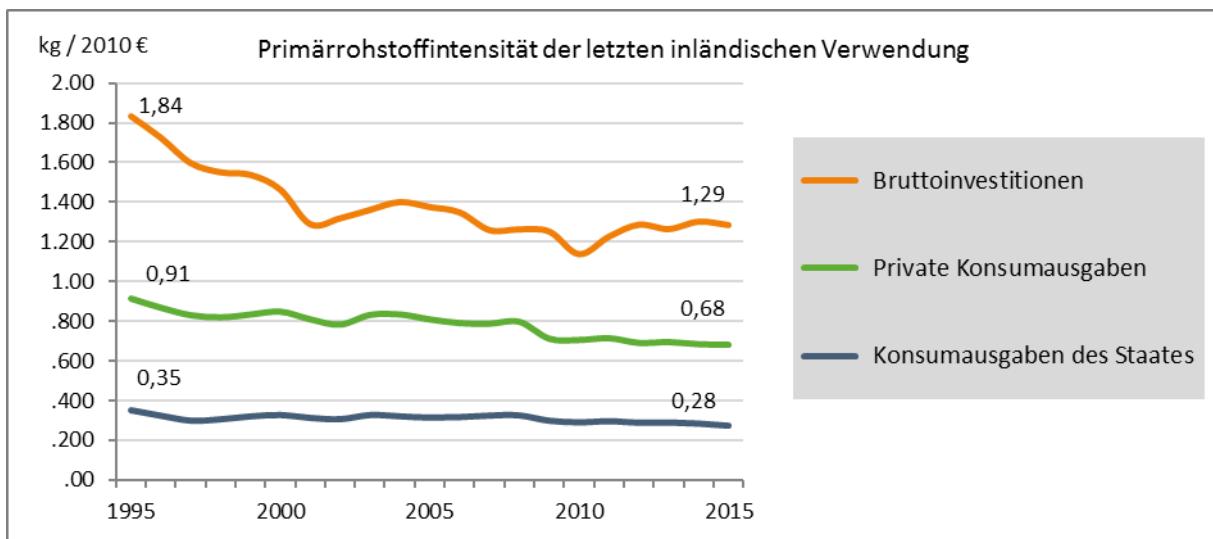
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Der deutsche Primär-Rohstoffbedarf für privaten Konsum war ebenfalls rückläufig (von 1163 Millionen Tonnen in 1995 auf 1053 Millionen Tonnen in 2015), der prozentuale Rückgang war jedoch mit -9% deutlich schwächer als bei den Bruttoinvestitionen (-24%). Der Primär-Rohstoffbedarf für Konsumausgaben des Staates hat sich hingegen nicht signifikant geändert (von 142 auf 146 Millionen Tonnen).

Um diese Entwicklungen und Gewichtsverschiebungen beim Primär-Rohstoffbedarf nach Verwendungsdimensionen besser einordnen zu können ist in der rechten Hälfte der Abbildung eine zur physischen Dimension synchrone Darstellung der Entwicklungen und Gewichtsverschiebungen in monetären Einheiten (in konstanten 2010 Euro) wiedergegeben. Hier zeigt sich zunächst, dass die preisbereinigte gesamte inländische letzte Verwendung im Gegensatz zum Rohstoffbedarf im Zeitverlauf gestiegen ist (um 20% im Zeitraum 1995 bis 2015). Am wenigsten dynamisch haben sich hierbei die preisbereinigten Bruttoinvestitionen entwickelt (+9%), am deutlichsten gestiegen sind die preisbereinigten Konsumausgaben des Staates (+31%).

Verbindet man die Abschätzungsergebnisse für Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für die verschiedenen inländischen Verwendungskategorien mit den entsprechenden preisbereinigten monetären Informationen, so lässt sich die Primär-Rohstoffintensität der Verwendungskategorien analysieren (siehe Abbildung 45). Es zeigt sich, dass erwartungsgemäß Bruttoinvestitionen rohstoffintensiver als konsumtive Verwendungen sind. Gleichzeitig erweist sich aber auch, dass im Zeitraum 1995 bis 2015 insbesondere bei den Bruttoinvestitionen deutliche Fortschritte im Hinblick auf einen Rückgang der Primär-Rohstoffintensität erzielt werden konnten, diese Fortschritte aber insbesondere im Zeitraum 1995 bis 2001 erzielt wurden. Weitergehende Detailanalysen deuten diesbezüglich darauf hin, dass diese Fortschritte in weitem Maße auf einen Rückgang des nachwendebedingten Baubooms in den Anfangsjahren des Analysezeitrahmens zurückzuführen sind.

Abbildung 45: Deutschlands Primär-Rohstoffintensität der inländischen letzten Verwendung, 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Bei der hier erfolgenden makroökonomischen Betrachtung bleibt zunächst unklar, inwieweit strukturelle Verschiebungen innerhalb der betrachteten Aggregate die dargestellten Ergebnisse prägen. Da bspw. unter den Konsumausgaben des Staates neben sozialen Transferleistungen auch die Werte sämtlicher vom Staat selbst produzierter Güter (mit Ausnahme selbst erstellter Anlagen und Verkäufe) erfasst werden, könnten die hier beobachtbaren Entwicklungen der Primär-Rohstoffintensität der Konsumausgaben des Staates theoretisch bspw. auch Veränderungen des relativen Anteils der Ausgaben für soziale Leistungen im Vergleich zum Anteil allgemeiner Verwaltungs- oder Verteidigungsausgaben an sämtlichen staatlichen Konsumausgaben abbilden. Das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm II sieht daher vor, zukünftig in Zusammenarbeit mit dem Statistischen Bundesamt regelmäßige Dekompositionsanalysen durchzuführen, um entsprechende Effekte besser erfassen und die Entwicklung der Produktivität auf individuelle Wachstums-, Struktur- und Verlagerungseffekte zurückführen zu können.

Ein erster eigener Vorschlag zur vorläufigen Abschätzung der Stärke entsprechender Individualeffekte wird von uns in Abbildung 46 vorgestellt. Die hier abgebildeten Balken basieren für jede Endnachfragekomponente auf einer Gegenüberstellung der monetären (preisbereinigten) Veränderungen im betrachteten Zeitraum (gelber Balken) mit den bereits aus Abbildung 45 bekannten Veränderungen der Primär-Rohstoffintensität (grüner Balken). Da die Veränderungen der jeweiligen RMC-Indikatoren ebenfalls historisch bekannt sind (linker Rand der Abbildung), kann die Einflussstärke der zuvor angesprochenen Struktureffekte residual auf Basis gegebener Wachstumsraten abgeschätzt werden (blauer Balken).<sup>85</sup>

<sup>85</sup> Erläuterung anhand des Beispiels RMC gesamt:

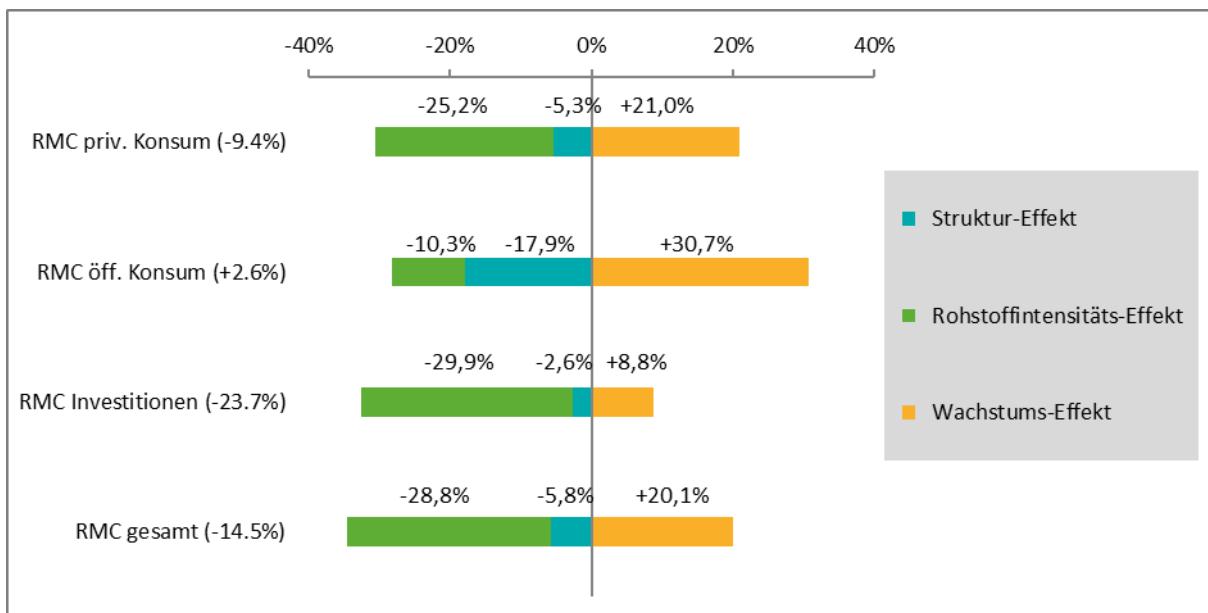
Im Zeitraum 1995 bis 2015 sind die (preisbereinigten) Konsumausgaben und Investitionen um 20,1% gestiegen. Gleichzeitig ist der Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) um 14,5% zurückgegangen. Hieraus resultiert ein Rückgang der Primärrohstoffintensität (RMC / Konsum und Investitionen in 2010€) von 1,01 auf 0,72 was einem Rückgang um 28,8% entspricht. Somit ergibt sich ein Struktur-Effekt von -5,8%.

$\Delta \text{RMC} = \Delta \text{Rohstoffintensität} + \Delta \text{Wachstum} + \Delta \text{Struktur}$

$\Delta \text{Struktur} = \Delta \text{RMC} - \Delta \text{Rohstoffintensität} - \Delta \text{Wachstum}$

$-5,8 = -14,5 + 28,8 - 20,1$

Abbildung 46: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 1995 - 2015



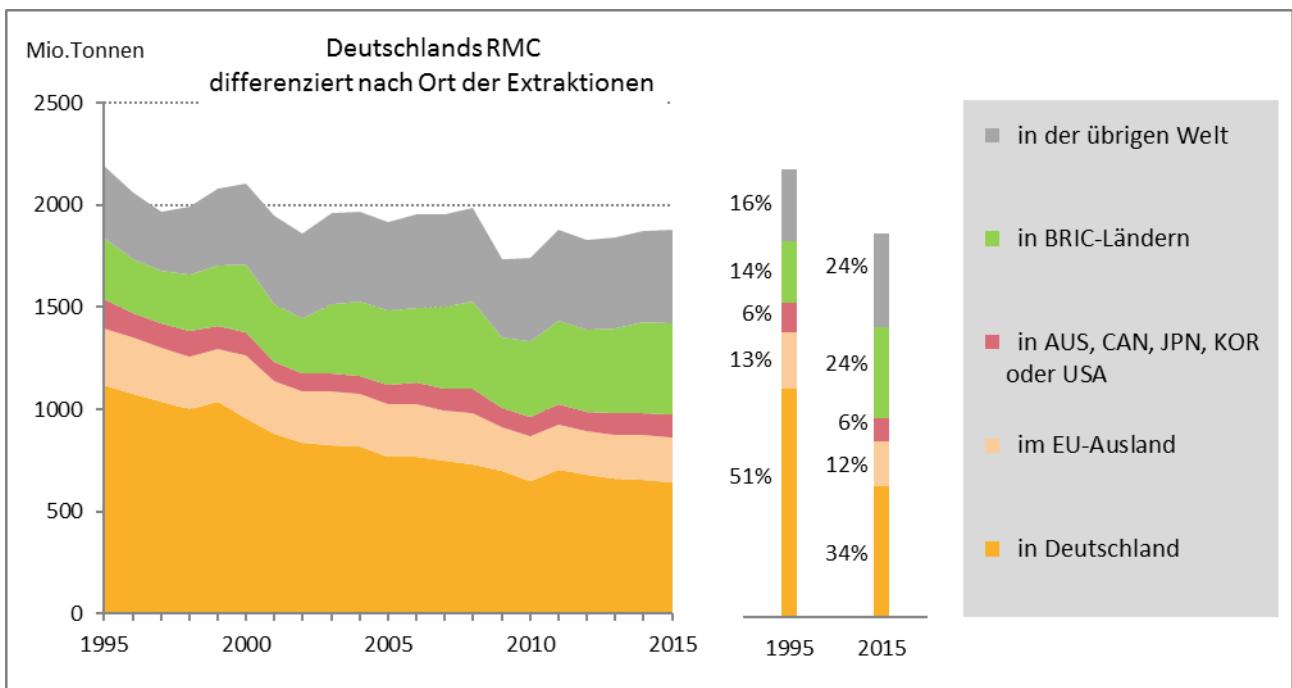
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Diese vorläufige Dekomposition verdeutlicht, dass beim privaten Konsum im Inland im Zeitraum 1995 bis 2015 der Wachstumseffekt (+21%) schwächer war als Fortschritte im Hinblick einer geringeren Primärrohstoffintensität (-25%). Zudem hat die Veränderung der Konsumstruktur hin zu Ausgaben für weniger primär-rohstoffintensive Waren und Dienstleistungen zu einer Verminderung des Primär-Rohstoffbedarfs in Höhe von 5,2% beigetragen. Beim öffentlichen Konsum, der ganz wesentlich durch Ausgaben für Dienstleistungen geprägt ist, konnten hingegen nur geringere Fortschritte im Hinblick auf eine geringere Primär-Rohstoffintensität (-10,3%) beobachtet werden, hingegen haben Veränderungen der Konsumstruktur deutlicher zu einem geringeren Primär-Rohstoffbedarf beigetragen (-17,9%). Bei den Bruttoinvestitionen wiederum war nach unseren Abschätzungen der deutlichste Fortschritt in Richtung einer geringeren Rohstoffintensität zu beobachten (-29,9%). Da die (preisbereinigten) Bruttoinvestitionen zudem am wenigsten stark zugenommen haben, hat sich der Primär-Rohstoffbedarf für Bruttoinvestitionen auch am Deutlichsten reduziert (-23,7%).

Neben der Aufteilung des Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen auf die einzelnen Verwendungskategorien ist es auch von Interesse, inwiefern sich dieser Primär-Rohstoffbedarf auf heimisch extrahierte Rohstoffe bezieht und inwiefern Extraktionen im Ausland betroffen sind. Abbildung 47 zeigt, dass im Jahr 1995 mit gut 1,1 Gigatonnen mehr als 50% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs durch heimische Extraktionen gedeckt wurden. Weitere 13% wurden im EU-Ausland extrahiert, 14% in den BRIC-Ländern<sup>86</sup> und 16% in der übrigen Welt. In den Jahren bis 2015 kam es dann aber zu einer deutlichen Verschiebung: Sowohl die heimischen Extraktionen als auch die Extraktionen im Ausland für den deutschen RMC gingen absolut zurück (auf 640 bzw. 224 Mio. Tonnen). Die Extraktionen im extra-EU-Ausland nahmen hingegen deutlich zu (von 798 Mio. Tonnen in 1995 auf 1017 Mio. Tonnen in 2015). Damit hat sich der Anteil der Extraktionen im extra-EU-Ausland auf deutlich über 50% erhöht.

<sup>86</sup> Brasilien, Russland, Indien, China

Abbildung 47: Provenienz der Extraktionen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Nachstehende Tabelle 8 analysiert wie sich Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität für Konsum und Investitionen (RMC) für verschiedene Waren und Dienstleistungen im Zeitraum 1995 bis 2015 entwickelt hat.<sup>87</sup> Gefragt wird zunächst nach denjenigen Waren und Dienstleistungen, die im Jahr 2015 am meisten zum Primär-Rohstoffbedarf (RMC) Deutschlands beigetragen haben. Die Tabelle weist die fünfzehn wichtigsten Waren und Dienstleistungen aus und fasst die übrigen fünfzehn Waren und Dienstleistungsarten zu einer Kategorie „Sonstige Waren und Dienstleistungen“ zusammen. Zudem analysiert die Tabelle jeweils Niveau und Dynamik der Primär-Rohstoffintensität, also den Primär-Rohstoffbedarf je Euro Konsumausgaben und Investitionen.<sup>88</sup>

Es zeigt sich, dass „Bauarbeiten“ nach wie vor diejenige Waren- und Dienstleistungsart mit dem höchsten Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen darstellen (398 Mio. t in 2015), obwohl es im Zeitraum seit 1995 sowohl zu einem deutlichen Rückgang des Primär-Rohstoffbedarfs (-44%) als auch zu Fortschritten im Hinblick auf die Primär-Rohstoffintensität (-34%) kam. Auf den Plätzen zwei und drei folgen die „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ sowie die „Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“. Bereits auf Rang vier folgen die Konsumausgaben und Bruttoinvestitionen für „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“. Hierbei handelt es sich nach unseren Abschätzungsresultaten um diejenige Warengruppe, deren Primär-Rohstoffbedarf mit Abstand am deutlichsten gestiegen ist (+185% seit 1995). Zudem kam es hier zu einem deutlichen Anstieg der Primär-Rohstoffintensität.

<sup>87</sup> Grundlage für diese Analyse (und die analogen Analysen in den nachfolgenden Tabellen) ist eine von uns vorgenommene Aggregation der Gütergruppenklassifikation des Modells in 30 verschiedene Waren- und Dienstleistungsarten. Details des verwendeten Aggregationsschemas werden von uns gerne auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

<sup>88</sup> In Preisen des Jahres 2010.

Tabelle 8: Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 15 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Ausgaben für Produkt- gruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Bauarbeiten [F]	RMC	714	613	455	394	398	-44%
		PRIC	2,86	2,63	2,45	2,04	1,88	-34%
2 [2]	Nahrungs- und Futtermittel, Ge- tränke, Tabakerz. [DA]	RMC	255	251	238	197	197	-23%
		PRIC	2,18	1,95	1,94	1,88	1,80	-17%
3 [3]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	RMC	145	152	153	165	166	+14%
		PRIC	6,68	6,20	6,17	4,95	4,89	-27%
4 [13]	Büromaschinen, DV-Geräte, E- Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	RMC	51	53	53	77	144	+185%
		PRIC	0,76	0,62	0,69	1,00	1,57	+107%
5 [7]	Fahrzeuge [DM]	RMC	78	84	99	97	104	+33%
		PRIC	0,88	0,77	0,81	0,73	0,77	-12%
6 [9]	Maschinen [DK]	RMC	61	65	67	69	86	+42%
		PRIC	0,96	0,87	0,98	0,98	1,20	+24%
7 [5]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	RMC	92	133	115	83	84	-8%
		PRIC	3,33	3,72	3,37	2,29	2,35	-29%
8 [6]	Erz. der Energie- und Wasserver- sorgung [E]	RMC	87	73	77	71	70	-19%
		PRIC	2,44	1,91	1,87	1,81	1,81	-26%
9 [17]	Chemische Erzeugnisse [DG]	RMC	42	47	57	56	63	+50%
		PRIC	1,24	1,23	1,43	1,25	1,39	+12%
10 [10]	DL d. öffentl. Verwaltung, Vertei- digung, Sozialvers. [L]	RMC	56	58	57	62	62	+11%
		PRIC	0,32	0,31	0,32	0,31	0,30	-6%
11 [4]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	RMC	114	90	107	66	59	-48%
		PRIC	6,23	6,33	6,91	7,34	8,93	+43%
12 [16]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	RMC	44	40	38	43	52	+17%
		PRIC	1,19	1,02	1,15	1,36	1,53	+29%
13 [12]	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens [N]	RMC	51	59	54	53	51	-1%
		PRIC	0,30	0,29	0,24	0,20	0,19	-39%
14 [8]	DL des Grundstücks- u. Woh- nungsw., der Verm. bewegl. Sa- chen, wirts. DL a.n.g. [K]	RMC	73	67	51	46	46	-37%
		PRIC	0,26	0,21	0,16	0,13	0,12	-53%
15 [11]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Ge- brauchsgütern [G]	RMC	55	55	50	43	44	-20%
		PRIC	0,28	0,25	0,22	0,17	0,17	-40%
	Sonstige Waren und Dienstleis- tungen	RMC	277	268	248	222	251	-9%
		PRIC	0,50	0,46	0,44	0,38	0,40	-20%
Insgesamt		RMC	2195	2107	1918	1745	1877	-14%
		PRIC	1,03	0,91	0,84	0,72	0,73	-29%

RMC = Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) in Mio. t

PRIC = Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Auch der Primär-Rohstoffbedarf für „Fahrzeuge“ ist gestiegen (+33% seit 1995). Während der von uns berechnete Anstieg um ca. 33% seit 1995 zunächst überraschend hoch erscheinen mag, sei darauf hingewiesen, dass bspw. Helmers (2015) am Beispiel des Volkswagen-Modells Golf vorrechnet, dass das Gewicht dieser Modelle im Zeitablauf kalkulatorisch um ca. 1,6% pro Jahr gesteigert wurde. Diese Wachstumsrate impliziert über einen 20-Jahreszeitraum eine Gesamtsteigerung um etwas mehr als 35%.

Tabelle 9: Biomasse - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Ausgaben für Produkt- gruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	RMC Bi PRIC Bi	193 1,65	187 1,46	179 1,46	156 1,48	155 1,41	-20% -14%
2 [2]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	RMC Bi PRIC Bi	128 5,91	134 5,48	139 5,59	149 4,45	150 4,41	+17% -25%
3 [3]	Beherbergungs- u. Gaststät- ten-DL [H]	RMC Bi PRIC Bi	27 0,42	26 0,37	22 0,33	21 0,31	22 0,29	-20% -31%
4 [4]	Textilien, Bekleidung [DB]	RMC Bi PRIC Bi	20 0,55	14 0,40	17 0,58	17 0,60	17 0,56	-15% +2%
5 [6]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	RMC Bi PRIC Bi	12 0,33	12 0,30	12 0,34	14 0,43	15 0,46	+26% +39%
6 [7]	DL d. Gesundheits-, Veteri- när- u. Sozialwesens [N]	RMC Bi PRIC Bi	10 0,06	15 0,07	15 0,07	16 0,06	15 0,05	+42% -12%
7 [8]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	RMC Bi PRIC Bi	8 0,05	10 0,05	9 0,05	13 0,06	12 0,06	+44% +22%
8 [5]	Bauarbeiten [F]	RMC Bi PRIC Bi	19 0,08	18 0,08	12 0,07	13 0,06	12 0,06	-38% -27%
9 [15]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	RMC Bi PRIC Bi	4 0,06	5 0,05	5 0,06	6 0,08	9 0,10	+111% +53%
10 [12]	Fahrzeuge [DM]	RMC Bi PRIC Bi	5 0,06	5 0,05	6 0,05	7 0,05	7 0,05	+28% -15%
	Sonstige Waren und Dienst- leistungen	RMC Bi PRIC Bi	50 0,05	53 0,04	51 0,04	50 0,04	52 0,04	+4% -15%
Insgesamt		RMC Bi PRIC Bi	479 0,23	479 0,21	466 0,20	461 0,19	466 0,18	-3% -19%

RMC Bi = Primär-Rohstoffbedarf Biomasse für Konsum und Investitionen (RMC) in Mio. t  
PRIC Bi = Primär-Rohstoffintensität Biomasse von Konsum und Investitionen in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Somit deuten unsere Berechnungsergebnisse an, dass im Mittel sämtliche in Deutschland nachgefragte Kraftfahrzeugmodelle relative Gewichtssteigerungen in der von Helmers exemplarisch berechneten Größenordnung durchliefen. Bemerkenswert erscheint zudem die im historischen Zeitraum ansteigende Primär-Rohstoffintensität bei der letzten Verwendung von Kohle, Torf, Erdöl und Erdgas [CA]. Ein Hintergrund für diesen Befund könnte darin begründet liegen, dass infolge des sukzessiven Ausstiegs aus der Steinkohleförderung die rohstoffintensivere letzte Verwendung von Braunkohle relativ an Bedeutung (innerhalb der Produktgruppe) gewonnen hat.

Betrachten wir nicht den gesamten Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen, sondern lediglich die Primär-Rohstoffkategorie „Biomasse“, so ergibt sich das in Tabelle 9 dargestellte Analyseergebnis. Erwartungsgemäß entfallen auf „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ sowie die „Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“ die höchsten Primär-Rohstoffbedarfe. Zusammen waren in 2015 Konsumausgaben und Investitionen allein dieser beiden Gütergruppen für knapp  $\frac{3}{4}$  des Biomassebedarfs (RMC Biomasse) Deutschlands verantwortlich. Auf Rang drei folgen die „Beherbergungs- und Gaststättendienstleistungen“ und auf Rang vier die „Textilien, Bekleidung“.

Tabelle 10: Fossile Energieträger - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 15 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Ausgaben für Produktgruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [2]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	RMC Fo PRIC Fo	83 3,03	123 3,44	104 3,06	75 2,09	75 2,09	-10% -31%
2 [3]	Erz. der Energie- und Wasserversorgung [E]	RMC Fo PRIC Fo	78 2,19	65 1,70	67 1,64	62 1,57	62 1,58	-21% -28%
3 [1]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	RMC Fo PRIC Fo	110 6,02	87 6,08	104 6,66	57 6,42	57 8,71	-48% +45%
4 [14]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	RMC Fo PRIC Fo	14 0,21	15 0,17	16 0,20	39 0,51	39 0,43	+188% +109%
5 [7]	Fahrzeuge [DM]	RMC Fo PRIC Fo	21 0,23	23 0,21	27 0,22	29 0,22	29 0,21	+36% -9%
6 [4]	Bauarbeiten [F]	RMC Fo PRIC Fo	42 0,17	41 0,18	29 0,16	27 0,14	27 0,13	-36% -24%
7 [12]	Maschinen [DK]	RMC Fo PRIC Fo	15 0,24	16 0,22	17 0,25	23 0,33	23 0,32	+49% +30%
8 [11]	Chemische Erzeugnisse [DG]	RMC Fo PRIC Fo	16 0,47	17 0,46	18 0,45	20 0,44	20 0,43	+23% -8%
9 [6]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	RMC Fo PRIC Fo	22 0,11	27 0,13	24 0,10	19 0,08	19 0,07	-15% -36%
10 [5]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	RMC Fo PRIC Fo	28 0,24	28 0,22	25 0,21	18 0,17	18 0,16	-35% -31%
11 [9]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	RMC Fo PRIC Fo	18 0,10	17 0,09	17 0,09	17 0,09	17 0,08	-5% -19%
12 [8]	Verkehrsleist., Nachrichtenübermittlungs-DL [I]	RMC Fo PRIC Fo	18 0,20	16 0,22	16 0,19	16 0,18	16 0,18	-11% -14%
13 [10]	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens [N]	RMC Fo PRIC Fo	17 0,10	21 0,10	18 0,08	14 0,06	14 0,05	-14% -47%
14 [15]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	RMC Fo PRIC Fo	10 0,27	9 0,23	9 0,26	12 0,38	12 0,36	+21% +33%
15 [13]	Textilien, Bekleidung [DB]	RMC Fo PRIC Fo	15 0,41	12 0,34	11 0,37	11 0,39	11 0,37	-24% -8%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	RMC Fo PRIC Fo	68 0,09	73 0,09	63 0,08	58 0,07	58 0,06	-15% -32%
Insgesamt		RMC Fo PRIC Fo	575 0,27	590 0,25	563 0,25	498 0,21	498 0,19	-13% -28%

RMC Fo = Primär-Rohstoffbedarf fossile Energieträger für Konsum und Investitionen (RMC) in Mio. t

PRIC Fo = Primär-Rohstoffintensität fossile Energieträger von Konsum und Investitionen in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Bei den auf Rang fünf angesiedelten Ausgaben für „Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sport- und Spielwaren, sonstige Erzeugnisse, Recycling“ war nicht nur ein Anstieg des Biomassebedarfs (+26%), sondern auch ein deutlicher Anstieg der Biomasseintensität zu beobachten (+39%), was u.a. auf immer kürzere Produktlebenszyklen zurückzuführen sein dürfte. Weitere Analyse-Ergebnisse können wiederum der Tabelle entnommen werden.

Tabelle 11: Mineralien - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Ausgaben für Produkt- gruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Bauarbeiten [F]	RMC Mi PRIC Mi	622 2,49	527 2,26	391 2,10	331 1,71	333 1,58	-46% -37%
2 [10]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	RMC Mi PRIC Mi	11 0,17	13 0,16	14 0,18	18 0,23	31 0,34	+174% +99%
3 [2]	DL des Grundstücks- u. Wohnungsw., der Verm. bewegl. Sachen, wirts. DL a.n.g. [K]	RMC Mi PRIC Mi	52 0,19	46 0,14	34 0,10	30 0,09	29 0,08	-44% -58%
4 [9]	Chemische Erzeugnisse [DG]	RMC Mi PRIC Mi	14 0,40	17 0,45	26 0,67	24 0,53	29 0,63	+110% +58%
5 [4]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	RMC Mi PRIC Mi	25 0,14	26 0,14	25 0,14	26 0,13	26 0,13	+3% -12%
6 [8]	Fahrzeuge [DM]	RMC Mi PRIC Mi	15 0,17	16 0,15	19 0,16	20 0,15	22 0,16	+47% -2%
7 [5]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	RMC Mi PRIC Mi	21 3,21	24 3,34	24 3,80	20 3,75	19 3,49	-12% +9%
8 [3]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	RMC Mi PRIC Mi	28 0,24	29 0,23	28 0,23	19 0,18	19 0,17	-32% -27%
9 [6]	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens [N]	RMC Mi PRIC Mi	19 0,11	18 0,09	17 0,07	16 0,06	16 0,06	-13% -46%
10 [14]	Maschinen [DK]	RMC Mi PRIC Mi	10 0,16	11 0,15	12 0,18	13 0,19	15 0,21	+54% +35%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	RMC Mi PRIC Mi	108 0,12	98 0,10	91 0,10	89 0,09	97 0,09	-10% -23%
Insgesamt		RMC Mi PRIC Mi	924 0,43	826 0,36	681 0,30	606 0,25	636 0,25	-31% -43%

RMC Mi = Primär-Rohstoffbedarf Mineralien für Konsum und Investitionen (RMC Mineralien) in Mio. t

PRIC Mi = Primär-Rohstoffintensität Mineralien von Konsum und Investitionen in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Eine entsprechend detaillierte Übersicht des Primär-Rohstoffbedarfs fossiler Energieträger für Konsum und Investitionen in Deutschland (RMC fossile Energieträger) findet sich in Tabelle 10. Auch hier entfallen die höchsten Primär-Rohstoffbedarfe auf die drei Gütergruppen („Kokerei-Erzeugnisse, Mineralölerzeugnisse, Spalt- u. Brutstoffe“, „Erzeugnisse der Energie- und Wasserversorgung“ und „Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas“) mit direktem Energieträgerbezug. Mit knapp 40% war dieser Anteil in 2013 aber deutlich geringer als der Anteil der beiden Gütergruppen mit direktem Biomassebezug beim Primär-Rohstoffbedarf Biomasse. Auf den Rängen vier bis acht folgen Gütergruppen des produzierenden Gewerbes, die größtenteils steigende Primär-Rohstoffbedarfe fossile Energieträger und eine steigende Primär-Rohstoffintensität fossile Energieträger aufweisen.

Tabelle 12: Metallerze - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Ausgaben für Produkt- gruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [4]	Büromaschinen, DV-Geräte, E- Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	RMC Me	21	20	19	30	65	+203%
		PRIC Me	0,32	0,24	0,24	0,38	0,71	+120%
2 [1]	Fahrzeuge [DM]	RMC Me	38	39	47	42	47	+25%
		PRIC Me	0,42	0,36	0,38	0,32	0,35	-17%
3 [2]	Maschinen [DK]	RMC Me	32	35	34	33	44	+37%
		PRIC Me	0,51	0,46	0,50	0,47	0,61	+20%
4 [3]	Bauarbeiten [F]	RMC Me	31	28	23	23	26	-17%
		PRIC Me	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	-2%
5 [5]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	RMC Me	17	15	14	4	16	-1%
		PRIC Me	0,74	0,63	0,75	0,25	0,66	-9%
6 [6]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	RMC Me	11	9	8	9	12	+6%
		PRIC Me	0,30	0,24	0,25	0,29	0,35	+17%
7 [7]	Chemische Erzeugnisse [DG]	RMC Me	9	9	9	9	10	+15%
		PRIC Me	0,26	0,24	0,22	0,20	0,22	-14%
8 [8]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	RMC Me	8	8	8	7	8	-6%
		PRIC Me	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	-30%
9 [11]	DL d. öffentl. Verwaltung, Ver- teidigung, Sozialvers. [L]	RMC Me	4	5	6	6	7	+52%
		PRIC Me	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	+29%
10 [9]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	RMC Me	7	7	6	5	5	-20%
		PRIC Me	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	-14%
	Sonstige Waren und Dienstleis- tungen	RMC Me	38	38	36	33	38	-1%
		PRIC Me	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-21%
Insgesamt		RMC Me	216	212	209	202	278	+28%
		PRIC Me	0,10	0,09	0,09	0,08	0,11	+7%

RMC Me = Primär-Rohstoffbedarf Metallerze für Konsum und Investitionen (RMC Metallerze) in Mio. t

PRIC Me = Primär-Rohstoffintensität Metallerze von Konsum und Investitionen in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 11 ergänzt diese Darstellungen um eine Übersicht des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs an Mineralien für Konsum und Investitionen (RMC Mineralien). Erwartungsgemäß finden sich die „Bauarbeiten“ mit deutlichem Abstand auf Rang 1. Mehr als die Hälfte des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs Mineralien entfallen auf die Konsumausgaben und Investitionen für diese Gütergruppe. Während jedoch der Primär-Rohstoffbedarf Mineralien und die Primär-Rohstoffintensität Mineralien sowohl für „Bauarbeiten“ als auch für die „Dienstleistungen des Grundstücks- u. Wohnungswesens, der Vermietung beweglicher Sachen, wirtschaftliche Dienstleistungen a.n.g.“ zurückgegangen ist, ist bei einer Vielzahl von Waren des Verarbeitenden Gewerbes eine gegenläufige Tendenz zu beobachten gewesen.

Eine differenzierte Übersicht des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs an Metallerzen für Konsum und Investitionen findet sich zudem in Tabelle 12. Anders als bei den übrigen Materialkategorien kam es in Bezug auf Metallerze im Zeitraum 1995 bis 2015 nahezu bei allen Gütergruppen zu einem Anstieg des Primärrohstoffbedarfs. Die meisten Metallerze wurden in 2015 für die Konsumausgaben und Investitionen der Gütergruppe „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“ benötigt (65 Mio. t). Dies entspricht einem Anstieg gegenüber 1995 von mehr etwa 200%. Auf den Rängen zwei bis vier folgen die Ausgaben für „Fahrzeuge“, „Maschinen“ und „Bauarbeiten“.

Tabelle 13: Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für privaten Konsum im Inland (RMC privater Konsum) der 15 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Ausgaben für Produktgruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	RMC PC PRIC PC	254 2,13	250 1,94	236 1,95	194 1,92	196 1,80	-23% -15%
2 [2]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	RMC PC PRIC PC	126 6,58	129 6,19	133 6,22	141 5,04	148 4,93	17% -25%
3 [4]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	RMC PC PRIC PC	89 3,25	133 3,70	117 3,40	93 2,33	86 2,36	-3% -27%
4 [5]	Erz. der Energie- und Wasserversorgung [E]	RMC PC PRIC PC	86 2,39	72 1,90	76 1,89	71 1,84	70 1,81	-19% -24%
5 [3]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	RMC PC PRIC PC	106 5,88	95 6,66	101 6,81	66 9,35	60 9,62	-44% 64%
6 [7]	Fahrzeuge [DM]	RMC PC PRIC PC	51 0,86	50 0,77	59 0,80	53 0,73	58 0,75	13% -13%
7 [11]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	RMC PC PRIC PC	37 1,16	33 1,01	33 1,16	38 1,38	44 1,54	21% 33%
8 [9]	Textilien, Bekleidung [DB]	RMC PC PRIC PC	46 1,26	36 1,03	38 1,33	40 1,29	41 1,32	-12% 6%
9 [6]	DL des Grundstücks- u. Wohnungsw., der Verm. bewegl. Sachen, wirts. DL a.n.g. [K]	RMC PC PRIC PC	64 0,28	59 0,23	45 0,17	40 0,14	39 0,13	-39% -55%
10 [10]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	RMC PC PRIC PC	45 0,27	43 0,25	41 0,22	35 0,17	34 0,17	-23% -39%
11 [14]	Chemische Erzeugnisse [DG]	RMC PC PRIC PC	22 1,21	27 1,23	31 1,44	31 1,27	34 1,39	53% 15%
12 [8]	Beherbergungs- u. Gaststätten-DL [H]	RMC PC PRIC PC	49 0,74	47 0,65	38 0,57	33 0,49	34 0,45	-31% -39%
13 [12]	Verkehrsleist., Nachrichtenübermittlungs-DL [I]	RMC PC PRIC PC	31 0,38	27 0,37	28 0,34	29 0,33	30 0,33	-4% -11%
14 [16]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	RMC PC PRIC PC	15 0,72	15 0,62	18 0,69	23 0,90	30 1,18	98% 64%
15 [13]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	RMC PC PRIC PC	25 3,94	27 4,14	25 4,54	19 4,41	20 4,02	-21% 2%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	RMC PC PRIC PC	116 0,38	127 0,37	121 0,35	120 0,32	130 0,32	12% -16%
Insgesamt		RMC PC PRIC PC	1163 0,94	1169 0,87	1141 0,83	1024 0,72	1053 0,70	-9% -25%

RMC PC = Primär-Rohstoffbedarf für privaten Konsum im Inland (RMC privater Konsum) in Mio. t

PRIC PC = Primär-Rohstoffintensität des privaten Konsums in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

In Tabelle 13 wird eine letzte Analyse des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen vorgestellt, indem nunmehr nur nach dem Rohstoffbedarf für den privaten Konsum gefragt wird. Wie bereits in Abbildung 44 dargestellt, hat sich dieser im Zeitraum von 1995 bis 2015 von 1163 auf 1053 Mio. t reduziert. Doch die Nachfrage nach welchen Gütergruppen zeichnete in welchem Maße für dieses Ergebnis verantwortlich?

Am Bedeutendsten im Hinblick auf den Primär-Rohstoffbedarf für den privaten Konsum erweisen sich „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ gefolgt von den „Erzeugnissen der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“. Auf den Rängen drei bis fünf folgen die energie-bezogenen Aufwendungen („Kokerei-Erzeugnisse, Mineralölerzeugnisse, Spalt- u. Brutstoffe“, „Erzeugnisse der Energie- und Wasserversorgung“ und „Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas“) und auf den Rängen sechs bis acht Ausgaben für „Fahrzeuge“, „Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sport- und Spielwaren, etc.“ und „Textilien, Bekleidung“.

### **3.2.2 Wieviel Primär-Rohstoffe wurden für Exporte und Importe verwendet? – Abschätzungsergebnisse für die Exporte und Importe in Rohmaterialäquivalenten**

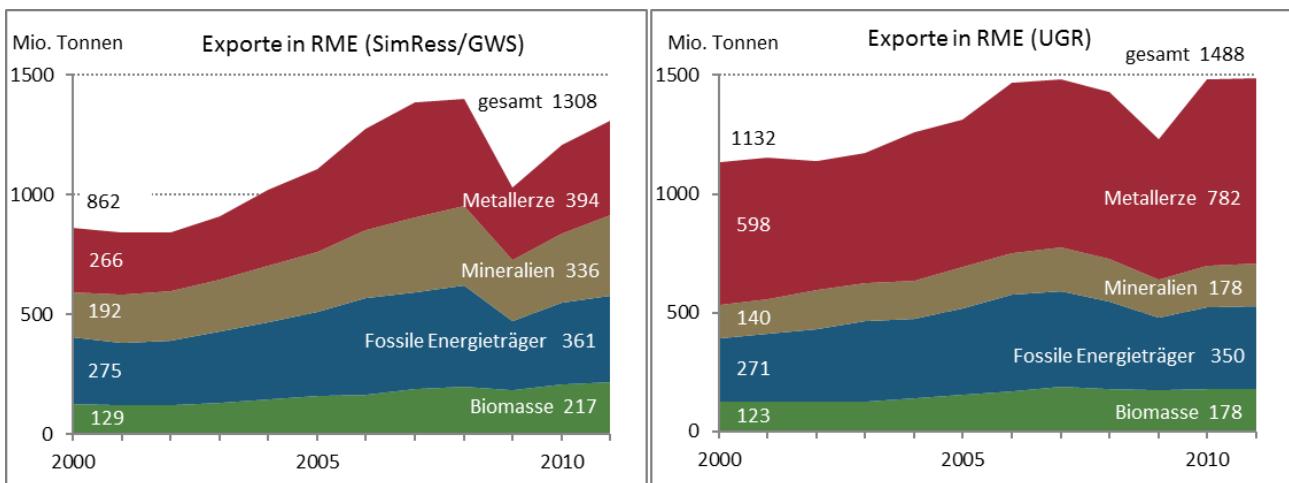
#### **Wie unterscheiden sich die Abschätzungsergebnisse von denjenigen der UGR?**

Wie schon beim Rohstoffkonsum gilt auch beim Primär-Rohstoffbedarf für die deutschen Exporte und Importe unser erster Blick einem Vergleich zwischen den eigenen Abschätzungsergebnissen und den entsprechenden Abschätzungen in der amtlichen Statistik. Die beiden Diagramme in Abbildung 48 zeigen zunächst, dass die SimRess/GWS-Ergebnisse für die deutschen Exporte in RME ein niedrigeres Niveau aufweisen, dieser Niveau-Unterschied jedoch im Zeitraum von 2000 bis 2011 deutlich geringer wird. Während sowohl bei der Biomasse als auch bei den fossilen Energieträgern die Unterschiede gering ausfallen, zeigen sich sowohl bei den Mineralien als auch bei den Metallerzen erhebliche Abweichungen zwischen den beiden Abschätzungen in Niveau und Dynamik. Während das Statistische Bundesamt den Primär-Rohstoffbedarf Metallerze für die deutschen Exporte im Jahr 2000 auf 598 Mio. t einschätzt kommen unsere Datengrundlagen und Abschätzungsmethoden auf einen Wert von nur 266 Mio. t. Bis 2011 kommt es auf Grundlage von beiden Abschätzungsmethoden zu einem deutlichen Anstieg des Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte, so dass sich die entsprechenden Werte auf 782 Mio. t (destatis) bzw. 394 Mio. t (SimRess/GWS) erhöhen. Bei den Mineralien zeigt sich ein gegenläufiges Analyseergebnis. Hier schätzt die SimRess/GWS-Methode den Primär-Rohstoffbedarf für Exporte höher ein als die amtliche Statistik (192 vs. 140 Mio. t in 2000; 336 vs. 178 Mio. t in 2011).

Die angeführten Ergebnisunterschiede sind wie schon diejenigen für den deutschen RMC sowohl auf Unterschiede in den Datengrundlagen als auch auf Unterschiede in der Abschätzungsmethodik zurückzuführen. So dürften die Niveau-Unterschiede beim Primär-Rohstoffbedarf Metallerze für deutsche Exporte überwiegend darauf zurückzuführen sein, dass das Statistische Bundesamt den Einsatz von Sekundär-Rohstoffen ausschließlich der inländischen Verwendung nicht aber dem Einsatz in der Produktion von Exportgütern zu rechnet. Eine solche einseitige Zuordnung, die aus Sicht der Autoren die Ergebnisse verzerrt, erfolgt in MRIO-basierten Abschätzungen, wie sie seitens der Autoren durchgeführt wurden, nicht.

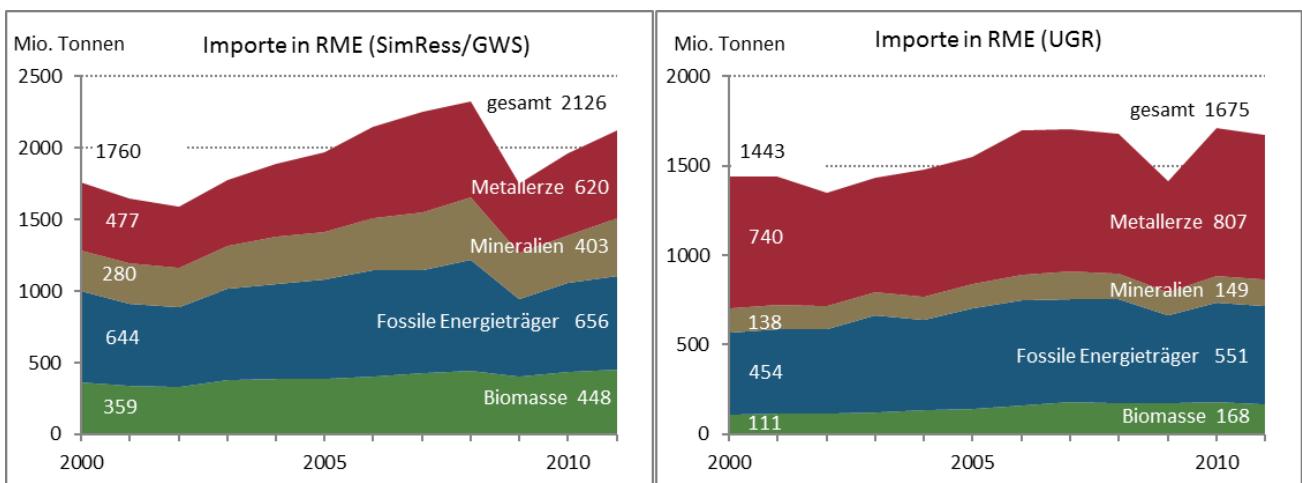
Nochmals ein anderes Bild ergibt sich im Hinblick auf die in Abbildung 49 dargestellten Abschätzungsergebnisse für die deutschen Importe in Rohmaterialäquivalenten. Hier kommen unsere Abschätzungen zu einem deutlich höheren Primär-Rohstoffbedarf als die amtliche Statistik. Diese Differenz nimmt auch nicht im Zeitverlauf ab. Ein Blick auf die einzelnen Materialkategorien zeigt, dass lediglich bei den Metallerzen seitens SimRess/GWS ein niedrigerer Primär-Rohstoffbedarf für Importe als von der UGR abgeschätzt wird. Bei allen anderen Materialkategorien (Biomasse, fossile Energieträger, Mineralien) liegen unsere Ergebnisse hingegen deutlich höher. In Bezug auf die UGR-Abschätzungen sei an dieser Stelle aber erinnert, dass diese bei Importgütern nicht den Rohstoffaufwand bei der Produktion dieser Güter im Ausland beschreibt, sondern die theoretische Einsparung gegenüber einer Herstellung im Inland.

Abbildung 48: Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte im RME), 2000 - 2011



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

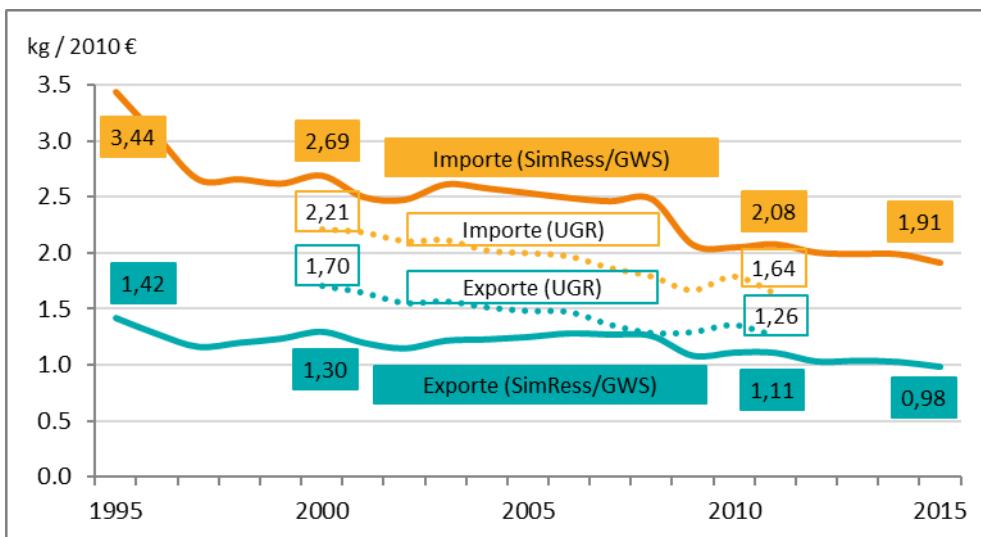
Abbildung 49: Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe im RME), 2000 - 2011



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Diese unterschiedlichen Abschätzungsergebnisse für den Primär-Rohstoffbedarf für Deutschlands Exporte und Importe schlagen sich natürlich auch in Unterschieden im Hinblick auf Niveau und Entwicklung der jeweiligen Primär-Rohstoffintensität nieder (siehe Abbildung 50). Während das Statistische Bundesamt im Zeitraum von 2000 bis 2011 einen Rückgang der Primär-Rohstoffintensität von 1,74 kg auf 1,29 kg Primärrohstoffbedarf je Euro Exporte (in konstanten 2010 Preisen) abschätzt, kommen unsere Analysen zu deutlich weniger dynamisch verlaufenden Fortschritten. Bei der Primär-Rohstoffintensität der deutschen Importe sehen beide Abschätzungen eine ähnliche Dynamik in den Jahren 2000 bis 2011 (-23% bei SimRess/GWS versus -26% beim Statistischen Bundesamt).

Abbildung 50: Deutschlands Primär-Rohstoffintensität der Exporte und Importe von Waren und Dienstleistungen, 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Abschätzungen im Hinblick auf die Importe liegt vielmehr beim Niveau der Primär-Rohstoffintensität. Damit steigt aber auch der Abstand zwischen der Primär-Rohstoffintensität der Importe und Exporte deutlich an. Während die amtliche Statistik die Primär-Rohstoffintensität der deutschen Importe lediglich 30% höher als diejenige der deutschen Exporte abschätzt, kommen unsere Analyseergebnisse diesbezüglich zu einer rund doppelt so hohen Differenz der Primär-Rohstoffintensität.

#### Wie stellt sich Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte und Importe im internationalen Vergleich dar?

Die deutsche Volkswirtschaft ist neben den USA und China, eine der drei wichtigsten Exportnationen der Welt. Doch gilt dies auch für den Primär-Rohstoffbedarf für die Exporte? Tabelle 14 zeigt, dass Deutschland nach unseren Abschätzungen mit einem Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von 1,3 Milliarden Tonnen in 2015 deutlich hinter China (7,0 Mrd. Tonnen) aber auch hinter den USA (1,8 Mrd. Tonnen) und Australien (1,5 Mrd. Tonnen) sowie etwa gleichauf mit Russland und Brasilien rangiert. Angeführt wird die Rangliste der wichtigsten Länder/Regionen jedoch von der Region „Rest der Welt“ zu der insbesondere auch eine Vielzahl von rohstoffreichen Ländern/Regionen (z.B. der gesamte Nahe Osten, Chile, Afrika) zählen. Die deutlichsten Zuwächse des Rohstoffbedarfs für Exporte von 1995 bis 2015 waren in China (+520%), Brasilien (+168%) und Indien (+143%) zu beobachten.

Kombinieren wir die Abschätzungen zum Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) mit den Beobachtungen zur Entwicklung der Exporte von Waren und Dienstleistungen in konstanten 2010 USD, so lassen sich Niveau und Dynamik der Primär-Rohstoffintensität der Exporte in den ausgewählten Ländern analysieren (die PRI EX-Zeilen in der Tabelle). Es zeigt sich, dass Deutschland mit einem Primär-Rohstoffbedarf von 0,75 kg je konstantem 2010 USD in 2015 selbst im Vergleich zu anderen Industrienationen vergleichsweise gut abschneidet. Japan, Frankreich und Italien weisen mit 0,65 bis 0,7 kg je konstanten 2010 USD in 2015 geringfügig niedrigere Primär-Rohstoffintensitäten der Exporte auf. Spitzenreiter im Hinblick auf einen geringen Primär-Rohstoffbedarf je 2010 USD Exporte in 2015 ist nach dieser Auswertung Großbritannien.

Tabelle 14: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME), 1995 - 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Land / Region		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Rest der Welt	EX RME	5,02	6,68	9,09	9,54	10,94	+118%
		PRIEX	3,81	2,93	3,02	3,01	2,75	-28%
2 [4]	China	EX RME	1,13	1,29	3,06	5,16	7,01	+520%
		PRIEX	5,05	3,43	2,88	2,24	2,05	-59%
3 [2]	übrige EU27-Länder	EX RME	1,76	2,13	2,60	2,55	2,90	+64%
		PRIEX	1,52	1,20	1,16	0,94	0,89	-41%
4 [3]	USA	EX RME	1,50	1,40	1,36	1,60	1,78	+19%
		PRIEX	1,88	1,27	1,07	0,98	0,89	-53%
5 [7]	Australien	EX RME	0,81	1,05	1,04	1,16	1,48	+82%
		PRIEX	5,16	4,60	4,46	4,51	4,27	-17%
6 [9]	Deutschland	EX RME	0,61	0,86	1,11	1,21	1,33	+116%
		PRIEX	1,09	1,00	0,96	0,85	0,75	-31%
7 [10]	Brasilien	EX RME	0,49	0,61	1,03	1,20	1,32	+168%
		PRIEX	4,83	3,92	4,28	5,30	5,12	+6%
8 [6]	Russland	EX RME	0,86	1,16	1,24	1,22	1,30	+52%
		PRIEX	2,83	2,81	2,87	3,20	3,19	+13%
9 [5]	Kanada	EX RME	0,95	1,20	1,02	0,91	1,09	+14%
		PRIEX	2,92	2,47	2,15	2,18	2,11	-28%
10 [13]	Indien	EX RME	0,32	0,47	0,66	0,68	0,79	+143%
		PRIEX	5,35	4,39	3,34	2,07	1,80	-66%
11 [14]	Japan	EX RME	0,28	0,33	0,47	0,55	0,65	+133%
		PRIEX	0,75	0,66	0,63	0,69	0,70	-7%
12 [11]	Frankreich	EX RME	0,37	0,48	0,49	0,44	0,49	+30%
		PRIEX	1,06	0,91	0,85	0,71	0,67	-36%
13 [12]	Italien	EX RME	0,34	0,42	0,45	0,37	0,35	+5%
		PRIEX	0,83	0,84	0,86	0,74	0,65	-22%
14 [8]	Großbritannien	EX RME	0,70	0,64	0,72	0,38	0,35	-50%
		PRIEX	1,84	1,29	1,27	0,60	0,49	-73%
15 [15]	Spanien	EX RME	0,16	0,28	0,33	0,30	0,33	+101%
		PRIEX	1,05	1,05	1,09	0,96	0,84	-20%

EX RME = Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) in Milliarden Tonnen

PRIEX = Primär-Rohstoffintensität der Exporte von Waren und Dienstleistungen in kg je 2010 US-\$

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Die deutlichsten Fortschritte in Richtung einer geringeren Primär-Rohstoffintensität der Exporte waren im Zeitraum von 1995 bis 2015 jedoch in Großbritannien (von 1,8 kg je konstanten 2010 USD in 1995 auf 0,5 kg je konstanten 2010 USD in 2015) und in Indien zu beobachten (von 5,3 kg je konstanten 2010 USD in 1995 auf 1,8 kg in 2015). Bei diesem internationalen Vergleich ist jedoch zu bedenken, dass Unterschiede in der Primär-Rohstoffintensität der Exporte nicht nur in Effizienz-Unterschieden in der Produktion der Exportgüter, sondern insbesondere auch in der Struktur der Exporte begründet liegen. So weisen Länder wie beispielsweise Russland in erster Linie eine höhere Primär-Rohstoffintensität der Exporte auf, weil sie in nicht unerheblichem Maße Rohstoffe exportieren und weiterverarbeitete Güter, die weniger rohstoffintensiv sind, weniger stark ins Gewicht fallen.

Tabelle 15: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME), 1995 - 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Land / Region		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Rest der Welt	IM RME	3,12	2,90	4,83	5,54	9,10	+192%
		PRIIM	2,17	1,44	1,61	1,36	1,64	-24%
2 [9]	China	IM RME	0,51	1,04	2,48	5,88	6,64	+1202%
		PRIIM	3,05	3,51	3,39	3,10	2,23	-27%
3 [3]	USA	IM RME	2,20	3,48	4,13	3,48	3,91	+78%
		PRIIM	2,16	2,04	1,94	1,56	1,55	-28%
4 [2]	übrige EU27-Länder	IM RME	2,23	2,90	3,44	3,31	3,43	+54%
		PRIIM	1,94	1,64	1,56	1,26	1,20	-38%
5 [4]	Japan	IM RME	2,17	2,14	2,22	2,14	2,33	+8%
		PRIIM	4,61	3,76	3,20	2,98	2,84	-38%
6 [5]	Deutschland	IM RME	1,50	1,76	1,97	1,96	2,21	+47%
		PRIIM	2,76	2,16	2,03	1,64	1,53	-44%
7 [13]	Indien	IM RME	0,24	0,55	0,70	0,85	1,06	+351%
		PRIIM	3,32	5,06	3,38	2,50	2,51	-24%
8 [7]	Frankreich	IM RME	0,69	0,92	1,05	0,97	1,04	+51%
		PRIIM	1,93	1,69	1,63	1,38	1,30	-33%
9 [10]	Kanada	IM RME	0,38	0,75	0,82	0,80	0,93	+143%
		PRIIM	1,55	2,10	2,01	1,73	1,73	+12%
10 [8]	Großbritannien	IM RME	0,67	0,77	1,07	0,88	0,91	+36%
		PRIIM	2,02	1,53	1,69	1,29	1,19	-41%
11 [6]	Italien	IM RME	0,80	0,97	1,11	0,96	0,82	+3%
		PRIIM	2,19	1,93	2,01	1,73	1,61	-27%
12 [11]	Spanien	IM RME	0,38	0,55	0,73	0,62	0,59	+56%
		PRIIM	2,29	1,87	1,83	1,58	1,51	-34%
13 [15]	Australien	IM RME	0,20	0,24	0,39	0,47	0,59	+195%
		PRIIM	2,65	2,25	2,34	2,02	2,22	-16%
14 [12]	Brasilien	PRB	0,24	0,24	0,27	0,45	0,56	+131%
		PRI	2,39	2,13	2,18	1,86	1,94	-19%
15 [14]	Russland	PRB	0,23	0,21	0,31	0,44	0,54	+136%
		PRI	2,85	2,77	1,73	1,47	1,40	-51%

IM RME = Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) in Milliarden Tonnen

PRIIM = Primär-Rohstoffintensität der Importe von Waren und Dienstleistungen in kg je 2010 US-\$

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 15 zeigt, dass Deutschland nach unseren Abschätzungen mit einem Primär-Rohstoffbedarf von 2,2 Milliarden Tonnen in 2015 wie schon bei den Exporten deutlich hinter China (6,6 Mrd. Tonnen) und den USA (3,9 Mrd. Tonnen) rangiert. Aber auch Japan weist nunmehr mit 2,3 Mrd. Tonnen in 2015 einen leicht höheren Primär-Rohstoffbedarf für Importe als Deutschland auf, obwohl Japan gleichzeitig deutlich weniger Waren und Dienstleistungen (bewertet in konstanten 2010 USD) als Deutschland importiert hat.

Betrachten wir die Dynamik des Primär-Rohstoffbedarfs für Importe im Zeitraum von 1995 bis 2015, so zeigt sich auch hier China mit Abstand als dasjenige Land mit dem größten Wachstum (+1202%). Aber auch für Indien (+351%), Australien (+195%) und die Region „Rest der Welt“ (+192%) werden enorm hohe Zuwächse abgeschätzt.

Werden die Abschätzungen zum Primär-Rohstoffbedarf für Importe (Importe in RME) in Relation zu den Beobachtungen zur Entwicklung der Importe von Waren und Dienstleistungen in konstanten 2010 USD betrachtet, lassen sich Niveau und Dynamik der Primär-Rohstoffintensität der Importe in den ausgewählten Ländern analysieren. Es zeigt sich, dass Deutschland mit einem Primär-Rohstoffbedarf von 1,53 kg je konstantem 2010 USD in 2015 weder eine ausgeprägt hohe noch eine ausgeprägt niedrige Primär-Rohstoffintensität der Importe von Waren und Dienstleistungen aufweist. Gut stellt sich Deutschland hingegen im internationalen Vergleich der im Zeitraum von 1995 bis 2015 erzielten Fortschritte im Hinblick auf eine Verringerung der Primär-Rohstoffintensität der Importe dar. Mit einem Rückgang um 44% wird Deutschland lediglich von Russland (-51%) überboten.

### **3.2.2.1 Detailanalysen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME)**

In Analogie zur vorherigen Darstellungsweise präsentiert Abbildung 51 Abschätzungsergebnisse der Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitätseffekte zur Entwicklung der deutschen Exporte von Waren und Dienstleistungen. Insgesamt ist der Primär-Rohstoffbedarf der Exporte zwischen 1995 und 2015 um 116% angestiegen. Die Veränderung der Struktur der deutschen Exporte hat mit -65% stärker zu einem schwächeren Wachstum des Primär-Rohstoffbedarfs beigetragen als Fortschritte im Hinblick auf eine geringere Primär-Rohstoffintensität (-31%). Wie schon beim RMC stellt sich auch im Hinblick auf die Primär-Rohstoffextraktionen für die deutschen Exporte und Importe von Waren und Dienstleistungen auch die Frage nach der Herkunft der jeweiligen Extraktionen.

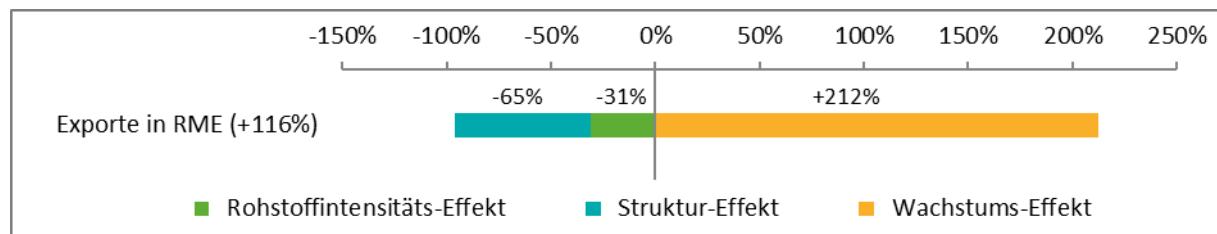
Abbildung 52 zeigt diesbezüglich zunächst für die deutschen Exporte in RME dass im Jahr 1995 mit gut 200 Mio. Tonnen etwa ein Drittel des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs durch heimische Extraktionen gedeckt wurde. Weitere 12% wurden im EU-Ausland, 18% in Australien, Kanada, Südkorea, Japan oder den USA, 16% in den BRIC-Ländern<sup>89</sup> und 22% in der übrigen Welt extrahiert. Wie schon beim RMC kam es auch bei den Exporten in RME in den Jahren bis 2015 zu einer deutlichen Verschiebung: Insbesondere die Extraktionen in der übrigen Welt sind überproportional (von 134 Mio. Tonnen in 1995 auf 446 Mio. Tonnen in 2015) gewachsen. Aber auch die Extraktionen in BRIC-Ländern haben sich mehr als verdoppelt (von 100 Mio. Tonnen in 1995 auf 238 Mio. Tonnen in 2015). Insgesamt hat sich der Anteil des Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte, der durch heimische Extraktionen gedeckt wird bis 2015 auf 28% reduziert.

In einem weiteren Schritt stellt sich die Frage, welche Waren und Dienstleistungen für Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte verantwortlich zeichnen und wie sich bei diesen Waren und Dienstleistungen die Primär-Rohstoffintensität entwickelt hat (siehe Tabelle 16). Es zeigt sich, dass gut 22% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte von Waren und Dienstleistungen auf die Exporte von „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnisse“ entfallen. Auf den Plätzen zwei bis vier folgen die klassischen deutschen Exportgüter „Fahrzeuge“, „Chemische Erzeugnisse“ und „Maschinen“ auf die zusammen ein weiteres Drittel des gesamten deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte entfallen. Die deutlichsten Fortschritte in Richtung einer verringerten Primär-Rohstoffintensität bei den deutschen Exporten werden für die „Chemischen Erzeugnisse“ abgeschätzt. Weitere Detailergebnisse können der Tabelle 16 entnommen werden.

---

<sup>89</sup> Brasilien, Russland, Indien, China

Abbildung 51: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME), 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 16: Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

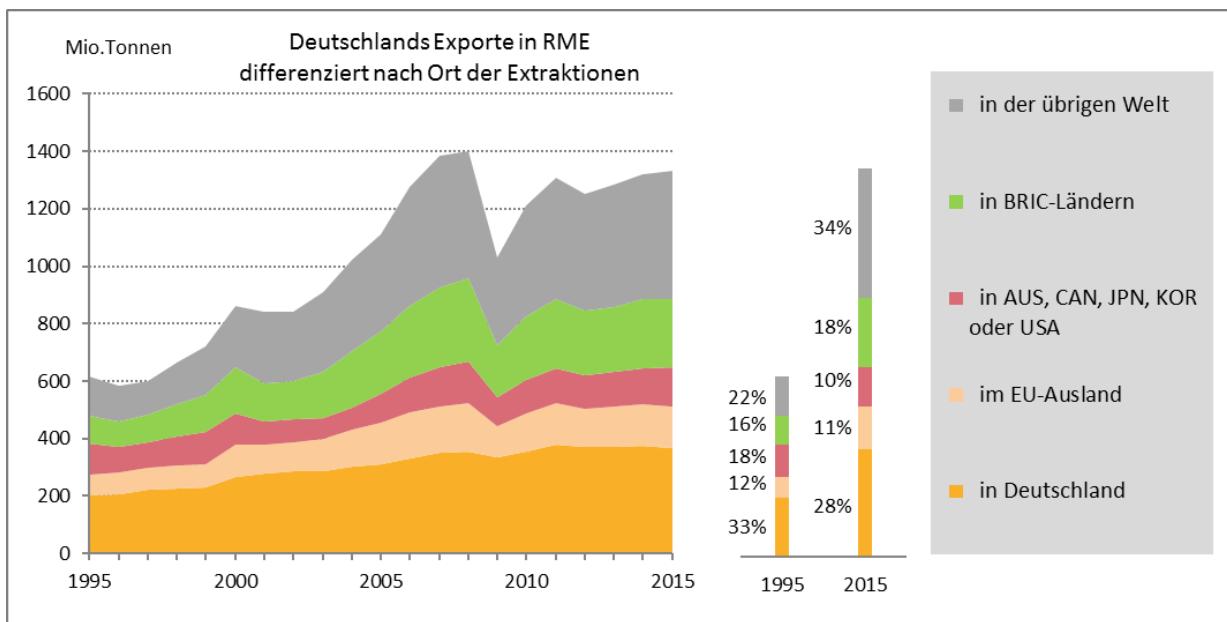
Rang 2015 [Rang 1995]	Exporte von Produktgruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	EX RME PRIEX	141 3,15	171 2,71	230 2,94	261 2,70	295 2,40	+109% -24%
2 [2]	Fahrzeuge [DM]	EX RME PRIEX	85 1,09	130 0,97	167 0,93	150 0,83	187 0,80	+121% -26%
3 [4]	Maschinen [DK]	EX RME PRIEX	61 0,91	70 0,79	93 0,80	106 0,77	119 0,70	+96% -23%
4 [3]	Chemische Erzeugnisse [DG]	EX RME PRIEX	64 1,23	86 1,13	109 1,05	110 0,79	117 0,68	+83% -45%
5 [6]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	EX RME PRIEX	45 2,44	60 2,23	73 2,05	113 2,03	113 1,79	+150% -27%
6 [5]	Büromaschinen, DV-Geräte, E- Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	EX RME PRIEX	46 0,77	63 0,68	80 0,68	85 0,64	100 0,63	+119% -19%
7 [7]	Erze, Steine u. Erden [CB]	EX RME PRIEX	29 55,2	43 75,5	48 44,0	72 44,0	68 42,3	+136% -23%
8 [8]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	EX RME PRIEX	23 8,18	38 8,24	43 7,16	49 5,89	53 5,60	+128% -32%
9 [13]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	EX RME PRIEX	12 12,4	20 15,1	21 17,0	36 14,1	39 15,8	+216% +28%
10 [9]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	EX RME PRIEX	20 3,69	32 3,86	41 3,90	38 3,54	38 3,01	+90% -19%
	Sonstige Waren und Dienstleis- tungen	EX RME PRIEX	89 0,94	149 0,96	205 0,93	190 0,63	199 0,53	+125% -43%
Insgesamt		EX RME PRIEX	615 1,45	862 1,32	1109 1,28	1210 1,13	1330 1,00	+116% -31%

EX RME = Primär-Rohstoffbedarf für Exporte (Exporte in RME) in Mio. t

PRIEX = Primär-Rohstoffintensität der Exporte in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Abbildung 52: Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME), 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Im Anhang in den Tabellen 54 bis 57 finden sich weitere Auswertungen, welche dieselbe Fragestellung, jedoch aus der Perspektive einzelner Materialkategorien (Biomasse, fossile Energieträger, Mineralien, Metalle). Die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Analysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Gut 60% des Primär-Rohstoffbedarfs Biomasse der deutschen Exporte von Waren und Dienstleistungen entfallen auf die Exporte von „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ und „Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“. Trotz erzielter Fortschritte im Hinblick auf die Primär-Rohstoffintensität Biomasse der Exporte dieser Waren hat sich der Primär-Rohstoffbedarf Biomasse im Zeitraum von 1995 bis 2015 um 159% bzw. 136% erhöht.
- Die Rangliste der Waren und Dienstleistungen, welche am meisten zum Primär-Rohstoffbedarf fossile Energieträger der deutschen Exporte beitragen, wird angeführt von „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnisse“ gefolgt von „Fahrzeugen“ und „chemischen Erzeugnissen“. Auf diese drei Warengruppen entfallen mehr als 40% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs fossile Energieträger der deutschen Exporte. Insbesondere bei den „chemischen Erzeugnissen“ konnten nach unseren Analysen in den Jahren 1995 bis 2015 überdurchschnittliche Fortschritte in Richtung einer geringeren Primär-Rohstoffintensität fossile Energieträger der Exporte erzielt werden.
- Beim Primär-Rohstoffbedarf Mineralien der deutschen Exporte entfallen lediglich gut 20% auf die direkten Exporte von unverarbeiteten Steinen und Erden. Knapp die Hälfte entfällt hingegen auf die Exporte von „chemischen Erzeugnissen“, „Fahrzeugen“, „Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden“ und „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnissen“.
- Die Rangliste der im Hinblick auf den Primär-Rohstoffbedarf Metallerze der deutschen Exporte wichtigsten Waren und Dienstleistungen wird deutlich angeführt von den „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnissen“. Allein auf die Exporte dieser Gütergruppe entfallen knapp 50% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs Metallerze der deutschen Exporte. Auf den weiteren Rängen folgen die Exporte von „Fahrzeugen“ und „Maschinen“. In diesen drei Gütergruppen konnten jeweils lediglich moderate Fortschritte in einer Größenordnung von etwa 1% p.a. in Richtung einer geringeren Primär-Rohstoffintensität Metallerze erzielt werden.

### 3.2.2.2 Detailanalysen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME)

Im Kontext des Primärrohstoffbedarfs für Deutschlands Importe wird zunächst wieder danach gefragt, inwiefern Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitätseffekte für den beobachteten Anstieg von 1995 bis 2015 um 47% bei den Importen verantwortlich zeichneten.

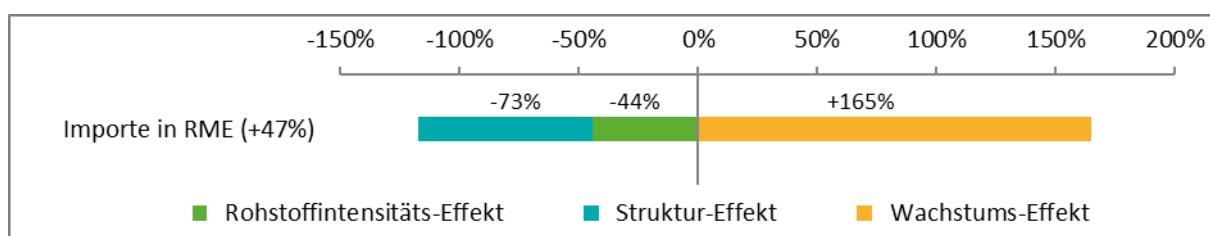
Abbildung 53 zeigt, dass bei den deutschen Importen stärkere Struktureffekte (-73%) und Primär-Rohstoffintensitätseffekte (-44%) sowie ein schwächerer Wachstumseffekt (+165%) als bei den deutschen Exporten zu beobachten waren, so dass der Primär-Rohstoffbedarf für die deutschen Importe „nur“ um 47% zugenommen hat.

Nicht nur im Hinblick auf Konsum, Investitionen und Exporte ermöglicht die in SimRess angewandte Methodik eine Analyse der Provenienz der direkt und indirekt enthaltenen Primär-Rohstoffe. Selbige Fragestellung kann auch, wie in Abbildung 54 dargestellt, für die deutschen Importe von Waren und Dienstleistungen analysiert werden. Erwartungsgemäß fallen die heimischen Extraktionen kaum ins Gewicht. Hierbei handelt es sich um Primär-Rohstoffextraktionen in Deutschland, die zunächst exportiert werden und dann in weiterverarbeiteter Form wieder nach Deutschland importiert werden. Die Abbildung zeigt darüber hinaus, dass mehr als die Hälfte aller Primär-Rohstoffextraktionen für die deutschen Importe in der übrigen Welt oder in den BRIC-Ländern stattfanden. Besonders deutlich gestiegen sind die Extraktionen in der übrigen Welt für die deutschen Importe (von knapp 500 Mio. Tonnen in 1995 auf über 900 Mio. Tonnen in 2015). Während in 1995 noch knapp 40% der Extraktionen aus dem EU-Ausland oder den fünf angeführten OECD-Ländern stammten hat sich dieser Anteil bis 2015 auf etwas mehr als ein Viertel reduziert.

In einem letzten Schritt stellen wir wieder die Frage danach, welche Waren und Dienstleistungen für Niveau und Dynamik der deutschen Importe in RME verantwortlich zeichnen und wie sich bei diesen Waren und Dienstleistungen die Primär-Rohstoffintensität entwickelt hat (siehe Tabelle 17). Es zeigt sich, dass auch bei den Importen die „Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnisse“ den höchsten Primär-Rohstoffbedarf aufweisen. Im Gegensatz zu den Exporten entfallen auf diese Gütergruppe jedoch nur 14% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs der Importe. Nahezu gleich wichtig für Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe erweisen sich die Importe von „Fahrzeugen“, „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“, „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“, „Maschinen“. Auf die fünf wichtigsten Waren und Dienstleistungen entfällt mehr als die Hälfte des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs für Importe. Interessant ist zudem ein Vergleich der Abschätzungsergebnisse für Primär-Rohstoffintensitäten der Importe und Exporte (siehe Tabelle 15). So zeigt sich beispielsweise, dass die Primär-Rohstoffintensität der importierten „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ im Jahr 2015 mit 3,05 kg je konstantem 2010 € fast doppelt so hoch wie diejenige der (in Deutschland produzierten) Exporte entsprechender Waren (1,75 kg) war. Weitere Detailergebnisse können wiederum der Tabelle 17 entnommen werden.

Die ergänzenden Tabellen 58 bis 61 im Anhang analysieren dieselbe Fragestellung aus der Perspektive einzelner Materialkategorien (Biomasse, fossile Energieträger, Mineralien, Metallerze). Die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Analysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Abbildung 53: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs der Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME), 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

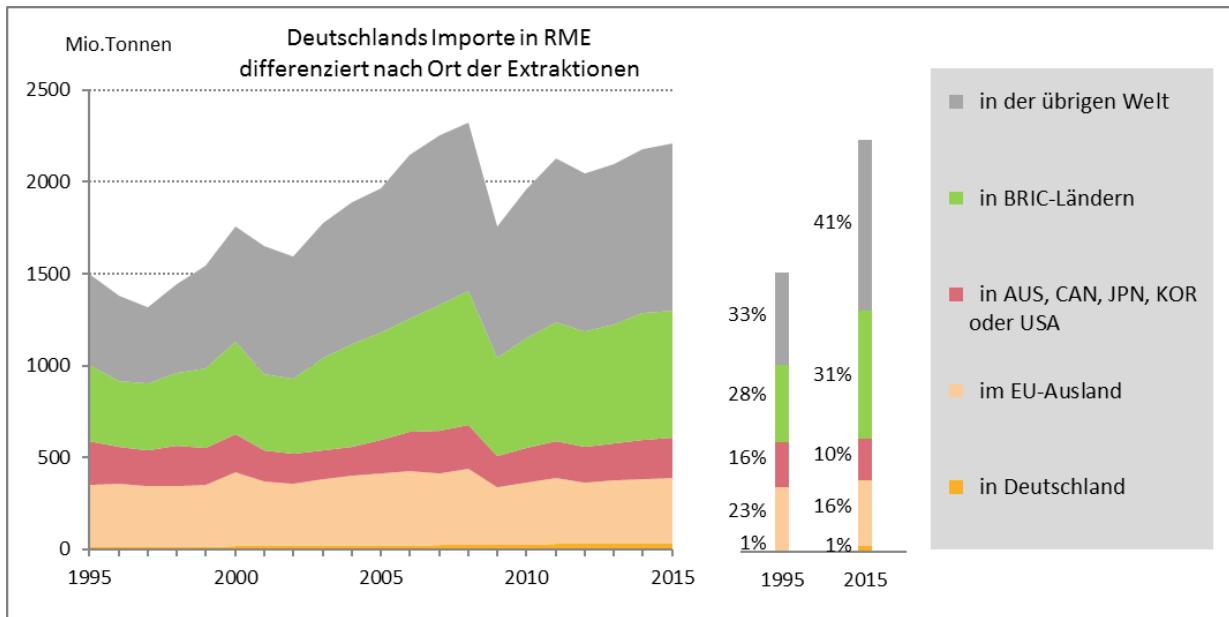
Tabelle 17: Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Importe von Produktgruppe ...	IM RME PRIIM	1995 3,79	2000 3,17	2005 3,59	2010 2,97	2015 2,71	Δ +102% -29%
1 [2]	Metalle u. Halbzeug dar- aus, Metallerz. [DJ]	IM RME PRIIM	153 3,79	179 3,17	236 3,59	258 2,97	309 2,71	+94% -45%
2 [4]	Fahrzeuge [DM]	IM RME PRIIM	141 3,47	189 2,72	243 2,57	230 1,97	274 1,91	+178% +5%
3 [7]	Büromaschinen, DV-Ge- räte, E-Technik, Feinme- chanik u. Optik [DL]	IM RME PRIIM	84 1,45	103 1,00	120 1,05	152 1,27	234 1,52	+28% -60%
4 [1]	Nahrungs- und Futtermit- tel, Getränke, Tabakerz. [DA]	IM RME PRIIM	172 8,21	182 6,27	194 5,95	217 4,06	221 3,25	+85% -47%
5 [5]	Maschinen [DK]	IM RME PRIIM	106 4,58	121 3,46	149 3,30	165 2,53	196 2,41	+94% -32%
6 [9]	Chemische Erzeugnisse [DG]	IM RME PRIIM	78 2,32	104 2,13	133 1,92	138 1,59	152 1,57	+29% -27%
7 [3]	Bauarbeiten [F]	IM RME PRIIM	144 38,5	141 34,0	116 36,1	100 31,5	102 28,1	+18% -58%
8 [6]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	IM RME PRIIM	85 8,65	165 8,17	163 8,20	98 3,61	101 3,62	+2% -44%
9 [8]	Erz. der Land- und Forst- wirts. [A]	IM RME PRIIM	79 5,93	80 5,04	86 5,16	84 3,52	80 3,32	+48% -51%
10 [12]	Möbel, Schmuck, Musikin- str., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	IM RME PRIIM	43 4,23	43 3,00	44 2,85	56 2,20	64 2,07	+47% -44%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	IM RME PRIIM	415 2,67	452 2,08	483 1,93	459 1,60	479 1,40	+15% -47%
Insgesamt		IM RME PRIIM	1501 3,66	1760 2,87	1967 2,70	1959 2,19	2212 2,04	+47% -44%

IM RME = Primär-Rohstoffbedarf für Importe (Importe in RME) in Mio. t  
PRIIM = Primär-Rohstoffintensität der Importe in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Abbildung 54: Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf der Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME), 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- Mehr als die Hälfte des Primär-Rohstoffbedarfs Biomasse der deutschen Importe von Waren und Dienstleistungen entfallen auf die Importe von „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ und „Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“. Gleichzeitig erweist sich Biomasse als diejenige Materialkategorie bei der im Zeitraum 1995 bis 2015 die höchsten Fortschritte bei der Primär-Rohstoffintensität der Importe erzielt werden konnten (-51%).
- Die Rangliste der Waren und Dienstleistungen, welche am meisten zum Primär-Rohstoffbedarf fossile Energieträger der deutschen Importe von Waren und Dienstleistungen beitragen, wird erwartungsgemäß angeführt von den „Kokereierzeugnissen, Mineralölerzeugnissen, Spalt- u. Bruststoffen“. Dicht auf folgen jedoch fünf Warengruppen des Verarbeitenden Gewerbes („Fahrzeuge“, „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“, „Chemische Erzeugnisse“, „Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnissen“ und „Maschinen“), in deren Produktion indirekt ebenfalls fossile Energieträger in nicht unerheblichem Maße eingeflossen sind. Auf diese fünf Warengruppen entfallen mehr als 40% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs fossile Energieträger der deutschen Importe.
- Beim Primär-Rohstoffbedarf Mineralien der deutschen Importe entfallen fast 40% auf die Importe drei wichtigsten Gütergruppen: „Chemische Erzeugnisse“, „Fahrzeuge“ und „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“. Für diese Importgüter waren im Zeitraum 1995 bis 2015 nur geringe Fortschritte bzw. sogar ein Anstieg („Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“) der Primär-Rohstoffintensität Mineralien zu beobachten, so dass sich der Primär-Rohstoffbedarf Mineralien teils mehr als verdreifacht hat.

Die Rangliste der im Hinblick auf den Primär-Rohstoffbedarf Metallerze der deutschen Importe wichtigsten Waren und Dienstleistungen wird wie bei den Exporten deutlich angeführt von den „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnissen“. Allein auf die Importe dieser Gütergruppe entfällt knapp ein Drittel des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs Metallerze der deutschen Importe. Auf den weiteren Rängen folgen die Importe von „Fahrzeugen“, von „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“ und von „Maschinen“. Gleichzeitig erweisen sich Metallerze als diejenige Materialkategorie bei der im Zeitraum 1995 bis 2015 die geringsten Fortschritte bei der Primär-Rohstoffintensität der Importe erzielt werden konnten (-37%).

### 3.2.3 Wieviel Primär-Rohstoffe wurden in Deutschland eingesetzt? – Abschätzungsergebnisse für den RMI und die Gesamtstoffproduktivität

Kombinieren wir die Abschätzungsergebnisse zum Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen im Inland (RMC) mit denjenigen zum Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) so lässt sich der gesamte Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) analysieren (RMI = RMC + Exporte in RME). Zudem ist der Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) Basis für die Ermittlung der Gesamtstoffproduktivität ((BIP + Importe von Waren und Dienstleistungen) / RMI).

#### Wie unterscheiden sich die Abschätzungsergebnisse von denjenigen in der UGR?

Nachstehende Abbildung 55 zeigt zunächst in den oberen beiden Diagrammen einen Vergleich der Werte für den deutschen DMI und RMI im Jahr 2011 gemäß amtlicher Statistik. Es zeigt sich, dass insbesondere bei den Metallerzen deutliche Niveaunterschiede durch die amtliche Statistik abgeschätzt werden, je nachdem ob die international gehandelten Waren und Dienstleistungen mit dem Gewicht beim Grenzübergang (DMI-Konzept) oder der Primär-Rohstoffbedarf mit der in Kaumanns und Lauber (2016) dokumentierten Methodik abgeschätzt wird.

Im unteren Teil der Abbildung werden die Ergebnisse der amtlichen Statistik mit den eigenen Abschätzungsergebnissen kontrastiert. Es zeigt sich, dass sich für das Jahr 2011 auf Grundlage der in SimRess angewandten Abschätzungsmethode ein um knapp 15% höherer RMI Deutschlands ergibt. Für Biomasse, fossile Energieträger und Mineralien ergeben sich höhere Primär-Rohstoffeinsätze in Deutschland, wohingegen die Abschätzungsergebnisse der GWS im SimRess-Projekt für den RMI Metallerze mit 620 Mio. Tonnen niedriger als in der amtlichen Statistik (807 Mio. Tonnen) ausfallen.

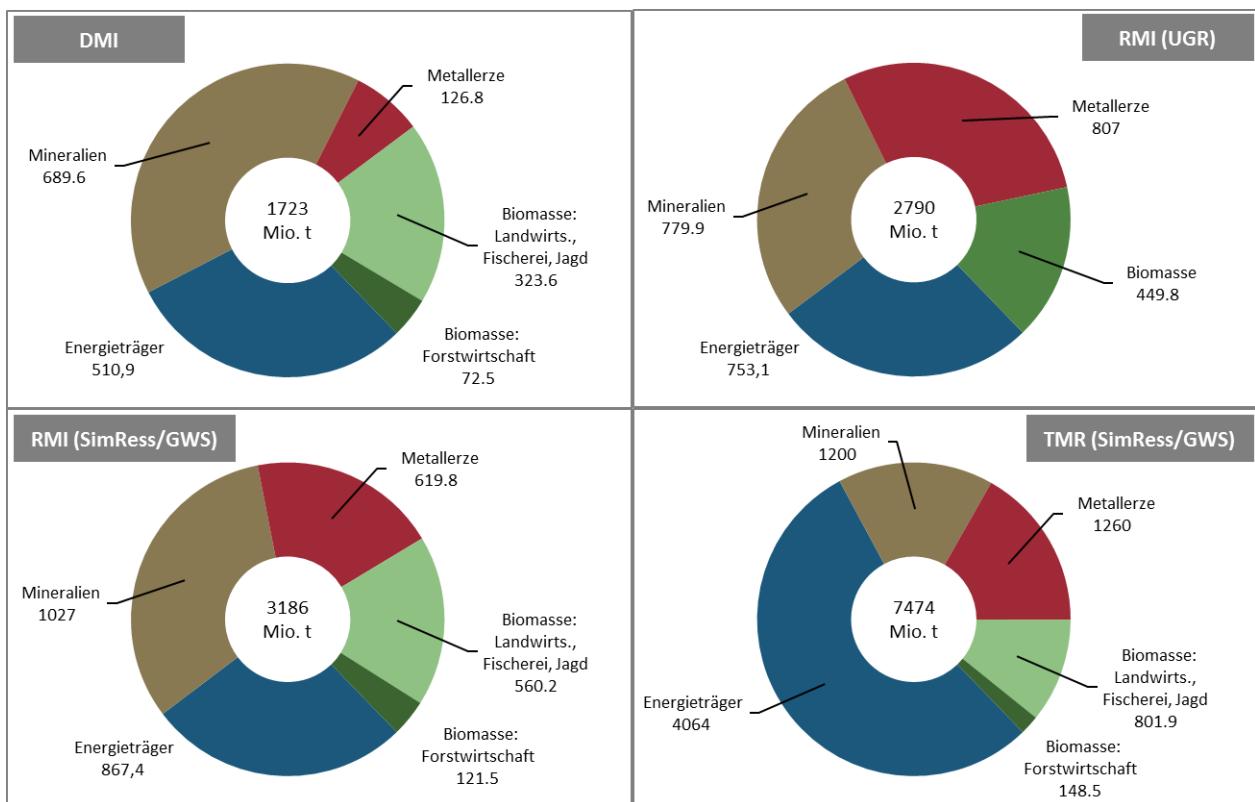
Ein Vergleich der Abschätzungsergebnisse für den deutschen RMI und TMR des Jahres 2011 zeigt, dass sich (wie schon beim Vergleich von RMC und TMC) das absolute Volumen bei zusätzlicher Berücksichtigung der ungenutzten Entnahmen deutlich erhöht, nämlich von 3,2 Mrd. Tonnen auf 7,5 Mrd. Tonnen. Gleichzeitig zeigt sich aber auch eine deutliche Verschiebung der Beiträge der verschiedenen Materialkategorien: den fossilen Energieträgern kommt im TMR-Konzept eine deutlich höhere Bedeutung zu, als im RMI-Konzept.

Doch nicht nur im Hinblick auf das Niveau und die Zusammensetzung des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes (RMI) ergeben sich Unterschiede zwischen den Abschätzungsergebnissen in den UGR und denjenigen der GWS im SimRess-Projekt. Abbildung 56 zeigt, dass sich laut UGR der deutsche RMI im Zeitraum von 2000 bis 2011 um 129 Mio. Tonnen bzw. 4,8% erhöht hat. Unsere Abschätzungsergebnisse kommen zu einem deutlich höheren absoluten Zuwachs (+218 Mio. Tonnen), was einem Anstieg um 7,3% entspricht.

Von einer absoluten Entkopplung des Primär-Rohstoffeinsatzes und der wirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland kann auf Grundlage dieser Zahlen nicht die Rede sein. Dies gilt sehr wohl jedoch für eine relative Entkopplung wie die folgenden beiden Abbildungen verdeutlichen. Abbildung 57 veranschaulicht die Entwicklung der Primär-Rohstoffintensität der gesamten letzten Verwendung in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2015.<sup>90</sup> Es zeigt sich, dass sich diese Intensität nach unseren Abschätzungen von 1,1 kg je 2010€ in 1995 auf 0,83 kg je 2010€ in 2015 deutlich verringert hat, wobei jedoch ein Großteil dieses Rückgangs bereits in den 90er Jahren stattgefunden hat. Die Abschätzungen der UGR führen in den Jahren 2000 bis 2011 zu einer ähnlichen Dynamik, jedoch auf einem niedrigeren Niveau.

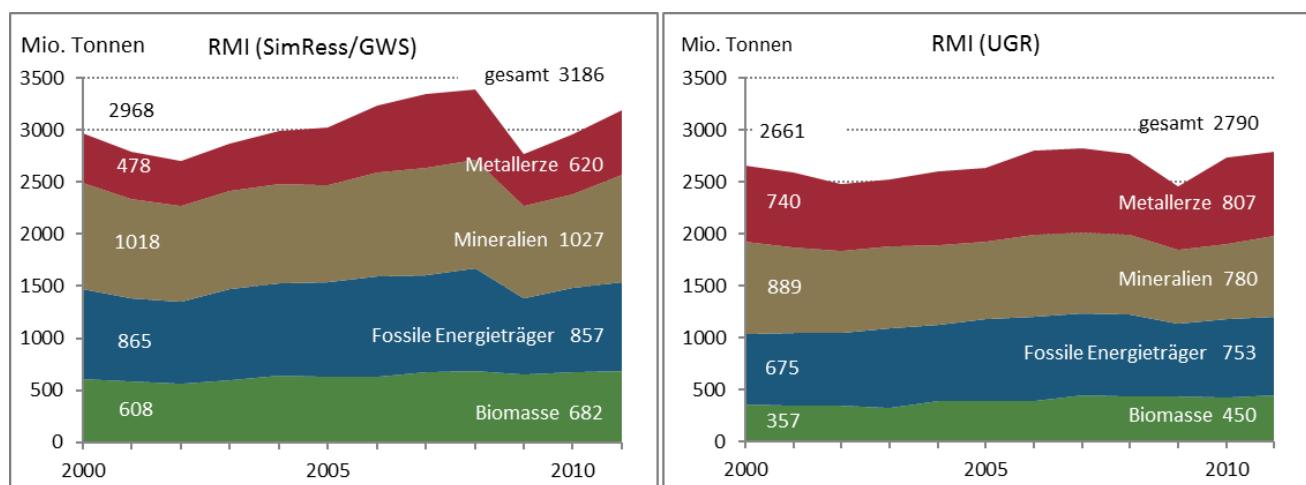
<sup>90</sup> Die Primär-Rohstoffintensität der gesamten letzten Verwendung ist der Quotient aus dem Primärrohstoffeinsatz (RMI) und der gesamten letzten Verwendung (Konsumausgaben im Inland + Bruttoinvestitionen + Exporte von Waren und Dienstleistungen = Bruttoinlandsprodukt + Importe von Waren und Dienstleistungen) und gibt an wieviel Primärrohstoffe je monetärer Einheit an Konsumausgaben im Inland, Bruttoinvestitionen und Exporten von Waren und Dienstleistungen (in 2010 Preisen) global extrahiert wurden. Die Primär-Rohstoffintensität der gesamten letzten Verwendung ist somit der Kehrwert der Gesamtstoffproduktivität, jedoch nicht ausgedrückt als Indexwert.

Abbildung 55: Abschätzungsergebnisse für Deutschlands DMI, RMI und TMR im Jahr 2011 im Vergleich



Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: Umweltbundesamt 2016 & eigene Berechnungen

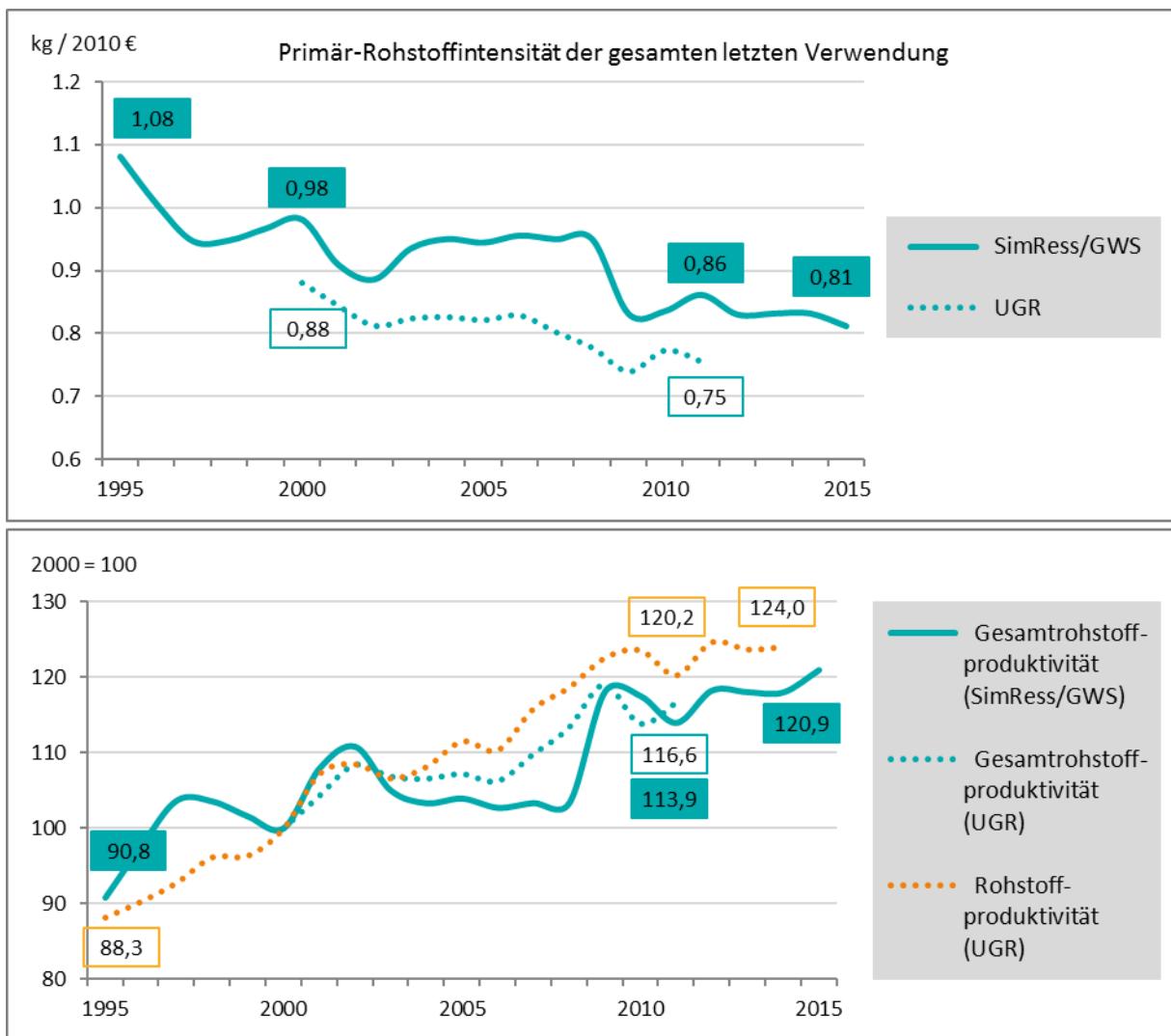
Abbildung 56: Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes (RMI), 2000 - 2011



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Diese Niveau-Unterschiede sind bei einer Darstellung der Gesamtrohstoffproduktivität nicht mehr sichtbar, wie die untere Grafik in Abbildung 57 veranschaulicht. Doch wie sind die Abschätzungsergebnisse zu Niveau und Dynamik des Primär-Rohstoffeinsatzes einzuordnen? Ist ein Anstieg der Gesamtrohstoffproduktivität um gut 20% seit 2000 viel oder wenig? Neben einem Abgleich mit entsprechenden Zielwerten aus dem ressourcenpolitischen Diskurs können im Hinblick auf diese Fragen insbesondere auch internationale Vergleiche hilfreich sein, denen wir uns im nächsten Abschnitt widmen.

Abbildung 57: Deutschlands Primär-Rohstoffintensität der gesamten letzten Verwendung und Deutschlands Gesamtrohstoffproduktivität, 1995 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

### Wie stellt sich der Primär-Rohstoffeinsatz Deutschlands im internationalen Vergleich dar?

Als besonders aufschlussreich für eine Einordnung der RMI-Werte für Deutschland erweist sich ein internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung, also dem RMI pro monetärer Einheit von Bruttoinlandsprodukt zuzüglich Importe, gemessen in konstanten 2010 US-\$.<sup>91</sup> Wie Tabelle 18 entnommen werden kann, nimmt Deutschland in einem entsprechenden Ranking<sup>92</sup> Platz 10 ein. Zu erkennen ist auch, dass die Nachbarländer Belgien und Niederlande nahezu identische Intensitäten aufweisen. Deutlich weniger rohstoffintensiv als Deutschland sind Großbritannien, Japan, aber auch Italien und Frankreich. Auch die USA schneiden bei diesem Vergleich leicht besser ab als Deutschland. Gleichzeitig kann aber auch eine Vielzahl von Ländern mit im Vergleich zu Deutschland deutlich höheren Primär-Rohstoffintensitäten identifiziert werden. Darunter finden sich auch Industrieländer wie Kanada, Südkorea und Australien.

<sup>91</sup> S. auch Fußnote 80 auf Seite 104.

<sup>92</sup> Für das Ranking der Tabellen in diesem Abschnitt wurde die Liste der analysierten größten Länder / Regionen (gemessen am BIP im Jahr 2010) erweitert, um ein noch detaillierteres Bild insbesondere im Hinblick auf innereuropäische Vergleiche zu ermöglichen.

Tabelle 18: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Land / Region	1995	2000	2005	2010	2015
1 [5]	Großbritannien	0,76	0,64	0,62	0,48	0,42
2 [1]	Japan	0,59	0,55	0,50	0,45	0,46
3 [3]	Italien	0,64	0,68	0,66	0,57	0,49
4 [2]	Frankreich	0,62	0,61	0,58	0,51	0,50
5 [6]	Dänemark	0,77	0,67	0,69	0,55	0,52
6 [4]	Spanien	0,76	0,79	0,84	0,63	0,54
7 [7]	USA	0,80	0,76	0,71	0,59	0,58
8 [9]	Niederlande	0,82	0,73	0,68	0,63	0,60
9 [8]	Belgien	0,81	0,69	0,72	0,63	0,62
10 [10]	Deutschland	0,83	0,75	0,72	0,64	0,62
11 [13]	Schweden	0,93	0,81	0,84	0,69	0,66
12 [11]	Österreich	0,84	0,79	0,83	0,74	0,69
13 [12]	Griechenland	0,93	0,93	0,88	0,72	0,77
14 [15]	Finnland	1,37	1,28	1,20	0,93	0,89
15 [14]	Kanada	1,24	1,24	1,15	1,00	1,03
16 [20]	Südkorea	1,76	1,43	1,30	1,08	1,06
17 [16]	Mexiko	1,39	1,22	1,21	1,14	1,13
18 [21]	Polen	2,21	1,83	1,63	1,43	1,32
19 [17]	Türkei	1,49	1,40	1,31	1,36	1,36
20 [19]	Australien	1,66	1,61	1,54	1,47	1,53
21 [23]	Russland	2,52	2,28	1,89	1,64	1,64
22 [18]	Brasilien	1,61	1,62	1,69	1,79	1,78
23 [22]	Rest der Welt	2,45	2,10	2,33	2,10	1,88
24 [24]	Indien	4,59	4,20	3,42	2,86	2,62
25 [25]	China	5,67	4,42	4,15	3,68	3,22

Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung (= RMI / [BIP + Importe]) in kg je 2010 USD

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Besonders markant sind diese Befunde aber für Indien und China. In China wurden nach unseren Abschätzungen mehr als fünfmal so viel Primär-Rohstoffe für einen US-\$ letzte Verwendung (C+I+EX = BIP + IMP) benötigt wie in Deutschland. Dieses Bild relativiert sich ein Stück weit, wenn man in Betracht zieht, dass China im Vergleich zu Deutschland eine 2,2mal so hohe Kaufkraftparität des BIP aufweist. Für Indien beläuft sich dieser Unterschied lt. Weltbank auf einen Faktor 3,4.

Während sich für einen internationalen Vergleich der Niveaus des Primär-Rohstoffbedarfs eine Analyse der Primär-Rohstoffintensitäten anbietet, gilt unser nächster Blick der in Tabelle 19 ausgewiesenen Dynamik der Gesamtrohstoffproduktivität. Auch in diesem internationalen Vergleich nimmt Deutschland mit Rang 15 (von 25) keine Vorreiterrolle im Zeitraum 1995 bis 2015 ein. Der in Deutschland seit dem Jahr 2000 erzielte Produktivitätsfortschritt von 21% ist in etwa so hoch wie derjenige in Frankreich, Schweden, Niederlande, Griechenland und Kanada.

Im Ranking der Produktivitätsfortschritte finden sich auf den Plätzen 1 und 8 mit Indien und China zwei Länder relativ gut positioniert, welche in der vorhergehenden Auswertung ein sehr niedriges Produktivitätsniveau aufwiesen. Aber bereits auf Platz zwei rangiert Großbritannien, das seine Gesamtrohstoffproduktivität seit 2000 um mehr als 50% steigern konnte. Die geringsten Gesamtrohstoff-Produktivitätsfortschritte werden für Australien und die Türkei abgeschätzt. Für Brasilien ergibt sich sogar ein Rückgang der Gesamtrohstoffproduktivität seit dem Jahr 2000.

Tabelle 19: Internationaler Vergleich der Dynamik der Gesamtrohstoffproduktivität, 1995 bis 2015

Rang	Land / Region	1995	2000	2005	2010	2015
1	Indien	91,3	100,0	122,8	146,6	160,4
2	Großbritannien	84,0	100,0	104,0	134,7	151,3
3	Spanien	105,0	100,0	94,9	126,2	148,0
4	Finnland	94,0	100,0	107,1	137,3	144,6
5	Italien	106,7	100,0	103,2	120,9	139,7
6	Russland	90,4	100,0	120,6	139,4	139,0
7	Polen	83,0	100,0	112,2	127,8	138,6
8	China	78,0	100,0	106,6	120,3	137,3
9	Südkorea	81,1	100,0	109,3	131,4	134,8
10	USA	94,3	100,0	106,3	127,8	131,2
11	Dänemark	87,1	100,0	96,6	120,7	128,8
12	Frankreich	98,5	100,0	104,9	118,7	122,3
13	Schweden	87,1	100,0	96,1	118,5	122,1
14	Niederlande	89,5	100,0	107,6	116,6	121,5
15	Deutschland	90,7	100,0	103,7	117,5	120,8
16	Griechenland	99,9	100,0	104,7	129,0	120,7
17	Kanada	99,8	100,0	108,3	123,5	120,6
18	Japan	92,2	100,0	109,7	122,1	118,6
19	Österreich	94,1	100,0	95,0	106,8	114,2
20	Belgien	85,5	100,0	95,8	110,0	112,9
21	Rest der Welt	85,8	100,0	90,3	100,1	111,7
22	Mexiko	87,3	100,0	100,8	107,2	108,1
23	Australien	97,1	100,0	104,3	109,6	105,3
24	Türkei	93,6	100,0	107,1	103,1	102,9
25	Brasilien	100,3	100,0	95,8	90,5	90,8

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Der internationale Vergleich der Dynamik der Gesamtrohstoffproduktivität zeigt auf einen zweiten Blick ein Paradoxon: Auf der einen Seite weisen alle Länder/Regionen mit Ausnahme von Brasilien Zuwächse bei der Gesamtrohstoffproduktivität auf. Betrachtet man im Gegenzug die globale Rohstoffproduktivität, so ist diese – ausgedrückt als Indexwert 2000 = 100 – von 1995 bis 2015 von einem Wert von 93,2 auf einen Wert von 92,0 zurückgegangen. Dies liegt darin begründet, dass in den vergangenen zwanzig Jahren weniger rohstoffproduktive Länder und Regionen schneller gewachsen sind als die vergleichsweise rohstoffproduktiven Industrieländer.

Aus Perspektive der Ressourcenschonungspolitik kann daher festgehalten werden, dass eine ausschließliche Betrachtung von Produktivitäts-, bzw. Intensitätsmaßen keine hinreichende Orientierung zur Interpretation der Befunde internationale Vergleichsanalysen bieten. Zumindest im Rahmen multi-nationaler Politikinitiativen (wie bspw. der G7-Allianz für Ressourceneffizienz oder aber dem G20 Resource Efficiency Dialogue) erscheint es daher zukünftig notwendig, auch das absolute Niveau des Primärrohstoffverbrauchs (an dieser Stelle also den RMI) explizit in die Betrachtung mit aufzunehmen.

## Welche Produktgruppen sind wie bedeutsam für Deutschlands Primär-Rohstoffeinsatz?

Tabelle 20: Deutschlands Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) und Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung, 1995 bis 2015 – die 15 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2015	Letzte Verwendung von Pro- duktgruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ 1995 – 2015	
1	Bauarbeiten [F]	PRE	715	614	455	395	399	-44%	
		PRI	2,86	2,63	2,45	2,04	1,88	-34%	
2	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	PRE	172	199	256	274	326	90%	
		PRI	2,55	2,30	2,66	2,43	2,22	-13%	
3	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRE	301	311	311	311	310	3%	
		PRI	2,21	2,00	1,97	1,93	1,80	-19%	
4	Fahrzeuge [DM]	PRE	163	214	266	247	291	79%	
		PRI	0,98	0,88	0,88	0,79	0,79	-19%	
5	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRE	97	116	133	162	245	153%	
		PRI	0,77	0,65	0,68	0,78	0,97	27%	
6	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	PRE	168	190	196	214	219	30%	
		PRI	6,86	6,53	6,37	5,14	5,05	-26%	
7	Maschinen [DK]	PRE	121	135	160	175	205	69%	
		PRI	0,94	0,83	0,87	0,84	0,85	-9%	
8	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRE	106	132	166	166	181	70%	
		PRI	1,23	1,16	1,16	0,90	0,83	-33%	
9	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	PRE	111	179	178	112	113	2%	
		PRI	3,39	3,88	3,43	2,31	2,29	-32%	
10	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	PRE	126	110	128	102	98	-22%	
		PRI	6,55	7,07	7,64	8,84	10,81	65%	
11	Erz. der Energie- und Wasserversorgung [E]	PRE	89	75	98	93	93	5%	
		PRI	2,46	1,93	1,99	1,91	1,89	-23%	
12	Erze, Steine u. Erden [CB]	PRE	32	49	54	80	75	135%	
		PRI	55,1	75,9	44,6	45,0	43,4	-21%	
13	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	PRE	51	49	50	60	67	32%	
		PRI	1,14	0,97	1,05	1,16	1,22	7%	
14	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	PRE	56	58	57	62	62	11%	
		PRI	0,32	0,31	0,32	0,31	0,30	-6%	
15	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	PRE	47	62	69	62	60	28%	
		PRI	3,88	4,00	4,14	3,81	3,31	-15%	
Sonstige Waren und Dienstleistungen		PRE	455	475	450	441	462	1%	
		PRI	0,37	0,33	0,30	0,26	0,25	-31%	
Insgesamt		PRE	2810	2968	3028	2955	3207	14%	
		PRI	1,10	1,00	0,96	0,85	0,83	-25%	

PRE = Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) in Mio. t  
tät in kg je 2010€

PRI = Primär-Rohstoffintensi-

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Eine detailliertere Übersicht zu wesentlichen Triebfedern der Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes kann Tabelle 20 entnommen werden. Die (in Analogie zu vorherigen Ergebnisdarstellungen) vorgenommenen Zuordnungen des deutschen RMI zu den jeweils ausgewiesenen Gütergruppen sowie entsprechende Berechnungen der Primär-Rohstoffintensitäten veranschaulichen, welche Kategorien der letzten

Verwendung die Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes in den vergangenen zwanzig Jahren deutlich geprägt haben. Dabei kann jeweils der Niveau-Effekt (also die Entwicklung des individuellen RMI der betrachteten Gütergruppe, in den Tabellen mit PRE bezeichnet) vom Intensitäts-Effekt (PRI) unterschieden werden.

So wird bspw. deutlich, dass der Primär-Rohstoffeinsatz für inländische Bauarbeiten von 1995 bis 2015 in Deutschland um 44% reduziert wurde. Während der absolute Primär-Rohstoffeinsatz für Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse im selben Zeitraum nahezu konstant blieb, wurde die für inländische Bauarbeiten ausgewiesene Reduktion des deutschen RMI allerdings im gleichen Zeitraum bereits durch Steigerungen des Primär-Rohstoffeinsatzes zur Bedienung der Endnachfrage nach Metallen und Metallerzeugnissen, Fahrzeuge sowie Büromaschinen etc. überkompensiert. Prozentual sind dabei die deutlichsten Steigerungen der zuletzt angesprochenen Gütergruppe Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik und Optik zuzuordnen, für welche auch ein Anstieg der Primär-Rohstoffintensität um 27% ausgewiesen wird.

## 4 Ausblick 2050 – Die Referenzszenarien und Potenzialanalysen

### 4.1 Parametrisierte Referenzszenarien: Narrative und Umsetzung im Modellrahmen

#### 4.1.1 Einleitende Vorbemerkungen

Auch im SimRess-Projekt wurden die quantitativen Parametrisierungen des Modells GINFORS3 in Korrespondenz zu parallel erarbeiteten qualitativen Umfeldszenarien (Bergmann und Lehr 2015) vorgenommen. Die im Rahmen des Forschungsprojekts PolRess (FKZ: 3711 93 103) entwickelten Szenarien beschreiben „alternative Zukünfte, indem sie mögliche zukünftige Entwicklungen in den für die Ressourcenpolitik wichtigen Dimensionen zu konsistenten, also widerspruchsfreien, Zukunftsbildern verdichten“ (Bergmann und Lehr 2015; S. 5). Wie Design-Simulationen haben sie keinen prognostischen Anspruch. Stattdessen werden plausible Beschreibungen alternativer zukünftiger Entwicklungen unter konsistenter Abbildung des Zusammenspiels ausgewählter relevanter Einflussfaktoren angestrebt. Hierdurch wird ein klar definierter Analyserahmen errichtet, welcher das Denken in alternativen Zukünften systematisiert. Dies erleichtert die Entwicklung strategischer Handlungsoptionen und deren umfassender Evaluation unter expliziter Berücksichtigung zukünftiger Unsicherheiten.

Im Rahmen einer mehrtägigen partizipativen Workshop-Reihe wurden im Projekt PolRess von den Workshop-Teilnehmern (u.a.) die beiden Szenarien „Fortschreitende Industrialisierung“ sowie „Starke Innovation“ erarbeitet. Da gemäß Bergmann und Lehr (2015) beide Szenarien von den Workshop-Teilnehmern als die wahrscheinlichsten und wünschenswertesten eingeschätzt wurden, seien deren wesentlichen qualitativen Merkmale an dieser Stelle kurz zusammengefasst: Im Szenario „Fortschreitende Industrialisierung“ werden Entwicklungen und Trends der jüngeren Vergangenheit unter Ausblendung potenzieller Krisen bzw. umfassender Strukturbrüche weiter fortentwickelt. Im Vergleich zu diesem relativ strukturkonstanten Szenario ist die zukünftige globale Entwicklung im Szenario „Starke Innovation“ wesentlich umfassender durch innovative Transformationspfade gekennzeichnet. So wird in diesem Szenario (u.a.) davon ausgegangen, dass der Energiebedarf in Deutschland im Jahr 2050 ausschließlich durch erneuerbare Energien abgedeckt wird.

Da beide Szenarien von den Workshop-Teilnehmern als die wahrscheinlichsten angesehen wurden, dienten sie im SimRess-Projekt bei der Parametrisierung quantitativer Umfeldszenarien im Modell GINFORS3 als Referenz. Im Verlauf vorbereitender inhaltlicher Analysen der jeweiligen Szenarien war dabei die Frage zu erörtern, in welchem Umfang die narrativen Beschreibungen der jeweiligen Szenarien in der Parametrisierung Berücksichtigung finden sollten. Als grundsätzlich herausfordernd ist dabei die Tatsache anzusehen, dass qualitative Szenarien jeweils in ihrem eigenen Kontext zu interpretieren sind. Die resultierenden Szenario-Formulierungen reflektieren mentale Modellkonzeptionen, welche zunächst in keinerlei Bezug zu existierenden quantitativen Simulationsmodellen stehen. Innerhalb dieses, den weiteren Verlauf der Workshop-Diskussionen prägenden konzeptionellen Rahmens wird zudem nicht ausschließlich wertfreies Expertenwissen der an der Szenario-Formulierung beteiligten Akteure gebündelt. Um einen möglichst umfassenden Szenarien-Zukunftsraum abzubilden, ist es vielmehr mitunter notwendig, die jeweiligen Szenario-Formulierungen auch auf normativen Vorgaben basieren zu lassen. Im Detail sind damit zwei Fragestellungen bezüglich des Zusammenspiels von qualitativen Umfeldszenarien mit quantitativen Umfeld-Parametrisierungen angesprochen: Wie soll mit qualitativen Szenario-Elementen umgegangen werden, welche von einem quantitativen Simulationsmodell nicht endogen abgebildet werden? Und wie soll mit qualitativen Szenario-Beschreibungen umgegangen werden, wenn diese im Widerspruch zu quantitativen Simulationsergebnissen stehen?

Die letztgenannte Frage verweist auf einen grundsätzlichen wissenschaftstheoretischen Themenkomplex und lässt sich in unserem Fall folgendermaßen konkretisieren: In welcher Beziehung stehen die numerischen Ergebnisse eines Simulationsmodells, welches vor Hintergrund eines positiven Wissenschaftsver-

ständnisses (Popper 1994) entwickelt wurde, zu Umfeldszenarien, welche „eine Sammlung möglicher Ausprägungen der Zukunft dar[stellen], [...] allerdings keinen Wahrheitsanspruch [erheben]“ (Bergmann und Lehr 2015; S. 6)? Ein Design-Modell wie GINFORS3 kann selbstverständlich so parametrisiert werden, dass es die narrativen Vorgaben eines qualitativen Szenarios umfassend nachzeichnet. Eine solche Vorgehensweise verhindert dann allerdings jegliche Abschätzungen im Hinblick auf die empirische Kohärenz und erschwert zumindest die inhaltliche Prüfung der Konsistenz der übernommenen Narrative. Im Vergleich hierzu bietet der ergebnisoffene Vergleich konsistenter Modellprojektionen mit stilisierten Fakten qualitativer Szenarien umfassende Gelegenheiten zum zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Wenn zudem wie im Fall von GINFORS3 die Strukturen des Simulationsmodells unter Beachtung eines positiven Wissenschaftsverständnisses auf Basis empirischer Beobachtungen entwickelt wurden, kann solch ein Vergleich als umfassender Test der den Umfeldszenarien zugrundeliegenden mentalen Modellkonzepte interpretiert werden. Hierzu sei noch einmal darauf hingewiesen, dass jedes dynamische Modell auf Grundlage von „business as usual“-Hypothesen eigenständig eindeutige und in ihren strukturellen Interdependenzen konsistente Entwicklungspfade generiert. Auch sämtliche im Modell GINFORS3 implementierten Referenz-Szenarien zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine sich dynamisch weiterentwickelnde Weltwirtschaft abbilden. Ob die so modellendogen ermittelten mittel- bis langfristigen Entwicklungen die im PolResS-Projekt erarbeiteten qualitativen Umfeldszenarien vollständig nachzeichnen oder aber bspw. parallel verschiedene Elemente aus beiden Szenarien abgebildet werden, ist zunächst offen.

Im SimResS-Projekt wurde vor diesem Hintergrund entschieden, zwei eigenständige Umfeldszenarien in GINFORS3 zu parametrisieren, welche hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Rahmenannahmen als ein „business as usual“ Szenario sowie ein stärker Innovations-orientiertes Transformationsszenario identifiziert werden können. Die einzelnen Parametrisierungen folgten dabei nicht dem Anspruch, sämtliche qualitativen Aussagen der PolResS-Szenarien „Fortschreitende Industrialisierung“ und „Starke Innovation“ nachzuzeichnen. Vielmehr können sie als eine anhand ausgewählter Szenario-Elemente vorgenommene exemplarische Abschätzung der unterschiedlichen gesamtwirtschaftlichen Implikationen beider PolResS-Szenarien verstanden werden. Da die zugehörigen Narrative das Szenario „Fortschreitende Industrialisierung“ explizit als Fortschreibung jüngerer Entwicklungstrends kennzeichnet, wurde das von uns hierzu implementierte GINFORS3-Szenario („Industrieland Deutschland“) als „business as usual“ Projektion mit stetigen, aber eher inkrementellen Weiterentwicklungen internationaler energiepolitischer Maßnahmen parametrisiert. Im Vergleich hierzu betrachten wir in Anlehnung an das PolResS-Szenario „Starke Innovation“ die Auswirkungen umfassender energiepolitischer Transformationsbemühungen in einer zweiten Umfeld-Parametrisierung („Klimaaktives Deutschland“).

Im Vergleich zu den soeben angesprochenen wissenschaftstheoretischen Aspekten, scheint die zweite Frage zum Zusammenspiel von qualitativen Umfeldszenarien mit quantitativen Umfeld-Parametrisierungen eher technischer Natur zu sein. Im Kern lässt sich diese wie folgt formulieren: Wie soll mit Szenario-Aspekten umgegangen werden, welche innerhalb eines zu parametrisierenden Simulationsmodells bislang nicht endogen abgebildet werden? Im Zusammenhang mit den von uns exemplarisch analysierten Weiterentwicklungen energiepolitischer Maßnahmen verweist diese Frage bspw. auf eine weitergehende Abbildung von zentralen Technologieannahmen wie bspw. der im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens RTD (FKZ: 3715411150) diskutierten umfassenden Diffusion von Power-to-Liquid Technologien. Da SimResS inhaltlich darauf abzielte, Modelle zur Abbildung von Langfristszenarien im Hinblick auf die Ressourceneffizienz weiterzuentwickeln, konnten in diesem Projekt keine weitergehenden Modellieraktivitäten zur zusätzlichen Berücksichtigung energiepolitisch relevant erscheinender Technologieannahmen durchgeführt werden. Eine weitergehende inhaltliche Diskussion des unseren Simulationen zugrundeliegenden Detailgrades bei der Abbildung energiepolitischer Zusammenhänge sowie konzeptionelle Hinweise auf zukünftig anzustrebende Steigerungen des diesbezüglichen Endogenitätsgrades erfolgt am Ende dieses Kapitels.

Aus dem soeben angesprochenen Verzicht auf weitergehende Modellieraktivitäten folgt, dass in dem von uns parametrisierten Umfeld-Szenario „Klimaaktives Deutschland“ für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland trotz einer vollständigen Umstellung der Stromerzeugung auf Erneuerbare Energien bis zum

Jahr 2045 lediglich ein Rückgang der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 80% bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Niveau des Jahres 1990 simuliert wird.

Zur übersichtlichen Zusammenstellung der in den Parametrisierungen der SimRess-Umfeldszenarien berücksichtigten Parametrisierungs-Details wurde folgendes Vorgehen gewählt: Zunächst werden im folgenden Unterabschnitt die Vorgaben für zentrale exogene Modellvariable (Bevölkerung und Rohstoffpreise) zusammengefasst. Daraufhin dienen die beiden folgenden Unterabschnitte einer Darstellung individueller Parametrisierungs-Details der jeweiligen Szenarien. Das folgende Unterkapitel fasst daraufhin für beide Umfeldszenarien wesentliche Simulationsergebnisse zusammen. Neben der bereits angesprochenen Vorstellung zu beachtender konzeptioneller Aspekte zur Unterscheidung unseres klimaaktiven Szenarios von einem treibhausneutralen Szenario dient das abschließende Unterkapitel dann insbesondere einer weitergehenden Sensitivitätsanalyse unseres klimaaktiven Szenarios.

## 4.1.2 Szenario-spezifische Vorgaben für exogene Modellvariable

### 4.1.2.1 Bevölkerungsentwicklungen

Die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland und den anderen Ländern/Regionen ist eine der wenigen aber zentralen exogenen Vorgaben, die für die modellbasierte Szenario-Berechnung in GINFORS3 benötigt werden. Einfluss auf die (ökonomische und ökologische) Zukunftsentwicklung nehmen diese exogenen Vorgaben in zweierlei Hinsicht. Auf der einen Seite ist die Anzahl der Einwohner konsumseitig einer der Einflussfaktoren bei der Nachfrageentwicklung, auf der anderen Seite ist die Anzahl der Einwohner im erwerbsfähigen Alter angebotsseitig einer der Einflussfaktoren auf die Lohnentwicklung. Für beide Umfeld-Parametrisierungen wurden jeweils identische Bevölkerungsannahmen unterstellt, deren nähere Details nachfolgend beschrieben werden.

Bei der Festlegung konkreter Vorgaben zur Entwicklung der Weltbevölkerung in den abgebildeten Modellregionen wurde im SimRess-Projekt berücksichtigt, dass durch WORLD6 eigenständige globale Bevölkerungsprojektionen generiert werden (vgl. hierzu Sverdrup und Koca 2017). Eine Diskussion der vorläufigen Simulationsergebnisse von Sverdrup und Koca zur Entwicklung der Weltbevölkerung ließ es dabei plausibel erscheinen, die in GINFORS3 benötigten regionalen Bevölkerungsprojektionen auf folgende beide amtlichen Quellen zu basieren:

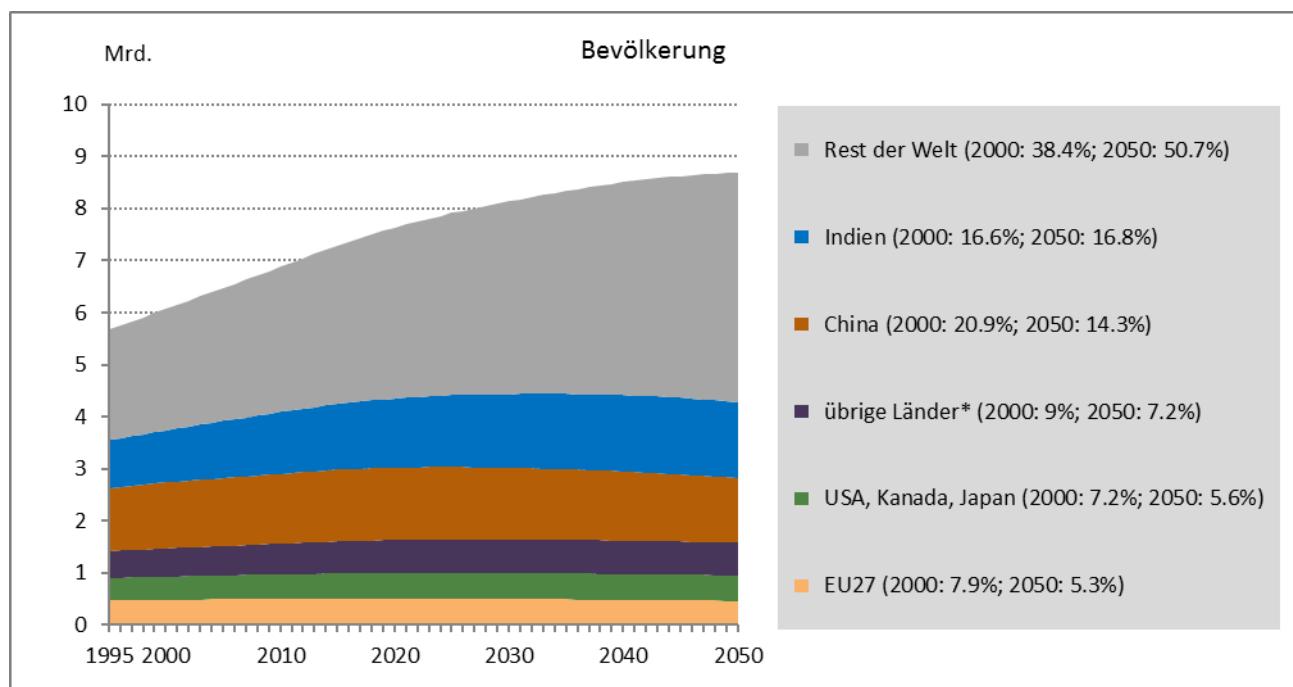
- Für Deutschland: die am 28. April 2015 veröffentlichten Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung (Statistisches Bundesamt 2015).
- Für alle anderen Länder und die Region „Rest of World“: die „Low variant“ der aktuellen Bevölkerungsprojektion der Vereinten Nationen (United Nations 2015).

Die charakteristischen Merkmale beider Vorgaben lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes umfasst insgesamt 8 Varianten und drei zusätzliche Modellrechnungen. Legt man ein Umfeld-Szenario zugrunde, in dem für Deutschland von „wirtschaftlicher Stärke“ und gleichzeitig von einem sich verstärkenden wirtschaftlichen und sozialen Gefälle zwischen einzelnen Ländern ausgegangen wird, so erscheint hiervon die Variante 2 (Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung) am konsistentesten zu sein.

Die Annahmen dieser Variante sind:

- annähernde Konstanz der Geburtenhäufigkeit (1,4 Kinder je Frau; Anstieg des Gebäralters der Frau von derzeit 30,7 auf 31,8 Jahre in 2028, danach Konstanz).
- moderater Anstieg der Lebenserwartung (bei Geburt von derzeit 77,7 Jahren auf 84,8 Jahre in 2060 [Jungen] bzw. 82,8 Jahren auf 88,8 Jahren [Mädchen]; im Alter von 65 Jahren von derzeit 17,5 Jahren auf 22 Jahre in 2060 [Männer] bzw. 20,7 Jahren auf 25 Jahre [Frauen]).
- Wanderungssaldo (schrittweise Anpassung von 500000 im Jahr 2014 auf 200000 im Jahr 2021; danach konstant)

Abbildung 58: Unterstellte globale Bevölkerungsentwicklungen in den Umfeldszenarien



\* übrige Länder in GINFORS3 sind: Australien, Brasilien, Mexiko, Russland, Südkorea und Türkei.

Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: Statistisches Bundesamt (2015, 2016), United Nations (2015)

Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich für Deutschland ein leichter Bevölkerungszuwachs bis zum Jahr 2020. Danach kommt es zunächst zu einem langsamen, im Zeitablauf aber immer dynamischeren Bevölkerungsrückgang. Für das Jahr 2050 wird eine im Vergleich zu heute um etwa 5 Millionen Einwohner niedrigere Bevölkerung in Deutschland erwartet. Gleichzeitig vermindert sich der Anteil der 15 bis 64-jährigen an der Bevölkerung von derzeit knapp 66% auf 57,7%.

Die Weltbevölkerung hingegen nimmt bis 2050 weiter zu und wächst auf 8,7 Mrd. Menschen, wobei die jährlichen Wachstumsraten von anfangs knapp unter 1% bis zum Jahr 2050 auf unter 0,2% zurückgehen. Differenziert nach wichtigen Weltregionen ergibt sich der in Abbildung 58 abgebildete Verlauf. Die deutlichsten Bevölkerungszuwächse werden für die Region „Rest der Welt“ erwartet (+1,36 Mrd. bis 2050). In Indien kommt es ebenfalls zu einem weiteren Bevölkerungszuwachs (+0,2 Mrd. bis 2050), wohingegen es in den übrigen Weltregionen „USA, Kanada, Japan“ und „übrige Länder“ bis 2050 zu einem nur leichten Bevölkerungszuwachs kommt. Sowohl für die EU27 als auch für China werden anfangs noch Bevölkerungszuwächse erwartet. Etwa ab dem Jahr 2030 ist jedoch die maximale Bevölkerung erreicht und es kommt zu einer abnehmenden Einwohnerzahl in diesen beiden Regionen. Für das Jahr 2050 wird sowohl für China als auch für die EU27 eine im Vergleich zu heute verminderten Bevölkerungszahl ausgegangen (China -131 Mio. Einwohner, EU27 -44 Mio. Einwohner).

#### 4.1.2.2 Weltmarktpreise für Rohstoffe

Abgesehen von Bevölkerungsentwicklungen repräsentieren globale Rohstoffpreise eine weitere Kategorie zentraler exogener Variable des Modells GINFORS3. Die aktuelle Modellversion des SimRess-Projekts benötigt dabei konkrete Vorgaben für die globale Preisdynamik von Massenmetallen sowie der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas. Bezüglich der für Massenmetalle anzunehmenden Preisentwicklungen konnte dabei im Verlauf des SimRess-Projekts ein Ansatz etabliert werden, um entsprechende Preistraktorien auf Basis eines soft links mit dem Modell WORLD6 im Zuge eines iterativen Informationsaustausches zu generieren. Nähere Details des umgesetzten soft-links werden im folgenden Unterabschnitt erläutert.

Zuvor sei an dieser Stelle einleitend auf die methodischen Hintergründe dieser Vorgehensweise verwiesen. Parallel zu unseren im vorliegenden Band dokumentierten Arbeiten am dynamischen MRIO-Modell GINFORS3 wurden im SimRess-Projekt auch Weiterentwicklungen des systemdynamischen Modells WORLD gefördert. Eine eigenständige Dokumentation dieser Arbeiten findet sich in Sverdrup und Koca (2017). Die den Modellbauaktivitäten von Sverdrup und Koca zugrundeliegende aktuelle WORLD3-Version wurde in Stella programmiert (Meadows et al. 2004),<sup>93</sup> gleicht allerdings zu weiten Teilen der ursprünglich bereits von Meadows et. al. (1972) in DYNAMO implementierten WORLD3-Version. Da dieses Modell gemäß Costanza et al. (2007) lediglich ca. 100 Variable sowie 80 Parameter enthält, sind seine Modellstrukturen generell relativ einfach operationalisierbar. Inzwischen existieren daher weitere frei verfügbare Modellvarianten für verschiedene Softwareumgebungen.<sup>94</sup>

Diese Modellstrukturen reflektieren sowohl die Datenverfügbarkeiten als auch die Simulationsfähigkeiten von Computersystemen in der Entwicklungszeit von WORLD3. So weist bspw. Imhof (2000) darauf hin, dass sowohl Kritiker wie auch Anhänger der ersten WORLD3-Version darin übereinstimmten, dass aufgrund weitreichender Datenlimitationen zu Beginn der 1970er Jahre keine empirisch zufriedenstellende globale Modellierung umgesetzt werden konnte.<sup>95</sup> In Ermangelung der notwendigen empirischen Befunde wurden die in WORLD3 abgebildeten Kausalzusammenhänge daher lediglich für globale Durchschnittswerte parametrisiert. Dies impliziert, dass bspw. internationale Handelsstrukturen durch WORLD3 nicht abgebildet werden können. Da die jeweiligen Parameter dabei üblicherweise gemäß Einschätzung der Modellautoren festgelegt wurden, lässt sich die hieraus resultierende empirische Güte des Modells nicht unmittelbar beurteilen.<sup>96</sup> Hierzu wäre eine Anwendung umfassender statistischer Testroutinen notwendig, deren Relevanz allerdings von den Modellautoren in aller Regel negiert wurde.<sup>97</sup>

Trotz offensichtlicher Kritikpunkte konnten Meadows et al. mit WORLD3 vor einem halben Jahrhundert zu Recht eine wesentliche Vorreiterrolle bei der Abbildung gesellschaftlicher Wirkungszusammenhänge in globalen dynamischen Simulationsstudien für sich in Anspruch nehmen. Unter Verweis auf den Informationsgehalt heute verfügbarer international harmonisierte MRIO-Datensätze (vgl. hierzu auch unsere Darstellung in Kapitel 2.2.2) muss allerdings kritisch hinterfragt werden, ob dieser Modellieransatz inzwischen noch als angemessenes Werkzeug einer evidenzbasierten Politikberatung angesehen werden kann. Die von uns im Verlauf des SimRess-Projekts weiterentwickelte Datenbank des dynamischen Simulationsmodells GINFORS3 enthält bspw. mehr als drei Millionen Zeitreihen.

<sup>93</sup> Stella ist eine Entwicklungsumgebung zur Generierung numerisch simulierbarer Differenzgleichungen unter Verwendung eines intuitiv zugänglichen grafischen User-Interfaces. Nähere Details können der Homepage des kommerziellen Anbieters isee systems entnommen werden (<https://www.iseesystems.com/>).

<sup>94</sup> So ist WORLD3 bspw. in Vensim frei verfügbar (siehe <http://vensim.com/model-analysis-world-dynamics/> für eine interaktive Vorstellung der Parametrisierungsoptionen dieser Modellversion). Eine frühe Umsetzung in Matlab wurde von Retortillo et al. (2008) vorgestellt, als frühe Referenz einer Implementierung in Modelica kann auf Cellier (2008) verwiesen werden.

<sup>95</sup> „... only 0.1 per cent of the data required to construct a satisfactory world model were available (Freeman 1973: 8). Both, the modelers and the critics agreed on that.“ (Imhof 2002, 11).

<sup>96</sup> Die konkreten empirischen Grundlagen einzelner Datenreihen sowie der mit ihnen verknüpften Parameter können anscheinend nicht anhand des Modellcodes überprüft werden, da dieser keine erläuternde Kommentierung enthält. Vgl. hierzu bspw. entsprechende Anmerkungen zur Modelica-Implementation der aktuellen Modellversion unter <http://reference.wolfram.com/system-modeler/libraries/SystemDynamics/SystemDynamics.WorldDynamics.World3.html>. Schnell (1990) geht aber bspw. davon aus, dass weniger als 1% der Parameter von Meadows empirisch geschätzt wurden.

<sup>97</sup> Während die Modellautoren in der Regel keine formal-statistischen Analysen ihrer Simulationsergebnisse präsentieren sei angemerkt, dass dieser Umstand durchaus auch von systemdynamischen Forschergruppen kritisch kommentiert wird: „In all the books on World3, calibration of the model with historical data is downplayed. [...] The reason given for this is that since the model is only an approximation, one should not put too much emphasis on “precise” calibrations. We think this is ultimately a mistake, since it misses the opportunity to present quantitative tests of the model’s performance.“ (Costanza et al. 2007, 424).

## Metallpreise

Vor Hintergrund der soeben angesprochenen methodischen Details können die hier vorgestellten Modellkopplungsaktivitäten als ein explorativer Ansatz zur Evaluation der durch WORLD abgebildeten Systemeigenschaften interpretiert werden.<sup>98</sup> Die im SimRess-Projekt verfügbare WORLD-Version kennzeichnet im Vergleich zu WORLD3 eine weitreichendere Modellierung der globalen Verfügbarkeiten verschiedener Metallgruppierungen (u.a. Aluminium, Bauxit oder Silber). Die systemdynamischen Grundlagen dieser Modellierung wurden mehrfach in Resources, Conservation and Recycling veröffentlicht (u.a.: Sverdrup 2016; Sverdrup und Ragnarsdottir 2016; Sverdrup, Koca und Ragnarsdottir 2015; Sverdrup, Koca, Ragnarsdottir 2014; Sverdrup, Ragnarsdottir, Koca 2014) und sind auch Gegenstand der von Sverdrup und Koca (2017) dokumentierten Projektarbeiten. Wir verzichten daher an dieser Stelle auf eine weitergehende Diskussion entsprechender Modelldetails um allgemein festzuhalten, dass WORLD in der Lage ist, das globale Metallangebot zu projizieren.

Bei gegebener Nachfrage (das Niveau der weltweiten Metallnachfrage wird als Produkt aus globaler Bevölkerungsanzahl sowie einer durchschnittlichen globalen Metallnachfrage pro Kopf berechnet, wobei die durchschnittliche globale Metallnachfrage pro Kopf als exogener Szenarioparameter vorzugeben ist) werden dabei in WORLD auch die jeweiligen Weltmarktpreise für einzelne Metallgruppen sowie Auswirkungen auf globale Recyclingaktivitäten endogen projiziert. Hierbei verfolgte Erklärungsansätze sind intuitiv schwer nachvollziehbar, da bspw. die Preisbildung für Metalle von üblichen ökonomischen Erklärungsmustern (basiert auf einem Ausgleich von globalem Angebot und globaler Nachfrage) abweicht.<sup>99</sup> Die dynamischen Eigenschaften dieser Projektionen lassen sich allerdings bei Endogenisierung der globalen Metallnachfrage anschaulich darstellen.

Auf Basis der zuvor beschriebenen Bevölkerungsannahmen sowie a priori Annahmen zur Entwicklung der Weltmarktpreise zentraler Rohstoffaggregate ist GINFORS3 in der Lage, dynamische Projektionen der globalen ökonomischen Aktivität unter endogener Berücksichtigung internationaler Handelsverflechtungen zu simulieren. Dabei wird u.a. auch zukünftige Entwicklungspfade der globalen Erznachfrage projiziert.

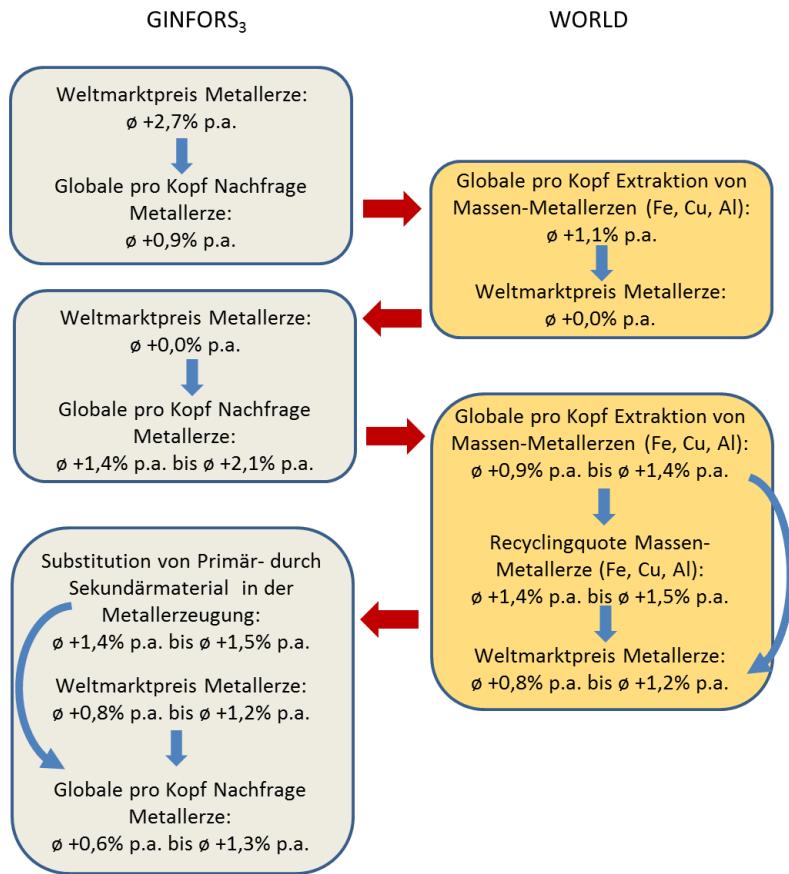
In SimRess wurden die dynamischen Projektionen der globalen preisbereinigten Nachfrage nach Metallerzen (in US-\$ pro Kopf) von GINFORS3 an WORLD übergeben. Auf Basis dieser Vorgaben war WORLD in der Lage, angebotsseitige Entwicklungen und resultierende Preiseffekte für die betrachteten Rohstoffkategorien (sowie Implikationen auf die Substitution von Primärrohstoffen durch Recyclingprodukte) endogen herzuleiten. Die resultierenden Weltmarktpreise konnten daraufhin vom WORLD-Modell wiederum an GINFORS3 übergeben werden, um die ursprünglichen a priori Annahmen zur Entwicklung der Weltmarktpreise zu aktualisieren. Auf Basis dieser aktualisierten Weltmarktpreise konnte daraufhin eine neue GINFORS-Simulation erstellt werden, auf deren Basis dann wiederum ein aktualisierter Input für das WORLD-Modell zur Verfügung stand. Dieser iterative Prozess wurde für einen Simulationszeitraum von 2020 bis 2050 in mehreren Umfeldparametrisierungen umgesetzt.

---

<sup>98</sup> SimRess war nicht dazu intendiert, eine umfassende empirische Evaluation des Modells WORLD3 durchzuführen. Eine methodische Diskussion von hinlänglich dokumentierten Kritikpunkten an WORLD3, wie bspw. einer mangelnden sozialwissenschaftlichen Expertise der Modellautoren (siehe hierzu bspw. entsprechende Anmerkungen in Imhof 2000) oder der weitreichenden kritischen Auseinandersetzung im Kontext von Cole und Curnow (1973) wird von uns zudem bewusst unterlassen, da entsprechende Einordnungen sicherlich von WORLD-Anwendern wesentlich zielführender vorgenommen werden können.

<sup>99</sup> Vgl. hierzu bspw. folgende Anmerkungen von Sverdrup und Ragnarsdottir (2016) zu ihrer Modellierung der dynamischen Entwicklung der Platinpreise: „The usual terminology of supply and demand is not used as they are compound terms and thus inaccurate and often misunderstood. At the metal market, the sellers meet the buyers and present their supplied lots at a seller price. The buyers present their purchase wishes and their buyer's price offers. The prices and lots are adjusted when there is a discrepancy. The seller offers more at a lower price or less at a higher price; the buyers do likewise.“ (Sverdrup und Ragnarsdottir 2016, 140)

Abbildung 59: Endogene Bestimmung der Weltmarktpreise für Metallerze



Quelle: Eigene Darstellung, GWS.

Die im Verlauf der ersten Iterationsschritte beobachtbaren Veränderungen in den jeweiligen Modellergebnissen können Abbildung 59 entnommen werden. In der Abbildung wurden unterschiedliche Befunde aus alternativen Umfeldparametrisierungen zusammengefasst. Diese Umfeldparametrisierungen unterscheiden sich hinsichtlich der angenommenen Wachstumsentwicklungen in der „Rest der Welt“-Region (siehe Kapitel 4.2.2.1) und dienen einer allgemeinen Abschätzung der Sensitivität der Simulationsergebnisse. Von einem durchschnittlichen Anstieg der globalen Erzpreise um ca. 2,7% pro Jahr bis zum Jahr 2050 ausgehend, wurde in GINFORS3 zunächst für sämtliche Umfeldparametrisierungen ein durchschnittliches Wachstum der globalen pro Kopf Nachfrage nach Metallerzen um ca. 0,9% p.a. simuliert.

Bei Vorgabe eines durchschnittlichen Wachstums der globalen pro Kopf Nachfrage nach Metallerzen um 0,9% p.a. simulierte WORLD daraufhin ein globales Erz-Überangebot (Anstieg der globalen Erz-Extraktionen pro Kopf um durchschnittlich 1,1% p.a.), welches den globalen Erzpreis insgesamt im Zeitablauf stagnieren ließ. Die bisherige exogene Vorgabe für die globalen Erzpreise wurde daraufhin in GINFORS3 entsprechend angepasst, neue Simulationsläufe berechnet und die resultierenden Wachstumsraten der globalen pro Kopf Nachfrage für Metallerze ausgelesen. In den verschiedenen Umfeldparametrisierungen konnten nun durchschnittliche Anstiege der globalen pro Kopf Nachfrage nach Metallerzen von ca. 1,4% p.a. bis zu 2,1% p.a. beobachtet werden. Diese, im Vergleich zur vorherigen Iteration nun wesentlich dynamischeren Vorgaben für die globale Nachfrageentwicklungen induzierten daraufhin in WORLD neben Mengenreaktionen (Anstieg der globalen pro Kopf Extraktionen in Abhängigkeit von der jeweiligen Nachfragevorgabe um ca. 0,9% bis 1,4% p.a.) auch globale Preisreaktionen (Anstiege um ca. 0,8% p.a. bis 1,2% p.a.) sowie eine Reaktion der in WORLD ebenfalls endogen abgebildeten Recyclingquoten (Anstieg um 1,4% p.a. bis 1,5% p.a., in Abhängigkeit von der betrachteten Nachfrageentwicklung). Diese Befunde konnten daraufhin wieder in GINFORS3 berücksichtigt werden, um einen weiteren iterativen soft-link Schritt durchzuführen. Nach einigen

weiteren Iterationsschleifen resultierte am Ende dieses Prozesses ein harmonisierter Datensatz, welcher sich aus GINFORS3-Perspektive durch eine Endogenisierung der Weltmarktpreise zentraler Rohstoffe sowie der hierdurch induzierten Recyclingaktivitäten auszeichnet und aus WORLD-Perspektive durch die ergänzende Berücksichtigung von ökonomischen Feedback-Effekten der globalen Nachfrage charakterisiert ist.

Für die fossilen Rohstoffe Kohle, Rohöl und Gas wurde eine entsprechende Endogenisierung der Weltmarktpreise ebenfalls angestrebt. Im Verlauf dieser Arbeiten zeigte sich allerdings, dass bislang durch WORLD keine vollständige globale Erfassung der Verwendung fossiler Rohstoffe sowie der hierdurch induzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen vorgenommen wurde. Damit erwiesen sich auch die projizierten globalen Extraktionsniveaus des WORLD-Modells als nicht-kompatibel zu entsprechenden Größen des Modells GINFORS3 (bei welchem die vollständige globale Abdeckung durch Verwendung der WIOD-Datenbank garantiert ist).

Zur Parametrisierung der eigenen Simulationsstudien mussten wir daher für Kohle, Rohöl und Gas auf entsprechende Preisprojektionen der IEA zurückgreifen (siehe nachfolgender Abschnitt). Aus Projekt-Perspektive ist dies sicherlich bedauerlich. Allerdings resultierten hieraus keine Einschränkungen für die parametrisierten Referenzszenarien in GINFORS3, da die Verwendung entsprechender exogener Vorgaben einer standardisierten Vorgehensweise entspricht.

### Fossile Energieträger

Für die fossilen Rohstoffe Kohle, Rohöl und Gas wurden im „klima-aktiven“ Szenario die Preisentwicklungen gemäß des 2°C Pfades (2DS) gemäß „Energy Technology Perspectives 2015“ (OECD/IEA 2015) unterstellt. Das parametrisierte Szenario „Industrieland Deutschland“ beruht auf den entsprechenden IEA-Projektionsergebnissen des 4°C Pfades (4DS). zugrunde gelegt. Tabelle 21 kann eine Übersicht der jeweiligen Preisentwicklungen entnommen werden.

Tabelle 21: Exogene Vorgaben zur Entwicklung der Weltmarktpreise fossiler Energieträger

			2013	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Kohle	OECD Steam Coal Import Price (2013 USD/Tonne)	Klimaaktives Szenario	86	88	83	78	78	77	77	76
		Industrieland Deutschland	86	101	105	108	110	112	114	116
Rohöl	IEA Crude Oil Import Price (2013 USD/bbl)	Klimaaktives Szenario	106	105	104	102	101	100	99	98
		Industrieland Deutschland	106	112	118	123	128	132	135	137
Gas	Europe Import Price (2013 USD/Mbtu)	Klimaaktives Szenario	10,6	10,5	10,3	10,0	9,6	9,2	9,1	9,0
		Industrieland Deutschland	10,6	11,1	11,6	12,1	12,4	12,7	13	13,2

Quelle: IEA (2015)

### 4.1.3 Projektion eines „Industrieland Deutschland“ Szenarios unter business-as-usual Bedingungen

Mit der soeben erfolgten Festlegung zukünftiger Werte für alle exogene Variable liegen sämtliche notwendigen Informationen für einen dynamischen „business as usual“-Simulationslauf vor. Zur detaillierten Umsetzung alternativer Umfeldszenarien können darüber hinaus allerdings auch zahlreiche weitere Modellparameter variiert werden. In GINFORS3 stehen als entsprechende ökonomische Politikparameter insbesondere verschiedene Steuersätze zur Besteuerung von Gütern, Einkommen- und Vermögen zur Verfügung.

Tabelle 22: „Industrieland Deutschland“, Erneuerbare Energien und Kernenergie in der Stromproduktion in wichtigen Nicht-EU-Ländern (Anteile in %)

	2012		2030		2050	
	Erneuerbare Energien	Kernenergie	Erneuerbare Energien	Kernenergie	Erneuerbare Energien	Kernenergie
Russland	9,6	7,1	12,8	8,6	16,7	9,6
China	20,1	1,6	29,6	5,7	38,7	7,4
Indien	15,7	2,4	30,2	6,4	35,4	7,5
Japan	13,7	0,0	20,8	0,0	26,2	0,0
USA	12,4	20,3	23,9	20,2	33,3	19,0

Quelle: Eigene Darstellung, GWS in Anlehnung an European Commission 2013 & IEA 2015

Daneben können klimapolitische Szenario-Annahmen beispielsweise zur Entwicklung des ETS oder des Anteils der Atomenergie sowie der erneuerbaren Energien an der Elektrizitätsentwicklung als Politikparameter variiert werden. Auch der Anteil der Elektromobilität an der gesamten Verkehrsnachfrage repräsentiert einen explizit vorgebbaren Szenario-Parameter.

Vor Hintergrund der narrativen Vorgaben des PolResS-Szenarios „Fortschreitende Industrialisierung“ wurde zur Projektion des „Industrieland Deutschland“-Szenarios eine Energie- und Klimapolitik simuliert, welche sich zwar in Deutschland, der EU und auch weltweit dynamisch weiterentwickelt, dabei aber nicht ambitioniert genug ist, um die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits deutlich vor dem Jahr 2050 auf einen Reduktionspfad zu bringen.

Im Hinblick auf die Kernenergie ist für Deutschland der Ausstieg bis zum Jahr 2022 berücksichtigt. Hinsichtlich der Dynamik des EE-Ausbaus in Deutschland wurde der aktuelle Projektionsbericht der Bundesregierung berücksichtigt. Demnach steigt der EE-Anteil in der Stromproduktion bis zum Jahr 2035 auf 61%. Für den Zeitraum 2035 bis 2050 wird ein weiterer, jedoch verlangsamter Anstieg des EE-Anteils bis auf 69% in 2050 angenommen. Grundlage für diesen Ausbaupfad ist, wie auch bei den anderen EU-Ländern, das „Reference Scenario 2013“ der EU-Kommission (European Commission 2013).

Für die übrigen EU-Länder wurden sämtliche Vorgaben bezüglich ihrer EE- und Kernenergieanteile in der Stromproduktion dem „Reference Scenario 2013“ der EU-Kommission entnommen (European Commission 2013). Für die EU27 insgesamt wird in dieser Studie ein Anstieg des Anteils Erneuerbarer Energien in der Stromproduktion auf 44,4% im Jahr 2030 und 51,5% im Jahr 2050 erwartet. Die Entwicklungen in den einzelnen Mitgliedsländern fallen jedoch recht unterschiedlich aus. Hintergrund hierfür sind unter anderem die Erwartungen im Hinblick auf die zukünftige Rolle der Atomenergie in den Mitgliedsstaaten. Auch für Belgien wird ein kompletter Kernenergieausstieg unterstellt. Für einige EU-Länder wird aber auch mit einem Anstieg des Kernenergieanteils in der Stromproduktion gerechnet (z.B. in Großbritannien und Finnland).

Im Hinblick auf die Entwicklung des EE- und Kernenergie-Anteils in den übrigen Ländern (und der Region „Rest of World“) wurde auf die IEA-Studie „Energy Technology Perspectives 2015“ zurückgegriffen (IEA 2015). Diese Studie gibt u.a. Auskunft darüber mit welchem Energieträgermix in der Elektrizitätserzeugung in den Jahren 2030 und 2050 zu rechnen ist, wenn global ein 2°-Pfad eingehalten werden soll.

Tabelle 23: „Industrieland Deutschland“, strukturierte Übersicht der weiteren Szenario-Vorgaben

Politikfeld	Szenario-Vorgaben / Konkretisierung
Kohleverstromung	Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland bis zum Jahr 2040
ETS-Preis	Anstieg des Zertifikatspreises im EU-ETS bis 2050 auf 62 € <sub>2010</sub> pro t CO <sub>2</sub> Kein ETS in übrigen Ländern
Förderung der energetischen Gebäudesanierung	Keine zusätzliche energetische Gebäudesanierung im Simulationszeitraum
Mineralölsteuer	Keine Anpassung der realen Steuersätze im Simulationszeitraum
Förderung der Elektro-Mobilität, 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%
Förderung der Elektro-Mobilität, 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%

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Vergleicht man für die EU die Ausbaupfade der EE zwischen dem IEA-ETP 2°-Szenario und dem Reference Scenario 2013 der Europäischen Kommission, so zeigt sich, dass im Reference Scenario ein lediglich halb so dynamischer Ausbaupfad zugrunde gelegt ist. Vor diesem Hintergrund wird im „Industrieland Deutschland“-Szenario für die anderen Länder nicht den IEA-Projektionen gefolgt. Vielmehr wird angenommen, dass sich der Ausbau der Erneuerbaren Energien lediglich halb so dynamisch entwickelt wie dort projiziert wird. Folgt man dieser Logik, so resultieren hieraus in den wichtigsten Nicht-EU-Ländern die in Tabelle 22 zusammengefassten EE- und Kernenergie-Anteile in der Stromerzeugung. Weitere Politikparameter, welche zur Unterscheidung des Umfeldszenarios „Industrieland Deutschland“ vom nachfolgend näher dokumentierten Umfeldszenario „Klimaaktives Deutschland“ genutzt wurden, können Tabelle 23 entnommen werden. Neben dem unterstellten Ausstieg aus der Kohleverstromung bis zum Jahr 2040 sowie eines gleichmäßig graduellen Anstiegs der Zertifikatspreise im europäischen ETS wurde im Szenario „Industrieland Deutschland“ eine relativ schwache Diffusion von Elektro-Mobilitätskonzepten im motorisierten Individualverkehr wie auch im motorisierten Straßen-Lieferverkehr abgebildet.

#### 4.1.4 Projektion „Klimaaktives Deutschland“

In diesem Umfeld-Szenario wird für Deutschland ein deutlich dynamischerer EE-Ausbaupfad zugrunde gelegt. Bereits in 2025 wird ein EE-Anteil in der Stromproduktion von 60% erreicht. In 2030 werden 73% und in 2040 91% des Stroms in Deutschland auf Grundlage Erneuerbarer Energien hergestellt. Ab 2045 ist ein 100%-EE-Anteil erreicht. Auch für die anderen Länder wird ein dynamischerer EE-Ausbaupfad zugrunde gelegt. Basis die entsprechenden Annahmen sind das IEA-ETP 2°-Szenario sowie die länderspezifischen Gegebenheiten im Hinblick auf Kernenergie-Nutzung und bis dato erreichten EE-Anteile in der Stromproduktion. Für die wichtigsten Nicht-EU-Länder resultieren hieraus die in Tabelle 24 zusammengestellten Szenario-Vorgaben.

Tabelle 24: „Klimaaktives Deutschland“, Erneuerbare Energien und Kernenergie in der Stromproduktion in wichtigen Nicht-EU-Ländern (Anteile in %)

	2012		2030		2050	
	Erneuerbare Energien	Kernenergie	Erneuerbare Energien	Kernenergie	Erneuerbare Energien	Kernenergie
Russland	9,6	7,1	23,3	8,6	55,2	9,6
China	20,1	1,6	40,1	5,7	77,2	7,4
Indien	15,7	2,4	40,7	6,4	73,9	7,5
Japan	13,7	0,0	31,3	0,0	64,7	0,0
USA	12,4	20,3	34,4	20,2	71,8	19,0

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 25: „Klimaaktives Deutschland“, strukturierte Übersicht der weiteren Szenario-Vorgaben

Politikfeld	Szenario-Vorgaben / Konkretisierung
Kohleverstromung	Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland bis zum Jahr 2040
ETS-Preis	Anstieg des Zertifikatspreises im EU-ETS bis 2050 auf 147 € <sub>2010</sub> pro t CO <sub>2</sub> Einführung ETS in übrigen Ländern ab 2020, Anstieg des Zertifikatspreises bis 2050 auf 152 US-\$ <sub>2010</sub> pro t CO <sub>2</sub>
Förderung der energetischen Gebäudesanierung	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	Anhebung des realen 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
Förderung der Elektro-Mobilität, private Haushalte	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 Elektro-Mobilität, Wirtschaft	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: Eigene Darstellung, GWS

Auch die übrigen Politikparameter entwickeln sich in diesem Szenario in der Regel deutlich dynamischer (vgl. Tabelle 25). Während weiterhin für Deutschland ein Ausstieg aus der Kohleverstromung bis zum Jahr 2040 unterstellt wird, wird die globale Einführung eines ETS-Systems unterstellt, welches zudem im Vergleich zu den entsprechenden Annahmen des Umfeld-Szenarios „Industrieland Deutschland“ eine wesentlich markantere Preisdynamik aufweist (siehe Zeile 2 der Tabelle 25). Als zusätzliches Szenario-Element wird zudem die globale Einführung von öffentlichen Programmen zur Finanzierung der energetischen Sanierung des Wohngebäudebestands simuliert. Grundlagen für die Parametrisierung des damit verbundenen Investitions- und Förderbedarfs sowie des Sanierungserfolgs sind Studien von (Prognos 2013) sowie ECORYS & ECN (2012). Zudem ist unterstellt, dass Mineralölprodukte im Zeitablauf global deutlich intensiver besteuert werden (siehe Zeile 4 der Tabelle 25). In Korrespondenz zu diesen verschärften klimapolitischen Anreizmechanismen wird außerdem eine wesentlich raschere globale Verbreitung von Elektro-Mobilitätskonzepten unterstellt.

## 4.2 Ergebnisse

### 4.2.1 Industrieland Deutschland und Klimaaktives Deutschland im Vergleich

#### 4.2.1.1 Globale Entwicklungstendenzen

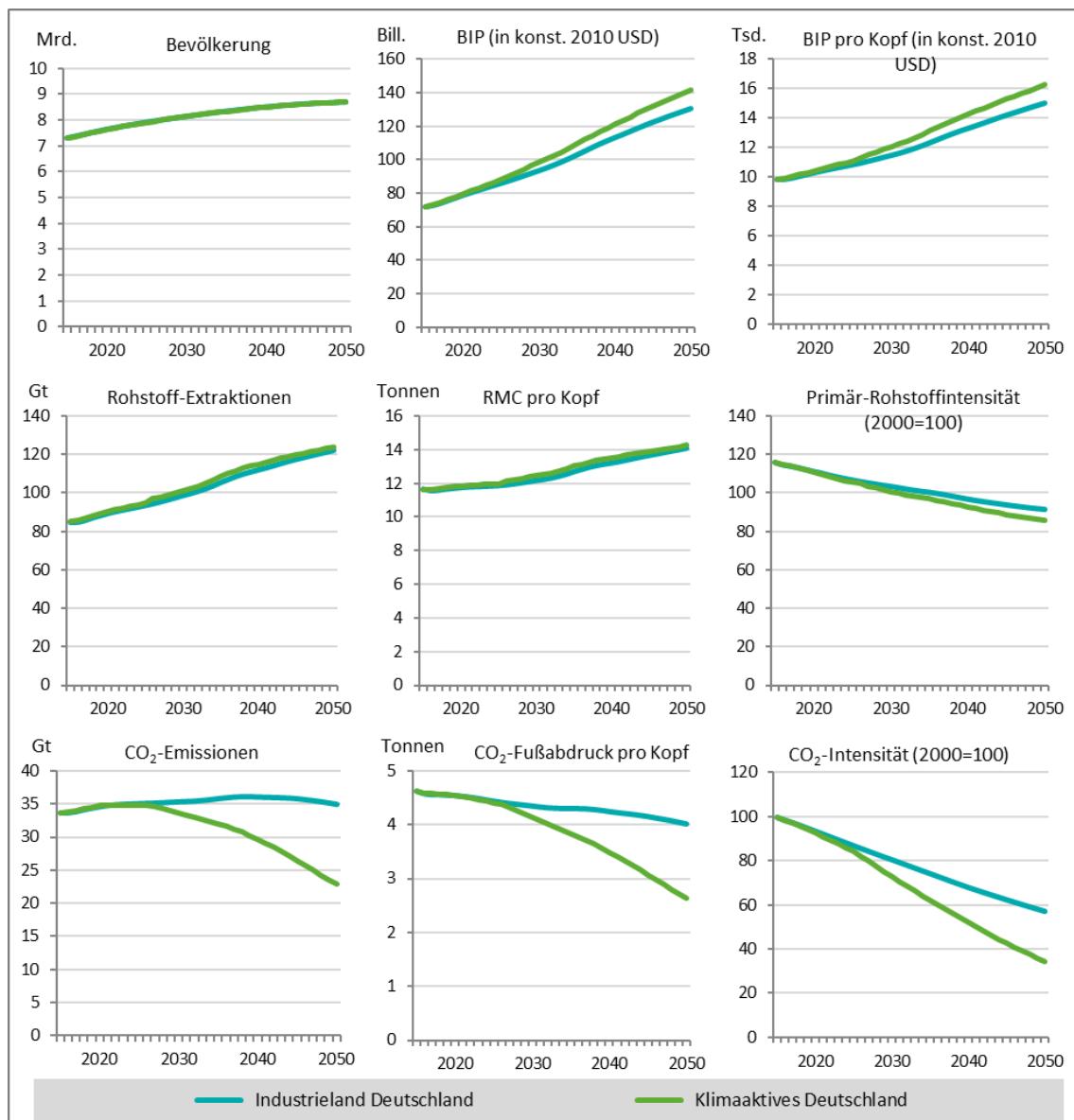
Unsere Darstellung der Simulationsergebnisse beginnt mit einem Ausblick auf zentrale globale Entwicklungstendenzen in den beiden parametrisierten Umfeldszenarien. Zu diesem Zweck wurden in der oberen Reihe der Abbildung 60 globale Bevölkerungszahlen (linker Zeitreihenplot) sowie das reale Bruttoinlandsprodukt in konstanten 2010 US-\$ (mittlerer Zeitreihenplot: Niveaus, rechter Zeitreihenplot: pro Kopf-Werte) zusammengeführt.

Wie bereits zuvor angesprochen wurde, wurden für beide Umfeld-Parametrisierungen jeweils identische Bevölkerungstrajektorien exogen vorgegeben. Annahmegemäß wächst die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 auf ca. 8,7 Mrd. Menschen an. Dieses Wachstum ist beinahe ausschließlich auf die Region „Rest der Welt“ konzentriert, welche bis zum Jahr 2050 einen Anstieg der Einwohnerzahl um ca. 1,36 Mrd. Menschen erfährt. Im Vergleich hierzu erscheinen die Bevölkerungszuwächse in den übrigen Wachstumsregionen wesentlich geringer: Die Bevölkerung in Indien wächst um ca. 200 Mio. Menschen bis zum Jahr 2050, in den USA wird im selben Zeitraum ein Zuwachs um ca. 29 Mio. beobachtet und die mexikanische Einwohnerzahl nimmt bis zum Jahr 2050 um ungefähr 18 Mio. Menschen zu. Bevölkerungsrückgänge werden insbesondere für China, die Europäische Union (inklusive Großbritannien) sowie Japan und Russland erwartet.

Der globale Bevölkerungsanstieg wird, absolut wie auch in der pro Kopf-Betrachtung, von einem stetigen Anstieg des globalen preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts begleitet. Bis zum Jahr 2050 wird für das Niveau des globalen Bruttoinlandsprodukts in beiden Modellsimulationen ein Anstieg um über 80% im Vergleich zu heutigen Werten projiziert (mittlerer Zeitreihenplot in der oberen Reihe der Abbildung). Dabei fällt auf, dass im klimaaktiven Umfeld-Szenario durchgehend höhere globale BIP-Werte simuliert werden.

Während im „Industrieland Deutschland“ Szenario die jährlichen Wachstumsraten des globalen Bruttoinlandsprodukts im Verlauf der 2020er Jahre durchschnittlich etwa 1,7% p.a. erreichen, erreicht der entsprechende Durchschnittswert im klimaaktiven Umfeld-Szenario etwa 2,1%. Im Zeitablauf ist in beiden Umfeldszenarien ein allmählicher Rückgang der globalen BIP-Wachstumsraten zu beobachten. In den 2040er Jahren beträgt das durchschnittliche Wachstum des globalen BIPs in der „Industrieland Deutschland“-Parametrisierung gut 1,4%. Im klimaaktiven Umfeld-Szenario berechnen sich die durchschnittlichen globalen BIP-Wachstumsraten der 2040er Jahre zu gut 1,5%.

Abbildung 60: Globale Entwicklungen in den SimRess Umfeld-Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Insgesamt kann dadurch auch in der pro Kopf-Betrachtung im globalen Durchschnitt ein andauernder Einommensanstieg beobachtet werden. Im Durchschnitt über die gesamte Simulationsperiode werden für das reale Bruttoinlandsprodukt pro Kopf jährliche Wachstumsraten in einer Größenordnung von ca. 1,2% (Industrieland Deutschland) bis 1,4% (Klimaaktives Deutschland) projiziert. Im Vergleich zu den globalen ökonomischen Wachstumsperspektiven alternativer umweltpolitischer Szenario-Analysen können diese Ergebnisse als ein relativ dynamischer ökonomischer Ausblick charakterisiert werden. Nennenswerte qualitative Abweichungen von den globalen ökonomischen Rahmendaten entsprechender Vergleichsstudien treten dabei nicht auf.<sup>100</sup>

Diese ausdauernden globalen ökonomischen Wachstumstendenzen werden in beiden Umfeldszenarien von qualitativ nahezu identischen Steigerungen der globalen Nachfrage nach Primärrohstoffen begleitet. Wie

<sup>100</sup> Vgl. hierzu bspw. UNEP(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“.

der linke Zeitreihenplot der mittleren Abbildungsreihe verdeutlicht, wird in beiden Szenarien eine Steigerung der globalen Rohstoff-Extraktionen um fast 50% im Vergleich zu heutigen Niveaus bis zum Jahr 2050 projiziert.

Während damit in beiden Szenarien insgesamt ein starkes Wachstum der globalen Extraktionsaktivitäten impliziert ist, scheinen auch diese Beobachtungen nicht im Widerspruch zu alternativ verfügbarer Hochrechnungen zu stehen. So wird bspw. von Dittrich et al. (2012) auf Basis einfacher statischer Extrapolationen sowie unter Annahme eines Anstiegs der Weltbevölkerung auf neun Milliarden Menschen bis zum Jahr 2050 argumentiert, dass eine globale Ausweitung der heute in den OECD-Staaten beobachtbaren Konsum- und Produktionsstrukturen einen Anstieg der jährlichen globalen Extraktionstätigkeiten auf ca. 180 Mrd. Tonnen im Jahr 2050 implizieren würde. Im Vergleich zu diesen statischen Extrapolationen berücksichtigen unsere dynamischen Simulationen auch endogene Steigerungen der Ressourceneffizienz durch technischen Fortschritt sowie Preis- und dadurch ausgelöste Substitutionseffekte. Daher erscheint es durchaus plausibel, dass unsere Modellrechnungen geringere Anstiege der globalen Extraktionsaktivitäten auf ein Niveau von 122 Gt (Industrieland Deutschland) bis 124 Gt (Klimaaktives Deutschland) im Jahr 2050 aufweisen. Dieses Niveaus erscheinen dabei relativ ähnlich zu den Befunden von Schandl et al. (2016). Deren gekoppelte Modellrechnungen deuten darauf hin, dass bei Einführung eines globalen ETS-Systems mit einem Ausgangspreis von 25 US-\$ (in Preisen des Jahres 2007) im Jahr 2015 und stetigen Preissteigerungen in einer durchschnittlichen Größenordnung von 4,5% p.a. ein gedämpfter Anstieg der Extraktionsaktivitäten auf ein Niveau von annähernd 130 Mrd. Tonnen im Jahr 2050 erreicht werden kann. Ein näherer Abgleich unserer Simulationsergebnisse mit jenen von Schandl et al. (2016) wird allerdings dadurch erschwert, dass diese alternative Annahmen zur Entwicklung der Weltbevölkerung unterstellen und ihre Modellrechnungen zudem ein wesentlich stärkeres globales ökonomisches Wachstum projizieren.<sup>101</sup> Während die thematische wie auch methodische Nähe unserer Arbeiten zu den von Schandl et al. (2016) eine detaillierte inhaltliche Diskussion beider Forschungsgruppen als ausgesprochen wünschenswert erscheinen lassen, konnte diese im Verlauf des SimRess-Projekts noch nicht realisiert werden.

Beide Szenarien implizieren somit eine relative Entkopplung der globalen Wirtschaftsaktivität von der Primärrohstoff-Nachfrage. Wie der rechte Zeitreihenplot der mittleren Abbildungsreihe verdeutlicht, wird bspw. für die globale Primärrohstoff-Intensität (also der Relation zwischen globalem RMC und realem globalen BIP) im Zeitverlauf ein Rückgang um ca. 20% („Industrieland Deutschland“) bis ca. 25% („klimaaktives Deutschland“) projiziert. Diese graduellen Rückgänge der Primärrohstoff-Intensitäten reflektieren die Einflüsse autonomen technischen Fortschritts sowie des in unseren dynamischen Simulationen endogen berücksichtigten Zusammenspiels aus ökonomischen Einkommens- (bspw. durch Veränderungen des Investitionsniveaus ausgelösten) und Substitutionseffekten (welche durch veränderte Preisrelationen befördert werden).

Da die im globalen Durchschnitt beobachteten graduellen Rückgänge der Primärrohstoff-Intensitäten auf den ersten Blick relativ gering erscheinen mögen, sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass in

---

<sup>101</sup> Die Studie von Schandl et al. (2016) basiert auf der mittleren Bevölkerungsprojektion der Vereinten Nationen (2013), welche einen Anstieg der Weltbevölkerung auf 9,6 Mrd. Menschen bis zum Jahr 2050 vorsieht. Die auf Basis dieser Annahmen von Schandl et al. (2016) durchgeführten Modellrechnungen implizieren durchschnittliche Wachstumsraten des preisbereinigten globalen Bruttoinlandsprodukts in einer Größenordnung von ca. 3,4% p.a. Da dieser Wert relativ hoch erscheint, muss kritisch darauf hingewiesen werden, dass die Autoren dieser Simulationsstudie ihre Annahmen zur Entwicklung der Materialeffizienz lediglich aus der Anwendung eines (partialanalytischen) physikalischen Modells (MEFISTO) herleiten. Abgesehen von einem generellen Verweis auf die Literatur (von Weizsaecker et al. 2009) bleibt dabei relativ unklar, wie genau in diesem Ansatz die Potenziale zukünftiger Effizienzgewinne bestimmt werden. Eindeutig ist jedoch, dass in diesem Ansatz keine dynamische ökonomische Modellierung erfolgt. Daher bleiben sämtliche ökonomischen Einflüsse auf die Materialeffizienz (also sowohl Einkommens- wie auch Substitutionseffekte) unberücksichtigt.

der jüngeren Vergangenheit seit der Jahrtausendwende ein Anstieg der globalen Rohstoff-Intensität beobachtet werden konnte.<sup>102</sup> Somit lässt sich dieser Befund durchaus als ein im Hinblick auf die Entwicklung umweltrelevanter Belastungen durchaus optimistisches Simulationsmerkmal kennzeichnen, der in nicht unerheblichem Maße auf eine Verlangsamung der Dynamik in China zurückzuführen ist. Trotz der durch diesen Befund verdeutlichten endogenen Produktivitätssteigerungen kann aber in beiden Szenarien weder eine absolute Entkopplung der Primärrohstoff-Nachfrage vom globalen ökonomischen Geschehen, noch eine Reduktion der durchschnittlichen globalen pro Kopf Rohstoff-Nachfrage erwartet werden. Wie der linke Zeitreihenplot der mittleren Abbildungsreihe verdeutlicht steigt der RMC pro Kopf im globalen Durchschnitt bis zum Jahr 2050 um ca. 21%-22% in beiden Szenarien an. Damit erreicht der durchschnittliche globale RMC pro Kopf in beiden Szenarien zum Ende der Simulationsperiode Größenordnungen, welche (zumindest in grober Annäherung) den derzeitigen europäischen Primärrohstoff-Konsumniveaus entsprechen.

Während damit beide Umfeldszenarien drängende (und in ihren jeweiligen Ausmaßen nahezu identische) Handlungsbedarfe zur nachhaltigen Reduktion der globalen Primärrohstoffanspruchnahme aufzeigen, unterscheiden sich beide Umfeldszenarien deutlich hinsichtlich ihrer implizierten weitergehenden klimapolitischen Handlungsnotwendigkeiten.

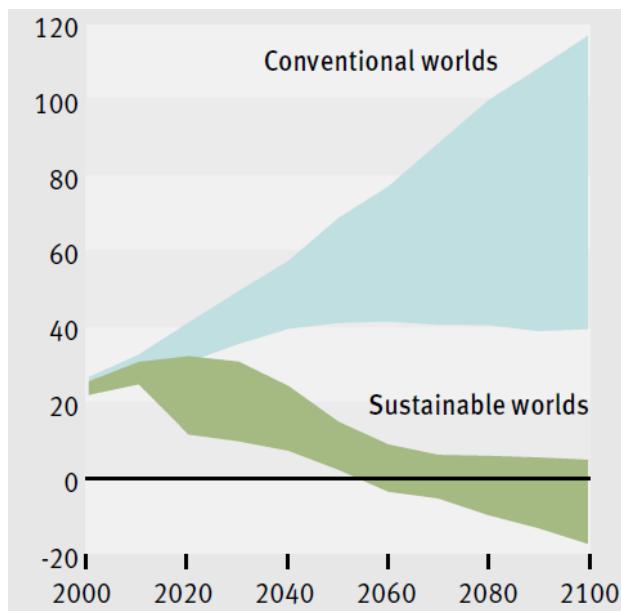
Dem mittleren Zeitreihenplot in der unteren Abbildungsreihe kann entnommen werden, dass im Umfeld-Szenario „Industrieland Deutschland“ pro Kopf ein leichter Rückgang der durchschnittlichen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen projiziert wird. Im Umfeld-Szenario „Klimaaktives Deutschland“ werden die durchschnittlichen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf hingegen bis zum Jahr 2050 um über 43% gegenüber heutigen Niveaus gesenkt. Diese absolute Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im klimaaktiven Szenario basiert auf einer (durch die entsprechenden klimapolitischen Parametrisierungs-Vorgaben ausgelösten) Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Intensität um knapp zwei Drittel ihres heutigen Niveaus (rechter Zeitreihenplot der unteren Abbildungsreihe). Aber auch im klimapolitisch international weniger ambitionierten „Industrieland Deutschland“-Szenario kann annähernd eine Halbierung (-43%) der globalen CO<sub>2</sub>-Intensität beobachtet werden. Während somit beide Umfeldszenarien durch weitreichende technologische Fortschritte in klimapolitisch relevanten Sektoren gekennzeichnet sind, wird allerdings nur im „klimaaktiven“ Szenario tatsächlich langfristig eine absolute Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht: Wie dem linken Zeitreihenplot der unteren Abbildungsreihe entnommen werden kann, impliziert dieser Simulationslauf ab Mitte der 2020er Jahre global rückläufige CO<sub>2</sub>-Emissionsniveaus. Bis zum Jahr 2050 wird dabei eine Reduktion um ca. 32% gegenüber heutigen globalen Emissionsniveaus erreicht. Im Vergleich hierzu steigen die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionsniveaus im Szenario „Industrieland Deutschland“ bis zum Jahr 2050 leicht (+4%) gegenüber derzeitigen Niveaus an.

Zur inhaltlichen Einordnung dieser Emissionspfade wird auf Abbildung 61 verwiesen. Diese Abbildung wurde UNEP (2012) entnommen um die übliche Bandbreite der implizierten globalen CO<sub>2</sub>-Trajektorien alternativer Zukunftsszenarien zu visualisieren. Der Vergleich dieser Darstellung mit den soeben angesprochenen eigenen CO<sub>2</sub>-Projektionen offenbart, dass das Umfeld-Szenario „Industrieland Deutschland“ als Beschreibung einer konventionellen Welt mit relativ geringen, aber nicht nachhaltigen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen gekennzeichnet werden kann. Im Vergleich hierzu kann das klimaaktive Umfeld-Szenario als ein im Hinblick auf seine implizierten globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen nahezu nachhaltiges Szenario charakterisiert werden.

---

<sup>102</sup> vgl. hierzu bspw. auch Dittrich et al. (2012).

Abbildung 61: Entwicklung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen in alternativen Zukunftsszenarien



Quelle: UNEP (2012). (Angaben in Gt)

Für ein näheres Verständnis der soeben vorgestellten globalen Entwicklungstendenzen ist eine genauere Betrachtung der diese Beobachtungen jeweils prägenden regionalen Wachstumstrends notwendig. Hierzu erfolgt eine detailliertere Beschreibung der ökonomischen Wachstumstendenzen sowie der damit einhergehenden Primärrohstoff-Nachfrage und CO<sub>2</sub>-Emissionen in denjenigen Weltregionen, welche die bisher vorgestellten globalen Befunde wesentlich prägen.

Die in beiden Umfeldszenarien im globalen Durchschnitt beobachtbaren anhaltenden ökonomischen Wachstumstendenzen werden in erster Linie durch ökonomische Aufholprozesse der Region „Rest der Welt“ angetrieben. In beiden Szenarien entfallen 44% („Klimaaktives Deutschland“) bzw. 51% („Industrieland Deutschland“) sämtlicher preisbereinigter Zuwächse des globalen Bruttoinlandsprodukts auf diese, durch ein starkes Bevölkerungswachstum geprägte, Region. Detaillierte Zahlenangaben können der ersten Zeile von Tabelle 26 entnommen werden. Wie die übrigen in Tabelle 26 ausgewiesenen Wachstumsbeiträge verdeutlichen, induziert die stimulierte Importnachfrage der „Rest der Welt“-Region zudem insbesondere in den Vereinigten Staaten, der Europäischen Union, in China sowie in Indien weitergehende Wachstumseffekte.

Aufgrund der starken ökonomischen Aufholprozesse der Region „Rest der Welt“ kann in beiden Szenarien eine langfristige Annäherung der ökonomischen Wohlstands niveaus beobachtet werden. Zur Verdeutlichung dieses Effekts wurden in Tabelle 27 die historischen Anteile ausgewählter Weltregionen am globalen Bruttoinlandsprodukt des Jahres 2000 den in den jeweiligen Szenarien für das Jahr 2050 projizierten Anteilen gegenübergestellt. Diese Übersicht zeigt, dass die „Rest der Welt“-Region in beiden Simulationen zur global dominierenden Wirtschaftsregion aufsteigt. Die im Jahr 2050 auf die „Rest der Welt“-Region entfallenden globalen BIP-Anteile sind dabei in ihrer Größenordnung mit historischen globalen BIP-Anteilen der Vereinigten Staaten vergleichbar. Aufgrund ihres im Vergleich langsameren ökonomischen Wachstums entfallen im Jahr 2050 auf die Vereinigten Staaten sowie die Volkswirtschaften der Europäischen Union mit jeweils 16%-18% etwas geringere globale BIP-Anteile. Als weitere auch im Jahr 2050 global bedeutsame Volkswirtschaft wird in beiden Szenarien zudem China mit globalen BIP-Anteilen in einer Größenordnung von jeweils etwa 16% ausgewiesen.

Tabelle 26: Strukturen der Weltwirtschaft: Wachstumsbeiträge ausgewählter Regionen

	Industrieland Deutschland	Klimaaktives Deutschland
Rest der Welt	50,86%	43,56%
Vereinigte Staaten	8,86%	10,90%
EU27	8,88%	10,91%
Japan	0,49%	1,97%
China	20,00%	20,54%
Indien	8,18%	7,63%

Angaben als Relation der Zunahme des regionalen Bruttoinlandsprodukts im Vergleich zur Zunahme des globalen Bruttoinlandsprodukts (jeweils in konstanten 2010 US-\$) im Zeitraum 2015-2050.

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 27: Strukturen der Weltwirtschaft: Regionale Anteile am globalen BIP

	Jahr 2000	Jahr 2050	
		Industrieland Deutschland	Klimaaktives Deutschland
Rest der Welt	17,4%	32,4%	30,2%
Vereinigte Staaten	22,2%	16,2%	16,6%
EU27	24,1%	17,3%	17,6%
Japan	8,0%	4,6%	5,0%
China	12,2%	15,7%	16,3%
Indien	3,3%	5,5%	5,4%
Übrige Länder*	12,8%	8,3%	8,7%

Übrige Länder = Australien, Brasilien, Kanada, Mexiko, Russland, Südkorea, Türkei

Angaben als %-Anteile des regionalen Bruttoinlandsprodukts am globalen Bruttoinlandsprodukt (jeweils in konstanten 2010 USD).

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Während für Japan in beiden Umfeld-Szenarien eine ein deutlicher Rückgang des Anteils an der globalen Wirtschaftsleistung gegenüber dem Jahr 2000 projiziert wird, erhöht sich der Anteil Indiens deutlich (auf rund 5,5%). Zieht man aber zusätzlich in Betracht, dass für Indien in den kommenden 35 Jahren ein Bevölkerungsanstieg um 15% erwartet wird und für Japan ein Rückgang der Bevölkerung um 23%, so relativieren sich die Implikationen auf eine Annäherung der ökonomischen Wohlstands niveaus (gemessen in BIP pro Kopf in konstanten 2010 USD): Betrug das BIP pro Kopf in Indien im Jahr 2015 lediglich 17% des globalen Durchschnitts so reduziert sich dieser Rückstand bis zum Jahr 2050 in beiden Projektionen auf Werte von etwa 30% des globalen Durchschnitts. Gleichzeitig geht der positive Abstand der Wohlstandsniveaus der industrialisierten Länder gegenüber dem globalen Durchschnitt nur geringfügig zurück: So reduziert sich der Faktor zwischen dem eigenen BIP pro Kopf und dem globalen pro Kopf Durchschnitt beispielsweise für Deutschland von 4,4 im Jahr 2015 auf 3,6 im Jahr 2050. Für Japan wird ein Rückgang von 4,6 in 2015 auf 4,1 in 2050 projiziert.

Tabelle 28: Territoriale CO<sub>2</sub>-Emissionen und Anteile der Regionen am globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß

	Jahr 2015		Jahr 2050			
	Gt	Anteil	Gt	Anteil	Gt	Anteil
Rest der Welt	6,8	22,1%	11,3	35,1%	7,3	34,6%
Vereinigte Staaten	4,8	15,5%	3,5	11,0%	2,2	10,6%
Europäische Union	3,7	11,9%	2,2	6,7%	1,6	7,6%
Japan	1,1	3,5%	0,7	2,1%	0,5	2,6%
China	8,7	28,1%	8,0	24,9%	4,9	23,2%
Indien	1,8	5,7%	2,7	8,4%	1,5	7,3%
Übrige Länder*	4,9	15,7%	3,8	11,8%	3,0	14,2%

Übrige Länder = Australien, Brasilien, Kanada, Mexiko, Russland, Südkorea, Türkei

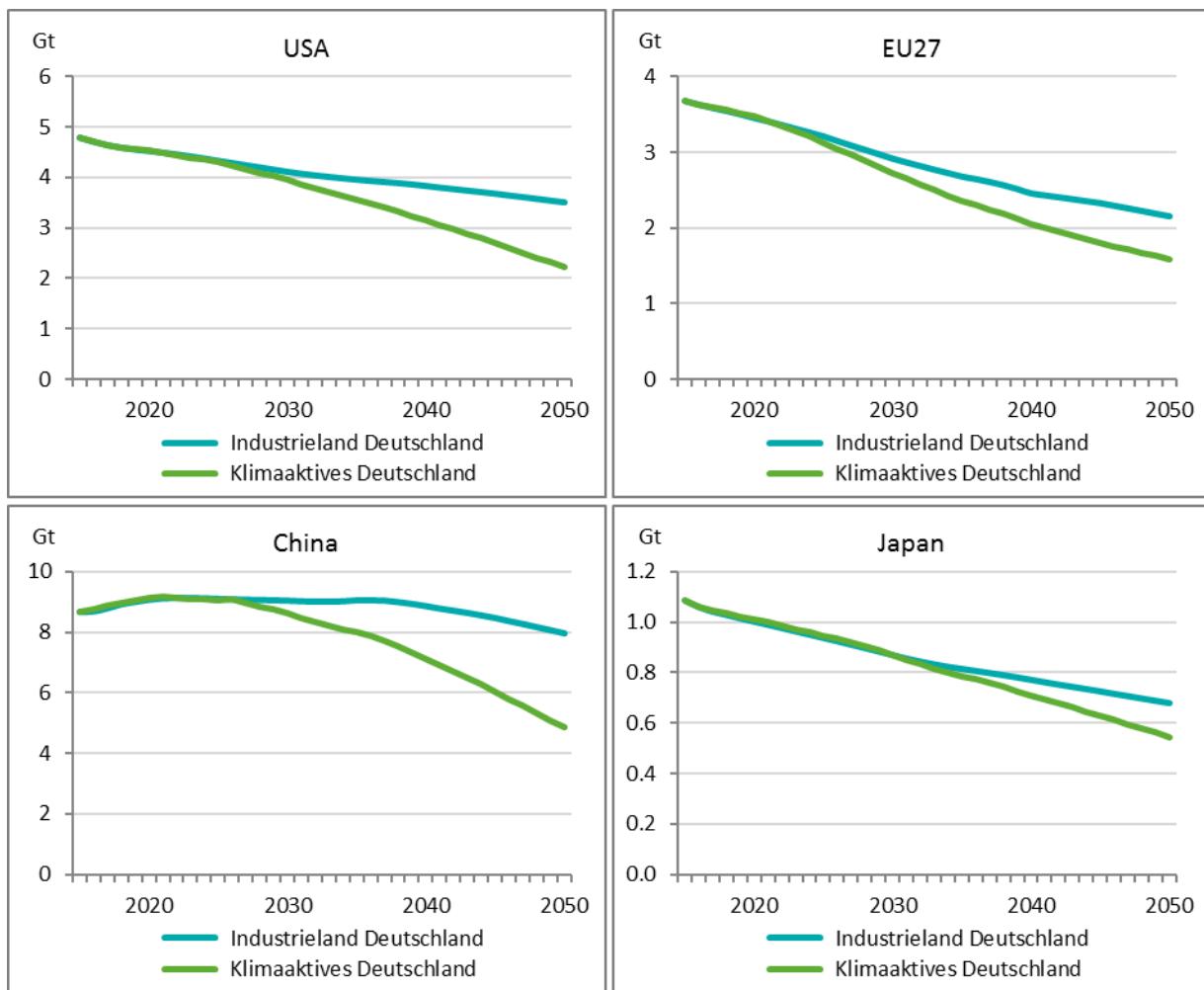
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

In Parallelität zur starken wirtschaftlichen Expansion der Region „Rest der Welt“ kann beobachtet werden, dass diese Region bis zum Jahr 2050 auch in beiden Umfeldszenarien zum weltweit größten CO<sub>2</sub>-Emittenten aufsteigt. Wie der Übersicht in Tabelle 28 entnommen werden kann, deuten beide Umfeldszenarien darauf hin, dass im Jahr 2050 mehr als die Hälfte sämtlicher territorialer CO<sub>2</sub>-Emissionen in der „Rest der Welt“-Region sowie in China freigesetzt werden. Der Anteil der etablierten Industriestaaten an sämtlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen wird im Vergleich hierzu deutlich reduziert. Während im Jahr 2015 noch knapp 31% sämtlicher globaler CO<sub>2</sub>-Emissionen von den Vereinigten Staaten, Japan sowie den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union emittiert wurden, reduziert sich der Anteil dieser drei Weltregionen an sämtlichen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 auf 19,9% („Industrieland Deutschland“) bzw. 20,8% („Klimaaktives Deutschland“).

Wie Abbildung 62 verdeutlicht, führen bereits in einem business-as-usual-Umfeld sich fortsetzender technologischer Wandel, gepaart mit einem langfristig zurückgehenden Wirtschaftswachstum, zu einem Rückgang der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen in den USA, Japan und der EU27. Mit -41% im Zeitraum 2015 bis 2050 fällt dieser Rückgang in der EU27 am Stärksten aus. Für China wird hingegen im Umfeldszenario „Industrieland Deutschland“ zunächst bis Mitte der 2020er Jahre noch mit einem weiteren Anstieg auf ca. 9,1 Gt gerechnet. Bis zum Jahr 2050 kommt es aber auch hier zu einem leichten Rückgang auf 8 Gt.

Im Vergleich wird das klimaaktive Szenario in allen soeben angesprochenen Regionen durch deutliche Rückgänge der CO<sub>2</sub>-Emissions-Niveaus gekennzeichnet. Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union erzielen dabei im Zeitraum 2015 bis 2050 eine Reduzierung ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen um gut 57%. Für die Vereinigten Staaten wird eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 54% projiziert. China erreicht in dieser Simulation eine Emissions-Reduktion um 44% während Japan seine Emissionen im Vergleich zum Jahr 2015 um 50% zurückführen kann.

Abbildung 62: Entwicklung territorialer CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Umfeldszenarien

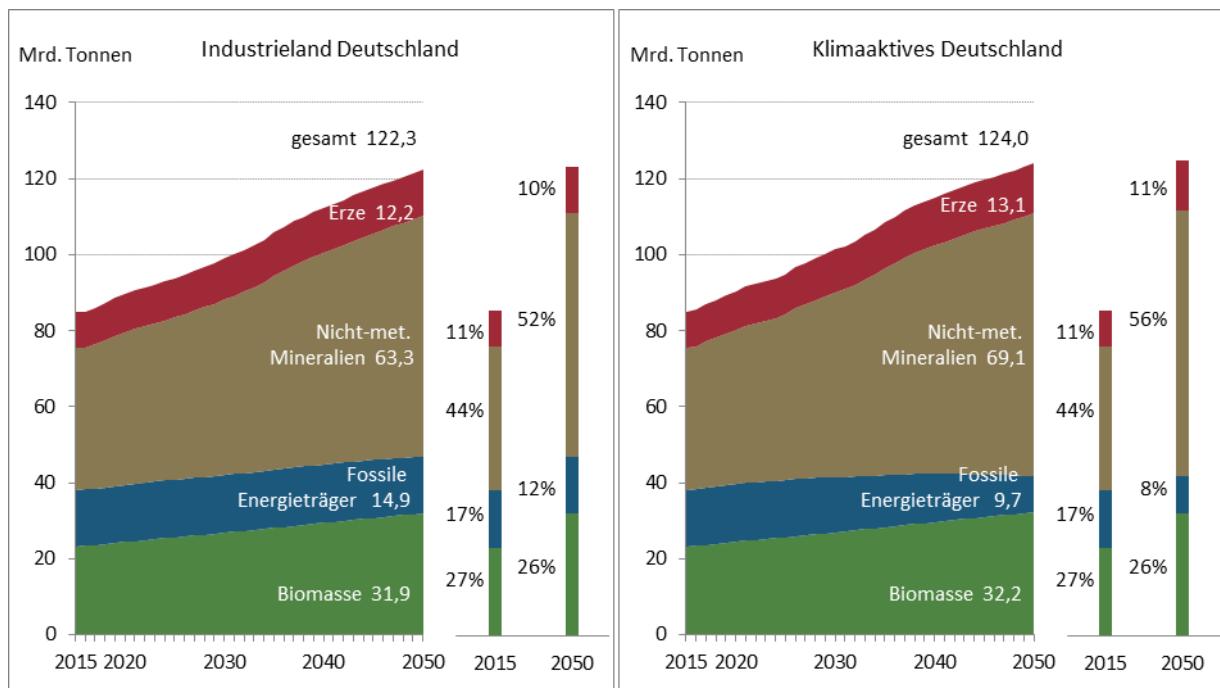


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Während damit sowohl das globale wirtschaftliche Geschehen wie auch die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissions-Strukturen wesentlich durch Entwicklungen in der Region „Rest der Welt“ geprägt werden, erweist sich diese Betrachtung auch bei der global projizierten Primärrohstoff-Nachfrage für Konsum und Investitionen (RMC) als zutreffend. Wie Tabelle 29 entnommen werden kann, deuten beide Umfeldszenarien darauf hin, dass im Jahr 2050 mehr als 40% der globalen Primärrohstoff-Nachfrage für Konsum und Investitionen auf den RMC „Rest der Welt“ zurückgeführt werden kann. Sowohl für China als auch für Indien werden ebenfalls weiter steigende Primär-Rohstoffbedarfe projiziert, insbesondere für China aber längst nicht mehr mit der Dynamik, wie sie in der jüngeren Vergangenheit zu beobachten war. Auf der anderen Seite wird für die industrialisierte Welt ein zurückgehender Primärrohstoffbedarf für Konsum und Investitionen projiziert. Mit -45% am Deutlichsten fällt dieser Rückgang in Japan aus. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass für Japan bis 2050 mit einem Bevölkerungsrückgang um 23% gerechnet wird.

Abbildung 63 fasst die hieraus in den jeweiligen Umfeldszenarien resultierenden globalen Projektionen der Primärrohstoff-Nachfrage für die jeweiligen Rohstoff-Kategorien zusammen. Wie bereits aus Abbildung 60 bekannt ist, unterscheiden sich beide Projektionen nur geringfügig bezüglich der jeweils global projizierten absoluten Extraktionsniveaus („Industrieland Deutschland“: 12,3 Gt, „Klimaaktives Deutschland“: 124 Gt).

Abbildung 63: Projektion der globalen Ressourcenextraktionen bis 2050



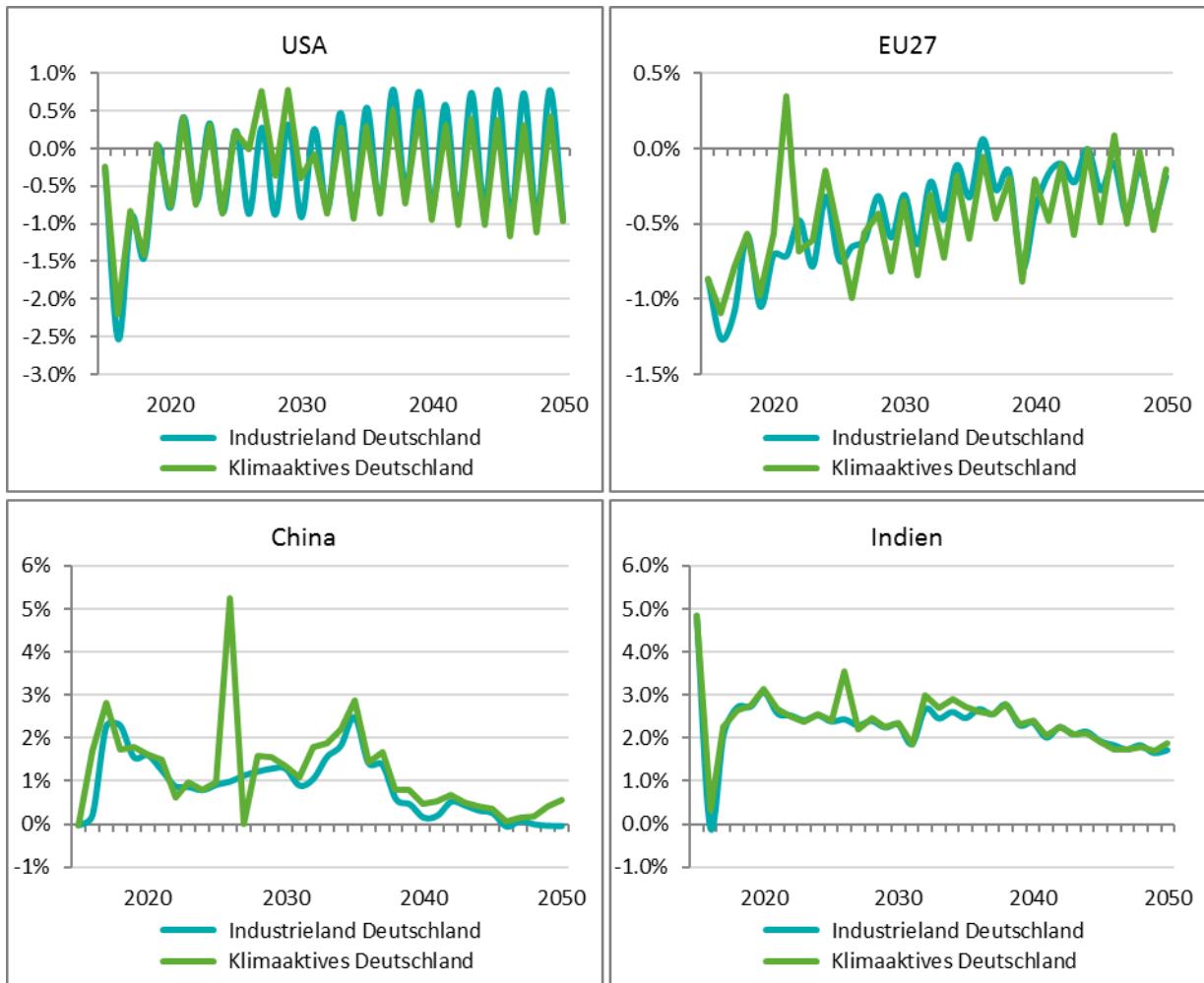
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Durch die hier erfolgende Betrachtung einzelner Rohstoffkategorien wird im Vergleich zum „Industrieland Deutschland“- Szenario deutlich, dass dieser Befund insbesondere auf einen Anstieg der Extraktionen nicht-metallischer Minderenalien bei gleichzeitigem Rückgang der Extraktionen fossiler Energieträger im klimaaktiven Umfeldszenario zurückzuführen ist. Die Reduktion der global genutzten Extraktionen fossiler Energieträger (Jahr 2050-Werte: „Industrieland Deutschland“ 14,9 Gt, „Klimaaktives Deutschland“ 9,7 Gt) resultiert unmittelbar aus den ambitionierteren exogenen klimapolitischen Vorgaben des Umfeldszenarios „Klimaaktives Deutschland“. Die zur globalen Umstellung des Energiesystems notwendigen Investitionen werden modellendogen abgebildet. Im „Klimaaktiven Deutschland“ implizieren diese (sowie die durch globale Einkommenseffekte ausgelöste Nachfragesteigerungen) sowohl einen deutlichen Anstieg der globalen Nachfrage nach nicht-metallischen Mineralien (Jahr 2050-Werte: „Industrieland Deutschland“ 63,3 Gt, „Klimaaktives Deutschland“ 69,1 Gt) wie auch der globalen Nachfrage nach Erzen (Jahr 2050-Werte: „Industrieland Deutschland“ 12,2 Gt, „Klimaaktives Deutschland“ 13,1 Gt).

Im Vergleich hierzu sind die Projektionen der globalen Biomasse-Nutzung in beiden Umfeldszenarien nahezu identisch (Jahr 2050-Werte: „Industrieland Deutschland“ 31,9 Gt, „Klimaaktives Deutschland“ 32,2 Gt). Dieses Ergebnis ist intuitiv plausibel, da beide Umfeldszenarien auf identischen Bevölkerungsprojektionen basieren und die globale Biomassenutzung auch in der Vergangenheit keine nennenswerte Einkommenselastizität aufwies.

Die Hintergründe der projizierten Entwicklungen werden in Abbildung 64 etwas detaillierter dargestellt. Während die simulierten RMC-Werte für traditionelle Industrienationen keine nennenswerte Dynamik aufweisen (siehe hierzu die beispielhaft abgebildeten Wachstumsraten des RMC der Vereinigten Staaten sowie der Europäischen Union), werden für China noch bis zum Ende der 2030er Jahre durchschnittlich jährliche Wachstumsraten in einer Größenordnung von 1,2% (Industrieland Deutschland) bis 1,5% (Klima-aktives Deutschland) projiziert. Diese Werte werden im Fall von Indien mit jährlichen Wachstumsraten in Größenordnungen von durchschnittlich 2,5%-2,6% bis zum Ende der 2030er Jahre noch übertroffen.

Abbildung 64: Jährliche Wachstumsraten des Rohstoffkonsums (RMC) in den USA, der EU27, China und Japan



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Die soeben angesprochenen Simulationsergebnisse für China und Indien können durchaus kritisch hinterfragt werden, da sie anhaltend hohe Investitionsaktivitäten zum weitergehenden Ausbau der jeweiligen Infrastrukturen reflektieren. Für eine detailliertere Abbildung der zukünftigen Einflussfaktoren auf die Primärrohstoffanspruchnahme von Schwellenländern könnte daher erwogen werden, die Wachstumstreiber des Infrastrukturbedarfs einer eigenständigen empirischen Analyse zu unterziehen (vgl. hierzu bspw. Fishman et al. 2016), um auf Basis dieser Befunde die Simulationseigenschaften des Modells weitergehend zu adjustieren.

Tabelle 29: Regionale Material-Fußabdrücke (RMC) und Anteile am globalen Primärrohstoffkonsum

	Jahr 2015		Jahr 2050			
	Gt	Anteil	Gt	Anteil	Gt	Anteil
Rest der Welt	21,9	25,8%	44,2	36,2%	40,7	32,9%
Vereinigte Staaten	8,6	10,1%	7,8	6,4%	7,7	6,2%
Europäische Union	9,0	10,7%	7,7	6,3%	7,7	6,2%
Japan	2,2	2,6%	1,2	1,0%	1,2	1,0%
China	29,3	34,5%	40,3	33,0%	44,8	36,2%
Indien	6,0	7,1%	13,1	10,7%	13,5	10,9%
Übrige Länder*	7,8	9,2%	7,9	6,5%	8,2	6,6%

Übrige Länder = Australien, Brasilien, Kanada, Mexiko, Russland, Südkorea, Türkei

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

#### 4.2.1.2 Befunde für Deutschland

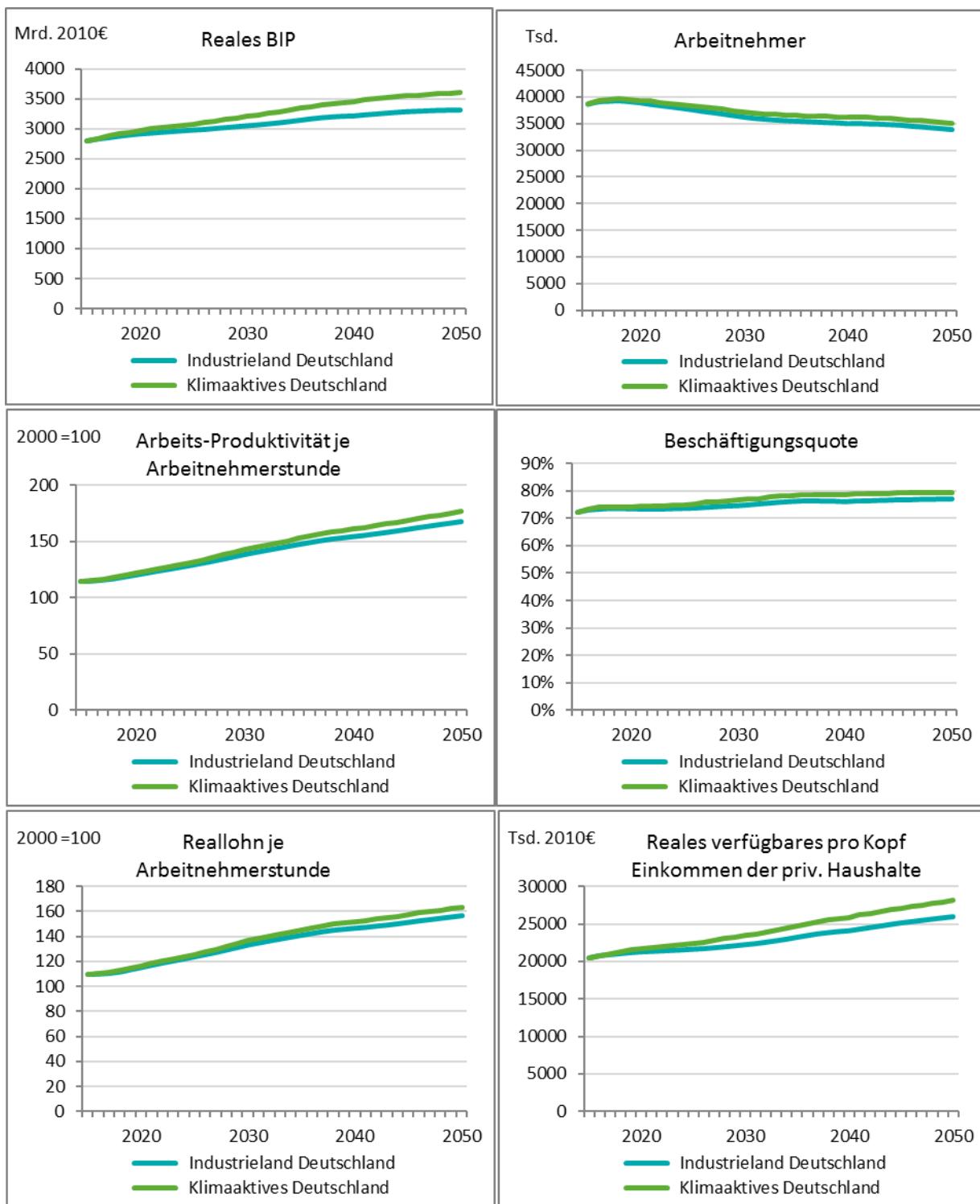
##### Wirtschaftliche Entwicklung

Die vorherige Betrachtung globaler Entwicklungstrends verdeutlichte, dass beide Umfeldszenarien langfristig internationale Nivellierungstendenzen implizieren. Ein näherer Blick auf nationale Projektionsergebnisse veranschaulicht dabei, dass diese Befunde auf überdurchschnittliche Wachstumsraten in heutigen Schwellenländern zurückgeführt werden können. Bis in die Mitte des 21. Jahrhunderts werden in beiden Umfeldszenarien auch für etablierte Industrienationen positive ökonomische Wachstumsraten projiziert. Die Simulationen deuten allerdings darauf hin, dass sich diese Zuwächse aufgrund der langfristig nachlassenden Importdynamik in den aufstrebenden Weltregionen im Zeitablauf deutlich abschwächen.

Exemplarisch sei hierzu auf den linken oberen Zeitreihenplot der Abbildung 65 verwiesen. Abgebildet ist das preisbereinigte Niveau des Deutschen Bruttoinlandsprodukts in Mrd. 2010€. In beiden Umfeldszenarien kann ein langfristiger Anstieg des deutschen Bruttoinlandsprodukts beobachtet werden. Im Umfeld-Szenario „Industrieland Deutschland“ wird das deutsche Bruttoinlandsprodukt zwischen 2015 und 2050 um 18,6% gesteigert. Das Umfeld-Szenario „Klimaaktives Deutschland“ wird im Vergleich hierzu sogar durch deutlich höhere Zuwächse (28,9%) charakterisiert. Die jeweiligen jährlichen Wachstumsraten in den 2020er und 2030er Jahren betragen 0,5% („Industrieland Deutschland“) bzw. 0,7% („Klimaaktives Deutschland“). In den 2040er Jahren gehen die Wachstumsraten des preisbereinigten BIP in beiden Umfeldszenarien weiter zurück (auf durchschnittlich 0,3% bzw. 0,4% p.a.).

Da gleichzeitig für die gesamtwirtschaftliche Arbeitsproduktivität je Arbeitnehmerstunde bis 2050 ein Anstieg um 50% („Industrieland Deutschland“) bis 58% („Klimaaktives Deutschland“) gegenüber 2010 projiziert wird, kommt es in beiden Projektionen ab den 2020er Jahren zu einem Rückgang der Beschäftigung in Deutschland. Für das Jahr 2050 wird im Szenario „Industrieland Deutschland“ mit 33,9 Mio. Arbeitnehmern eine um 5,3 Mio. Arbeitnehmer geringere Beschäftigung als heute projiziert. Im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ fällt dieser Rückgang mit 4,2 Mio. Arbeitnehmern auf 35,0 Mio. Arbeitnehmer in 2050 erheblich geringer aus.

Abbildung 65: Makroökonomische Entwicklungen in Deutschland in den Referenzszenarien



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Aufgrund der exogen vorgegebenen Bevölkerungsentwicklung wird für den Zeitraum bis 2050 nicht nur ein Rückgang der gesamten Bevölkerung in Deutschland (auf 76,6 Mio. Einwohner in 2050), sondern auch ein Rückgang der Bevölkerung im Alter von 15 bis 64 Jahren erwartet (von 53,6 Mio. in 2015 auf 44 Mio. in 2050). Bildet man den Quotienten aus Arbeitnehmern und der Bevölkerung in dieser Altersgruppe, so zeigt sich, dass trotz des Rückgangs der Anzahl der Arbeitnehmer in beiden Umfeld-Szenarien ein Anstieg der Beschäftigungsquote projiziert wird.

Die beobachteten Steigerungen der Arbeitsproduktivität sowie die relative Verknappung des Arbeitsangebots im Zeitverlauf induzieren gemeinsam deutliche Anstiege des Reallohns. Wie der linke Zeitreihenplot der unteren Reihe in Abbildung 65 zeigt, steigt der Reallohn in Deutschland im Simulationszeitraum um 43% („Industrieland Deutschland“), bzw. 49% („Klimaaktives Deutschland“) an.

In der pro-Kopf Betrachtung steigt aufgrund des deutlichen Reallohn-Wachstums auch das durchschnittlich verfügbare Einkommen der privaten Haushalte in beiden Szenarien dauerhaft an. Wie der rechte Zeitreihenplot der unteren Reihe in Abbildung 65 verdeutlicht, sind dabei wiederum im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ die höchsten Zuwächse zu beobachten. Während im Szenario „Industrieland Deutschland“ das verfügbare pro-Kopf Einkommen der privaten Haushalte zwischen 2015 und 2050 preisbereinigt um 27% ansteigt belaufen sich die im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ im selben Zeitraum beobachtbaren Einkommenszuwächse auf 38%.

In der ersten Hälfte des Simulationszeitraums erweisen sich die Exportentwicklungen als wesentlicher Wachstumstreiber des deutschen Bruttoinlandsprodukts. Obwohl ab etwa Mitte der 2030er Jahre in beiden Szenarien stagnierende, bzw. leicht rückläufige Ergebnisse für den deutschen Außenbeitrag projiziert werden, können auch zum Ende des Simulationszeitraums im Vergleich zu historischen Relationen noch gestiegerte Außenbeitrags-Quoten beobachtet werden.

Wie der Abbildung 66 entnommen werden kann, entfielen im Jahr 2015 7% des preisbereinigten deutschen Bruttoinlandsprodukts auf den Außenbeitrag (also dem Saldo aus deutschen Exporten und Importen). In beiden Umfeldszenarien wird bis zum Jahr 2050 ein weiterer Anstieg des Außenbeitrags projiziert.<sup>103</sup> Im „Industrieland Deutschland“-Szenario steigt der Anteil des Außenbeitrags am BIP bis zum Jahr 2035 auf ca. 11,6% und sinkt dann bis zum Ende des Projektionszeitraums auf 10,7%. Im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ steigt der Anteil des Außenbeitrags am BIP ebenfalls zunächst weiter an. Der maximale Anteil wird mit 11,0% im Jahr 2033 erreicht. Bis zum Jahr 2050 reduziert sich der Anteil dann auf 9,2%.

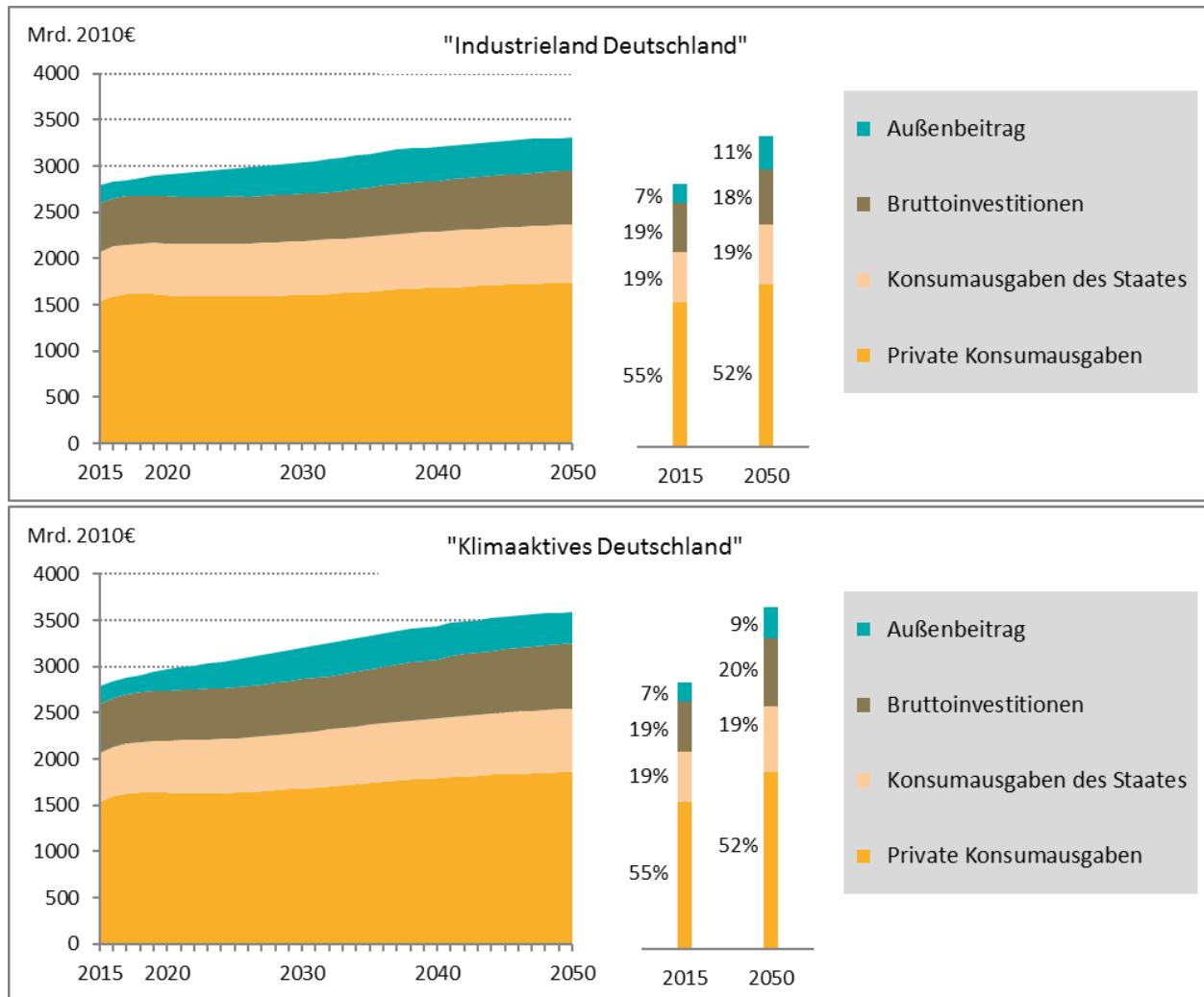
Diese Beobachtungen sind in beiden Szenarien jeweils auf den Umstand zurückzuführen, dass die deutschen Exportgüterindustrien insbesondere in der ersten Hälfte des Simulationszeitraums vom starken ökonomischen Wachstum und der hiermit einhergehenden Steigerung der Importnachfrage in anderen Weltregionen. Erst in den 2040er Jahren induziert eine sich in beiden Umfeldszenarien global abschwächende Importdynamik der aufstrebenden Weltregionen leicht rückläufige Entwicklungen des deutschen Außenbeitrags, welche auch die entsprechenden Entwicklungen des deutschen BIPs kennzeichnen.

Die im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ im Vergleich zum „Industrieland Deutschland“ dauerhaft höheren deutschen BIP-Wachstumsraten sind insbesondere auf den höheren Innovationsgrad des Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ zurückzuführen. Diesbezüglich sei an dieser Stelle bspw. noch einmal daran erinnert, dass für Deutschland im Szenario „Industrieland Deutschland“ lediglich ein Anstieg des Anteils erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung auf 69% bis zum Jahr 2050 unterstellt wurde. Im Vergleich hierzu steigt dieser Anteil im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ im Simulationszeitraum bis auf 100%. Zur Umsetzung dieses ambitionierten Ausbaupfades (wie auch zur Realisation weiterer exogener Innovationsvorgaben dieses Szenarios) sind im Vergleich zum Szenario „Industrieland Deutschland“ zusätzliche Investitionsausgaben notwendig, welche über modellendogen abgebildete Einkommenskreisläufe einen dauerhaften Anstieg des Bruttoinlandsprodukts im Vergleich zum Szenario „Industrieland Deutschland“ bewirken.

---

<sup>103</sup> Im Hinblick auf die projizierte langfristige Persistenz der deutschen Außenhandelsüberschüsse kann sicher kritisch eingewandt werden, dass eine solche Entwicklung aus globaler, politökonomischer Sicht zumindest fragwürdig ist. Diesem Einwand ist uneingeschränkt zuzustimmen. Die ökonomischen Triebkräfte, die in den Modellierungen bottom-up für alle Länder/Regionen und Gütergruppen abgebildet sind, lassen jedoch keinen Beleg dafür finden, dass sich die (nicht nur für Deutschland) beobachtbaren Handelsbilanzüberschüsse und -defizite in Zukunft abbauen werden.

Abbildung 66: Entwicklung des deutschen BIP nach Verwendungskomponenten in den Umfeld-Szenarien, 2015 bis 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Ab den 2030er Jahren repräsentieren die Bruttoinvestitionen im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ daher die am stärksten wachsende Verwendungskomponente des deutschen BIPs. Im Jahr 2050 liegt der Anteil der Bruttoinvestitionen am deutschen BIP folglich im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ mit ca. 19,9% ungefähr 2%-Punkte oberhalb des entsprechenden Wertes des Szenarios „Industrieland Deutschland“.

Hinsichtlich der Entwicklung der Anteile des Staatskonsums sowie des Privaten Konsums können keine wesentlichen Variationen zwischen beiden Szenarien beobachtet werden. Der Anteil des Staatskonsums bleibt in beiden Szenarien langfristig nahezu unverändert und berechnet sich im Jahr 2050 jeweils zu 19%. Die Konsumausgaben des Staates in konstanten 2010€ nehmen somit bis 2050 gegenüber heute um 102 Mrd. bzw. 19% im Szenario „Industrieland Deutschland“ und um 154 Mrd. bzw. 29% zu. Diese Expansion steht aber in beiden Szenarien nicht im Widerspruch zu langfristigen haushaltspolitischen Zielen. Zwar wird in beiden Projektionen für den im Modell endogen erklärten Finanzierungssaldo des Staates spätestens in 10 Jahren eine Rückkehr zu roten Zahlen erwartet. Die Defizitquote erreicht aber bis zum Jahr 2050 lediglich 0,8% bis 1% des Bruttoinlandsprodukts.

Aufgrund der langfristigen demographischen Entwicklung repräsentiert der Private Konsum die am langsamsten wachsende deutsche BIP-Verwendungskomponente. Bis zum Jahr 2050 reduzieren sich daher in beiden Umfeldszenarien die BIP-Anteile des Privaten Konsums von historisch beobachteten 55% auf rund 52%.

## Entwicklung der Bruttowertschöpfung und Beschäftigung nach Wirtschaftsbereichen in den Szenarien

Die in den jeweiligen Umfeldszenarien implizierten strukturellen Veränderungen der deutschen Wirtschaft werden in Abbildung 67 dargestellt. Im Vergleich der Zeitpunkte 2050 und 2015 wurde hier für aggregierte Wirtschaftszweige die Veränderung der Bruttowertschöpfung im Verhältnis zum makroökonomischen BIP-Preisdeflator abgebildet. Wie sich zeigt, überwiegen positive Entwicklungen die sektorale Befunde: Im Durchschnitt erleben sämtliche Zweige der deutschen Wirtschaft zwischen 2015 und 2050 einen langfristigen Anstieg ihrer preisbereinigten Bruttowertschöpfung, wobei dieser in der klimaaktiven Umfeldparametrisierung deutlich positiver ausfällt (14,1% im Industrieland Deutschland, 24,3% im Klimaaktiven Deutschland).

Einige markante Ausnahmen sind durch den Bergbau, das Baugewerbe sowie (in schwächerer Ausprägung) das Ernährungsgewerbe gegeben, welche zwischen 2015 und 2050 in beiden Umfeldszenarien rückläufige Entwicklungen der preisbereinigten Bruttowertschöpfung aufweisen.

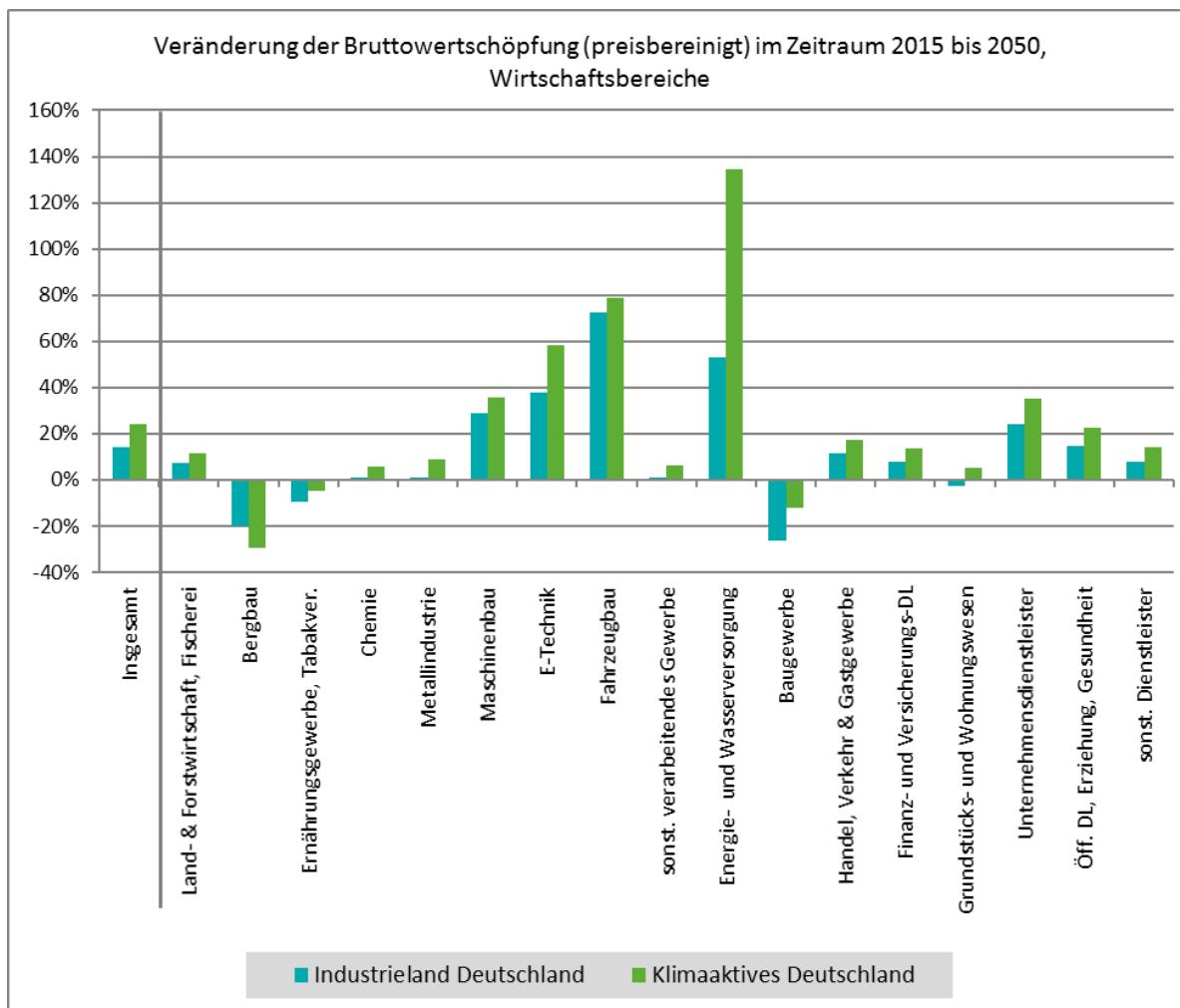
Diese Befunde können unmittelbar auf die exogen vorgegebene Bevölkerungsdynamik zurückgeführt werden. Wie bereits erwähnt, unterstellen beide Umfeldparametrisierungen einen Rückgang der Einwohnerzahl um etwa 5 Millionen sowie eine Reduktion des Anteils der 15 bis 64-jährigen an der Bevölkerung bis zum Jahr 2050. Damit induziert die demographische Entwicklung in Deutschland einen langfristigen Rückgang der Nachfrage nach Nahrungs- und Genussmitteln wie auch nach Immobilien. Beide Wirtschaftszweige sind dabei mit unterschiedlichen Preiselastizitäten der Nachfrage konfrontiert, wobei der Konsum von Nahrungs- und Genussmitteln eine relativ geringe Preiselastizität aufweist. Vor Hintergrund einer steigenden Weltbevölkerung und damit einhergehender globaler Nachfrage- und Preissteigerungen für Nahrungs- und Genussmittel, fällt es dem deutschen Ernährungsgewerbe daher im Vergleich zum Baugewerbe leichter, reale Nachfrageverluste durch positive Preisdynamiken zu kompensieren. Der resultierende Gesamteffekt auf die Entwicklung der preisbereinigten Bruttowertschöpfung erweist sich daher im Fall der deutschen Nahrungs- und Genussmittel-Industrie als relativ moderat (-9,6% im Industrieland Deutschland, -5% im Klimaaktiven Deutschland). Im Vergleich hierzu erleidet das Baugewerbe deutlich stärkere Rückgänge der preisbereinigten Bruttowertschöpfung (-26,5% im Industrieland Deutschland, -12,3% im Klimaaktiven Deutschland). Als wichtiger Vorleistungslieferant erleidet hierdurch auch der Bergbau deutliche Wertschöpfungsverluste. Bemerkenswert ist allerdings, dass die Wertschöpfungsverluste des Bergbaus im Umfeldszenario Klimaaktives Deutschland (-29,7%) deutlich höher ausfallen als im Umfeldszenario Industrieland Deutschland (-20,1%). Da das Baugewerbe im Klimaaktiven Deutschland deutlich von im Vergleich zum Industrieland Deutschland gesteigerten makroökonomischen Investitionsaktivitäten profitiert, wird die beobachtbare Entwicklung der Wertschöpfung des deutschen Bergbaus auch durch Veränderungen der Nachfrage nach fossilen Energieträgern geprägt. Die nationale wie auch internationale Reduktion der Nachfrage nach fossilen Energieträgern induziert daher im Szenario Klimaaktives Deutschland einen im Vergleich zum Szenario Industrieland Deutschland stärkeren Rückgang der Bruttowertschöpfung im Bergbau.

Wie bereits zuvor erwähnt, steigt das das deutsche Bruttoinlandsprodukt zwischen 2015 und 2050 im Umfeld-Szenario „Industrieland Deutschland“ um 18,6% (28,9% im Umfeld-Szenario „Klimaaktives Deutschland“). Im Vergleich zu diesen makroökonomischen Referenzwerten erweisen sich in beiden Baselineszenarien der Fahrzeugbau (72,4% im Industrieland Deutschland, 78,7% im Klimaaktiven Deutschland)<sup>104</sup>, die Elektrotechnik (37,7% im Industrieland Deutschland, 58,6% im Klimaaktiven Deutschland), der Maschinenbau (29,0% im Industrieland Deutschland, 35,8% im Klimaaktiven Deutschland), Unternehmensdienstleister (24,3% im Industrieland Deutschland, 35% im Klimaaktiven Deutschland) sowie Dienstleistungen der Energie- und Wasserversorgung (53,3% im Industrieland Deutschland, 134,4% im Klimaaktiven Deutschland) als wesentliche Wachstumstreiber der deutschen Wirtschaft.

---

<sup>104</sup> Dies entspricht durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten von 1,6% (Industrieland Deutschland) bis 1,7% (Klimaaktives Deutschland).

Abbildung 67: Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen – Veränderungen im Zeitraum 2015 bis 2050

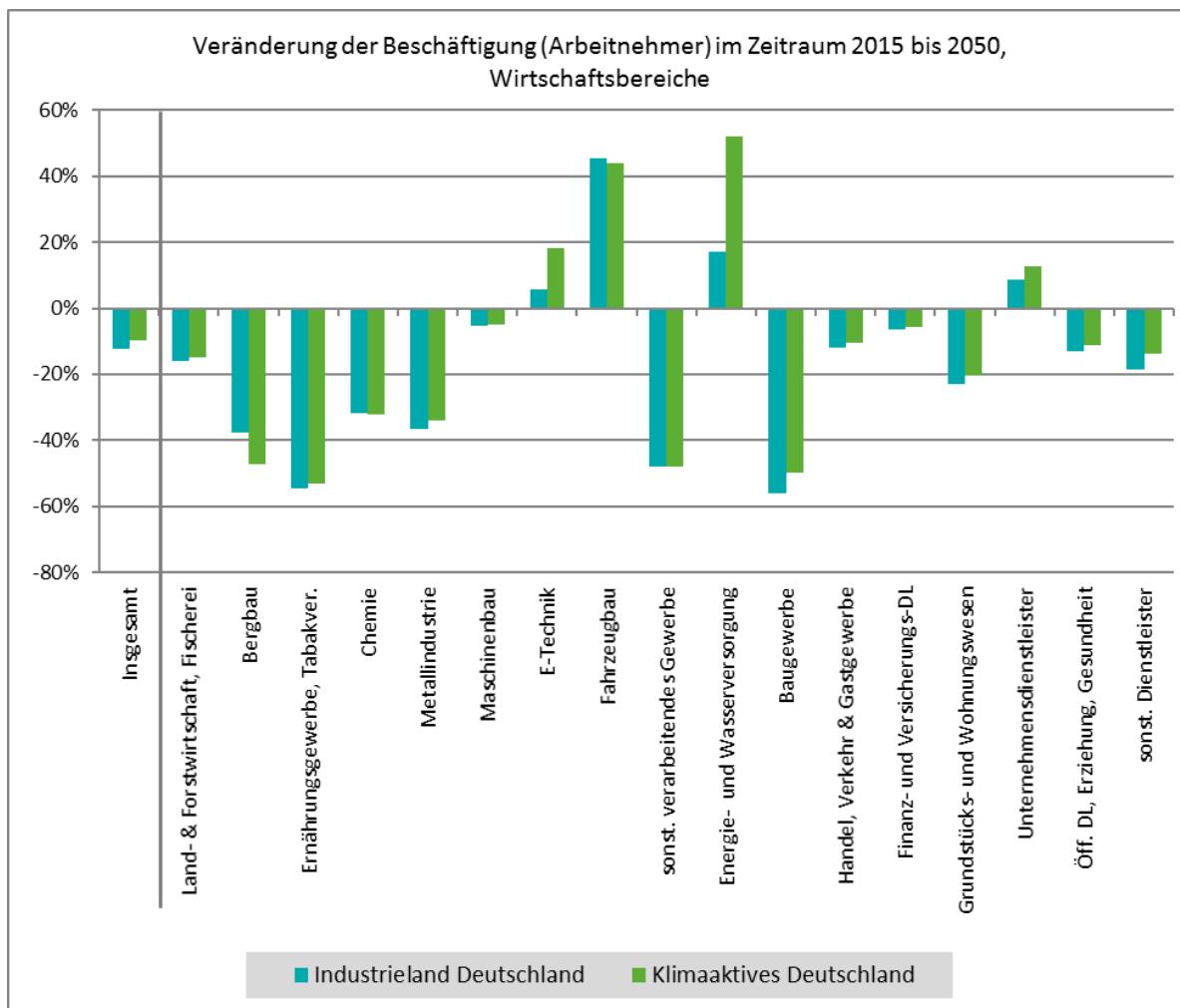


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Während (mit Ausnahme des Bergbaus) sämtliche Wirtschaftszweige im Szenario Klimaaktives Deutschland im Vergleich zum Industrieland Deutschland von höheren Steigerungen der Bruttowertschöpfung profitieren, ist dieser Effekt damit am deutlichsten im Bereich der Energie- und Wasserversorgung zu beobachten. Die markante Steigerung der Elektrizitätsnachfrage aufgrund der exogen unterstellten umfassenden Elektrifizierung des Straßenverkehrs erweist sich in diesem Fall als zentraler Wachstumstreiber.

Um eine inhaltliche Einordnung dieser Befunde zu erleichtern sei noch einmal daran erinnert, dass beide Umfeldszenarien durch die in Abschnitt 4.1 dokumentierten exogenen Modellvorgaben definiert sind. Für sämtliche dort nicht explizit genannten Szenarioaspekte gilt grundsätzlich eine Business as Usual Hypothese. Da bspw. keine direkten Veränderungen der globalen Marktanteile des deutschen Fahrzeugbaus in Folge der soeben angesprochenen umfassenden Elektrifizierung des Straßenverkehrs unterstellt wurden, basieren die zuvor berichteten Wachstumsprojektionen für den deutschen Fahrzeugbau auch auf der impliziten Annahme, dass die Entwicklungsdynamik dieses Wirtschaftszweigs bis zum Jahr 2050 in beiden Umfeldszenarien auf Basis historischer Anpassungsreaktionen projiziert werden kann. Weitergehende Analysen, bei denen bspw. unterstellt wird, dass der Übergang vom fossil-basierten Individualverkehr zur Elektromobilität auch von einer umfassenden Verschiebung der Verbraucherpräferenzen von traditionellen deutschen Fahrzeugbauprodukten zu US-amerikanischen oder bspw. japanischen Konkurrenzprodukten begleitet wird, können mit GINFORS3 grundsätzlich modelliert werden. Die Simulation eines entsprechenden Szenarios war aber nicht Gegenstand des SimRess-Projekts.

Abbildung 68: Beschäftigung (Arbeitnehmer) nach Wirtschaftsbereichen – Veränderungen im Zeitraum 2015 bis 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Während aus Abbildung 65 bereits bekannt ist, dass die Gesamtzahl der Arbeitnehmer in Deutschland aufgrund entsprechender demographischer Entwicklungen in beiden Szenarien als rückläufig projiziert wird, verdeutlicht Abbildung 68, dass dabei deutliche sektorale Unterschiede festgestellt werden können. Gesamtwirtschaftlich ergibt sich im Umfeldszenario Industrieland Deutschland zwischen 2015 und 2050 eine relative Verringerung der Anzahl der Arbeitnehmer um -12,4%. Im Klimaaktiven Szenario, welches höhere gesamtwirtschaftliche Wachstumsraten aufweist, schwächt sich dieser Rückgang auf -9,6% ab. Beschäftigungszuwächse sind dabei in beiden Umfeldszenarien in den stark wachsenden Bereichen des Fahrzeugbaus (45,4% im Industrieland Deutschland, 43,8% im Klimaaktiven Deutschland), der Elektrotechnik (5,9% im Industrieland Deutschland, 18,2% im Klimaaktiven Deutschland), der Unternehmensdienstleister (8,6% im Industrieland Deutschland, 12,8% im Klimaaktiven Deutschland) sowie der Dienstleistungen der Energie- und Wasserversorgung (17,0% im Industrieland Deutschland, 52,0% im Klimaaktiven Deutschland) zu beobachten.

Die durch die gesamtwirtschaftliche Verknappung des Arbeitsangebots sowie daraus resultierende Reallohn-Steigerungen forcierte Dynamik der Arbeitsproduktivität induziert allerdings bereits im wachsenden Maschinenbausektor langfristig einen moderaten Abbau von Arbeitsplätzen (-5,3% im Industrieland Deutschland, -4,9% im Klimaaktiven Deutschland).

Wir zu erwarten ist, sind in den zuvor angesprochenen Sektoren mit rückläufiger Entwicklung der Brutto-wertschöpfung deutlich negativere Arbeitsmarkteffekte zu beobachten. Im Fall der deutschen Nahrungs-

und Genussmittel-Industrie implizieren beide Umfeldszenarien eine ungefähre Halbierung der Zahl der Arbeitnehmer zwischen 2015 und 2050 (-54,6% im Industrieland Deutschland, -53,3% im Klimaaktiven Deutschland). Während die Anzahl der Arbeitnehmer im Bergbau in Relation zum Ausgangswert des Jahres 2015 in etwas schwächerem Ausmaß reduziert wird (-37,8% im Industrieland Deutschland, -47,2% im Klimaaktiven Deutschland), kennzeichnen qualitativ ähnliche Befunde die Beschäftigungsentwicklung im Bau- gewerbe (-56,3% im Industrieland Deutschland, -49,8% im Klimaaktiven Deutschland).

Deutlich rückläufige Beschäftigungszahlen werden in dieser Darstellung aber auch für vier weitere Wirtschaftszweige sichtbar. Im sonstigen verarbeitenden Gewerbe wird die Anzahl der Arbeitnehmer in beiden Umfeldszenarien bis zum Jahr 2050 jeweils ungefähr halbiert (-48,0% im Industrieland Deutschland, -47,8% im Klimaaktiven Deutschland).<sup>105</sup> In der Chemie- wie auch der Metallindustrie kann bis zum Jahr 2050 in beiden Umfeldszenarien jeweils ein Abbau von ca. einem Drittel der derzeitigen Arbeitsplätze beobachtet werden. Im Grundstücks- und Wohnungswesen, für welches langfristig lediglich graduelle Veränderungen der Bruttowertschöpfung projiziert werden, werden bis zum Jahr 2050 mehr als ein Fünftel aller Arbeitsplätze abgebaut (-23,1% im Industrieland Deutschland, -20,5% im Klimaaktiven Deutschland).

Als wichtiger Vorleistungslieferant erleidet hierdurch auch der Bergbau deutliche Wertschöpfungsverluste. Bemerkenswert ist allerdings, dass die Wertschöpfungsverluste des Bergbaus im Umfeldszenario Klimaaktives Deutschland (-29,7%) deutlich höher ausfallen als im Umfeldszenario Industrieland Deutschland (-20,1%). Da das Baugewerbe im Klimaaktiven Deutschland deutlich von im Vergleich zum Industrieland Deutschland gesteigerten makroökonomischer Investitionsaktivitäten profitiert, wird die beobachtbare Entwicklung der Wertschöpfung des deutschen Bergbaus auch durch Veränderungen der Nachfrage nach fossilen Energieträgern geprägt. Die nationale wie auch internationale Reduktion der Nachfrage nach fossilen Energieträgern induziert daher im Szenario Klimaaktives Deutschland einen im Vergleich zum Szenario Industrieland Deutschland stärkeren Rückgang der Bruttowertschöpfung im Bergbau.

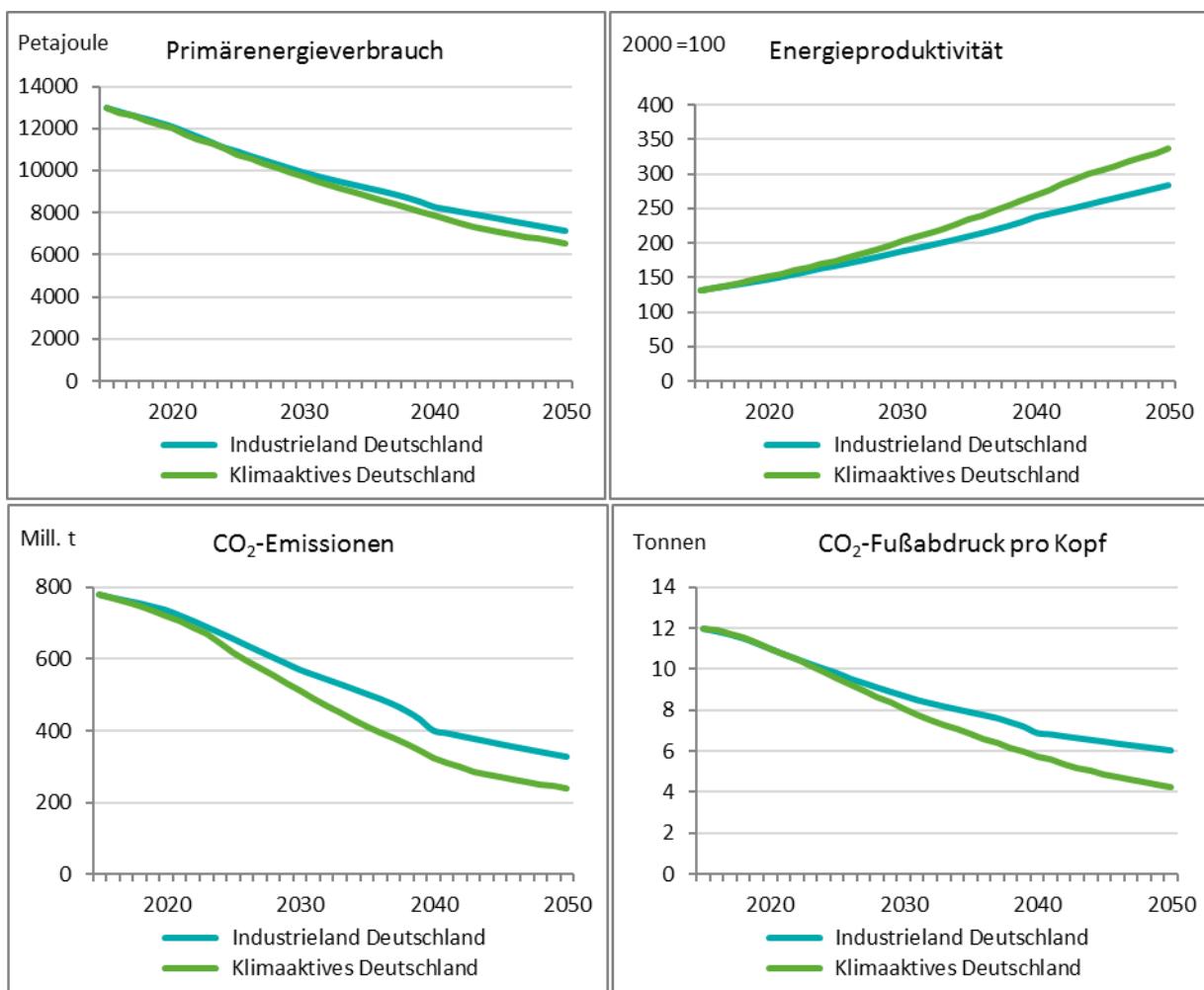
## Umweltindikatoren

Territoriale CO<sub>2</sub>-Emissionen werden in GINFORS3 bottom-up auf Grundlage der projizierten nationalen Energieverbräuche der Wirtschaftsbereiche und privaten Haushalte sowie des spezifischen CO<sub>2</sub>-Gehalts der jeweils eingesetzten Energieträger bestimmt. Unter Berücksichtigung der klimapolitischen Vorgaben beider Referenzszenarien werden modellendogen deutliche Effizienzsteigerungen bezüglich des Primärenergieverbrauchs in Deutschland erwartet (siehe Abbildung 69). So sinkt der deutsche Primärenergieverbrauch bereits im Umfeld-Szenario Industrieland Deutschland um ca. 45% zwischen 2015 und 2050. Im klimaaktiven Szenario werden diese Reduktionen weiter gesteigert, so dass hier insgesamt ein Rückgang des Primärenergieverbrauchs um annähernd 50% bis zum Jahr 2050 beobachtet werden kann. Die Energieproduktivität steigt damit bis zum Ende des Projektionszeitraums um 184% („Industrieland Deutschland“) bzw. 236% („Klimaaktives Deutschland“) gegenüber dem Jahr 2000.

---

<sup>105</sup> In der Darstellung wurden zum sonstigen verarbeitenden Gewerbe die Wirtschaftszweige Textil- und Bekleidungsgewerbe, das Leder- und Holzgewerbe, das Papier-, Verlags- und Druckgewerbe, der Bereich der Kokerei, Mineralölverarbeitung und der Herstellung von Brutstoffen, die Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren, das Glasgewerbe, die Herstellung von Keramik, die Verarbeitung von Steinen und Erden sowie die Herstellung von Möbeln aggregiert. Weitergehende Detaildarstellungen können von uns auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

Abbildung 69: Entwicklung von klimapolitischen Indikatoren Deutschlands, 2015 bis 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Auf Basis der Primär-Energieverbräuche sowie des modellierten Energieträger-Mixes wird im Umfeld-Szenario „Industrieland Deutschland“ ein Rückgang der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands auf 326 Mio. Tonnen im Jahr 2050 projiziert. Da in der klimaaktiven Variante stärkere klimapolitische Annahmen implementiert wurden, kann in diesem Umfeld-Szenario ein Rückgang der territorialen CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 77% im Vergleich zum Ausgangsniveau des Jahres 1990 auf 239 Mio. Tonnen im Jahr 2050 beobachtet werden.

Wird in Ergänzung hierzu der globale CO<sub>2</sub>-Fußabdruck Deutschlands betrachtet so fällt auf, dass auch dieser im Vergleich zu den zu Beginn dieses Kapitel vorgestellten globalen Entwicklungen im Zeitverlauf deutlich stärker reduziert wird. Für das Umfeld-Szenario „Industrieland Deutschland“ wird eine Reduktion des pro Kopf CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks um 49% zwischen 2015 und 2050 projiziert. Im klimapolitisch stärker ambitionierten Szenario „Klimaaktives Deutschland“ wird im selben Zeitraum eine Reduktion um 64% auf 4,2 Tonnen in 2050 erwartet.

### **Exkurs: Ist das Szenario „Klimaaktives Deutschland“ klimaaktiv genug?**

Abbildung 69 verdeutlichte, dass im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ eine deutliche Reduktion der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen realisiert wird. Im Vergleich zu den historischen Niveaus des Jahres 1990 werden diese in der Projektion bis zum Jahr 2050 um 77% vermindert. Dennoch bleibt zu konstatieren, dass dieser Reduktionspfad weder den Ambitionen Deutschlands zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf unter 2° C, noch dem im Szenario „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2013) attestierten Minderungsniveau von 95% gegenüber 2050 entspricht.

Vor diesem Hintergrund soll an dieser Stelle eine grundsätzliche Einordnung unserer klimapolitischen Ergebnisse im Vergleich zu anderen populären Studien erfolgen. Vorab sollte dabei darauf hingewiesen werden, dass diese Einordnung aktuell lediglich einen vorläufigen Charakter aufweisen kann. Da das SimRess-Projekt einem starken ressourcenpolitischen Fokus unterlag, konnten wir im Zuge der hier dokumentierten Arbeiten zunächst lediglich die Projektionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig in die Modellierung der aktuellen Modellversion integrieren. Unter Anwendung von GINFORS3 ist es damit möglich, bereits heute wesentliche Treibhausgasminderungspotentiale der Ressourcenschonungspolitik aufzuzeigen. Die damit bereits heute gegebenen Möglichkeiten zur Generierung qualitativer wie auch quantitativer Aussagen hinsichtlich der Muster, Effekte und Größenordnungen möglicher Treibhausgasminderungspotentiale von Ressourcenschonungspolitik sowie möglicher Ressourcenschonungspotentiale von Klimapolitik repräsentieren ein markantes Projektergebnis, welches uns in die Lage versetzt, die (derzeit gerade erst aufkeimende) Nexusanalyse von Wechselwirkungen zwischen Ressourcen- und Klimapolitik um eigenständige Beiträge zu bereichern. Gleichzeitig muss allerdings anerkannt werden, dass für umfassende Nexusanalysen zukünftig weitere Modellentwicklungen absolut notwendig erscheinen: Treibhausgas-Emissionen werden in der klimapolitischen Berichterstattung üblicherweise in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ausgewiesen. Damit können neben den unmittelbaren Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen auch weitere klimapolitisch relevante Effekte (wie bspw. die Entwicklung von Methan- oder Distickstoffoxid-Emissionen) in einem aggregierten Indikator abgebildet werden. Unter diesen gegebenen Hinweisen auf zukünftig anzustrebende weitergehende Modellentwicklungsaktivitäten sollten die folgenden Anmerkungen als eine erste qualitative Einordnung der SimRess-Projektionsergebnisse im Kontext aktueller Nexus-Debatten aufgefasst werden. Es verbleibt zukünftigen Forschungsprojekten überlassen, auf Basis dieser Vorarbeiten vertiefende quantitative Beurteilungen der hier angesprochenen Systemzusammenhänge voranzutreiben.

Bevor im Folgenden der Vergleich der Szenarien „Klimaaktives Deutschland“ aus dem SimRess-Projekt und „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ des Umweltbundesamtes sowohl aus methodischer als auch aus Ergebnissicht einer detaillierteren Analyse unterzogen werden soll, gilt unser Blick zunächst der Frage nach der Zukunftsverantwortung Deutschlands und anderer Länder zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs.

Tabelle 30: CO<sub>2</sub>-Budgets für die Welt, Deutschland und ausgewählte Länder

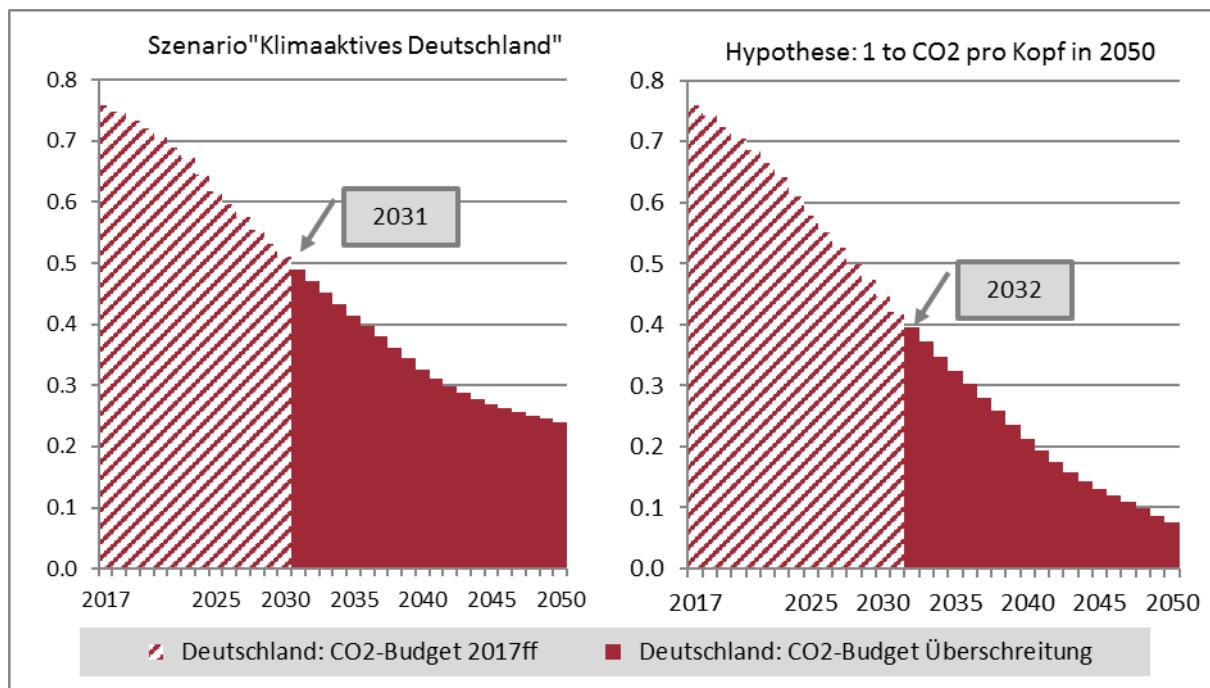
	Anteil an Weltbevölkerung 2015 [%]	CO <sub>2</sub> -Budget Ende 2016 [Gt]	CO <sub>2</sub> -Emissionen 2017 bis 2050 [Gt]	CO <sub>2</sub> -Budget Ende 2050 [Gt]	CO <sub>2</sub> -Budget Ende 2050 [t pro Kopf]
Welt	100	810	973	-163	-19
Deutschland	1,1	9	16	-7	-92
EU (ohne D)	5,8	47	70	-23	-60
USA	4,4	36	122	-86	-245
Japan	1,7	14	28	-14	-143
Russland	2,0	16	33	-17	-149
China	18,9	153	264	-111	-89
Indien	17,4	141	63	78	53
Brasilien	2,7	22	10	12	57

Quellen: Eigene Darstellung, GWS. Daten: IPCC 2014 (Cumulative global CO<sub>2</sub> emissions from 2011, probability of net anthropogenic warming < 2°C > 66%); UNSD (Bevölkerungsstatistik); Szenario „Klimaaktives Deutschland“ (CO<sub>2</sub>-Emissionen)

Hierzu fragen wir in einem ersten Schritt in Orientierung an die vom WBGU eingeführte Option II „Zukunftsverantwortung“ (WBGU 2009, 2014) nach den verbleibenden CO<sub>2</sub>-Budgets Ende 2016 global, für Deutschland und für ausgewählte weitere Länder. Vom IPCC wurde das ab Ende 2010 verbleibende globale CO<sub>2</sub> Kontingent, welches mit einer mehr als 66% Wahrscheinlichkeit zu einer anthropogenen Klimaerwärmung von weniger als 2°C führt, mit 1000 Gigatonnen abgeschätzt (IPCC 2014, p.64). In den Jahren 2011 bis 2016 wurden indes bereits rund 190 Gigatonnen dieses Kontingents „aufgebraucht“, so dass ab dem Jahr 2017 nur noch ein globales CO<sub>2</sub>-Budget von 810 Gigatonnen verbleibt. Für Deutschland bedeutet dies bei Zugrundelegung des Konzepts „Zukunftsverantwortung“, dass Ende 2016 ein CO<sub>2</sub>-Budget im Umfang von 9 Gigatonnen verblieb.<sup>106</sup> Vergleichen wir in einem nächsten Schritt diese CO<sub>2</sub>-Budgets mit den Projektionsergebnissen im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ für die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Jahren 2017 bis 2050 (siehe vierte Spalte in obiger Tabelle), so lässt sich das verbleibende CO<sub>2</sub>-Budget Ende 2050 ermitteln. Aus globaler Perspektive zeigt sich, dass in der Projektion bereits bis zum Jahr 2050 163 Gigatonnen CO<sub>2</sub> zu viel emittiert werden. Mit anderen Worten: Selbst, wenn ab den 50er Jahren des Jahrtausends weltweit gar kein CO<sub>2</sub> mehr emittiert würde, würde das CO<sub>2</sub>-Budget zur Begrenzung der anthropogenen Klimaerwärmung auf unter 2°C um mehr als 160 Gigatonnen überschritten. Für Deutschland kommt die Projektion zu kumulierten CO<sub>2</sub> Emissionen in einer Größenordnung von 16 Gigatonnen. Auch hier wird das CO<sub>2</sub>-Budget deutlich überschritten (um rd. 7 Gigatonnen, bzw. 92 Tonnen pro Kopf). Dieser Befund gilt jedoch auch für eine Vielzahl weiterer Länder. Besonders deutlich überschritten wird das CO<sub>2</sub>-Budget nach unseren Projektionsergebnissen in den USA (um 86 Gigatonnen) und in China (um 111 Gigatonnen). Auf der anderen Seite brauchen Länder wie Indien und Brasilien ihr aktuelles CO<sub>2</sub>-Budget bis zum Jahr 2050 voraussichtlich um weniger als 50% auf.

<sup>106</sup> Soll mit einer 33% Wahrscheinlichkeit die anthropogene Klimaerwärmung auf unter 1,5°C begrenzt werden, so reduziert sich das globale CO<sub>2</sub>-Budget Ende 2016 auf 660 Gigatonnen, das deutsche auf 7 Gigatonnen. Zur Wahrung einer 66% Wahrscheinlichkeit einer anthropogenen Klimaerwärmung von < 1,5°C stünden global nur noch ein CO<sub>2</sub>-Budget von 210 Gigatonnen und für Deutschland von 2,3 Gigatonnen zur Verfügung.

Abbildung 70: Wie lange reicht Deutschlands CO<sub>2</sub>-Budget noch?



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Als erstes Zwischenfazit lässt sich somit festhalten, dass die im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ berücksichtigten klimapolitischen Maßnahmen und Technologiepfade nicht ausreichen werden um der Verantwortung Deutschlands zur Begrenzung der anthropogenen Klimaerwärmung gerecht zu werden. Doch zur Beantwortung der Frage nach den Hintergründen für diese „Lücke“ ist der Blick auf das Jahr 2050, wie er im Folgenden durch den Vergleich mit dem UBA-Szenario „THG-neutrales Deutschland im Jahr 2050“ durchgeführt wird, nur eine Facette. Mindestens genauso wichtig ist der Blick auf den zeitlichen Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit das „Aufbrauchen“ des CO<sub>2</sub>-Budgets. Abbildung 66 zeigt diesbezüglich zunächst im linken Diagramm das Projektionsergebnis für Deutschland im Szenario „Klimaaktives Deutschland“. Es zeigt sich, dass demnach Deutschlands CO<sub>2</sub>-Budget bis zum Jahr 2031 aufgebraucht wäre.

Im rechten Diagramm ist diese Entwicklung mit einer hypothetischen Entwicklung kontrastiert. Es wird unterstellt, dass bis zum Jahr 2050 eine stärkere Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 1 Tonne pro Kopf gelingt. Zudem wird angenommen, dass die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Einsparung gegenüber dem Szenario „Klimaaktives Deutschland“ linear von 2017 bis 2050 ansteigt. Unter diesen Voraussetzungen zeigt sich eindeutig, dass die Betrachtung des Ziel-Jahrs 2050 allein nicht ausreicht um Aussagen zu Deutschlands Verantwortung für die globale Klimaerwärmung zu machen. Denn auch in diesem Fall wäre Deutschlands CO<sub>2</sub>-Budget bis zum Jahr 2032 und damit lediglich ein Jahr später aufgebraucht. Zudem kann der Abbildung implizit ein deutlicher Hinweis darauf entnommen werden, dass das im Klimaschutzplan der Bundesregierung (BMUB 2016b) definierte Ziel, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis spätestens 2030 um mindestens 55 Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken, nicht hinreichend ambitioniert erscheint. Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen wird diese Zielmarke im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ mit -51% knapp verfehlt. In der hypothetischen Entwicklung wird hingegen bis 2030 eine Minderung um 58% erreicht und dennoch ist bereits zwei Jahre später das CO<sub>2</sub>-Budget aufgebraucht. Als zweites Zwischenfazit lässt sich daher festhalten, dass eine Klimapolitik, die Deutschlands Verantwortung für die globale Erwärmung ernst nimmt, stärker als bisher eine ambitionierte Emissionsreduktion in der kurzen bis mittleren Frist in den Fokus nehmen sollte.

In einem weiteren Schritt gilt es, zentrale Aspekte der Methodik, Annahmen und Ergebnisse des SimRess-Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ und des UBA-Szenarios „THG neutrales Deutschland im Jahr 2050“ zu vergleichen. Während die Studie des Umweltbundesamtes eine rein nationale Perspektive einnimmt und ausschließlich die technische Machbarkeit einer THG-neutralen Gesellschaft untersucht, basiert das Szenario „Klimaaktives Deutschland“ auf einer globalen, dynamischen Modellierung der Interdependenzen zwischen wirtschaftlicher Entwicklung (Strukturwandel, technischer Fortschritt, Wettbewerb auf globalen Märkten, etc.), Energienachfrage und CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Ziel dieser Art der Modellierung ist es, nicht nur die direkten Wirkungen von technischen Transformationen (auf das Energiesystem), sondern insbesondere auch die vielfältigen induzierten indirekten und Rebound-Effekte zu berücksichtigen. Somit ist beispielsweise in der UBA-Studie das Wirtschaftswachstum in Deutschland exogen vorgegeben, wohingegen im vorangegangenen Abschnitt dieser Studie gezeigt wurde, dass bei einem schnelleren Umbau des Energiesystems ein nicht unerheblicher zusätzlicher Wachstumsbeitrag zu erwarten ist.

Trotz dieser grundlegenden methodischen Unterschiede bleibt aber auch zu konstatieren, dass im Hinblick auf einige zentrale Ergebnisse eine große Nähe zu beobachten ist:

- Das durchschnittliche Wachstum des deutschen Bruttoinlandsprodukts im Zeitraum bis 2050 ist in der UBA-Studie mit 0,7% angenommen. Die modellendogene Erklärung im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ kommt diesbezüglich auf einen Wert von 0,73%.
- In der UBA-Studie geht der deutsche Endenergieverbrauch von 2010 bis 2050 um rund 48% zurück. Im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ führen die modellendogenen Erklärungen in GINFORS zu einem etwas geringeren Rückgang um rund 41%.
- In beiden Szenarien steigt der Stromanteil am Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 deutlich an: auf 38% im UBA-Szenario und auf 41% im SimRess-Szenario.

Neben diesen Gemeinsamkeiten zeigt sich aber auch ein wesentlicher Unterschied zwischen den Szenarien: Während es in der UBA-Studie zu einer Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen Deutschlands auf 0 kommt, gelingt im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ bis 2050 lediglich eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf gut 210 Mio. Tonnen.

Um die Hintergründe für diese Differenz zu beleuchten, analysiert Tabelle 31 die Projektionsergebnisse für die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands nach Energieträgern im Szenario „Klimaaktives Deutschland“. Bei den Energieträgern Steinkohle & Koks sowie Braunkohle zeigt sich, dass im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf nahe null gelingt. Bei den Energieträgern Gas und leichtes Heizöl wird hingegen nur eine Reduktion um 68 bzw. 70% gegenüber 2010 erreicht. Mit anderen Worten: eine komplett CO<sub>2</sub>-freie Erzeugung von Wärme für die Haushalte und die Wirtschaft ist bis 2050 in dem Szenario noch nicht erreicht. Am Deutlichsten fallen hingegen die Unterschiede bei den Energieträgern Diesel, Benzin, Kerosin, Schweröl und sonstige Erdölprodukte aus. Hier wird im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ lediglich ein Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 2010 um 21% (Kerosin) bis 60% (Schweröl) projiziert.

Tabelle 31: Szenario „Klimaaktives Deutschland“, CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands nach Energieträgern

	CO <sub>2</sub> -Emissionen 2010 [Mio. t]	CO <sub>2</sub> -Emissionen 2050 [Mio. t]	Veränderung 2010 bis 2050 [%]
Steinkohle & Koks	139	11	-92%
Braunkohle	160	3	-98%
Diesel	88	47	-46%
Benzin	67	33	-51%
Kerosin	32	25	-21%
leichtes Heizöl	61	20	-68%
Schweröl	14	6	-60%
sonstige Erdölprodukte	46	22	-52%
Gas	152	45	-70%
Energie insgesamt	758	211	-72%
Abfall	28	12	-56%
Nicht-energetisch	47	16	-66%
Insgesamt	832	239	-71%

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Diese Differenz lässt sich jedoch sehr einfach erklären: Während im UBA-Szenario fossile Kraftstoffe bis 2050 vollständig durch stromgenerierte Kraftstoffe substituiert werden, ist im SimRess-Szenario die Power to Gas / Power to Liquid Technologie nicht berücksichtigt.<sup>107</sup> Wie bereits einleitend angesprochen, verbleiben entsprechende Modellentwicklungen für zukünftige Forschungsaktivitäten.

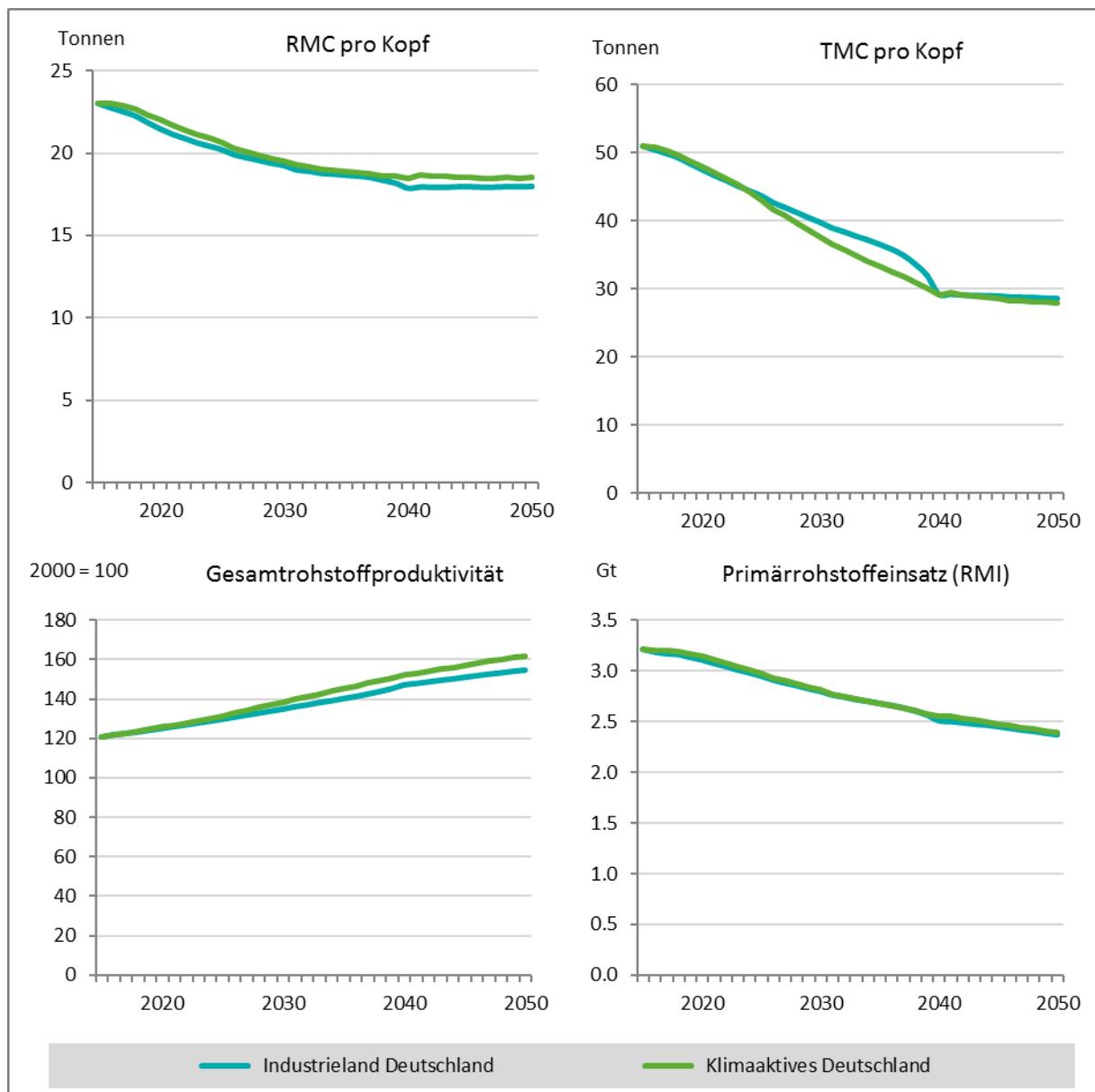
Als grundlegendes Fazit lässt sich aber bereits heute festhalten:

Das Szenario „Klimaaktives Deutschland“ bezweifelt keineswegs die technische Realisierbarkeit eines treibhausgasneutralen Deutschlands im Jahr 2050. Vielmehr wird unter Berücksichtigung der vielfältigen indirekten und Rebound-Effekte projiziert, wieviel noch zur Treibhausgasneutralität fehlt, wenn die Substitution von fossilen Brennstoffen durch regeneratives Methan und von fossilen Kraftstoffen durch regenerative Kraftstoffe (Power to Liquid) nicht berücksichtigt wird.

Um die Systemtransformation hin zu einer vollständig treibhausgasneutralen Gesellschaft auf Grundlage eines dynamischen, ökonometrischen EE-MRIO-Modells analysieren zu können, bedarf es weitergehender Forschungsaktivitäten, die über den Rahmen des SimRess-Projektes weit hinausgehen.

<sup>107</sup> Selbiges gilt auch für die Substitution von Brennstoffen durch regeneratives Methan.

Abbildung 71: Entwicklung von ressourcenpolitischen Indikatoren Deutschlands, 2015 bis 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Die Zeitreihenplots in Abbildung 71 dokumentieren die projizierten Entwicklungen gesamtwirtschaftlicher Rohstoffindikatoren für Deutschland. Im linken unteren Zeitreihenplot findet sich die projizierte Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität (definiert als Relation der Summe aus preisbereinigtem BIP und gesamtwirtschaftlicher Importnachfrage sowie dem Indikator RMI) abgebildet. Als Zielkorridor für die Zunahme der Gesamtrohstoffproduktivität wird bspw. von Günther und Golde (2015) bis zum Jahr 2030 ein Anstieg um 40% bis 60% im Vergleich zu 2010 gefordert. Mit einem Anstieg der Gesamtrohstoffproduktivität um 36% wird dieser Zielkorridor im klimaaktiven Umfeld-Szenario knapp verfehlt. Für das Umfeld-Szenario „Industrieland Deutschland“ werden zwar ebenfalls Steigerungen der Gesamtrohstoffproduktivität projiziert, allerdings verbleiben sie mit insgesamt rund 29% zwischen 2010 und 2030 noch deutlicher unter der genannten Zielmarke. Der Vergleich beider Umfeldszenarien verdeutlicht, dass eine aktive Klima- und Energiepolitik einen relevanten Beitrag zur Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität leisten kann. Dies gilt jedoch weder für das Ziel einer absoluten Reduktion des Rohstoffkonsums (RMC) noch für eine absolute Reduktion des Primärrohstoffeinsatzes (RMI) in Deutschland. Zwar kommt es im klimaaktiven Umfeld zu verringerten Inputs/Entnahmen von fossilen Energieträgern. Gleichzeitig führen aber sowohl die höheren

Investitionen als auch über Kreislaufeffekte induzierte Rebound-Effekte insgesamt zu einem leicht höheren Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) pro Kopf. Insbesondere die Projektions-Ergebnisse für den RMC pro Kopf, die lediglich einen moderaten Rückgang auf 18 Tonnen („Industrieland Deutschland“) bzw. 18,5 Tonnen („Klimaaktives Deutschland“) erwarten lassen, implizieren einen deutlichen politischen Handlungsbedarf. Die Dimension der notwendigen Ressourcenwende wird insbesondere 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)). Schließlich findet sich im rechten oberen Diagramm der Abbildung dargestellt, dass eine aktive Klima- und Energiepolitik sehr wohl einen Beitrag zur Reduktion des gesamten Materialkonsums (TMC), also unter Berücksichtigung der ungenutzten Entnahmen, leistet.

## 4.2.2 Das Szenario Klimaaktives Deutschland im Detail

### 4.2.2.1 Sensitivitätsanalyse

#### Hintergrund

In der Politikberatung sollte der Transparenz der angewandten Simulationsmodelle stets hinreichende Aufmerksamkeit gewährt werden. Wie bspw. auch von Koehler et al. (2016) diesbezüglich angemerkt wird, können die zur Analyse einer gegebenen Fragestellung grundsätzlich geeignet erscheinenden Modelle in der Regel relativ einfach aufgrund verfügbarer Informationen, bzw. Dank entsprechender Vorkenntnisse identifiziert werden. Wie bereits im zweiten Kapitel dieses Bandes festgehalten wurde, muss diese allgemeine (eher thematisch orientierte) Vorauswahl geeigneter Simulationsmodelle in der Anwendung dann aber um hinreichende Kenntnisse der wesentlichen Parametrisierungs-Annahmen des ausgewählten Simulationsmodells ergänzt werden. Hierzu könnte bspw. den Auftraggebern einer quantitativen Studie der Quellcode des angewandten Simulationsmodells zur Einsicht vorgelegt werden. Bei lehrbuchmäßiger Verfolgung eines ökonometrischen Ansatzes könnten zudem für jede Reaktionsfunktion des Modells Konfidenzintervalle der geschätzten Parameter sowie ggf. weiteren Ergebnisse zusätzlicher Spezifikationstests zur Verfügung gestellt werden.

In der Beratungspraxis zeigt sich allerdings, dass solch eine Vorgehensweise häufig von Entscheidungsträgern als nicht zielführend erachtet wird.<sup>108</sup> Zudem scheint solch ein Verfahren lediglich für kleine bis mittlere Simulationsansätze überhaupt praktikabel zu sein. Im Fall des Simulationsmodells GINFORS3 muss hierzu angemerkt werden, dass die Datenbank der im SimRess-Projekt eingesetzten Modellversion mehr als drei Millionen Zeitreihen enthält. Auch wenn nicht sämtliche dieser Zeitreihen ökonometrisch geschätzt werden,<sup>109</sup> kann der Versuch einer umfassenden Dokumentation sämtlicher Reaktionsfunktionen des Modells offensichtlich kritisch hinterfragt werden. Die resultierenden dynamischen Eigenschaften einer Vielzahl direkt und indirekt miteinander verbundener Gleichungen können letztlich nicht durch eine isolierte Betrachtung dieser Gleichungen nachvollzogen werden. Aufgrund dieser Tatsache werden große Simulationsmodelle häufig einem „black box“-Vorwurf ausgesetzt. Prinzipiell erscheint dieser Vorwurf etwas widersprüchlich. Gerade aus der hier thematisierten Komplexität umfassender systemischer Interdependenzen begründet sich ja die Notwendigkeit zur Quantifizierung, da nur auf Basis dieser Quantifizierung in Compu-

---

<sup>108</sup> Siehe hierzu bspw. (mit einem Blick auf die Praxis umweltpolitischer Assessments auf europäischer Ebene) folgendes Zitat: „Clarity on important modelling assumptions is necessary for the results to be interpreted appropriately. In the scientific literature, some fields always make the source code available. This is not useful for policymakers, but it might be possible to make the funding of model development dependent on transparency regarding methodology, assumptions and data.“ (Koehler et al., 2016; 30)

<sup>109</sup> Manche Zeitreihen bilden auch einfache ökonomische Identitäten (bspw. in der verwendungsseitigen Bestimmung des Bruttoinlandsprodukts) sowie ergänzende Aggregationen ab (bspw. bei Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Beschäftigung als Summe sämtlicher Beschäftigten in den einzelnen Wirtschaftsbereichen).

tersimulationen die aus unterschiedlichen Feedbackschleifen resultierenden Gesamteffekte mehrdimensionaler Ursache-Wirkungszusammenhänge konsistent abgebildet werden können. Sofern die quantitative Analyse komplexer Systemzusammenhänge als notwendig angesehen wird, ist es daher schlichtweg paradox, die kognitiven Grenzen des induktiv-analytischen Ansatzes einer Prüfung einzelner Gleichungen zur Diskussion der resultierenden Systemeigenschaften als pauschalen Einwand gegen die Verwendung großer Simulationsmodelle anzuführen. Diese Modelle wurden ja gerade dazu geschaffen, entsprechende Kognitionsgrenzen zu überwinden.

Dieses Argument entbindet die Entwickler von Simulationsmodellen aber selbstverständlich nicht im Ge- ringsten von ihrer notwendigen Pflicht, möglichst umfassende Transparenz ihrer Analyseinstrumente und der den jeweiligen Analysen zugrundeliegenden Annahmen zu gewährleisten. Wenn bei einer Modellanwendung keine entsprechenden Bemühungen zur Sicherstellung einer hinreichenden Transparenz erkennbar sind, ist der „black box“-Vorwurf auch grundsätzlich gerechtfertigt.

Im Sinne von Design-Modellierungen dienen Simulationsmodelle nicht dazu, eine zukünftige Entwicklung zu prognostizieren, sondern die systemischen Auswirkungen alternativer Szenario-Annahmen sichtbar zu machen. Erst diese Vergleichsmöglichkeit alternativer Szenario-Parametrisierungen schafft eine hinreichende Gelegenheit zur Evaluation der dynamischen Eigenschaften eines Modells.<sup>110</sup> Wie die bereits im Kapitel zwei angeführten Wissenschaftsphilosophinnen Morisson und Morgan treffend erläutern, können die wesentlichen Modelleigenschaften nur durch eine Beobachtung der Modellreaktionen auf Veränderungen der Basisannahmen abgebildet werden.<sup>111</sup> Unter Verweis auf ähnliche Argumentationen bspw. in UNEP (2014) sind wir daher ebenfalls davon überzeugt, dass in der Politikberatung nur Simulationsmodelle angewandt werden sollten, deren dynamischen Eigenschaften aufgrund geeigneter Simulationsvergleiche hinsichtlich ihrer internen Plausibilität geprüft werden konnten.<sup>112</sup> Die soweit erfolgte Gegenüberstellung der jeweiligen Befunde für zwei alternative Baseline-Parametrisierungen bietet in diesem Sinne eine notwendige Gelegenheit zur Abwägung der Plausibilität in Simulationsrechnungen mit dem dynamischen MRIO-Modell GINFORS3 implizierten Annahmen. Darüber hinaus zeigen empirische Analysen, dass in der Vergangenheit die Konsumausgaben der Privaten Haushalte in der Region „Rest der Welt“ schneller gewachsen sind als das BIP der Region (BIP-Elastizität  $> 1$ ), dass dieser Wachstumsvorsprung jedoch im Zeitverlauf abgenommen hat (erste Ableitung der BIP-Elastizität  $< 0$ ). Dieser Beobachtung wird in der Modellierung Rechnung getragen, indem als zusätzliche Erklärende ein nichtlinearer Zeittrend bei der Erklärung der Konsumausgaben berücksichtigt wird (siehe Trend 2 in nachstehender Abbildung).

In der Sensitivitätsanalyse wird nun untersucht, wie sich das System verändern würde, wenn statt des normalerweise berücksichtigten nichtlinearen Zeittrends zwei alternative, ebenfalls nichtlineare und ähnlich signifikant nachweisbare, Zeittrends wirksam würden:

- Ein Zeittrend, der im Vergleich zur „normalen“ Lösung, erst später sein Maximum erreicht (siehe Trend 1 in Abbildung 72).
- Ein Zeittrend, der im Vergleich zur „normalen“ Lösung, bereits früher sein Maximum erreicht (siehe Trend 3 in Abbildung 72).

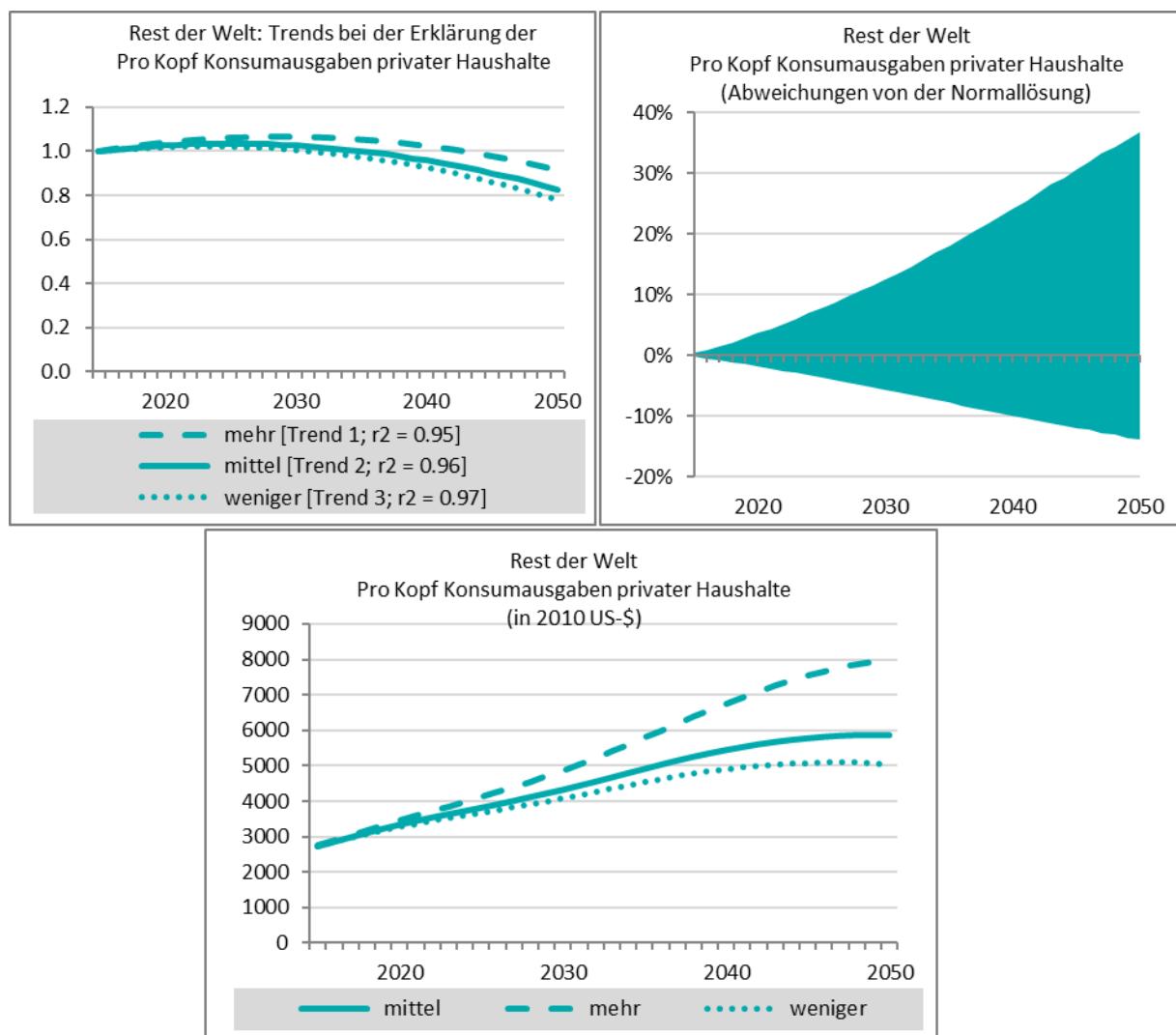
---

<sup>110</sup> In Ergänzung zu der soeben angesprochenen Herausforderung, dass die dynamischen Eigenschaften eines Simulationsmodells nicht allein durch Betrachtung der diese Eigenschaften generierenden Gleichungen verstanden werden können, sei an dieser Stelle noch explizit angemerkt, dass die isolierte Betrachtung eines einzelnen Business-as-Usual-Szenarios selbstverständlich ebenfalls keine hinreichende Transparenz des Modellrahmens etablieren kann.

<sup>111</sup> „We do not learn much from looking at a model – we learn more from building the model and from manipulating it.“ (Morisson und Morgan, 1999; S. 11f (eigene Hervorhebung))

<sup>112</sup> „In fact, generating an “accurate” output behaviour is not sufficient for model validity; what is crucial is the validity of the internal structure of the model. In short, it is often said that a system dynamics model must generate the “right output behaviour for the right reasons“. (UNEP, 2014; S. 29-30)

Abbildung 72: Sensitivitätsanalyse: Variationen des Privaten Konsums der Region "Rest der Welt"

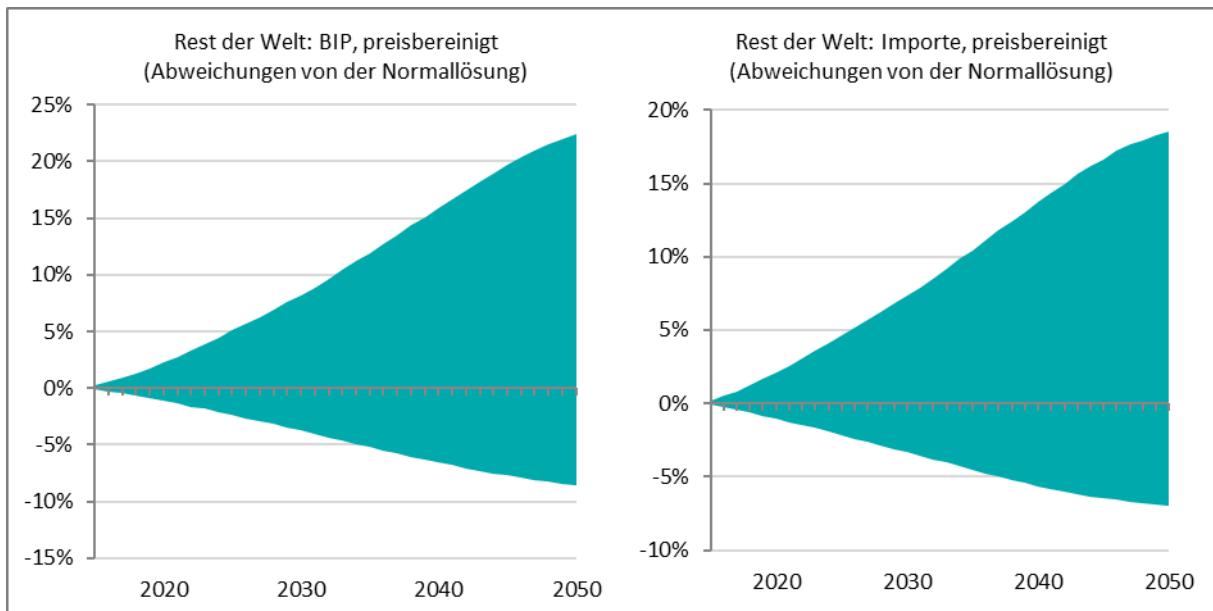


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Wie dem oberen rechten Diagramm der Abbildung entnommen werden kann, wird durch diese beiden ergänzenden Simulationen ein Ergebniskorridor aufgespannt, in welchem der Private Konsum der Rest der Welt Region im Jahr 2050 seinen ursprünglich im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ projizierten Wert um annähernd 37% übersteigt, bzw. um nahezu 14% hinter diesen Wert zurückfällt. Eine vollständige Übersicht zur Entwicklung des Privaten Konsums in den jeweiligen Simulationsvarianten kann dem unteren Zeitreihenplot der Abbildung 72 entnommen werden.

## Befunde

Abbildung 73: Sensitivitätsanalyse: Direkte gesamtwirtschaftliche Reaktionen in der Region "Rest der Welt"



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

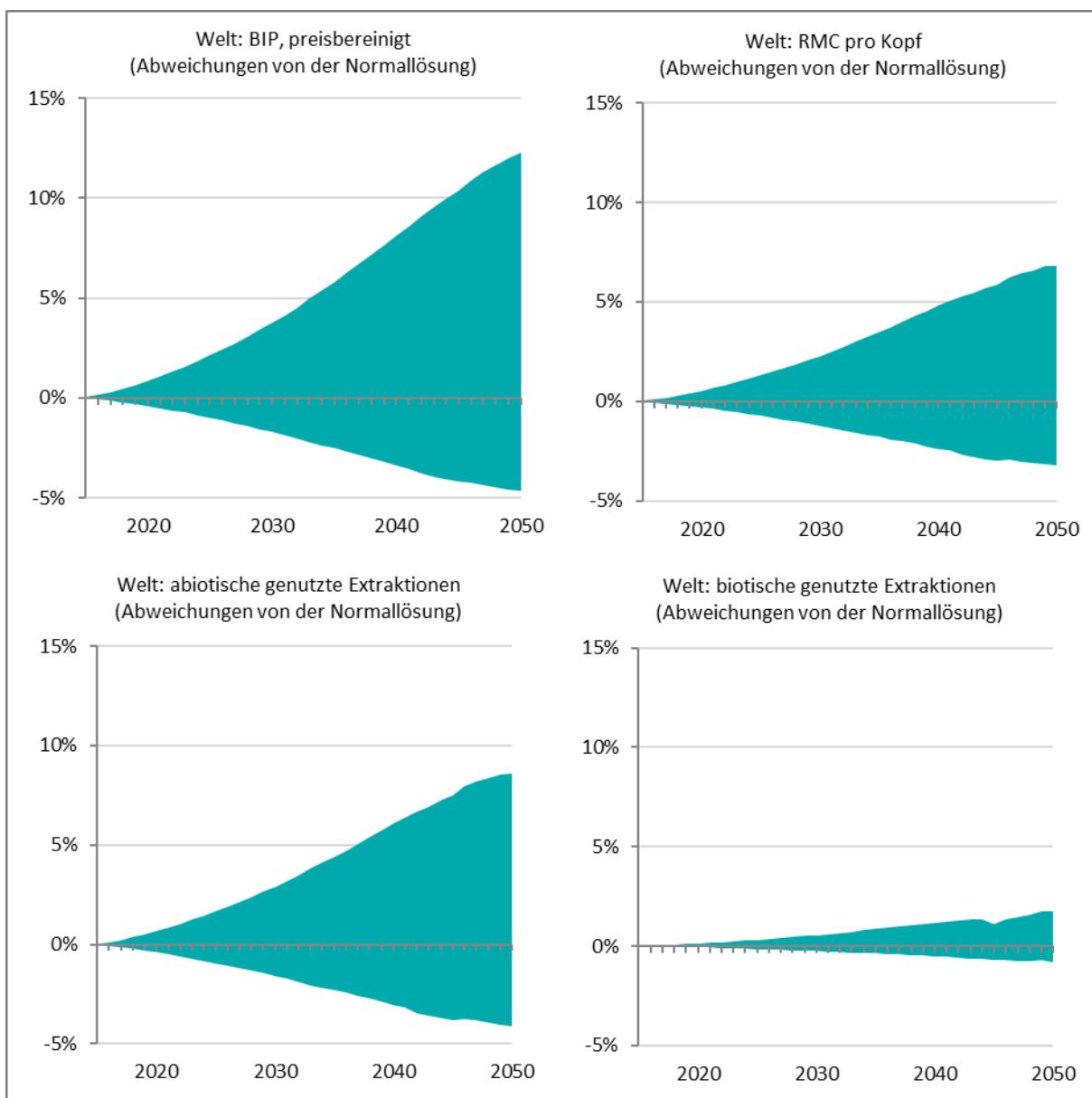
Der von uns unterstellte Nachfrageimpuls beeinflusst die Produktionstätigkeiten in der Region „Rest der Welt“ wie auch in anderen Weltregionen. Wie dem linken Zeitreihenplot in Abbildung 73 entnommen werden kann, werden für das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt der Rest der Welt Region im Jahr 2050 in Abhängigkeit vom unterstellten Impuls Steigerungen um bis 22,5%, bzw. Reduktionen um bis zu -8,6% im Vergleich zum Modellergebnis des Umfeld-Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ beobachtet.

Ähnliche prozentuale Variationen werden für die preisbereinigte Importnachfrage der Rest der Welt Region simuliert. Wie die rechte Grafik in Abbildung 73 verdeutlicht, induziert der positive Nachfrageschock im Umfeld-Szenario „Klimaaktives Deutschland“ bis zum Jahr 2050 eine Steigerung der realen Importe in die „Rest der Welt“ Region um ca. 18,3%. Die unterstellte Reduktion der privaten Konsumnachfrage dämpft hingegen die preisbereinigte Importnachfrage der Rest der Welt Region. Im hierzu simulierten Beispiel wird daher im Vergleich zur ursprünglichen Lösung des Umfeld-Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ im Jahr 2050 ein um annähernd -7% geringeres Importniveau beobachtet.

In der Folge induzieren die soeben vorgestellten Variationen der Importnachfrage der Rest der Welt Region internationale Handels- und daraus resultierende Einkommens- und Rebound-Effekte. Eine generelle Übersicht zu den global beobachtbaren Modellreaktionen kann Abbildung 74 entnommen werden. Der linke obere Zeitreihenplot dieser Abbildung verdeutlicht, dass der unterstellte positive Nachfrageimpuls der Rest der Welt Region das globale Bruttoinlandsprodukt bis zum Jahr 2050 um ca. 12,3% im Vergleich zur ursprünglichen Projektion im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ ansteigen lässt. Die durch einen negativen Nachfrageimpuls der Rest der Welt Region verursachte Dämpfung globaler ökonomischer Wachstumstendenzen führt in dem hier simulierten Beispiel dazu, dass im Jahr 2050 ein im Vergleich zur ursprünglichen Modelllösung um ca. -4,7% geringeres globales Bruttoinlandsprodukt simuliert wird.

Werden diese Sensitivitäten in Relation zu den beobachtbaren Veränderungen der globalen Primärrohstoffinanspruchnahme betrachtet (rechte obere Grafik der Abbildung 74), scheint die Primärrohstoffinanspruchnahme eine relativ geringe Elastizität im Hinblick auf globale ökonomische Produktionsaktivitäten aufzuweisen.

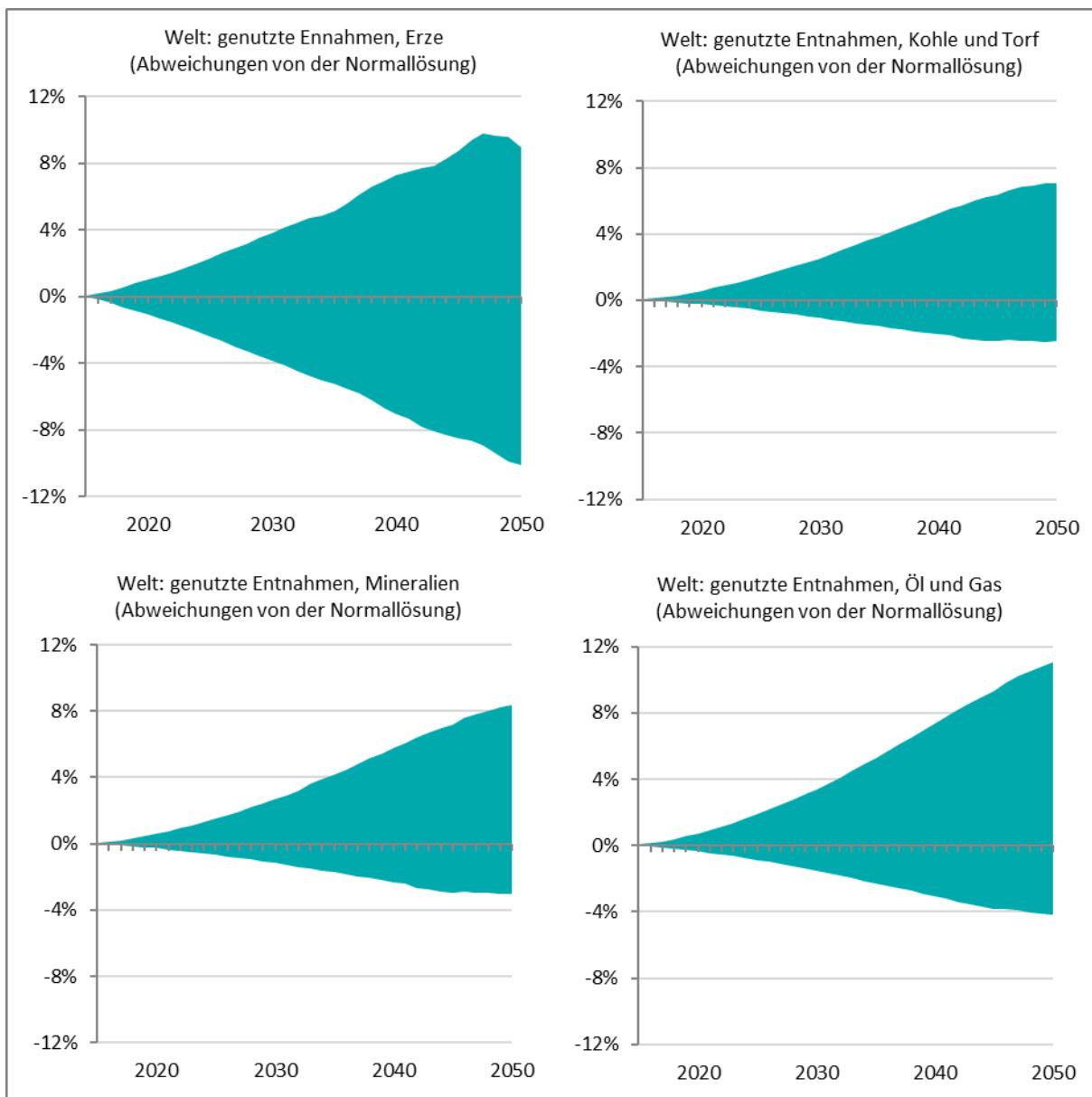
Abbildung 74: Sensitivitätsanalyse: Globale Modellreaktionen



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Die global genutzten Primärrohstoffextraktionen steigen bei Simulation eines positiven Nachfrageimpulses in der Region Rest der Welt bis zum Jahr 2050 um ca. 6,8% im Vergleich zu ihrem Referenzwert des Umfeld-Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ an. Die Simulation einer gedämpften Entwicklung des privaten Konsums in der Region „Rest der Welt“ dämpft zwar auch im Fall der global genutzten Primärrohstoffextraktionen deren Wachstumstendenzen. Im Jahr 2050 wird dennoch ein globales Extraktionsniveau projiziert, welches lediglich ca. -3,2% unterhalb der ursprünglichen Lösung des Umfeld-Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ liegt.

Abbildung 75: Sensitivitätsanalyse: Globale Reaktionsmuster individueller Materialkategorien



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Dieser Befund steht im Einklang mit der historischen Beobachtung, dass die globale Primärrohstoffnachfrage bei langfristigen Betrachtungen im Vergleich zum globalen Bruttoinlandsprodukt durch geringere Wachstumsraten gekennzeichnet ist.<sup>113</sup> Das Ergebnis zeigt zudem, dass mit steigendem Konsum zwar eine (global) steigende Rohstoff-Produktivität aber eben auch ein (global) steigender Primär-Rohstoffbedarf einhergeht. Ein ausschließliches Monitoring der Primär-Rohstoffanspruchnahme auf Grundlage von Produktivitätsmaßen ist daher nicht zielführend.

Zudem kann unserer Sensitivitätsstudie entnommen werden, dass das Modell GINFORS3 ebenfalls den historischen Befund reflektiert, dass abiotische Extraktionen im Vergleich zu biotischen Extraktionen eine wesentlich höhere Einkommenselastizität aufweisen. Wie die linke untere Grafik in Abbildung 74 verdeutlicht,

<sup>113</sup> Siehe bspw. Schaffartzik et al. (2014) für entsprechende statistische Analysen für verschiedene Weltregionen über einen Zeitraum von bis zu 60 Jahren.

variieren die im Jahr 2050 insgesamt genutzten abiotischen Primärrohstoffextraktionen in den Sensitivitätsläufen global um -4,1% bis +8,6% im Vergleich zur ursprünglichen Modelllösung. Im Fall der global genutzten biotischen Extraktionen (rechte untere Grafik) kann hingegen nur eine wesentlich schmalere Schwankungsbreite beobachtet werden. Bis zum Jahr 2050 werden in der Sensitivitätsanalyse lediglich Schwankungen in einem Bereich von -0,8% bis +1,8% abgebildet.

Eine nähere Analyse der dynamischen Reaktionsweisen unterschiedlicher Materialkategorien kann anhand von Abbildung 75 durchgeführt werden. Interessant ist dabei zunächst die Beobachtung, dass die globale Primärrohstoffnachfrage im Fall der Erze deutliche Regimeabhängigkeiten aufweist. In der linken oberen Grafik der Abbildung 75 können für das Jahr 2050 in den Sensitivitätsläufen Abweichungen der global genutzten Erzextraktionen in einer Größenordnung von -10,1% bis +8,9% vom Referenzlauf identifiziert werden. Dieser Befund ist insofern bemerkenswert, da (wie in den vorherigen Abbildungen zu beobachten war) die betrachteten auslösenden Impulse üblicherweise keine symmetrischen Intervalle um die ursprünglichen Umfeld-Ergebnisse generieren (der unterstellte negative Schock ist relativ gering im Vergleich zum unterstellten positiven Schock).

Um die hierfür verantwortlichen Ursachen näher zu verstehen, wurden in Abbildung 76 für ausgewählte Gütergruppen die in der ökonomischen Modellierung beobachtbaren Veränderungen der globalen Produktionsaktivitäten zusammengestellt. Im Vergleich zeigt sich, dass die globalen Bauaktivitäten (linker oberer Zeitreihenplot) relativ geringe Sensitivitäten hinsichtlich der unterstellten Schocks aufweisen.

Weitergehende Analysen weisen darauf hin, dass dieses Phänomen auf eine im Vergleich der jeweiligen Sensitivitätsläufe relativ stabile Wachstumsprojektion der Bauaktivitäten in der Region „Rest der Welt“ zurückgeführt werden kann. Wir weisen daher darauf hin, dass eine Einkommens-elastischere Entwicklung der Bauaktivitäten in der Region Rest der Welt die gezeigten Schwankungsintervalle der global genutzten Erzextraktionen sicherlich erweitern würde, wobei insbesondere im positiven Bereich der Abbildung eine deutliche Steigerung zu erwarten wäre. Auch für nichtmetallische Mineralien sollte dann eine entsprechende Intervallausweitung zu erwarten sein.<sup>114</sup>

Die übrigen aus Abbildung 76 ablesbaren Befunde zu globalen ökonomischen Output-Reaktionen erscheinen allesamt plausibel: Im Jahr 2050 werden im Vergleich zur ursprünglichen Projektion des Szenarios „Klimaaktives Deutschland“ für Mineralölprodukte reale Produktionsrückgänge in einer Größenordnung von -4,1%, bzw. Produktionssteigerungen in einer Größenordnung von ca. 10,7% simuliert (rechter oberer Zeitreihenplot).

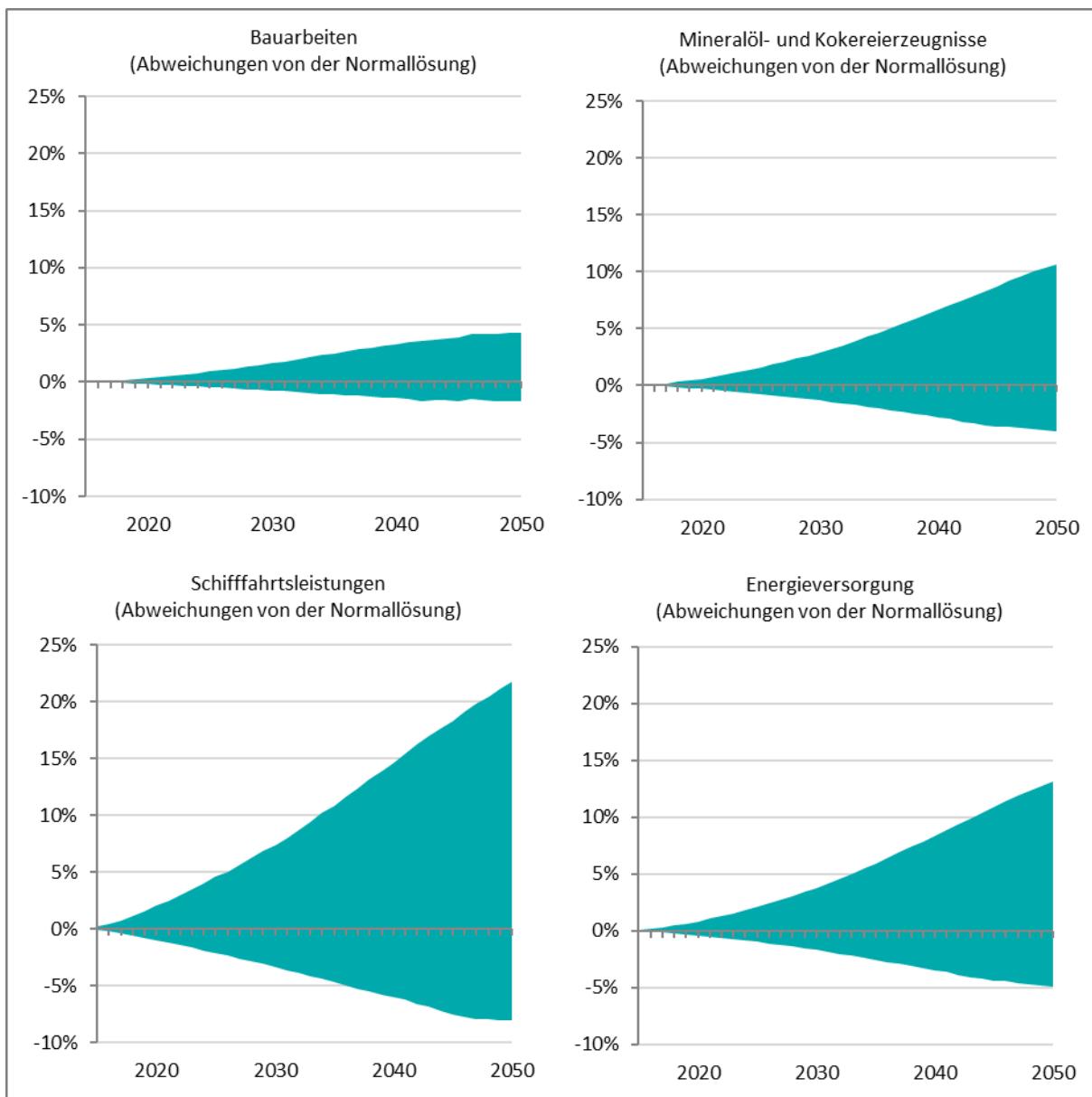
Ein qualitativ ähnlicher Befund zeigt sich für Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Gas- und Wasserversorgung (-4,9%, bzw. 13,1%), deren relative Abweichungen im rechten unteren Zeitreihenplot dargestellt wurden. In beiden Fällen kann also eine annähernd proportionale Veränderung des globalen Outputs in Relation zum globalen Bruttoinlandsprodukt beobachtet werden. Deutlich überproportionale Reaktionsmuster zeigen hingegen die globalen Schifffahrtsdienstleistungen (linker unterer Zeitreihenplot). Während das globale Bruttoinlandsprodukt im Fall des negativen Konsumschocks im Jahr 2050 lediglich um ca. -4,7% von seinem Referenzwert abwich, kann für die globalen Schifffahrtsdienstleistungen bei dieser Betrachtung ein Rückgang um -8,0% beobachtet werden.

Auch im Fall eines positiven Nachfrageschocks reagieren die Schifffahrtsdienstleistungen mit einem simulierten Anstieg ihres realen Produktionswertes um 21,8% im Vergleich zur Referenz ausgesprochen sensitiv. Da insbesondere Containerverkehre allgemein als relativ konjunkturanfällig einzuschätzen sind, ist auch dieser Modellbefund plausibel nachvollziehbar.

---

<sup>114</sup> Für die hier angestrebte exemplarische Durchführung einer Sensitivitätsstudie wurde darauf verzichtet, ergänzende Alternativsimulationen unter Berücksichtigung Einkommens-elastischer Bauaktivitäten in der Region Rest der Welt durchzuführen. In weitergehenden Fallstudien wäre dies aber selbstverständlich ohne weiteres möglich.

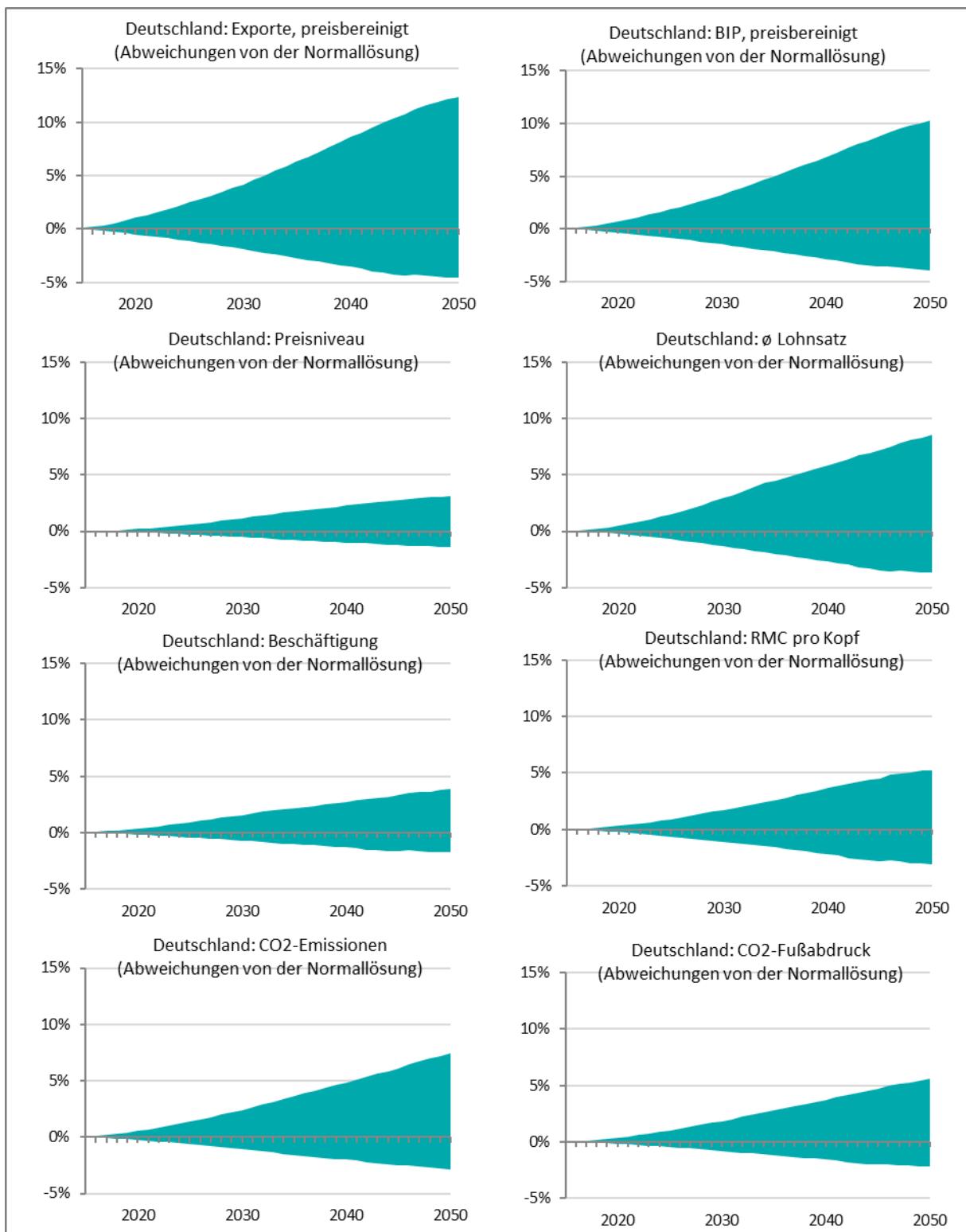
Abbildung 76: Sensitivitätsanalyse: Globale Output-Reaktionen ausgewählter Gütergruppen



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Der Blick auf Abbildung 77 zeigt, dass die auslösenden Impulse der Rest der Welt Region auch in Deutschland sichtbare Auswirkungen induzieren.

Abbildung 77: Sensitivitätsanalyse: Ergebnisse für Deutschland

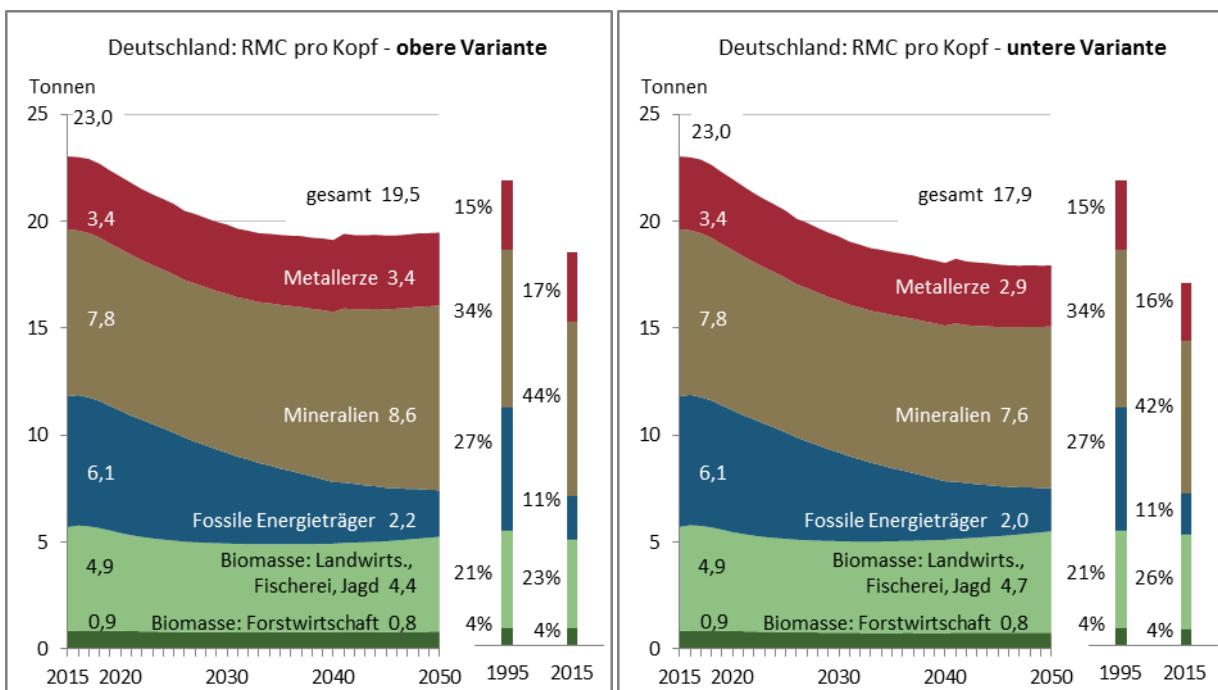


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

#### 4.2.2.2 Detailliertergebnisse für die Primär-Rohstofffinanzspruchnahme

In diesem Kapitel widmen wir uns detaillierten Auswertungen zu den Projektionsergebnissen bis zum Jahr 2050 für die Primär-Rohstofffinanzspruchnahme in den Umfeldszenarien „Klimaaktives Deutschland“. Wie schon für die Historie beginnen diese Auswertungen mit dem Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC).

Abbildung 78: Klimaaktives Deutschland: Entwicklung des Rohstoffkonsums (RMC) pro Kopf nach Materialkategorien in Deutschland, 2015 - 2050

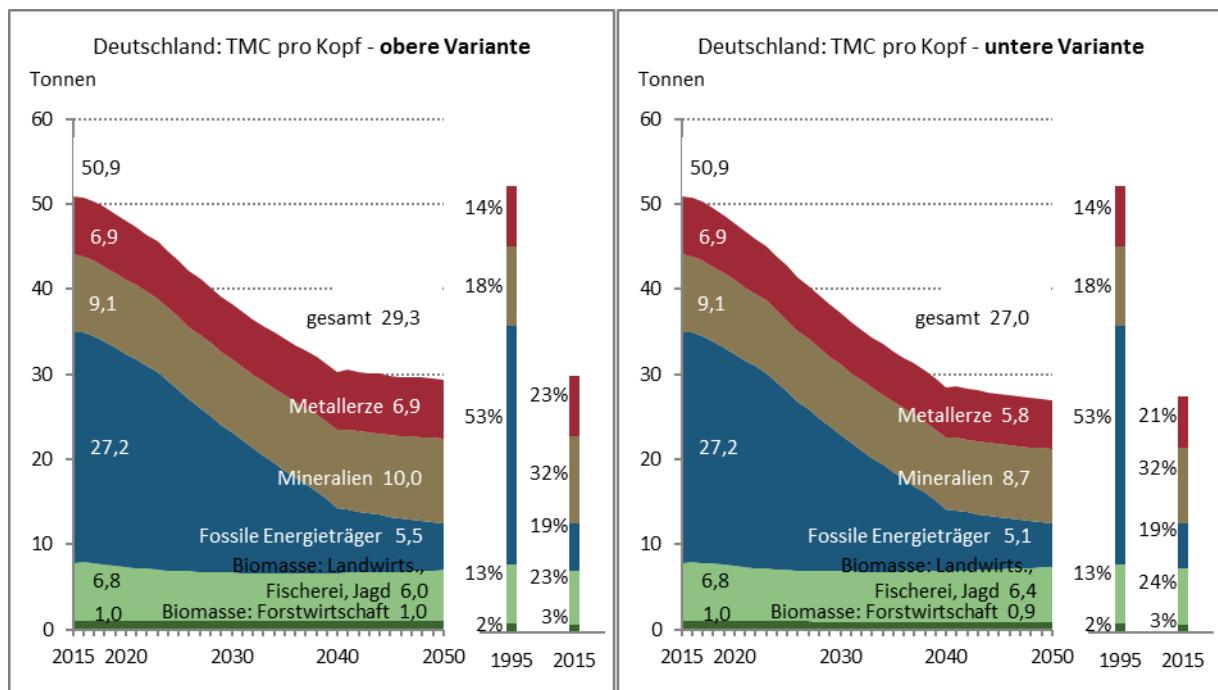


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Bereits in Abbildung 71 in Abschnitt 4.2.1.2 wurde dargestellt, dass für Deutschlands RMC pro Kopf im Szenario „Klimaaktives Deutschland“ im Mittel mit einem Rückgang auf etwa 18,5 Tonnen bis 2050 gerechnet wird. Die nachstehende Abbildung 78 fragt darüber hinaus nach Materialkategorien (fossile Energieträger, Mineralien, Metallerze, Biomasse) und zeigt nicht mehr den Mittelwert, sondern die Bandbreite die sich aufgrund der Sensitivitäts-Analysen ergibt. Wenn es in der Region „Rest der Welt“ zu einer dynamischeren Entwicklung des privaten Konsums kommt – im Folgenden als „obere Variante“ bezeichnet – geht der RMC pro Kopf in Deutschland auf 19,5 Tonnen zurück. Wenn es hingegen zu einer geringer als ursprünglich abgeschätzten Dynamik des privaten Konsums in der Region „Rest der Welt“ kommt – im Folgenden als „untere Variante“ bezeichnet – fällt dieser Rückgang bis 2050 erheblich größer aus (auf 17,9 Tonnen pro Kopf). Wie nicht anders zu erwarten in Umfeld-Szenarien die mit „klimaaktives Deutschland“ tituliert sind, kommt es insbesondere beim Rohstoffkonsum von fossilen Energieträgern zu einem deutlichen Rückgang (von 6,1 Tonnen pro Kopf in 2015 auf 2,0 bis 2,2 Tonnen pro Kopf in 2050). Bei den übrigen Materialarten sehen die modellbasierten bottom-up-Fortschreibungen jedoch keine eindeutige Tendenz zu einem langfristig zurückgehenden pro-Kopf Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen in Deutschland.<sup>115</sup> Sowohl bei den Mineralien als auch bei den Metallerzen werden in der unteren Variante leichte Rückgänge des RMC pro Kopf in Deutschland projiziert, wohingegen in der oberen Variante eine Konstanz (Metallerze) bzw. sogar ein zunehmender Rohstoffkonsum pro Kopf (Mineralien) erwartet wird. Zu einer auf den ersten Blick kontinuierlichen Entwicklung kommt es beim Rohstoffkonsum Biomasse. Dieser ist in der oberen Variante, in der es zu mehr wirtschaftlicher Dynamik kommt, niedriger als in der unteren Variante.

<sup>115</sup> In den folgenden Abschnitten werden wir durch Analysen der Komponenten des Rohstoffkonsums (z.B. dem Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen einzelner Gütergruppen oder der Frage nach der Primär-Rohstoffintensität der Importe, differenziert nach Gütergruppen) versuchen wesentliche Hintergründe und Muster aufzuzeigen, die für dieses Makro-Ergebnis der SimRess-Projektionen verantwortlich zeichnen.

Abbildung 79: Klimaaktives Deutschland: Entwicklung des gesamten Materialkonsums (TMC) pro Kopf nach Materialkategorien in Deutschland, 2015 - 2050



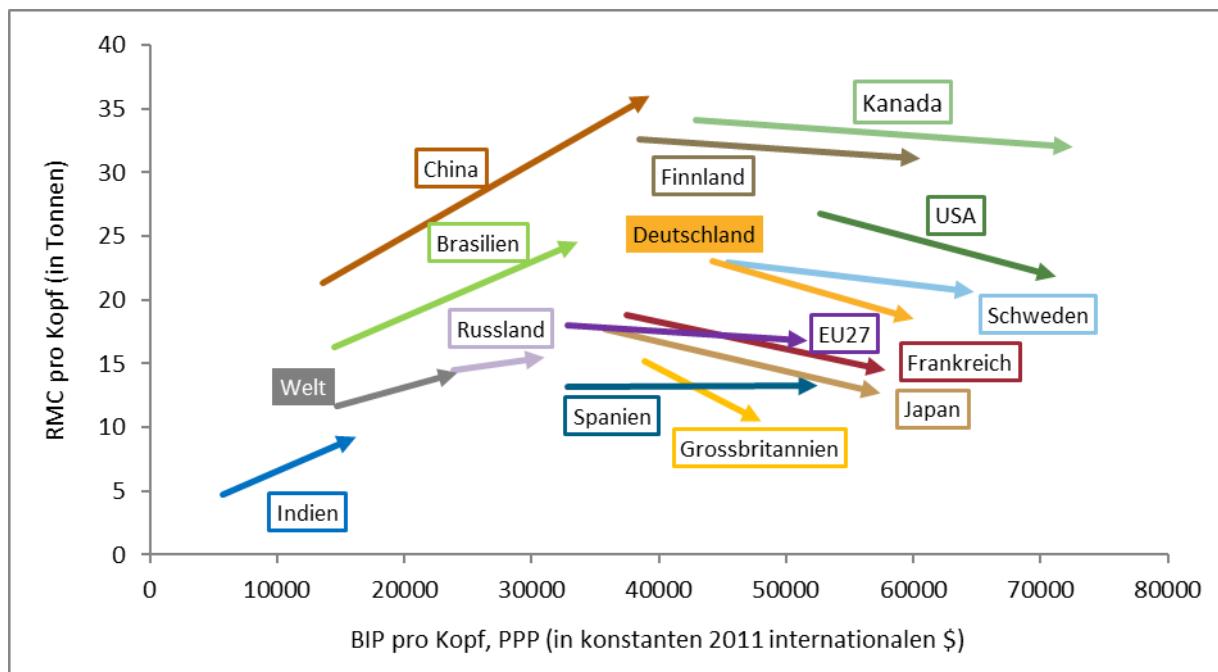
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Die höhere wirtschaftliche Dynamik insbesondere in der Region „Rest der Welt“ führt aber unter anderem dazu, dass die Preise für landwirtschaftliche Produkte auf den Weltmärkten deutlich steigen, was in Deutschland zu einem sparsameren Umgang mit biotischen Rohstoffen führt als in der ökonomisch weniger dynamischen unteren Variante.

Beziehen wir in unsere Analysen zusätzlich auch die direkt und indirekt in Konsumausgaben und Investitionen enthaltenen ungenutzten Entnahmen (TMC) mit ein so ergibt sich ein deutlich anderes Bild (siehe Abbildung 79). Sowohl in der oberen als auch in der unteren Variante kommt es zu einem deutlichen Rückgang des gesamten Materialkonsums pro Kopf. Bis zum Jahr 2050 wird ein Rückgang auf 27,0 bis 29,3 Tonnen projiziert, was einem Rückgang gegenüber 2015 um 42% bis 47% entspricht. Ein Blick auf die Beiträge der einzelnen Materialkategorien veranschaulicht eindrücklich, wie die Energiewende einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenwende leistet.

In Analogie zur historischen Betrachtung in Kapitel 3 stellt Abbildung 80 für ausgewählte Länder und Ländergruppen die Entwicklungen des RMC pro Kopf gemeinsam mit dem BIP pro Kopf im Simulationszeitraum dar. Als markante Beobachtung fällt in dieser Darstellung auf, dass in sämtlichen BRIC-Staaten (für welche in der Simulation weniger ambitionierte, bzw. erst später im Zeitablauf einsetzende klimapolitische Maßnahmen unterstellt wurden) keine absolute Entkopplung des Rohstoffkonsums vom Wirtschaftswachstum beobachtet werden kann.

Abbildung 80: Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich des Rohstoffbedarfs für inländischen Konsum und Investitionen (RMC) pro Kopf, 2015 - 2050

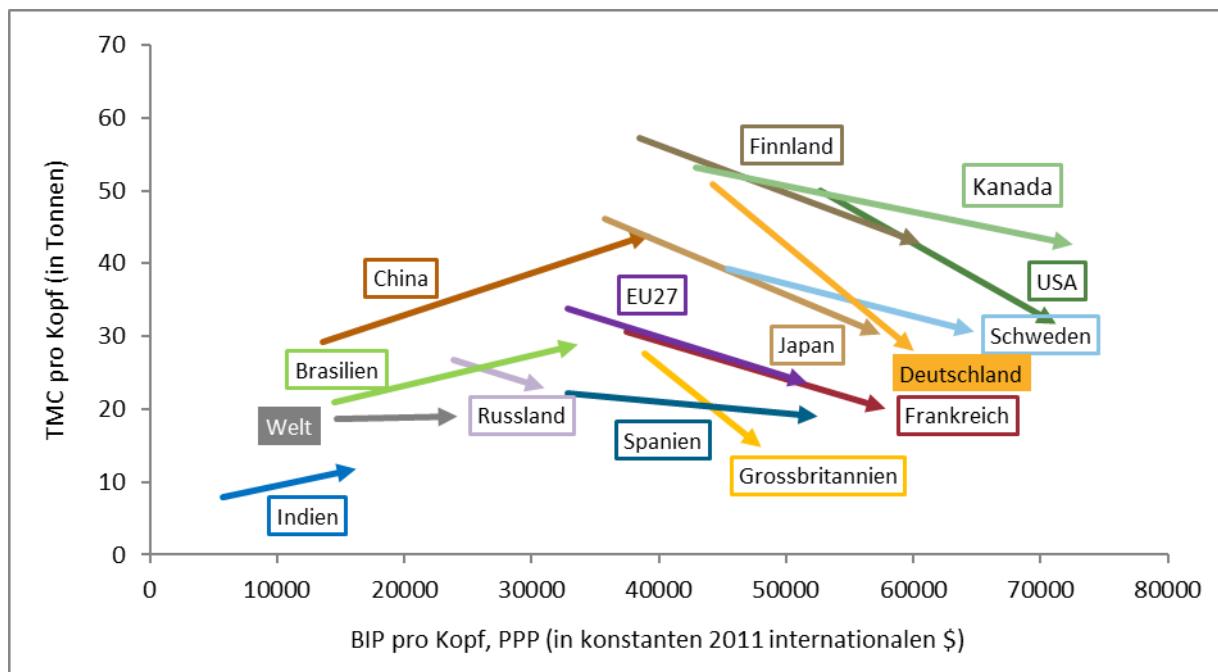


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Im Gegensatz hierzu kennzeichnet eine absolute Entkopplung des Rohstoffkonsums vom Wirtschaftswachstum die Entwicklung in beinahe sämtlichen betrachteten Industrienationen.<sup>116</sup> Zum Ende des Simulationszeitraums werden in China die global höchsten RMC-Werte erreicht. Mit einem Wert von ca. 36 Tonnen pro Kopf erreichen diese bis zum Jahr 2050 ein Niveau, welches die derzeitigen Werte von Kanada leicht übersteigt, im Jahr 2050 allerdings ungefähr dem doppelten Niveau des deutschen RMC pro Kopf entspricht. Dieses relativ hervorstechende Ergebnis kann kritisch hinterfragt werden: Nachdem die chinesische Volkswirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten den ausgesprochen dynamischen Wachstumsmustern anderer Schwellenländer gefolgt ist, ist es zweifelsohne herausfordernd, zukünftig zu erwartenden Anpassungsprozesse an Wachstumspfade etablierter Industriestaaten abzubilden.

<sup>116</sup> Spanien markiert dabei mit einer langfristig annähernden Stagnation des pro-Kopf-Rohstoffkonsums die einzige beobachtbare Ausnahme. Ein Hintergrund für dieses Simulationsergebnis ist, dass es in Spanien infolge der Wirtschaftskrise zu einem drastischen Rückgang der Bautätigkeit kam. Inzwischen ist jedoch ein Niveau erreicht, das ebenso wie die Vorkrisenbautätigkeit von Übertreibungen geprägt ist. Mittel- bis langfristig ist wieder mit einer „normalen“ Bautätigkeit in Spanien zu rechnen, so dass sich der RMC pro Kopf wieder dem europäischen Durchschnitt annähert und nicht mehr, wie derzeit, deutlich niedriger liegt.

Abbildung 81: Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich des gesamten Rohstoffkonsums (TMC) pro Kopf, 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

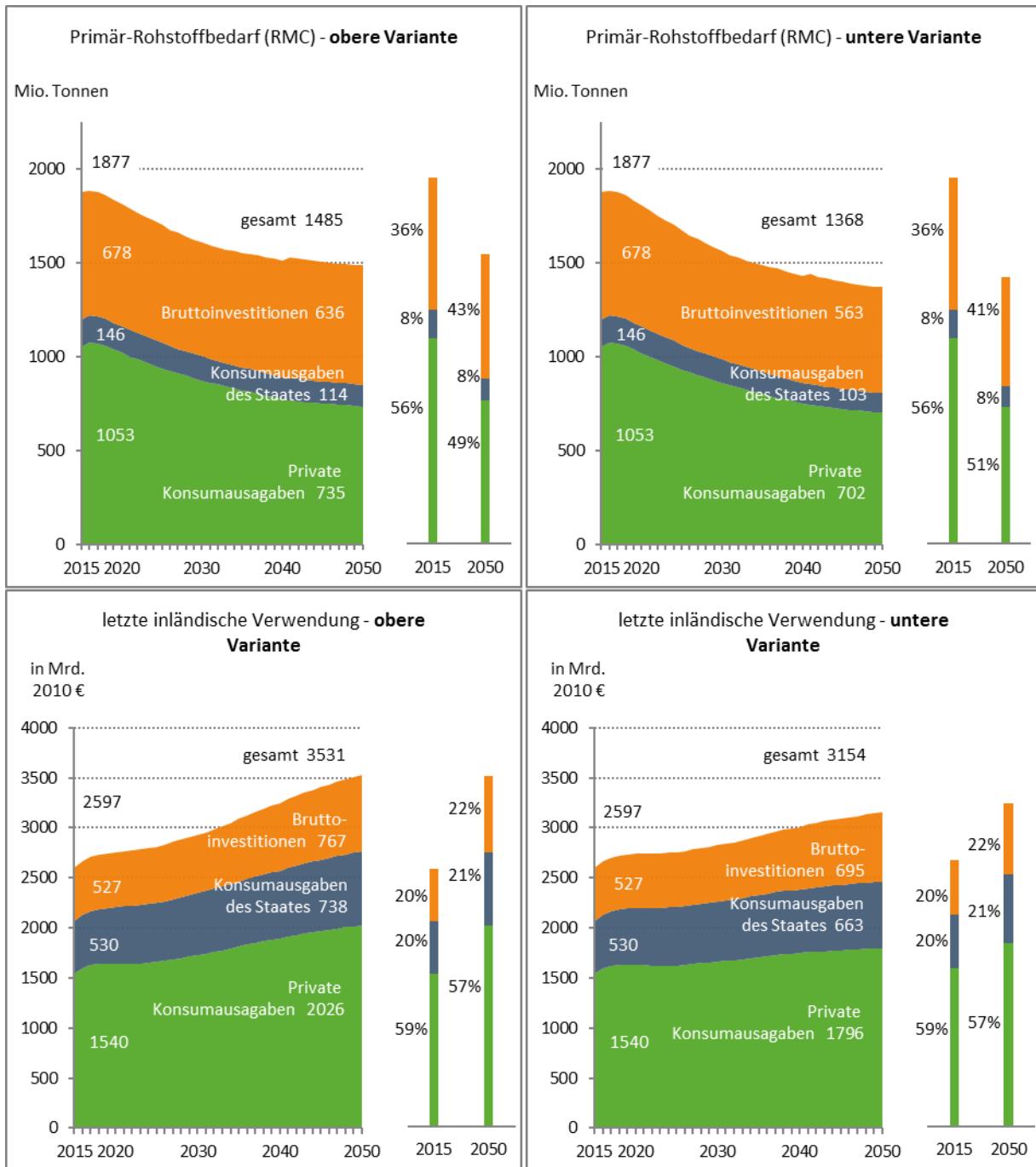
Für wesentliche Treiber des Primärrohstoffbedarfs werden durch GINFORS3 bereits entsprechende Adjustierungen endogen vorgenommen.<sup>117</sup> Im Vergleich zu anderen verfügbaren Projektionsergebnissen erweitern sich unsere Abschätzungen daher auch eher als relativ moderat.<sup>118</sup> Es ist aber unzweifelhaft, dass auch zukünftig insbesondere der Modellierung des chinesischen Rohmaterialkonsums weitergehende Beachtung geschenkt werden sollte: Aufgrund der exogen vorgegebenen Bevölkerungsentwicklungen werden die globalen Entwicklungen in erster Linie durch die bereits angesprochenen Befunde für China sowie in Indien und der „Rest der Welt“-Region geprägt. Im globalen Durchschnitt ist das Szenario „Klimaaktives Deutschland“ daher weiterhin von einem globalen Anstieg der Wirtschaftsleistung und einem damit einhergehenden Anstieg des Rohstoffkonsums gekennzeichnet.

Ohne an dieser Stelle die jeweiligen nationalen Simulationsergebnisse detailliert diskutieren zu wollen lässt sich somit zunächst qualitativ festhalten, dass im internationalen Ergebnisvergleich unsere, um umfassende energiepolitische Transformationsbemühungen erweiterte „business as usual“ Projektion auf positive Effekte von klimapolitischen Maßnahmen auf ressourcenpolitische Indikatoren hinweist. Allerdings wird auch deutlich, dass weitaus größere Transformationen benötigt werden, um den Primärrohstoffkonsum global vom wirtschaftlichen Wachstum zu entkoppeln.

<sup>117</sup> So ist in den Modellierungen für China bereits berücksichtigt, dass die in den letzten Jahren beobachtete Bautätigkeit Zeichen eines Nachholbedarfs enthält, die unter mittel- bis langfristigen Aspekten nicht dauerhaft erhalten werden bleiben. Beispielsweise tätigte der Wirtschaftsbereich „Grundstücks- und Wohnungswesen“ in China in den letzten Jahren Investitionen in Höhe des doppelten seines Produktionswertes. In „normalen“ Volkswirtschaften ohne Nachholbedarf in der Wohninfrastruktur können diesbezüglich jedoch nur Investitionen in Höhe von 40 bis 60% des Produktionswertes beobachtet werden. Vor diesem Hintergrund wird in GINFORS3 für China ein deutlicher Abschwung der Wohnbaukonjunktur projiziert. Ob andere zentrale Treiber des Rohstoffkonsums in China ebenfalls Übertreibungen enthalten, und damit möglicherweise einen langfristig überschätzten pro-Kopf-Rohstoffbedarf implizieren, konnte im Rahmen des SimRess-Projektes nicht umfassend analysiert werden.

<sup>118</sup> Schandl et al. (2016) publizierten bspw. eine Projektion, welche den chinesischen RMC des Jahres 2050 in einer Größenordnung von 50 Tonnen pro Kopf abschätzt (wobei sie hierzu gleichzeitig selber anmerken, dass dieser Wert besser als „modelling artefact“ interpretiert werden sollte).

Abbildung 82: Klimaaktives Deutschland: Entwicklung des Primär-Rohstoffbedarfs (RMC) Deutschlands nach Verwendungskategorien, 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Dieser qualitative Befund ändert sich grundsätzlich nicht, wenn anstelle des RMC der Indikator TMC betrachtet wird. Wie Abbildung 81 verdeutlicht, ist der TMC generell in allen Ländern im Vergleich zum RMC durch stärkere Reduktionen gekennzeichnet. In der globalen Betrachtung kann daher für den durchschnittlichen TMC pro Kopf sogar eine annähernde Stagnation im Simulationszeitraum beobachtet werden. Da für Brasilien, Indien und China allerdings auch bei Betrachtung des TMC weiterhin ein Anstieg des Primärrohstoffkonsums beobachtet wird, kann grundsätzlich weiterhin festgehalten werden, dass weitaus umfassendere Transformationsbemühungen notwendig sind, um den Primärrohstoffkonsum global vom wirtschaftlichen Wachstum zu entkoppeln.

Abbildung 82 fasst die Entwicklung der Komponenten der heimischen Endnachfrage in Deutschland (untere Abbildungsreihe) sowie die damit einhergehenden Entwicklungen des deutschen RMC (obere Abbildungsreihe) in den jeweiligen Sensitivitätsläufen zusammen. Allgemein lässt sich dabei festhalten, dass zwischen beiden Varianten keine umfassenden Veränderungen der jeweils abgebildeten Strukturen beobachtet werden können. Für sämtliche Verwendungskategorien werden im Zeitablauf abnehmende RMC-Beiträge simuliert. Der Private Konsum weist dabei die relativ deutlichsten Rückgänge auf, so dass sein Anteil am deutschen RMC im Jahr 2050 auf 49% (obere Variante) bis 51% (untere Variante) zurückgeht. Im Vergleich hierzu steigt der relative Anteil der Bruttoinvestitionen auf 43% (obere Variante) bzw. 41% (untere Variante) im Zeitablauf an.

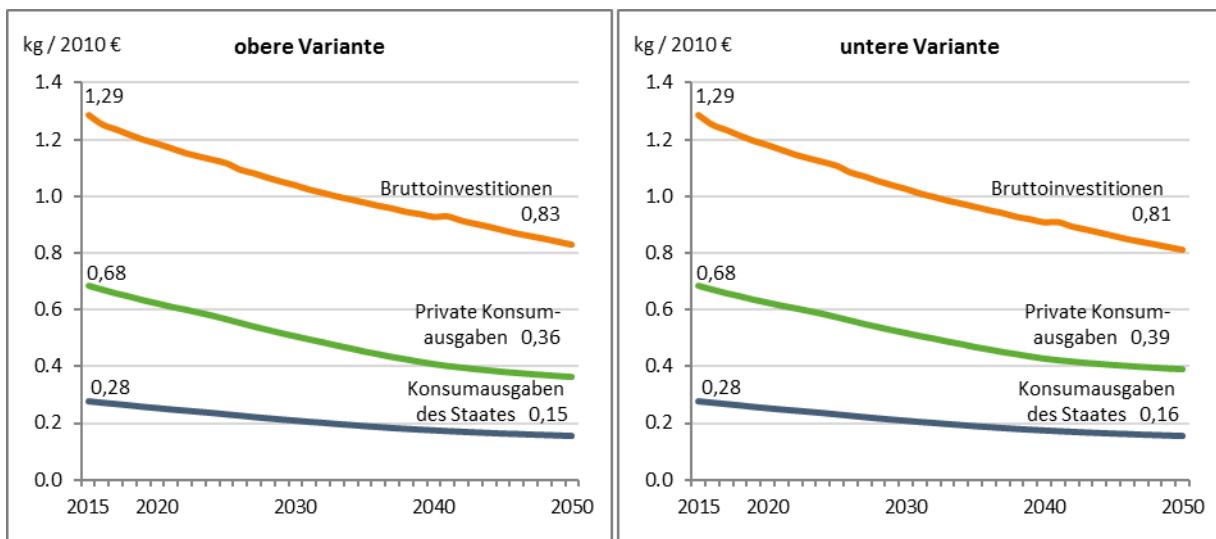
Die diese Entwicklungen treibenden ökonomischen Nachfrageveränderungen sind in der unteren Abbildungsreihe dargestellt. Erwartungsgemäß sind auch hier keine wesentlichen strukturellen Verschiebungen zu beobachten. Für sämtliche Endnachfragekomponenten wird in beiden Sensitivitätsläufen ein langfristiges Wachstum simuliert. Das stärkste Wachstum wird dabei für die Bruttoinvestitionen mit einem Anstieg um ca. 46% (obere Variante) bzw. 32% (untere Variante) bis zum Jahr 2050 beobachtet. Die Konsumausgaben des Staates steigen im selben Zeitraum um ca. 39% (obere Variante) bzw. 25% (untere Variante). Das relativ schwächste Wachstum wird wiederum für den Privaten Konsum projiziert, welcher insgesamt um ca. 32% (obere Variante) bzw. 17% (untere Variante) ansteigt.

Die insgesamt beobachtbare Entkopplung des deutschen RMC von der ökonomischen Entwicklung der inländischen letzten Verwendung impliziert somit deutliche Rückgänge der jeweiligen Primär-Rohstoffintensitäten. In der oberen Variante wird die Primär-Rohstoffintensität des Privaten Konsums bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu gegenwärtigen Niveaus nahezu halbiert. Für die Konsumausgaben des Staates ist eine ähnliche relative Entwicklung zu beobachten.

Die rohstoffintensivste Nachfragekategorie der Bruttoinvestitionen weist bis zum Jahr 2050 eine relative Reduktion ihrer Primär-Rohstoffintensitäten um ca. 36% auf. Wie Abbildung 83 verdeutlicht, variieren diese modellendogenen projizierten Effizienzfortschritte kaum zwischen den beiden Sensitivitätsläufen.

Wie zuvor in der historischen Analyse wird in Abbildung 84 auf Basis der soeben angesprochenen Befunde eine Dekomposition der simulierten RMC-Entwicklungen für die jeweiligen Endnachfragekomponenten vorgenommen. Dabei zeigt sich, dass in dem projizierten Umfeldszenario für sämtliche Endnachfragekomponenten relativ moderate Struktur-Effekte (in einem Umfang von -9,2% bis -12,7%) abgebildet werden. Dieser Befund erscheint für eine in ihren bezüglich der Entwicklung der Endnachfrage als „business as usual“-Szenario aufzufassende Projektion plausibel. Die unterstellten energiepolitischen Szenario-Vorgaben induzieren zwar eine weitreichende Dekarbonisierung des Wirtschaftskreislaufs, zielen aber nicht auf weitergehende ressourcenpolitisch motivierte Präferenz- und daraus resultierenden Verhaltensänderungen von Konsumenten (wie bspw. einer längeren Nutzung von Konsumgütern ab) und Investoren ab.

Abbildung 83: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffintensität der inländischen letzten Verwendung Deutschlands, 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen

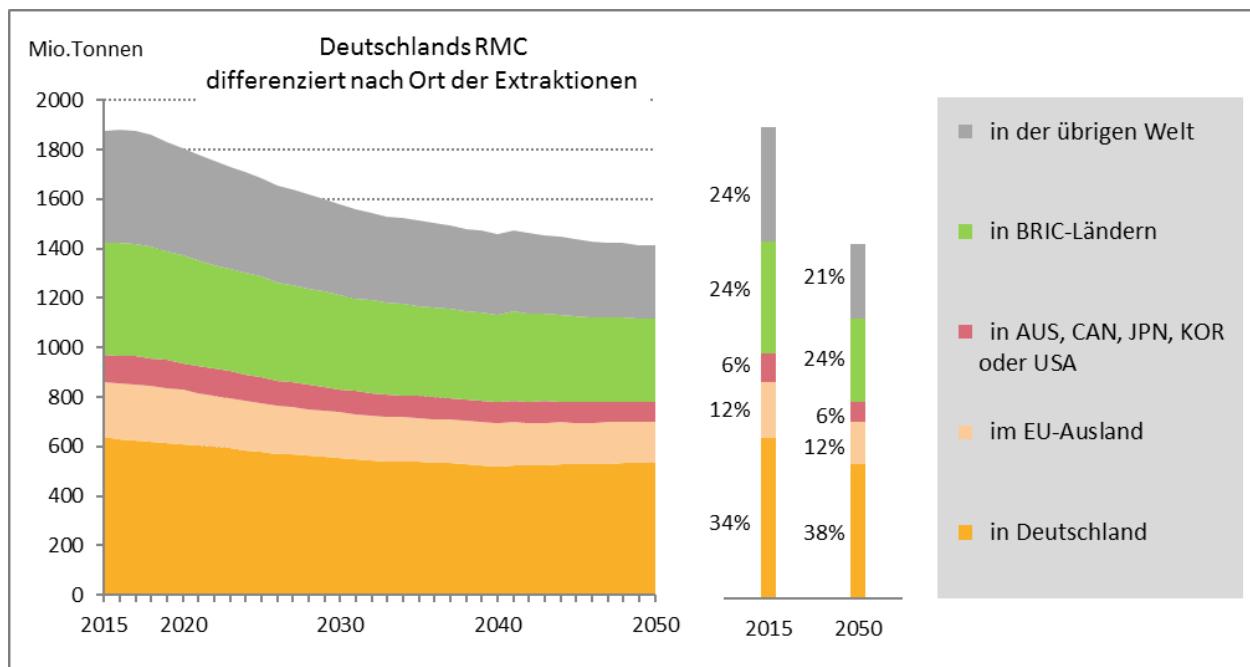
Abbildung 84: Klimaaktives Deutschland: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Nachdem zu Beginn dieses Abschnitts bereits gezeigt wurde, dass im Umfeldszenario „klimaaktives Deutschland“ insbesondere der Rohstoffkonsum fossiler Energieträger deutlich reduziert wird, ist es nicht verwunderlich, dass bei differenzierter Betrachtung der geografischen Extraktionsstätten des deutschen Primärrohstoffkonsums insbesondere der Anteil der übrigen Welt in diesem Szenario bis zum Jahr 2050 verringert wird. Zudem wurde bereits eingangs festgestellt, dass für Mineralien tendenziell lediglich stagnierende RMC-Werte simuliert werden. Wie Abbildung 85 verdeutlicht, erhöht sich hierdurch der relative Anteil der bereits historisch dominierenden Kategorie der deutschen Extraktionen von 34% im Jahr 2015 auf 38% im Jahr 2050. Für die übrigen geografischen Ursprungsstätten werden im Zeitablauf gleichförmige Reduktionen simuliert, so dass deren relative Anteile am deutschen RMC auch langfristig stabil bleiben.

Abbildung 85: Klimaaktives Deutschland: Provenienz der Extraktionen des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Wie Tabelle 32 verdeutlicht, kann der mengenmäßig markante Anteil der Mineralien am deutschen RMC in erster Linie auf Konsum- und Investitionsausgaben für Bauarbeiten zurückgeführt werden. Zwar kennzeichnet sämtliche Simulationsläufe eine langfristige Reduktion der durch diese Ausgabenkategorie induzierten RMC-Bestandteile (-12%, bzw. -24% bis zum Ende der Simulationsperiode), welche in erster Linie auf eine stetige Verringerung der entsprechenden Primär-Rohstoffintensität (-27%, bzw. -29% bis zum Ende der Simulationsperiode) zurückzuführen ist. Dennoch können auf Basis unserer Kalkulationsroutinen in beiden Varianten auch im Jahr 2050 noch 302 bis 349 Mio. Tonnen des deutschen RMC der heimischen Endnachfrage nach Bauarbeiten zugerechnet werden. Tabelle 32 macht zudem erneut deutlich, dass der deutsche RMC in dieser Umfeld-Parametrisierung keine weitreichenden Strukturveränderungen durchläuft. Auch im Jahr 2050 wird gemäß unseren Simulationsergebnissen insgesamt mehr als die Hälfte des deutschen RMC-Niveaus auf Konsum- und Investitionsausgaben für die vier bereits derzeit wichtigsten Ausgabenkategorien (Bauarbeiten, Land- und Forstwirtschaftliche Produkte, Büromaschinen etc. sowie Nahrungsmittel und Getränke) des RMC zurückzuführen sein. Dabei ist bemerkenswert, dass für zwei dieser Ausgabenkategorien (Land- und Forstwirtschaftliche Produkte sowie Büromaschinen etc.) im Zeitablauf steigende individuelle RMC-Beiträge ausgewiesen werden.

Während beide Befunde damit konkrete Hinweise auf näher zu betrachtende ressourcenpolitische Handlungsfelder liefern, scheint die Entwicklung des Aggregats „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“ besonders herausfordernd. Trotz einer langfristig deutlichen Reduktion der Primär-Rohstoffintensität dieser Ausgabenkategorie (-43% in beiden Varianten der Sensitivitätsläufe), steigt der durch entsprechende Konsum- und Investitionsausgaben in Deutschland induzierte globale Primär-Rohstoffbedarf bis zum Jahr 2050 um 9% bis 19% an.<sup>119</sup>

<sup>119</sup> Weitergehende Detailauswertungen entsprechender Befunde konnten im Rahmen des SimRess-Projekts nicht durchgeführt werden. Detailliertere Ergebnistabellen der Beiträge einzelner Ausgabenkategorien zur Entwicklung einzelner Rohstoffkategorien finden sich allerdings in Anhang 7.3. Für das hier angesprochene Beispiel verdeutlichen die entsprechenden Tabellen, dass

Tabelle 32: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen (RMC) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 15 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [Rang 2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [1]	Bauarbeiten [F]	PRB PRI 1,85	321 bis 337 1,57 bis 1,58	302 bis 349 1,32 bis 1,35	-12% bis -24% -27% bis -29%
2 [3]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	PRB PRI 4,81	160 bis 163 3,88 bis 4,09	175 bis 181 3,12 bis 3,67	+5% bis +9% -24% bis -35%
3 [4]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI 1,55	138 bis 146 1,21 bis 1,23	157 bis 172 0,88 bis 0,89	+9% bis +19% -43% bis -43%
4 [2]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI 1,77	160 bis 162 1,28 bis 1,35	145 bis 150 0,99 bis 1,15	-24% bis -26% -35% bis -44%
5 [5]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI 0,76	87 bis 92 0,59 bis 0,6	68 bis 78 0,41 bis 0,43	-25% bis -35% -44% bis -46%
6 [6]	Maschinen [DK]	PRB PRI 1,18	70 bis 74 0,86 bis 0,88	53 bis 62 0,55 bis 0,58	-28% bis -38% -51% bis -53%
7 [9]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI 1,37	56 bis 59 1,07 bis 1,08	46 bis 53 0,78 bis 0,81	-16% bis -27% -41% bis -43%
8 [10]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	PRB PRI 0,30	54 bis 56 0,23 bis 0,23	46 bis 51 0,18 bis 0,18	-18% bis -25% -40% bis -41%
9 [12]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	PRB PRI 1,51	44 bis 45 1,11 bis 1,11	36 bis 40 0,8 bis 0,8	-22% bis -30% -47% bis -47%
10 [14]	DL des Grundstücks- u. Wohnungsw., der Verm. bewegl. Sachen, wirts. DL a.n.g. [K]	PRB PRI 0,12	41 bis 42 0,1 bis 0,1	36 bis 41 0,07 bis 0,07	-11% bis -21% -38% bis -38%
11 [13]	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens [N]	PRB PRI 0,18	41 bis 42 0,13 bis 0,13	33 bis 36 0,09 bis 0,1	-30% bis -34% -47% bis -50%
12 [7]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	PRB PRI 2,31	62 bis 63 2,35 bis 2,36	33 bis 35 2,43 bis 2,47	-58% bis -61% +5% bis +7%
13 [15]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	PRB PRI 0,16	34 bis 36 0,12 bis 0,12	27 bis 30 0,09 bis 0,09	-32% bis -39% -45% bis -46%
14 [18]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	PRB PRI 1,29	29 bis 30 0,96 bis 0,99	25 bis 29 0,6 bis 0,65	-8% bis -22% -50% bis -53%
15 [20]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	PRB PRI 3,94	22 bis 23 3,55 bis 3,56	23 bis 26 3,2 bis 3,25	+5% bis +20% -17% bis -19%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	PRB PRI 0,50	239 bis 244 0,33 bis 0,34	152 bis 163 0,19 bis 0,2	-50% bis -54% -60% bis -62%
Insgesamt		PRB PRI 1877 0,72	1564 bis 1609 0,55 bis 0,55	1368 bis 1485 0,42 bis 0,43	-21% bis -27% -40% bis -42%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) in Mio. t

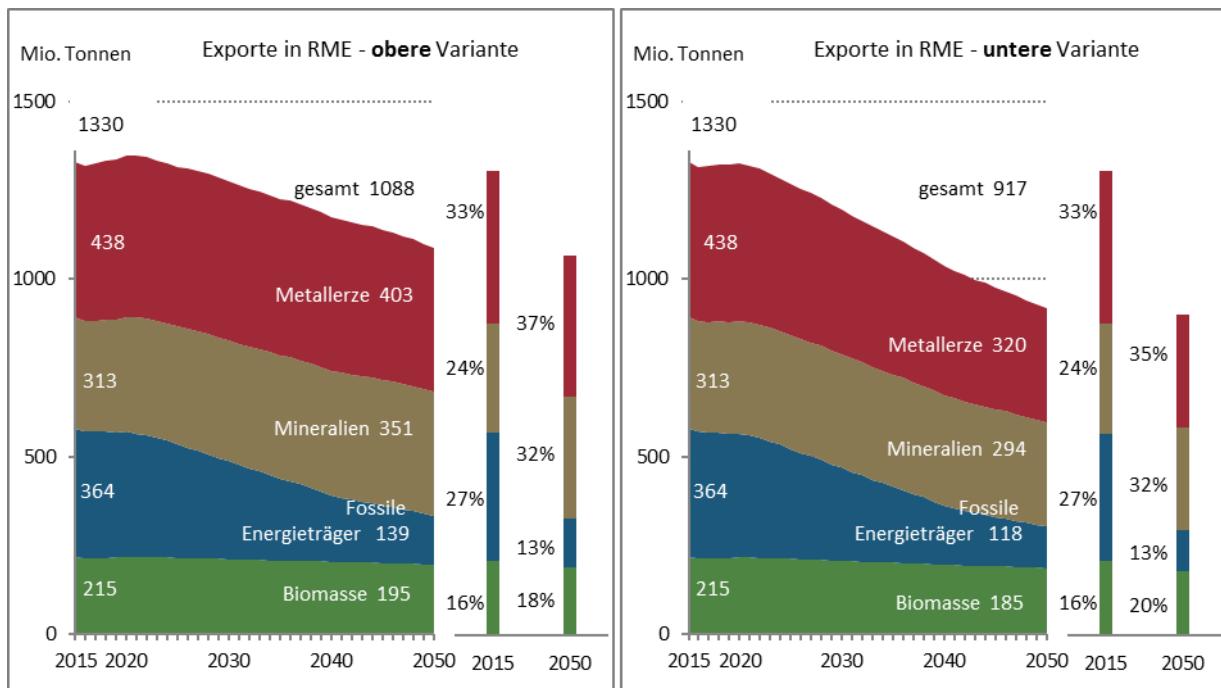
PRI = Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

die inländische Endnachfrage nach „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“ im Simulationszeitraum insbesondere die Rohstoffkategorien der Mineralien sowie der Metallerze im deutschen RMC antreibt.

Nachdem bislang Simulationsergebnisse zur Entwicklung des deutschen Primärrohstoffkonsums betrachtet wurden, rücken nun ergänzend die Rohmaterialäquivalente des Außenhandels sowie darauf aufbauend die Befunde zur Entwicklung des deutschen RMI in den Mittelpunkt unserer Ergebnispräsentation. Hierzu sei zunächst auf Abbildung 86 verwiesen, welche die Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte für beide Sensitivitätsläufe im Zeitablauf darstellt.

Abbildung 86: Klimaaktives Deutschland: Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte (Exporte im RME), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Wie sich zeigt, erweist sich der deutsche Primär-Rohstoffbedarf für Exporte insbesondere in der Kategorie der Metallerze als relativ reagibel bei Variationen des privaten Konsums in der Region „Rest der Welt“. In der oberen Variante erreichen die Metallerze mit 403 Mio. Tonnen Rohmaterialäquivalenten im Jahr 2050 ein Niveau, welches annähernd 26% über dem entsprechenden Referenzwert der unteren Variante liegt. Bei den Mineralien wie auch bei den fossilen Energieträgern werden etwas schwächere Veränderungen der Exporte in Rohmaterialäquivalenten zwischen beiden Varianten simuliert (Mineralien: +19%, fossile Energieträger: +18%). Eine wesentlich geringere Variabilität zeigt sich bei Betrachtung der Biomasse, deren Exporte in Rohmaterialäquivalenten im Jahr 2050 in der oberen Variante ihren Referenzwert der unteren Variante lediglich um 5% übersteigen.

Diese Befunde sind grundsätzlich sicherlich plausibel, da die deutsche Exportwirtschaft überwiegend Investitionsgüter herstellt, welche generell einen relativ hohen Anteil von Metallerzen und Industriemineralien aufweisen. Wie Tabelle 33 entnommen werden kann, entfallen in beiden Simulationsvarianten auf die vier Produktgruppen von Produkten des Fahrzeugbaus, Metalle und Metallerzeugnisse, Büromaschinen etc. sowie Produkte des Maschinenbaus auch zum Ende des Simulationszeitraums mehr als die Hälfte des gesamten deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte. Für Fahrzeuge sowie Büromaschinen, EDV-Geräte, Geräte der Feinmechanik und Optik wird dabei in der oberen Variante jeweils ein Anstieg des Primär-Rohstoffbedarfs für Exporte simuliert.

Bemerkenswert ist zudem, dass Abbildung 86 für die Rohstoffkategorie der Mineralien in der oberen Variante einen Anstieg des Primär-Rohstoffbedarfs der Exporte von 313 Mio. Tonnen im Jahr 2015 auf 351 Mio. Tonnen im Jahr 2050 ausweist. Eine inhaltliche Interpretation der Befunde aus Tabelle 33 legt nahe, dass

hierbei insbesondere der Gütergruppe der Büromaschinen, EDV-Geräte, Geräte der Feinmechanik und Optik eine zentrale Bedeutung zukommt. Ergänzend sei aber bereits an dieser Stelle angemerkt, dass die Entwicklung der deutschen Importe ähnliche Effekte aufweist. Qualitativ kann somit festgehalten werden, dass die außenwirtschaftlichen Treiber der Primärrohstoffnachfrage nach Mineralien saldiert keine wesentlichen Strukturveränderungen aufweisen.

Tabelle 33: Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität der Exporte (Exporte in RME), 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [Rang 2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [2]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI 0,79	187 0,62 bis 0,63	199 bis 215 0,42 bis 0,44	181 bis 218 -3% bis +17% -44% bis -46%
2 [1]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	PRB PRI 2,36	295 1,66 bis 1,73	233 bis 252 1,51 bis 1,86	-37% bis -49% -49% bis -54%
3 [6]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI 0,62	100 0,49 bis 0,5	107 bis 114 0,35 bis 0,37	-7% bis +12% -40% bis -43%
4 [3]	Maschinen [DK]	PRB PRI 0,69	119 0,49 bis 0,5	105 bis 112 0,32 bis 0,34	-24% bis -36% -50% bis -53%
5 [5]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI 1,75	113 1,3 bis 1,37	98 bis 101 1,02 bis 1,17	-27% bis -32% -33% bis -42%
6 [4]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI 0,66	117 0,47 bis 0,47	92 bis 98 0,32 bis 0,33	-37% bis -48% -51% bis -51%
7 [8]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	PRB PRI 5,48	53 4,85 bis 5,07	60 bis 62 4,15 bis 4,8	+11% bis +20% -12% bis -24%
8 [10]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	PRB PRI 2,94	38 2,63 bis 2,64	46 bis 48 2,39 bis 2,43	+35% bis +52% -17% bis -19%
9 [7]	Erze, Steine u. Erden [CB]	PRB PRI 41,45	68 35,8 bis 36,1	59 bis 63 29,7 bis 30,3	-31% bis -44% -27% bis -28%
10 [14]	Gummi- und Kunststoffwaren [DH]	PRB PRI 0,60	28,1 0,42 bis 0,42	27 bis 29 0,28 bis 0,28	-4% bis -20% -53% bis -53%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	PRB PRI 0,62	210 0,41 bis 0,42	170 bis 183 0,25 bis 0,26	-39% bis -50% -58% bis -60%
Insgesamt		PRB PRI 1330 0,98	1197 bis 1276 0,72 bis 0,72	917 bis 1088 0,5 bis 0,5	-18% bis -31% -49% bis -50%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf für Exporte (Exporte in RME) in Mio. t  
PRI = Primär-Rohstoffintensität der Exporte in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Wie der internationale Vergleich in Tabelle 34 zeigt, werden weltweit sinkende Primär-Rohstoffintensitäten der Exporte simuliert. Ausdauernde ökonomische Wachstumstendenzen erweisen sich aber in vielen Weltregionen als relevante Treiber eines in beiden Simulationsvarianten absolut ansteigenden Primär-Rohstoffbedarfs der nationalen Exporte (China, USA, Brasilien, Australien, Südkorea, Indien, Mexiko, Türkei). Darunter erleben insbesondere Brasilien und die Türkei im Zeitablauf relativ starke Ansteige ihrer Primär-Rohstoffbedarfe für Exporte. Ein in beiden Simulationsvarianten absolut sinkender Primär-Rohstoffbedarf für nationale Exporte wird für den Rest der Welt, Russland, Deutschland sowie das Aggregat sämtlicher übriger Länder beobachtet.

Zusammenfassend lässt sich aus den Analysen der Projektionsergebnisse zweierlei herauslesen:

- Das Zusammenspiel aus technischem Fortschritt, Dekarbonisierung (der Energiewirtschaft) und Änderungen in den Wirtschaftsstrukturen lassen ohne eine umfassende Ressourcenwende bis 2050 für alle Länder und Regionen einen Rückgang der Primär-Rohstoffintensität der Exporte in einer Größenordnung von 40 bis 65% erwarten. Für Deutschland ist aus den Modellergebnissen keine Vorreiterrolle im Hinblick auf besonders starke Fortschritte im Hinblick auf eine weniger primärrohstoffintensive Produktion der Exporte abzulesen.

Tabelle 34: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Exporte (Exporte in RME) und der Primär-Rohstoffintensitäten der Exporte, 2015 - 2050 – die 15 wichtigsten Länder/Regionen

Rang 2050 [Rang 2015]	Land / Region		2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [1]	Rest der Welt	PRB	10,9	10,8 bis 11,3	9,27 bis 10,5	-4% bis -15%
		PRI	2,75	1,89 bis 1,9	1,16 bis 1,17	-58% bis -58%
2 [2]	China	PRB	7,01	7,41 bis 7,92	7,11 bis 8,49	+1% bis +21%
		PRI	2,05	1,36 bis 1,36	0,87 bis 0,88	-57% bis -57%
3 [3]	USA	PRB	1,78	1,98 bis 2,1	1,98 bis 2,3	+11% bis +29%
		PRI	0,89	0,66 bis 0,67	0,44 bis 0,46	-49% bis -50%
4 [6]	Brasilien	PRB	1,32	1,7 bis 1,81	1,76 bis 2,08	+33% bis +58%
		PRI	5,12	3,95 bis 4,02	2,41 bis 2,5	-51% bis -53%
5 [4]	Australien	PRB	1,48	1,61 bis 1,72	1,61 bis 1,92	+9% bis +30%
		PRI	4,27	2,52 bis 2,54	1,45 bis 1,45	-66% bis -66%
6 [8]	Kanada	PRB	1,09	1,09 bis 1,15	1,02 bis 1,2	-7% bis +10%
		PRI	2,11	1,57 bis 1,59	1,03 bis 1,08	-49% bis -51%
7 [7]	Russland	PRB	1,3	1,25 bis 1,33	0,96 bis 1,14	-12% bis -26%
		PRI	3,19	2,72 bis 2,76	1,86 bis 1,94	-39% bis -42%
8 [5]	Deutschland	PRB	1,33	1,2 bis 1,28	0,92 bis 1,09	-18% bis -31%
		PRI	0,74	0,54 bis 0,54	0,37 bis 0,38	-49% bis -50%
9 [9]	Südkorea	PRB	0,83	0,9 bis 0,96	0,85 bis 1,02	+3% bis +23%
		PRI	1,18	0,77 bis 0,78	0,46 bis 0,48	-60% bis -61%
10 [10]	Indien	PRB	0,79	0,84 bis 0,9	0,84 bis 1,02	+6% bis +29%
		PRI	1,8	1,24 bis 1,24	0,83 bis 0,84	-54% bis -54%
11 [12]	Mexiko	PRB	0,55	0,57 bis 0,61	0,55 bis 0,66	+1% bis +20%
		PRI	1,45	1,1 bis 1,12	0,72 bis 0,75	-48% bis -50%
12 [11]	Japan	PRB	0,65	0,67 bis 0,72	0,56 bis 0,67	-13% bis +3%
		PRI	0,7	0,48 bis 0,49	0,29 bis 0,29	-58% bis -59%
13 [18]	Türkei	PRB	0,34	0,41 bis 0,44	0,47 bis 0,57	+39% bis +67%
		PRI	2,01	1,55 bis 1,55	1,09 bis 1,11	-45% bis -46%
14 [14]	Frankreich	PRB	0,49	0,47 bis 0,5	0,42 bis 0,49	-13% bis +1%
		PRI	0,67	0,48 bis 0,48	0,34 bis 0,34	-49% bis -50%
15 [15]	Polen	PRB	0,38	0,39 bis 0,41	0,35 bis 0,41	-8% bis +7%
		PRI	1,49	1,12 bis 1,12	0,82 bis 0,83	-44% bis -45%
	Sonstige Länder	PRB	3,55	3,3 bis 3,48	2,71 bis 3,14	-11% bis -24%
		PRI	0,77	0,56 bis 0,57	0,4 bis 0,41	-47% bis -48%

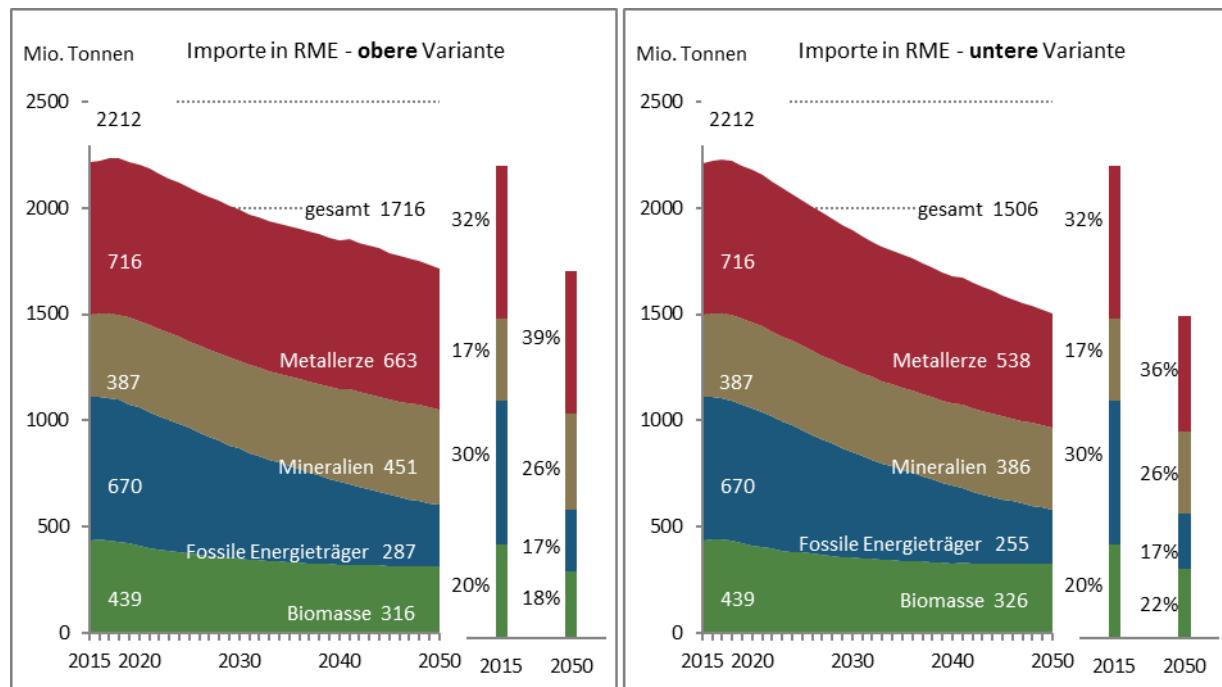
PRB = Primär-Rohstoffbedarf für Exporte (Exporte in RME) in Milliarden Tonnen

PRI = Primär-Rohstoffintensität der Exporte in kg je 2010 US-\$

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- Nur für Länder/Regionen, die eine im globalen Maßstab unterdurchschnittliche monetäre Exportdynamik in den Projektionen aufweisen, wie beispielsweise Deutschland oder Russland, reichen die Fortschritte bei der Primärrohstoffintensität aus, um auch eine absolute Reduktion des Primärrohstoffbedarfs für Exporte zu erreichen.

Abbildung 87: Klimaaktives Deutschland: Niveau und Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs für Importe (Importe im RME), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Ergänzende Darstellungen zur Bedeutung von Wachstums-, Struktur- und Intensitätseffekten des deutschen Primärrohstoffbedarfs für Exporte (Abbildung 104) sowie zur geografischen Verteilung der durch deutsche Exporte weltweit induzierten Extraktionsaktivitäten (Abbildung 105) können im Anhang nachgeschlagen werden. Aus Platzgründen verzichten wir an dieser Stelle auf eine weitere Diskussion dieser Befunde, um stattdessen in Ergänzung der bisherigen Ergebnisdarstellung zur Betrachtung der Ergebnisse hinsichtlich des Primär-Rohstoffbedarfs der deutschen Importe überzuleiten.

Wie Abbildung 87 entnommen werden kann, werden auch für die Zukunft in beiden Simulationsvarianten für die Importe im Vergleich zu den bisher betrachteten Exporten insgesamt andauernd höhere Rohmaterialäquivalente simuliert. Die Entwicklungen für einzelne Rohstoffkategorien kennzeichnet dabei im Fall der Biomasse wie auch der fossilen Energieträger eine relativ geringere Variabilität zwischen beiden Simulationsvarianten. Für Biomasse wird in der oberen Variante eine Reduktion des Primär-Rohstoffbedarfs der Importe bis zum Jahr 2050 um 28% projiziert. In der unteren Variante verringert sich dieser Wert geringfügig auf 26%. Wie bereits eingangs erläutert wurde, können diese geringfügigen Variationen insbesondere auf global veränderte Preisdynamiken für landwirtschaftliche Produkte im Fall einer deutlich gesteigerten Privaten Konsumnachfrage der Region „Rest der Welt“ zurückgeführt werden. Erwartungsgemäß werden die umfassendsten Rückgänge des Primär-Rohstoffbedarfs der Importe für fossile Energieträger beobachtet. In der oberen Variante kommt es dabei bis zum Jahr 2050 zu einer Reduktion um 57% im Vergleich zu heutigen Importniveaus. In der unteren Variante wird mit einem Rückgang von 670 auf 255 Mio. Tonnen Rohmaterialäquivalenten eine geringfügig stärkere Reduktion beobachtet. Bei den Metallerzen werden im Ver-

gleich hierzu lediglich geringere Reduktionen beobachtet, im Fall der Mineralien prägen (in der unteren Variante) stagnierende, bzw. (in der oberen Variante) im Zeitablauf ansteigende Importe in Rohmaterialäquivalenten den Befund.

Tabelle 35: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität der Importe (Importe in RME) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [Rang 2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [3]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI 234 1,42	235 bis 250 1,12 bis 1,14	242 bis 274 0,81 bis 0,83	+3% bis +17% -42% bis -43%
2 [2]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI 274 1,79	271 bis 291 1,38 bis 1,42	236 bis 282 0,93 bis 0,99	-14% bis +3% -45% bis -48%
3 [1]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	PRB PRI 309 2,54	251 bis 271 1,82 bis 1,9	170 bis 209 1,19 bis 1,3	-32% bis -45% -49% bis -53%
4 [4]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI 221 3,05	175 bis 176 2,04 bis 2,14	147 bis 149 1,42 bis 1,63	-33% bis -34% -46% bis -54%
5 [5]	Maschinen [DK]	PRB PRI 196 2,26	169 bis 180 1,65 bis 1,69	125 bis 147 1,05 bis 1,12	-25% bis -36% -50% bis -53%
6 [6]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI 152 1,47	125 bis 133 1,11 bis 1,12	90 bis 106 0,77 bis 0,8	-30% bis -41% -46% bis -48%
7 [7]	Bauarbeiten [F]	PRB PRI 102 26,32	79 bis 84 18,79 bis 19,1	63 bis 75 12,76 bis 13,24	-27% bis -38% -50% bis -51%
8 [9]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	PRB PRI 80 3,12	64 bis 66 2,31 bis 2,46	57 bis 59 1,76 bis 2,11	-27% bis -29% -32% bis -44%
9 [8]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	PRB PRI 101 3,39	81 bis 83 3,47 bis 3,49	49 bis 55 3,77 bis 3,77	-46% bis -51% +11% bis +11%
10 [10]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	PRB PRI 63,9 1,94	55 bis 57 1,44 bis 1,46	45 bis 51 1,03 bis 1,04	-21% bis -30% -46% bis -47%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	PRB PRI 479 1,32	390 bis 406 0,96 bis 0,96	278 bis 314 0,62 bis 0,63	-34% bis -42% -52% bis -53%
Insgesamt		PRB PRI 2212 1,91	1897 bis 1992 1,42 bis 1,43	1506 bis 1716 0,97 bis 0,98	-22% bis -32% -49% bis -49%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf für Importe (Importe in RME) in Mio. t

PRI = Primär-Rohstoffintensität der Importe in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 35 zeigt, dass in beiden Simulationsvarianten insbesondere wiederum diejenigen Gütergruppen für den Primär-Rohstoffbedarf der deutschen Importe relevant sind, welche zuvor bereits bei der Betrachtung des Rohstoffbedarfs der Exporte im Fokus standen. Neben Büromaschinen etc., Produkten des Fahrzeugbaus, Metallen und Metallerzeugnissen sowie Produkten des Maschinenbaus kommt dabei auch Nahrungs- und Futtermitteln, Getränken und Tabakerzeugnissen eine zentrale Bedeutung zu. Büromaschinen, EDV-Geräte, Geräte der Feinmechanik und Optik repräsentieren dabei die einzige Gütergruppe, für welche in beiden Varianten jeweils ein Anstieg des Primär-Rohstoffbedarfs für Importe beobachtet werden kann.

Tabelle 36 zeigt, dass im internationalen Vergleich wiederum weltweit sinkende Primär-Rohstoffintensitäten der Importe simuliert werden. Ein starkes ökonomisches Wachstum der Importe führt allerdings in der Region „Rest der Welt“ sowie China, Indien, Südkorea, Australien, Brasilien, der Türkei und Mexiko jeweils

in beiden Varianten zu einem langfristigen Anstieg des Primär-Rohstoffbedarfs für Importe. Lediglich für die USA, Deutschland, Japan, Frankreich, Großbritannien, Spanien werden in beiden Varianten absolute Reduktionen des Primär-Rohstoffbedarfs für Importe simuliert.

Tabelle 36: Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffbedarfe für Importe (Importe in RME) und der Primär-Rohstoffintensitäten der Importe, 2015 - 2050 – die 15 wichtigsten Länder/Regionen

Rang 2050 [Rang 2015]	Land / Region		2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [1]	Rest der Welt	PRB	9,1	10,8 bis 11,9	11 bis 14,42	+21% bis +59%
		PRI	1,64	1,19 bis 1,2	0,82 bis 0,85	-48% bis -50%
2 [2]	China	PRB	6,64	8,89 bis 9,37	9,12 bis 10,57	+37% bis +59%
		PRI	2,23	1,87 bis 1,89	1,34 bis 1,38	-38% bis -40%
3 [3]	USA	PRB	3,91	3,61 bis 3,74	3,12 bis 3,5	-11% bis -20%
		PRI	1,55	1,12 bis 1,13	0,75 bis 0,76	-51% bis -51%
4 [7]	Indien	PRB	1,06	1,37 bis 1,42	1,63 bis 1,79	+54% bis +69%
		PRI	2,51	1,79 bis 1,8	1,18 bis 1,22	-52% bis -53%
5 [6]	Südkorea	PRB	1,48	1,6 bis 1,69	1,51 bis 1,74	+2% bis +17%
		PRI	2,37	1,64 bis 1,65	0,98 bis 1	-58% bis -59%
6 [5]	Deutschland	PRB	2,21	1,9 bis 1,99	1,51 bis 1,72	-22% bis -32%
		PRI	1,44	1,06 bis 1,07	0,73 bis 0,74	-49% bis -49%
7 [4]	Japan	PRB	2,33	1,86 bis 1,93	1,3 bis 1,5	-36% bis -44%
		PRI	2,84	1,98 bis 1,98	1,18 bis 1,18	-59% bis -59%
8 [9]	Kanada	PRB	0,93	0,95 bis 0,98	0,92 bis 1,02	-1% bis +10%
		PRI	1,73	1,32 bis 1,34	0,9 bis 0,93	-46% bis -48%
9 [14]	Australien	PRB	0,59	0,75 bis 0,78	0,87 bis 0,99	+47% bis +67%
		PRI	2,22	1,66 bis 1,67	1,18 bis 1,2	-46% bis -47%
10 [15]	Brasilien	PRB	0,56	0,63 bis 0,65	0,69 bis 0,78	+23% bis +40%
		PRI	1,94	1,53 bis 1,54	1,14 bis 1,17	-40% bis -41%
11 [17]	Türkei	PRB	0,55	0,63 bis 0,66	0,65 bis 0,75	+18% bis +37%
		PRI	2,5	1,86 bis 1,88	1,32 bis 1,38	-45% bis -47%
12 [8]	Frankreich	PRB	1,04	0,85 bis 0,89	0,65 bis 0,73	-30% bis -38%
		PRI	1,3	0,95 bis 0,95	0,66 bis 0,66	-49% bis -49%
13 [16]	Mexiko	PRB	0,55	0,61 bis 0,63	0,61 bis 0,67	+11% bis +21%
		PRI	1,43	1,08 bis 1,09	0,78 bis 0,78	-45% bis -45%
14 [10]	Großbritannien	PRB	0,91	0,71 bis 0,74	0,55 bis 0,61	-33% bis -40%
		PRI	1,19	0,86 bis 0,86	0,57 bis 0,58	-51% bis -52%
15 [13]	Spanien	PRB	0,59	0,55 bis 0,58	0,44 bis 0,49	-16% bis -25%
		PRI	1,51	1,09 bis 1,09	0,72 bis 0,72	-52% bis -52%
	Sonstige Länder	PRB	3,55	4,17 bis 4,36	3,15 bis 3,59	-11% bis +1%
		PRI	0,94	0,96 bis 0,96	0,67 bis 0,68	-28% bis -29%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf für Importe (Importe in RME) in Milliarden Tonnen

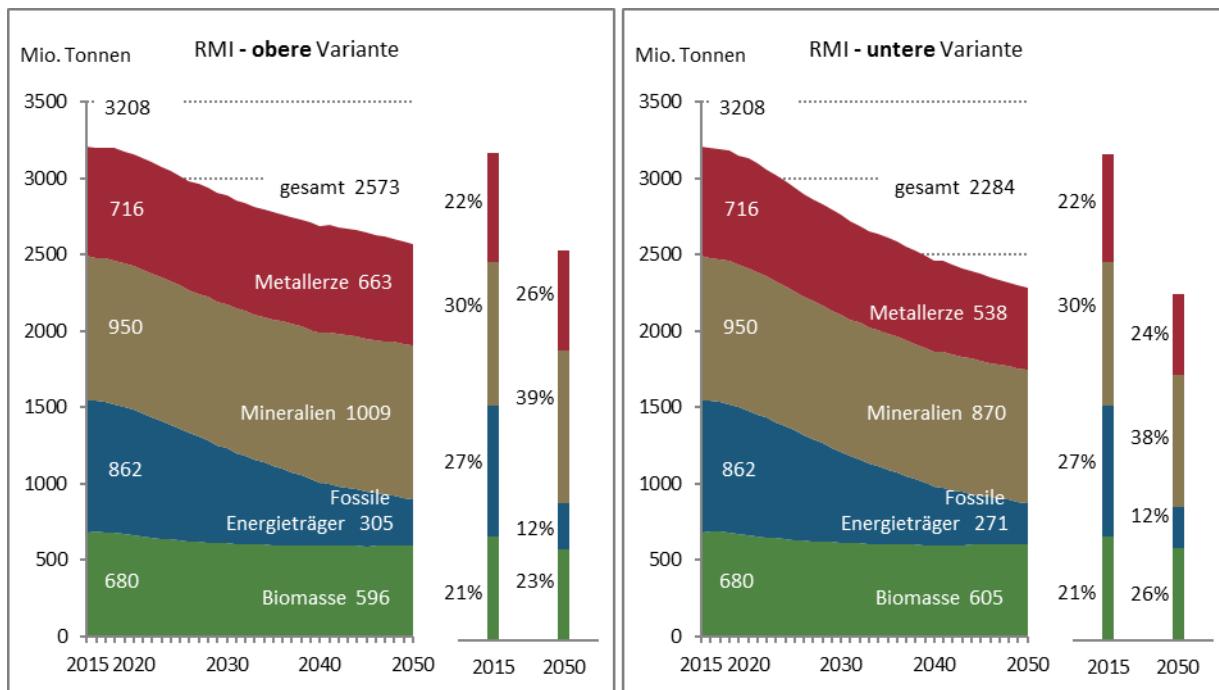
PRI = Primär-Rohstoffintensität der Importe in kg je 2010 US-\$

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Eine Betrachtung der Entwicklung des deutschen RMI in den jeweiligen Varianten ermöglicht Abbildung 88. Da sich der RMI definitorisch aus einer Addition des RMC mit den Primärmaterialäquivalenten der Exporte ergibt, sind in dieser Darstellung bereits zuvor angesprochene Charakteristika erkennbar. Der RMI fossiler

Energieträger wird im Zeitablauf deutlich reduziert, während der Primär-Rohstoffeinsatz von Biomasse im Zeitablauf tendenziell stagniert.

Abbildung 88: Klimaaktives Deutschland: Dynamik des deutschen Primär-Rohstoffeinsatzes (RMI), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

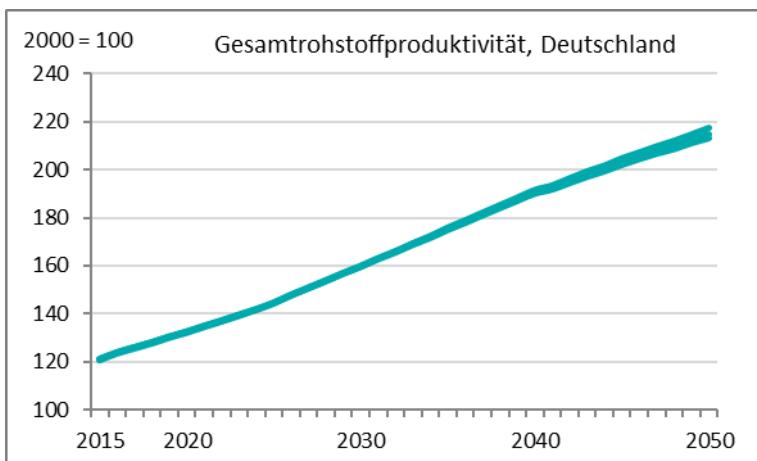
Für Metallerze werden in beiden Varianten langfristig rückläufige RMI-Werte simuliert, für Mineralien zeigt sich in der unteren Variante lediglich eine geringe Reduktion, in der oberen Variante hingegen ein leichter Anstieg im Zeitablauf.

Auf Basis des RMI lässt sich auch der Indikator Gesamtrohstoffproduktivität berechnen, welcher im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm II als zusätzlicher Referenzpunkt mit in die Berichterstattung aufgenommen wurde. Die Gesamtrohstoffproduktivität ist dabei definiert als Quotient aus der Summe von Bruttoinlandsprodukt und Importen in Relation zum RMI. Die durch beide Varianten in den Simulationen aufgezeigte Entwicklungsspanne dieses Indikators kann Abbildung 85 entnommen werden.

Als offizielles Ziel wird für diesen Indikator bis zum Jahr 2030 eine Fortschreibung des Trends der Jahre 2000 – 2010 (+1,6% p.a.) angestrebt. Mit einem durchschnittlichen Wachstum in einer Größenordnung von 1,6% p.a. wird dieses Ziel in beiden Varianten des Umfeldszenarios „Klimaaktives Deutschland“ so eben erreicht.

Tabelle 37 kann entnommen werden, dass diese Entwicklung auf andauernde Reduktionen der Primär-Rohstoffintensität für beinahe sämtliche diesbezüglich relevanten Gütergruppen der letzten Verwendung zurückzuführen ist. Lediglich für die Gruppe der Kokereierzeugnisse, Mineralölerzeugnisse und Spalt- und Brutstoffe werden im Zeitablauf (annähernd) konstante Rohstoffintensitäten simuliert. Der letztgenannte Befund reflektiert in erster Linie die physikalischen Produktionsnotwendigkeiten bei der Verarbeitung fossiler Rohstoffe zu Mineralölerzeugnissen und ist damit absolut plausibel. Die übrigen Reduktionen der Primär-Rohstoffintensitäten kennzeichnen den dynamischen Charakter unserer Projektionen. In dem Innovations-orientierten Umfeldszenario „Klimaaktives Deutschland“ induziert stetiger technischer Fortschritt umfassende Produktivitätsfortschritte, welche für eine überwiegende Anzahl der abgebildeten Gütergruppen auch ausreichend sind, um den insgesamt beobachtbaren Primär-Rohstoffeinsatz im Zeitablauf absolut zu reduzieren.

Abbildung 89: Klimaaktives Deutschland: Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland, 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Steigerungen des deutschen RMI-Niveaus werden in beiden Simulationsvarianten lediglich durch die Gütergruppe der Büromaschinen etc., durch Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie durch die Gütergruppe Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden hervorgerufen.

Politikansätze zur Reduktion des deutschen RMI, bzw. zur weiteren Steigerung der deutschen Gesamtrohstoffproduktivität sollten daher in diesem Umfeldszenario zunächst auf eine weitergehende Beeinflussung der Entwicklung dieser Nachfragekomponenten abzielen.

Zumindest sollte die simulierte Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland nicht vor schnell als ein Anzeichen für fehlenden ressourcenpolitischen Handlungsbedarf in dem hier betrachteten Umfeldszenario interpretiert werden. Gemessen an eigenen historischen Erfahrungen ist der Befund der Abbildung 89 sicherlich begrüßenswert, ein ergänzender internationaler Vergleich offenbart allerdings, dass für andere Volkswirtschaften in der Vergangenheit höhere Steigerungen der jeweiligen Gesamtrohstoff-Produktivität beobachtet werden konnten, welche auch im Simulationszeitraum weiterhin fortgeschrieben werden.

Unter Verweis auf die internationale Heterogenität der Wirtschaftsstrukturen sowie unterschiedlichen Ausgangsniveaus der jeweiligen Gesamtrohstoff-Produktivität muss hierzu angemerkt werden, dass ein internationaler Vergleich anhand einer ausschließlichen Betrachtung von Produktivitäts-Wachstumsraten nicht wirklich zielführend durchzuführen ist. Multinationale Politikinitiativen zur Senkung der Primärrohstofffinanzspruchnahme sind daher dazu aufgefordert, auch das Niveau globaler Rohstoff-Extraktionen explizit zu betrachten: Von derzeit jährlich annähernd 85 Gigatonnen werden diese nach unseren Szenario-Ergebnissen bis 2050 auf ein Niveau von 120 bis 132 Gigatonnen weiter ansteigen. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass gerade für relativ ressourcenintensive Länder und Regionen im Vergleich zu bereits hoch-industrialisierten Regionen relativ hohe ökonomische Wachstumsraten erwartet werden. Unter dem Aspekt der globalen Verantwortung kann daher hinterfragt werden, ob eine mittel- bis langfristige Steigerung der deutschen Gesamt-Rohstoffproduktivität um ca. 1.6% p.a. als angemessen ambitioniertes Ziel anzusehen ist.

Tabelle 37: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) und Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [Rang 2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [1]	Bauarbeiten [F]	PRB PRI 2,27	399 1,57 bis 1,58	322 bis 338 1,32 bis 1,35	303 bis 350 -12% bis -24% -40% bis -42%
2 [4]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI 0,73	291 0,61 bis 0,62	286 bis 306 0,42 bis 0,44	-15% bis +2% -40% bis -43%
3 [5]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI 0,91	245 0,74 bis 0,75	245 bis 260 0,57 bis 0,57	+3% bis +17% -37% bis -38%
4 [6]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	PRB PRI 5,52	219 4,11 bis 4,31	222 bis 222 3,34 bis 3,9	+9% bis +10% -29% bis -39%
5 [3]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI 1,88	310 1,29 bis 1,36	261 bis 261 1 bis 1,16	-27% bis -27% -38% bis -47%
6 [2]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	PRB PRI 2,25	326 1,54 bis 1,6	262 bis 282 0,98 bis 1,07	-34% bis -46% -52% bis -57%
7 [7]	Maschinen [DK]	PRB PRI 0,85	205 0,59 bis 0,6	176 bis 187 0,39 bis 0,41	-26% bis -37% -52% bis -54%
8 [8]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI 0,82	181 0,59 bis 0,59	148 bis 157 0,43 bis 0,44	-30% bis -41% -47% bis -47%
9 [15]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	PRB PRI 3,49	60 2,87 bis 2,88	69 bis 71 2,59 bis 2,63	+24% bis +40% -25% bis -26%
10 [9]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	PRB PRI 2,34	113 2,26 bis 2,27	88 bis 91 2,33 bis 2,35	-50% bis -55% -1% bis +1%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	PRB PRI 0,38	858 0,28 bis 0,28	683 bis 711 0,18 bis 0,18	-37% bis -44% -53% bis -54%
Insgesamt		PRB PRI 0,81	3207 0,61 bis 0,61	2761 bis 2885 0,45 bis 0,46	-20% bis -29% -44% bis -44%

PRB = Primär-Rohstoffeinsatz (RMI) in Mio. t

PRI = Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung (= RMI / (C+I+EX)) in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Eine entsprechende internationale Vergleichsübersicht indexierter Werte der Gesamtrohstoffproduktivität findet sich in Tabelle 38. Bezogen auf das Basisjahr 2000 sind nach unseren Abschätzungsergebnissen für den RMI derzeit insbesondere Ungarn, Tschechien, Indien, Großbritannien sowie Spanien durch auffallend starke Steigerungen der Gesamtrohstoffproduktivität gekennzeichnet. Diese historischen Befunde reflektieren sicherlich jeweils individuelle Merkmale der einzelnen Volkswirtschaften und werden zumindest teilweise zudem durch spezifische Sondereffekte (wie bspw. konjunkturellen Auswirkungen der Bauwirtschaft) geprägt. Zudem wird der internationale Vergleich dadurch erschwert, dass in der hier gewählten Index-Darstellung keine ursprünglichen Niveauinformationen verfügbar sind.

Tabelle 38: Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich der Gesamtrohstoffproduktivität (2000 = 100), 2015 bis 2050

Rang 2050 [Rang 2015]	Land / Region	2015	2030	2050
1 [2]	Tschechien	163,5	245,9 bis 247,2	365,7 bis 373,8
2 [10]	Südkorea	134,8	192,6 bis 193,2	287 bis 289,6
3 [6]	Italien	139,7	190,3 bis 191,3	282 bis 287,5
4 [1]	Ungarn	165,0	222,9 bis 225,1	278,3 bis 288,1
5 [4]	Großbritannien	151,3	200,2 bis 204,3	260,4 bis 277,7
6 [17]	Griechenland	120,7	162,7 bis 167,7	250,4 bis 274,1
7 [3]	Indien	160,4	210,8 bis 212,2	255,6 bis 258
8 [9]	China	137,3	194,2 bis 194,8	251,9 bis 253,4
9 [5]	Spanien	148,0	192,3 bis 194,1	249,5 bis 258,2
10 [19]	Japan	118,6	157,1 bis 157,6	238,8 bis 241,8
11 [8]	Polen	138,6	178,9 bis 180,4	233,4 bis 239,6
12 [22]	Rest der Welt	111,7	157,3 bis 165,4	218,3 bis 246,1
13 [18]	Kanada	120,6	157,7 bis 159,5	223,3 bis 230,2
14 [15]	Niederlande	121,5	159,7 bis 161,9	214,5 bis 224,9
15 [16]	Deutschland	120,9	159,9 bis 159,9	214,9 bis 217,6
16 [11]	USA	131,2	160,7 bis 161,3	211,7 bis 216
17 [24]	Australien	105,3	146,8 bis 148,3	212,7 bis 215,7
18 [13]	Frankreich	122,3	160,9 bis 162,1	208,9 bis 214,9
19 [12]	Portugal	129,8	164,4 bis 165,8	207 bis 209,9
20 [20]	Österreich	114,2	150,4 bis 150,5	196,8 bis 199,8
21 [14]	Schweden	122,1	157,3 bis 158,5	195,6 bis 201,8
22 [21]	Belgien	112,9	144,2 bis 145,2	189 bis 194,8
23 [7]	Russland	139,0	147,5 bis 147,6	180,5 bis 182,8
24 [23]	Mexiko	108,1	135,5 bis 135,8	179,7 bis 179,7
25 [26]	Türkei	102,9	124,7 bis 125,1	157,5 bis 158,1
26 [25]	Rumänien	103,8	123,4 bis 124,9	144,6 bis 147,8
27 [27]	Brasilien	90,8	108,1 bis 109,2	145,7 bis 150,2

Gesamtrohstoffproduktivität (= [BIP + Importe] / RMI), Index 2000 = 100

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Es erscheint allerdings bemerkenswert, dass gemäß unseren Berechnungen die für Deutschland simulierten Steigerungen der Gesamtrohstoffproduktivität im internationalen Vergleich lediglich moderat erscheinen. So wird bspw. für Südkorea wie auch für Italien bis zum Jahr 2050 in beiden Varianten nahezu eine Verdreifachung der Gesamtrohstoffproduktivität im Vergleich zu den jeweiligen Ursprungs niveaus des Jahres 2000 simuliert. Auch in Japan, welches in der Vergangenheit im Vergleich zu Deutschland ein geringeres Wachstum der Gesamtrohstoffproduktivität aufwies und im Simulationszeitraum durch ein im Vergleich zu den zuvor angesprochenen Volkswirtschaften schwächeres Wachstum seiner Gesamtrohstoffproduktivität gekennzeichnet ist, steigt dieser Indikator bis zum Jahr 2050 auf ein Niveau, welches das deutsche Niveau in beiden Varianten um ca. 11% übersteigt.

Eine umfassende Analyse der Hintergründe für diese Analyseergebnisse übersteigt sicher die Möglichkeiten und Intentionen des vorliegenden Berichts. Hierzu müssten letztlich für jedes Land ähnlich detailliert wie für Deutschland die einzelnen Komponenten und Treiber des Primärrohstoffeinsatzes (RMI) analysiert werden, also

- Niveau und Dynamik des Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (RMC) nach Gütergruppen,
- Niveau und Dynamik des Rohstoffbedarfs für Exporte (Exporte in RME) nach Gütergruppen,
- Niveau und Dynamik der monetären Nachfrage (Konsum, Investitionen und Exporte) nach Gütergruppen
- Niveau und Dynamik der Primär-Rohstoffintensitäten nach Gütergruppen.

Aus Sicht der Autoren wären wichtige nächste Schritte sowohl im Hinblick auf entsprechende ex-post-Evaluationen als auch im Hinblick auf ex-ante-Projektionen und Simulationen:

- Der Vergleich von SimRess-Ergebnissen mit entsprechenden Detailergebnissen (für eines oder mehrere Länder) aus anderen nationalen und internationalen Forschungsvorhaben.<sup>120</sup>
- Ex-post Vergleiche für eine begrenzte Anzahl vergleichbarer (benachbarter) Länder auf Grundlage eines einheitlichen Daten- und Methodenhintergrunds, zur Identifikation von länderspezifischen Vorsprüngen bzw. Defiziten im Hinblick auf eine ressourcenschonende Wirtschaftsweise.
- Detailanalysen zu ex-ante-Projektionsergebnissen für eine begrenzte Anzahl vergleichbarer (benachbarter) Länder auf Grundlage eines konsistenten dynamischen Modellierungsansatzes, zur Identifikation von zu erwartenden Vorsprüngen bzw. Defiziten im Hinblick auf künftige Fortschritte zu einer ressourcenschonenderen Wirtschaftsweise.

Mit der soweit erfolgten Vorstellung von Detailergebnisse für die Primär-Rohstofffinanzspruchnahme schließen wir an dieser Stelle unsere ausführliche Vorstellung der Simulationsergebnisse im Umfeldszenario „Klimaaktives Deutschland“ mit einem weiterführenden Ausblick auf zukünftige Potenziale zur Erweiterung des Berichtsumfangs. Während die von uns vorgenommene Darstellung auf eine Vorstellung des in wissenschaftlichen Publikationen regelmäßig diskutierten Indikators RMC sowie des im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm II in Form der Gesamtrohstoffproduktivität betrachteten Indikators RMI fokussiert war, können auf Basis dieser Indikatoren sicherlich nicht alle politisch relevant erscheinenden Fragestellungen umfassend diskutiert werden. So erscheint es bspw. ausgesprochen sinnvoll, die derzeit übliche Betrachtung makroökonomischer Kennzahlen zukünftig um internationale Vergleiche der Rohstofffinanzspruchnahme für Produktionsaktivitäten ausgewählter Wirtschaftszweige in unterschiedlichen Volkswirtschaften zu ergänzen. Im SimRess-Projekt standen entsprechende Arbeiten nicht im Vordergrund des Erkenntnisinteresses. Wir halten es aber für ausgesprochen sinnvoll, zukünftig unter Berücksichtigung der gesamten Vorleistungsketten auch darüber zu berichten, welche globalen Ressourcenextraktionen durch die inländische Produktion einzelner Wirtschaftszweige oder Gütergruppen induziert wurden. Entsprechende internationale Produktivitätsvergleiche bieten Einsichten in die Fragestellung, ob die inländischen Produzenten der letzten Fertigungsstufe im Vergleich zu internationalen Wettbewerbern ressourceneffizient wirtschaften.

---

<sup>120</sup> Ganz überwiegend beschränken sich bis dato Veröffentlichungen im Kontext der Indikatoren RMC, RMI und (Gesamt-) Rohstoffproduktivität auf den Makro-Indikator selbst, bzw. eine Unterteilung nach 4 Materialkategorien. Detailergebnisse zu einzelnen Gütergruppen werden nach unserem Erkenntnisstand mit Ausnahme des vorliegenden Berichts nicht analysiert oder publiziert.

## 5 Simulationsstudien zur Abschätzung der Potenziale ressourcenpolitischer Interventionen

### 5.1 Einleitender Überblick

In der wissenschaftlich basierten Politikberatung sollten numerische Simulationsmodelle nur zum Einsatz kommen nachdem sichergestellt wurde, dass sie die thematisch relevanten Indikatoren sowie deren kausale Interdependenzen mit zentralen, historisch beobachtbaren Treibern plausibel nachvollziehbar darstellen. Hierzu sind umfassende quantitative Evaluationen notwendig, da bspw. eine rein qualitative Dokumentation zugrundeliegender Kausalbeziehungen in Form eines CLDs niemals hinreichend sein kann, um eindeutige Rückschlüsse auf die resultierenden Systemeigenschaften eines dynamischen Simulationsmodell zu ermöglichen.<sup>121</sup> Vor diesem Hintergrund diente Kapitel 3 zunächst einer umfassenden Darstellung der historischen Datenbasis des Modells sowie seiner Fähigkeiten, auf Basis von international klassifizierten Datenstrukturen ressourcenpolitisch relevante Indikatoren verlässlich abzubilden und bis an den aktuellen Rand fortzuschreiben. Die erfolgte Vorstellung von parametrisierten Umfeldszenarien verdeutlichte zudem, dass dynamische GINFORS3-Projektion durch einen globalen Berichtsumfang gekennzeichnet sind, welcher in seinem Detailreichtum wesentlich weiterreichende Interpretationen der in alternativen Zukunftsszenarien implizierten umwelt- wie auch sozio-ökonomischen Auswirkungen ermöglicht. Nachdem wir die entsprechenden Projektionsfähigkeiten für das Modell GINFORS3 zudem durch eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse exemplarisch evaluiert haben, fokussieren wir an dieser Stelle weitergehende Details des zentralen Alleinstellungsmerkmal, welches Design-Modelle von alternativ verfügbaren numerischen Rechentools unterscheidet: Die Simulationsfähigkeit zur Abbildung der direkten und indirekten Auswirkungen (ressourcen-) politischer Instrumente und/oder (autonomer) Verhaltensänderungen auf Seiten der Produzenten oder Konsumenten.

Auch die Simulationsfähigkeit von GINFORS3 wurde im SimRess-Projekt kontinuierlich weiterentwickelt, um deren Anwendung im Kontext ressourcenpolitischer Handlungsfelder weiter voranzutreiben. Dabei wurden im Projektverlauf zwei alternative Vorgehensweisen parallel verfolgt. Einerseits wurden, aufbauend auf Vorarbeiten des Projektpartners Ecologic Institut, Parametrisierungsmöglichkeiten zur Abbildung aktuell konkret diskutierter ressourcenpolitischer Maßnahmen identifiziert. Unter Berücksichtigung der bislang in den deutschen Ressourceneffizienzprogrammen ProgRess I und ProgRess II genannten politischen Handlungsansätze (BMU 2012, BMUB 2016), wurden hierzu verfügbare Veröffentlichungen bisheriger sowie laufender thematisch verwandter Forschungsprojekte auf konkrete Instrument-Vorschläge überprüft.<sup>122</sup> Wie der entsprechenden Dokumentation in Hirschnitz-Garbers et al. (2017a) entnommen werden kann, konnten vor diesem Hintergrund insgesamt über 300 Instrumenten-Vorschläge identifiziert werden. Diese theoretischen Vorarbeiten wurden von uns um eine konkrete methodische Übersicht der in GINFORS3 prinzipiell umsetzbar erscheinenden Parametrisierungs-Optionen für sämtliche in der ursprünglichen ProgRess II-Entwurfssatzung diskutierten Handlungsansätze ergänzt.

---

<sup>121</sup> Dass es zumindest ausgesprochen fragwürdig erscheint, ein beliebig parametrisiertes Modell ohne entsprechende inhaltliche Evaluationen unmittelbar für weitergehende Analysen anzuwenden, repräsentiert selbstverständlich keineswegs ausschließlich unsere persönliche Einschätzung. Entsprechende Forderungen lassen sich vielmehr bspw. auch im Bereich der angewandten systemdynamischen Modellierung finden. Siehe hierzu bspw. folgendes Zitat: „[...] if there are case [...] in which that criterion cannot be met, one should, perhaps, restrict the analysis to the qualitative level [...]. [...] the determination always to quantify [...] may lead to models that are so misleading as to be valueless, or even, when practical decisions are involved, damaging.“ (Coyle, 2000; p. 233).

<sup>122</sup> Im Kern konnte hierzu auf Ergebnisse folgender Forschungsprojekte zurückgegriffen werden: ÖkonRess (UFOPLAN FKZ 3712 93 105, 2013 – 2016), DYNAMIX (gefördert unter dem 7. EU-Forschungsrahmenprogramm, 2012 – 2016), POLFREE (gefördert unter dem 7. EU-Forschungsrahmenprogramm, 2012 – 2016), PolRess (UFOPLAN FKZ 3711 93 103, 2012 – 2015), MaRess (UFOPLAN FKZ 3707 93 300, 2007 – 2010).

Dabei wurde deutlich, dass für einen Großteil der theoretisch diskutierten Instrumenten-Vorschläge derzeit keine hinreichend belastbaren Parametrisierungs-Annahmen vorliegen. Dieser Befund lässt sich darauf zurückführen, dass bei der Entwicklung alternativer Politikinstrumente zunächst in aller Regel formal-theoretische Aspekte diskutiert werden. Hingegen werden die zur Wirkungsfolgenabschätzung in einem ökonomischen Totalmodell notwendigerweise zu unterstellenden unmittelbaren Auswirkungen eines Politikinstruments allenfalls durch sporadische empirische Referenzen angedeutet. Im Rückblick auf unsere vorherigen Anmerkungen in Kapitel 2 zur Notwendigkeit integrierter Simulationsstudien, kann dieser Befund durchaus als ein konkreter Appell zur zielgerichteten Förderung integrierter Simulationsstudien zur Ermöglichung weitergehender Abschätzungen alternativer Politikinstrumente im Bereich der Ressourcenpolitik verstanden werden. Da im Forschungsprojekt SimRess allerdings eine eigenständige empirische Analyse der direkten Effekte unterschiedlicher Politikinstrumente nicht budgetiert war, wurde in Absprache mit den fachlichen Betreuern des Umweltbundesamtes beschlossen, für ausgewählte Instrument-Beispiele anhand der gegebenen Modellstrukturen konkrete Ansatzpunkte zur Durchführung gesamtwirtschaftlicher Politikfolgenabschätzungen aufzuzeigen. Am Beispiel dieser Ansatzpunkte konnten daraufhin die fehlenden Detailinformationen für eine evidenzbasierte Politikfolgenabschätzung exemplarisch veranschaulicht werden. Im nachfolgenden Unterkapitel erfolgt eine detaillierte Zusammenfassung dieses Arbeitsschrittes.

Zuvor sei aber auch die alternativ verfolgte Vorgehensweise zur Abschätzung der Potenziale ressourcenpolitischer Interventionen kurz einleitend vorgestellt: Wie ebenfalls bereits im Kapitel 2 erwähnt wurde, sollten sich Design-Modelle insbesondere dadurch auszeichnen, dass sie flexible Simulationsmöglichkeiten zur konsistenten Abbildung umfassender Systemveränderungen, der dabei auftretenden komplexen kausalen Interdependenzen sowie der hierdurch induzierten Gesamteffekte ermöglichen. In diesem Sinne können auch für beliebige Variable des Modells GINFORS3 in jedem Simulationslauf die jeweiligen dynamischen Entwicklungen exogen variiert werden.

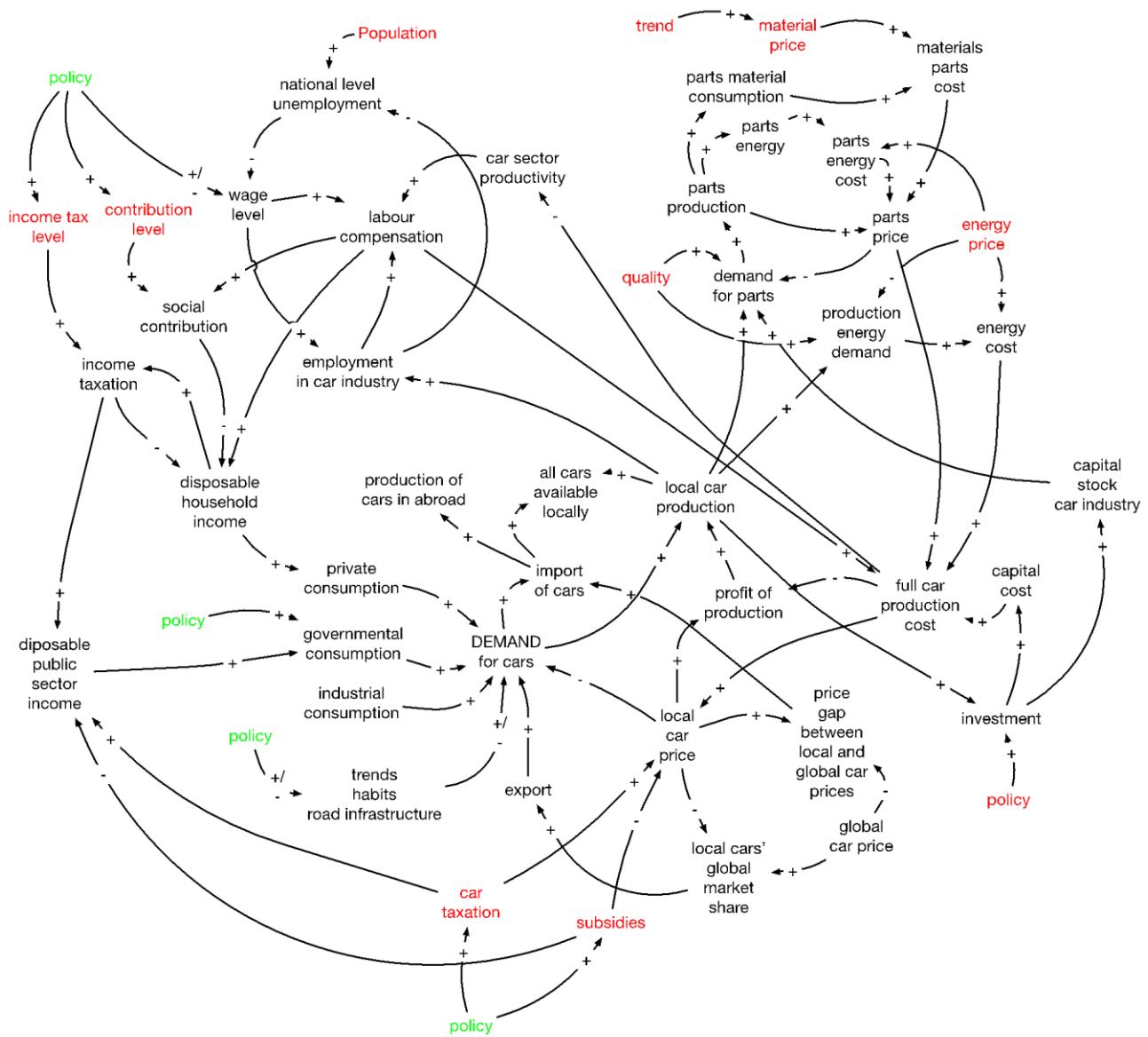
Inhaltlich lässt sich diese Modelleigenschaft unter Verweis auf Abbildung 86 näher erläutern. Diese Abbildung stellt einen Versuch dar, die in der Parametrisierung des Modells GINFORS3 berücksichtigten zentralen Wirkungsinterdependenzen zwischen industrieller Produktion (im hier gewählten Beispiel der Automobilindustrie), Beschäftigungsnachfrage, Material- und Energieeinsatz sowie daraus resultierenden Produktivitäts- und Einkommensentwicklungen zu visualisieren. Diese Abbildung ist als Resultat eines internen SimRess-Workshops eher generell didaktischer Natur (die Abbildung ist sicherlich nicht vollständig, teilweise didaktisch vereinfachend und daher stellenweise durch irreführende Kausalitätsbeziehungen geprägt) und kann somit nicht als konkrete Beschreibung der tatsächlichen GINFORS3-Modellstrukturen aufgefasst werden.<sup>123</sup>

Dennoch verweisen wir hier gerne auf diese Darstellung, um anhand dieses Beispiels folgende grundsätzliche inhaltliche Aspekte zu verdeutlichen: Die übliche Vorgehensweise einer klassischen Politikfolgenabschätzung zielt darauf ab, in entsprechenden Wirkungszusammenhängen modellexogene Politikansatzpunkte zu identifizieren (in der Abbildung durch grüne, bzw. rote Bezeichnungen symbolisiert), um deren ursprüngliche Parameter in einer Politiksimulation zu variieren (bspw. Einkommenssteuersätze) und die hieraus resultierenden gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen zu beobachten.

---

<sup>123</sup> Die Abbildung wurde Hirschnitz-Garbers et al. (2017a) entnommen. Sie wurde von den systemdynamisch modellierenden Projektpartnern erstellt, um die Identifikation von Politikansatzpunkten zu systematisieren. Um die Komplexität der Darstellung nicht unnötig zu steigern, wurde die Darstellung der hierbei angesprochenen Kausalketten pragmatisch verkürzt. Weitergehende konzeptionelle Erläuterungen (bspw. zur Identifikation von Politikansatzpunkten) können bei Hirschnitz-Garbers et al. (2017a) nachgelesen werden.

Abbildung 90: Automobilproduktion, in GINFORS3 berücksichtigte ökonomische Wirkungszusammenhänge



Quelle: Hirschnitz-Garbers et al. (2017a)

Während diese Visualisierung tendenziell suggeriert, dass solch eine Vorgehensweise die einzig denkbare Vorgehensweise bei der Anwendung eines Simulationsmodells darstellt, implizieren die zuvor angesprochenen flexiblen Optionen zur exogenen Beeinflussung ausgewählter Modellvariable aber weitaus umfassendere Möglichkeiten zur Anwendung von GINFORS3. Wenn die dynamischen Entwicklungen ausgewählter Variablen exogen variiert werden, lässt sich dies als Verstärkung oder aber Verminderung (bis hin zur völligen Abschaltung) der ansonsten im Referenzlauf unverändert gültigen kausalen Einflüsse auf diese Variable (in der visuellen Darstellung als eingehende Pfeile symbolisiert) verstehen. Relativ im Zentrum dieser Abbil-

dung findet sich bspw. ein Pfeil, welcher den Zusammenhang zwischen heimischem Produktionsniveau („local car production“) und der hierdurch verursachten Vorleistungsnachfrage („demand for parts“) symbolisiert.<sup>124</sup>

Die ressourcenpolitischen und gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen einer umfassenden Dematerialisierung des Fahrzeugbaus könnten an dieser Stelle beispielsweise durch exogen vorgegebene Reduktionen der Vorleistungsnachfrage der Automobilindustrie analysiert werden.

Dieses in impact assessment Studien zu den makroökonomischen Implikationen einer Ressourcenwende häufig angewandte Verfahren, fragt nicht danach durch welche politischen Interventionen oder Verhaltensänderungen diese Reduktionen ermöglicht werden, sondern danach welche Gesamt-Effekte aus den Reduktionen unter Beachtung der induzierten indirekten Effekte resultieren. Eine im SimRess-Projekt durchgeführte entsprechende Fallstudie wird in Unterkapitel 4.3.3 vorgestellt.

Gemäß unserer Einschätzung beweist diese Studie den weitreichenden Nutzen umfassender Simulationsstudien mit dynamischen Modellen zur zielgerichteten Entwicklung von Politikinstrumenten. Wichtig erscheint uns dabei festzuhalten, dass entsprechende Potenzialanalysen in der bisherigen Praxis der Instrumentenentwicklung keine nennenswerte Anwendung finden. Es wäre daher wünschenswert, wenn die Befunde unserer Fallstudie eine stärkere Einbindung modellgestützter Potenzialanalysen in zukünftige Instrumentenentwicklungen induzieren würde.

## 5.2 Möglichkeiten und Grenzen der Simulation von nationalen ressourcenpolitischen Interventionen

Wie bereits eingangs erwähnt dient dieses Unterkapitel dazu, die Herausforderungen einer evidenzbasierten Modellierung von Politik-Mixen nachvollziehbar vorzustellen. Grundsätzlich ist zur Simulation eines ausgewählten Politikinstruments stets eine Übersetzung der jeweiligen individuellen Wirkungsannahmen in die gegebenen Modellstrukturen notwendig. In SimRess wurden hierzu von uns für sämtliche Handlungssätze (der Entwurfssatzung) des Ressourceneffizienzprogramms ProgRess II (BMUB 2016) generelle methodische Vorarbeiten durchgeführt.

Auf Basis dieser Vorarbeiten konnten von uns individuelle ProgRess II-Handlungssätze zentralen Modellansatzpunkten zugeordnet werden. Beispielhaft sei hierzu kurz auf die Handlungssätze „Ressourceneffiziente Produktions- und Verarbeitungsprozesse entwickeln und verbreiten“ sowie „Betriebliche Effizienzberatung ausbauen“ verwiesen. Während unter diesen Handlungssätzen inhaltlich unterschiedliche Maßnahmenkonzeptionen diskutiert werden, zielen beide in ihrer angestrebten Wirkung auf eine Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produktion ab. Vor Hintergrund der Modellstrukturen ist eine solche Effizienzsteigerung jeweils durch eine entsprechende Anpassung ausgewählter Input-Koeffizienten in den betroffenen Wirtschaftszweigen zu parametrisieren. Die verfügbaren „Stellschrauben“ des Modells zur Abbildung der unmittelbaren Effekte sind also für beide Handlungssätze zunächst identisch.

Hinsichtlich der für eine Politikfolgenabschätzung notwendigen Parametrisierungsannahmen sind damit bei beiden Handlungssätzen identische Fragestellungen zu beantworten (Welche Wirtschaftszweige werden durch dieses Instrument erreicht? Welche Input-Koeffizienten können durch diese Maßnahme reduziert werden? Sind hierbei relevante Substitutions- oder Komplementaritätszusammenhänge zu berücksichtigen? ...). Aus Modellperspektive bieten somit beide Handlungssätze unterschiedliche Argumentationen

---

<sup>124</sup> Hierzu sei nochmals angemerkt, dass diese Darstellung offensichtlich grob vereinfachend ist, da der ökonomisch wichtige Effekt der Vorleistungsnachfrage auf die industrielle Produktivitätsentwicklung unberücksichtigt bleibt. Bei Betrachtung dieser Stelle sollte die Abbildung daher gedanklich um einen Pfeil mit negativem Vorzeichen von der Vorleistungsnachfrage zur Produktivität („car sector productivity“) ergänzt werden.

zur Umsetzung von „Effizienzparametrisierungen“, erfordern allerdings keine unterschiedlichen technischen Vorgehensweisen (im Sinne der im Modell anzusprechenden Kausalketten) bei der Umsetzung dieser Parametrisierungen.

Tabelle 39: Ausgewählte Handlungscluster zur konkreten Prüfung der Möglichkeiten zur Politikfolgenabschätzung

Nr.	ProgRess Handlungsansätze
1	7.1.5 Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe umweltverträglich ausbauen
2	7.2.1 Ressourceneffiziente Produktions- und Verarbeitungsprozesse entwickeln und verbreiten 7.2.2 Betriebliche Effizienzberatung ausbauen 7.2.3 Anreize für die Nutzung von Energie- und Umweltmanagementsystemen
3	7.3.3 Ressourcenschonung in die Produktentwicklung einbeziehen 7.3.4 Ressourcen durch soziale Innovationen und (Produkt-) Dienstleistungssysteme effizienter nutzen 7.3.5 Anreize zur besseren Marktdurchdringung ressourcenschonender Produkte
4	7.4.4 Erfassung und Recycling ressourcenrelevanter Mengenabfälle optimieren 7.4.8 Sekundärrohstoffe aus anthropogenem Lager gewinnen (Urban Mining)
5	7.4.7 Phosphorrecycling verbessern
6	7.5.1 Quartiere und Bauwerke ressourcenschonend entwickeln, bauen, sanieren und nutzen 7.5.2 Ressourcenschonende Infrastrukturen 7.5.3 Kennzeichnung von Bauprodukten hinsichtlich ihrer Wirkung auf Umwelt, Rohstofffinanzierungsnahme und Gesundheit 7.5.4 Stärkung der Kreislaufführung bei Bauprozessen
7	7.7.3 Ökonomische Instrumente nutzen, Subventionen abbauen, die den Ressourcenverbrauch fördern

Quelle: Eigene Darstellung, GWS auf Basis von BMUB 2016

Vor diesem Hintergrund wurden von uns bereits während der Erarbeitung der Übersicht zu Modellierungsoptionen von ProgRess II-Handlungsansätzen einzelne Handlungsfelder zu Clustern qualitativ ähnlich wirkender Kausaleffekte zusammengefasst. Diese Vorgehensweise reduzierte die Komplexität der Aufgabenstellung in angemessener Weise. Da das SimRess-Projekt zudem nicht darauf abzielte, sämtliche prinzipiell möglich erscheinende Parametrisierungsoptionen umzusetzen, wurde die resultierende Übersicht von den Konsortialpartnern vom Ecologic Institut gemäß ihrer jeweiligen politischen Relevanz priorisiert. Die weiteren Arbeiten zur Parametrisierung ausgewählter Handlungsfelder konzentrierten sich daraufhin auf die als zumindest mittel bis hoch kategorisierten „Handlungsansatzcluster“. Wie Tabelle 39 entnommen werden kann, wurden auf Basis dieser Vorarbeiten letztlich sieben ausgewählte Handlungscluster identifiziert, bei denen eine konkrete Prüfung der Möglichkeiten zur Parametrisierung eines am ProgRess II-Maßnahmenumfang orientierten Politikmixes besonders relevant erscheint.

Im Rahmen des für entsprechende Arbeiten im SimRess-Projekt vorgesehenen Budgets konnten von uns für vier der aufgeführten Handlungscluster vorläufige Parametrisierungen von Politikinstrumenten vorgenommen werden. Eine Übersicht der parametrisierten Politikinstrumente sowie deren Zuordnung zu den oben aufgeführten Handlungsclustern kann Tabelle 40 entnommen werden. Weitergehende Referenzen zu den parametrisierten Beispielen finden sich in Anhang 8.4 dieses Berichts.

Tabelle 40: Explorative Anwendungsbeispiele der SimRess-Politikfolgenabschätzung

Cluster	Parametrisierte Beispiele
1	Substitution fossiler Inputs (Erdöl und Mineralölerzeugnisse) in der chemischen Industrie durch Stärke-, Zucker- und Pflanzenölinputs sowie Rest- und Abfallstoffe der Papierherstellung.
2	Auf Unternehmen folgender Wirtschaftsbereiche fokussiertes Materialeffizienz-Beratungsprogramm: Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden; Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen; Maschinenbau; Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, sonstiger Fahrzeugbau.
3	Nationales Informationsprogramm „nachhaltiger Konsum“, dadurch ausgelöste Verhaltensänderungen der Konsumenten: <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Verdoppelung der Absatzmengen von Recyclingpapier innerhalb von zehn Jahren.</li> <li>b) Langfristige Umstellung der Konsummuster für langlebige Elektrogeräte (auschließlicher Kauf langlebiger Geräte).</li> </ul>
6	Ressourcenschonende Infrastrukturen: Einführung von Bedarfsnachweisen für die Ausweitung von Siedlungs- und Gewerbegebieten in der kommunalen Planung.

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Mit einem Fokus auf Handlungsbereiche der nationalen Ressourcenpolitik wurden in diesen vorläufigen Parametrisierungen grundsätzlich lediglich isolierte regionale Systemveränderungen betrachtet. Auf eine Abschätzung der potenziellen Auswirkungen ambitionierter globaler Transformationsbemühungen wurde somit bewusst verzichtet. Zudem wurden im Hinblick auf die zu erwartenden direkten Effekte generell vorsichtig zurückhaltende Annahmen gewählt. Unter diesen Parametrisierungs-Vorgaben deuteten vorläufige Simulationen lediglich geringe Potenziale zur Reduktionen des Primärrohstoffkonsums (RMC) sowie zu Steigerungen der Gesamtrohstoffproduktivität für die hier ausgewählten Anwendungsbeispiele an. Im Vergleich zur Baseline konnten sowohl für den Rohstoffkonsum als auch für die Gesamtrohstoffproduktivität bis zum Jahr 2050 lediglich Variationen im niedrigen einstelligen Prozentbereich beobachtet werden. Diese Ergebnismuster verdeutlichen die grundsätzliche Notwendigkeit umfassenderer Systemveränderungen zur Erreichung ambitionierter Zielwerte der Ressourcenschonungspolitik. Da damit die zuvor angesprochene Fähigkeit von GINFORS3 zur Exploration von „Was wäre wenn“-Fragestellungen automatisch in den Mittelpunkt der Politikanalysen rückte, wurde von ergänzenden Parametrisierungen gradueller Politikmaßnahmen im weiteren Verlauf des SimRess-Projekts abgesehen.

Es ist daher wichtig festzuhalten, dass zur Evaluation der derzeit unter ProgRess II diskutierten Maßnahmen umfassender Forschungsbedarf verbleibt. Als besonders zielführend erscheinen uns hierzu Forschungsansätze, welche als integrierte Simulationsstudien unter ergänzender Einbindung dynamischer Partialmodelle konzipiert sind.

Da in SimRess eine Einbindung entsprechender Detailmodelle nicht vorgesehen war, konnten von uns nur generelle Abschätzungen zentraler Wirkungszusammenhänge vorgenommen werden. Auch für die ausgewählten Parametrisierungs-Beispiele kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass zukünftige integrierte Simulationsstudien durch ihre Möglichkeiten zur dynamischen Abbildung der von uns in den Simulationen unterstellten Wirkungseffekte, bzw. durch ihre Möglichkeit zur Berücksichtigung komplexerer Rückkopplungseffekte weitergehende Wirkungspotenziale aufzeigen würden.

### 5.3 Simulationsexperimente zu produktionsseitigen Effizienzgewinnen

In den im Folgenden dargestellten Simulationsexperimenten zu produktionsseitigen Effizienzgewinnen wird die vorab im Hinblick auf Handlungsfelder der Ressourcenschonungspolitik angewandte Systemlogik quasi

umgedreht. Es wird nun nicht mehr nach den Wirkungen eines wie auch immer gestalteten Politikmixes gefragt, sondern danach welche Implikationen sich ergeben, wenn eine Systemtransformation hin zu einem ressourcenschonenderen Wirtschaften gelingen würde. Die Frage danach, wie die Politik eine solche Systemtransformation herbeiführen kann bleibt also zunächst außen vor. Auch wenn es nicht Ziel dieses Simulationsexperiments ist, die technische Machbarkeit der simulierten Systemtransformation zu beleuchten, so ist das im Folgenden dokumentierte Untersuchungsdesign sehr wohl intendiert, ambitionierte aber keinesfalls utopische produktionsseitige Effizienzgewinne und deren Wirkungen auf Wirtschaft und Umwelt zu simulieren.

Da uns im Zusammenhang mit den Simulationsexperimenten nicht allgemein eine Transformation hin zu effizienteren Produktionsweisen interessiert, sondern gezielt das Thema Rohstoffeffizienz beleuchtet werden soll, wurden in einem ersten Schritt auf Grundlage detaillierter Auswertungen der Abschätzungen zu den direkten und indirekten globalen Primär-Rohstoffextraktionen im Ressourcenmodul diejenigen Inputkoeffizienten (= monetäres Abbild der Produktionstechnologien in Deutschland) identifiziert, auf die die höchsten Rohstoffanspruchnahmen für die Produktion in Deutschland entfallen.<sup>125</sup> Bei der Zusammenstellung dieser Rangfolge wurden sowohl Inputkoeffizienten auf der Hauptdiagonalen als auch Elemente, die sich auf klimapolitische Systemtransformationen beziehen, nicht berücksichtigt. Eine Liste der so ermittelten 100 für die Primär-Rohstoffanspruchnahme wichtigsten Inputkoeffizienten kann Tabelle 68 im Anhang entnommen werden.

### 5.3.1 Das Untersuchungsdesign

Auf Grundlage der Vorarbeiten zur Identifikation der für die Primär-Rohstoffanspruchnahme wichtigsten Inputkoeffizienten wurde eine Nutzeroberfläche entworfen, die das Durchspielen verschiedener Annahmen zu Dynamik und Umfang der simulierten Systemtransformation erlaubt. In Abbildung 91 findet sich ein Screenshot dieser Nutzeroberfläche dargestellt. Die durch den Nutzer zu definierenden Annahmen und Einstellungen umfassen hierbei vier Themenblöcke:

- (1) Zunächst ist die Anzahl der im Simulationsexperiment variierten Inputkoeffizienten festzulegen.<sup>126</sup> Ein Inputkoeffizient besagt, wieviel Vorleistungen einer spezifischen Kategorie (Gütergruppe) ein Sektor beziehen muss, um eine Einheit seines Produktes produzieren zu können.
- (2) Im zweiten Themenblock wird der Nutzer nach der Stärke des zusätzlichen Effizienzfortschritts (bei den ausgewählten Inputkoeffizienten) gefragt. Hierbei ist zu beachten, dass in GINFORS3 bereits in den Referenzszenarien technischer Fortschritt in Form von dynamischen Entwicklungen der Inputkoeffizienten abgebildet ist. Gefragt ist hier folglich nach dem zusätzlichen Fortschritt der simuliert werden soll.
- (3) Im dritten Themenblock wird danach gefragt, ob das Simulationsexperiment zu produktionsseitigen Ressourceneffizienzgewinnen ausschließlich auf die Produktionsprozesse in Deutschland angewandt werden soll. Hierbei ist darauf zu achten, dass gerade bei produktionsseitigen Innovationen in einer globalisierten Welt der langfristige Alleingang einer Volkswirtschaft wenig plausibel erscheint. Daher kann im Weiteren vorgegeben werden mit welchem zeitlichen Abstand synonyme Systemtransformationen in andere EU-Länder, in andere Industrieländer außerhalb der EU und schließlich in die übrigen Länder und Regionen der Welt diffundieren.

---

<sup>125</sup> Basis für diese Auswertungen waren die Projektionsergebnisse für das Jahr 2020 im klimaaktiven Referenzszenario.

<sup>126</sup> Nach den Auswertungen der Rangfolge der für die Primär-Rohstoffanspruchnahme wichtigsten Inputkoeffizienten weisen 464 der insgesamt 1600 potentiell relevanten Inputkoeffizienten einen Beitrag von größer als 0,01% auf. Auf einen Beitrag von größer als 0,05% kommen demnach 163 Inputkoeffizienten und auf einen Beitrag von größer als 0,1% kommen lediglich 103 Inputkoeffizienten.

Abbildung 91: SimRess-Potenzialanalysen, Annahmen/Einstellungen zur produktionsseitigen Systemtransformation in der Nutzeroberfläche

Beispiel: Einstellungen der moderaten produktionsseitigen Systemtransformation		Calculate and write tweaks for resource efficiency improvements in production based on the choices	
The ... most important industrial uses (input coefficients) should be considered:			50
How strong should the additional resource efficiency improvement be? Please indicate the improvement in % p.a.:			1,5
Do other countries follow up with regard to resource efficiency improvements in German production?			yes
if yes, how fast will the following country groups follow up? Please indicate the delay against Germany in years			
Other EU countries			2
Other industrial countries (USA, Canada, Japan, Korea, Australia)			5
Other less industrialized or emerging countries (Russia, Turkey, Brazil, Mexico, China, India, Rest of World)			10
Which hypothesis on the costs of the resource efficiency improvements (see below) should be considered?			3
Please indicate 1, 2 or 3:			
Hypothesis 1: no additional costs		1	
Hypothesis 2: only consulting costs amounting to the savings of one year		1,5	
Hypothesis 3: consulting costs, research & development costs and costs for additional investment in new fixed assets		2,5	
If Hypothesis 3 on the costs is considered, please indicate the amount of costs that should be considered:			
Consulting costs (in relation to the savings of one year)			
Research & development costs (in relation to the savings of one year)			
Costs for additional investments in new fixed assets (in relation to the savings of one year)			

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

- (4) Der vierte Themenblock widmet sich schließlich den Annahmen zu den Kosten der Systemtransformation. Hier kann der Nutzer vorgeben wie hoch die initial zu tätigen Aufwendungen des Wirtschaftsbereichs für Beratungsleistungen, für Forschung & Entwicklung und für Bruttoanlageinvestitionen sind, um den Effizienzgewinn in der Produktion zu erreichen.

Der letztgenannte Punkt verdient eine explizite weiterführende Anmerkung: In der Vergangenheit wurden von anderen Autorengruppen Abschätzungen zu den makroökonomischen Effekten einer Ressourcenumwende unter völliger Ausblendung entsprechender Kosten vorgenommen. Eine solche Vorgehensweise ist sicherlich grundsätzlich zu kritisieren, da dabei die unterstellten Effizienzsteigerungen wie „manna from heaven“ positive ökonomische Effekte freisetzen. Dieser unangemessenen Extremposition wird in SimRess ein Ansatz gegenübergestellt, welcher den Modellanwendern die (transparent zu dokumentierende) Entscheidung über möglichst realistische Vorgaben zu den Kosten der Systemtransformation überlässt. Selbstverständlich sollten diese Vorgaben so weit wie möglich durch empirische Belege aus diesbezüglichen Feldstudien fundiert sein.

Da sich entsprechende Erfahrungen bspw. der Effizienzagentur NRW wahrscheinlich eher auf die low-hanging fruit beziehen und die Initialkosten einer umfassenderen Systemtransformation somit tendenziell unterschätzen, wurden in unserem Anwendungsbeispiel vergleichsweise hohe Initialkosten angenommen.<sup>127</sup>

In den Ergebnisdarstellungen für die Simulationsexperimente zu den ökonomischen und ökologischen Folgen einer produktionsseitigen Systemtransformation werden 3 Beispiele (moderate Transformation, mittlere Transformation, große Transformation) dokumentiert, deren kennzeichnende Annahmen zu den soeben angesprochenen vier Themenblöcken Tabelle 41 entnommen werden können.

<sup>127</sup> In eigenen Vorgängerstudien zu SimRess wurden auf Grundlage dieses Erfahrungswissens die Initialkosten einer Ressourceneffizienzsteigerung in der Produktion in der Regel mit 100% der erzielten Materialeinsparungen eines Jahres angenommen. Im SimRess-Simulationsexperiment wird angenommen, dass zusätzlich noch Aufwendungen für Forschung und Entwicklung in Höhe von 150% der erzielten Materialeinsparungen eines Jahres und Investitionen in Höhe von 250% der erzielten Materialeinsparungen eines Jahres zu tätigen sind.

Tabelle 41: 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 von potentiell 1600 <sup>128</sup>	75 von potentiell 1600	100 von potentiell 1600
2	Stärke des zusätzlichen Effizienzgewinns	1,5% p.a.	2,0% p.a.	2,5% p.a.
3	Bezieht sich das Simulationsexperiment ausschließlich auf Effizienzgewinne in der deutschen Wirtschaft?  Mit wieviel Verzögerung folgen Produzenten in anderen EU-Ländern?  Mit wieviel Verzögerung folgen Produzenten in außereuropäischen Industrieländern?  Mit wieviel Verzögerung folgen Produzenten in sonstigen Ländern und Regionen?	nein  2 Jahre  5 Jahre  10 Jahre	nein  1 Jahr  3 Jahre  5 Jahre	nein  0 Jahre  0 Jahre  0 Jahre
4	Umfang der initial zu tätigen Aufwendungen (in Relation zur erzielten Ersparnis eines Jahres)  für Beratungsleistungen für Forschung & Entwicklung für Bruttoanlageinvestitionen	1 1,5 2,5	1 1,5 2,5	1 1,5 2,5

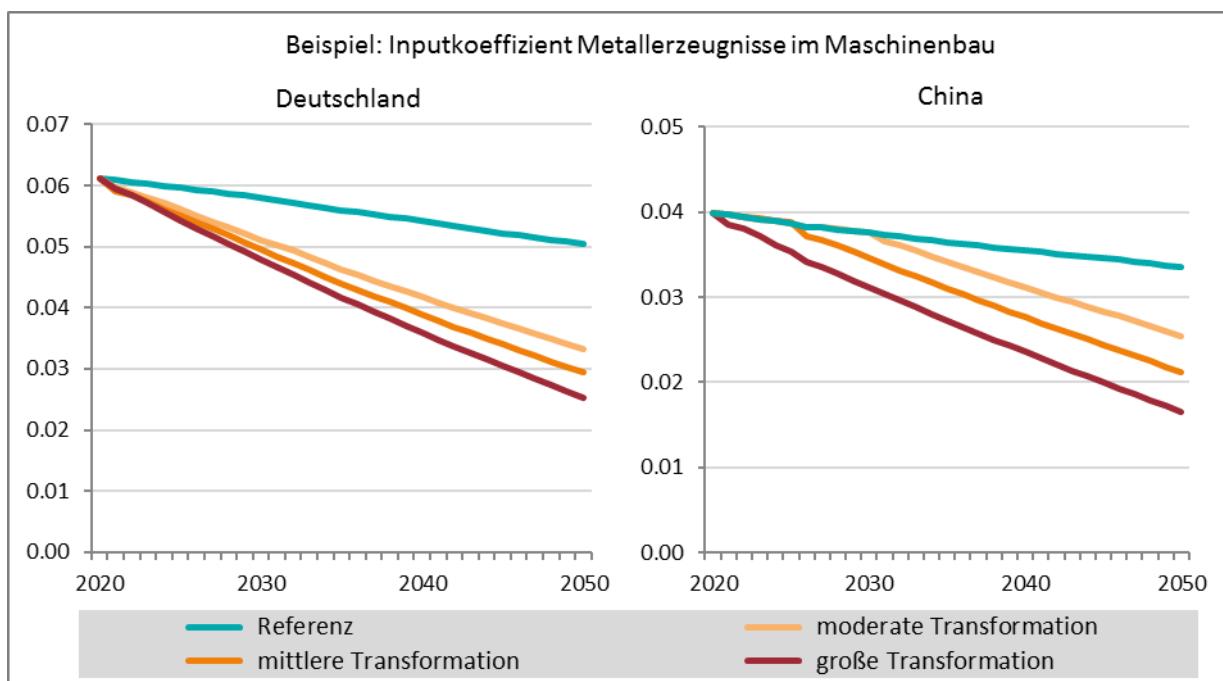
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

An dieser Stelle sei an Ziel und Philosophie des in SimRess durchgeführten Simulationsexperiments erinnert:

- Es soll nicht nach den Effekten eines konkreten Politikinstrumentes gefragt werden, sondern im Sinne eines „Was wäre wenn?“ nach den Implikationen eines, wodurch aus immer ausgelösten, stärkeren produktionsseitigen Ressourceneffizienzfortschritts.
- Wie die Unterteilung in vier Themenblöcke zeigt, bedarf es für eine konsistente und vollständige Abbildung eines solchen Simulationsexperiments einer Reihe von Annahmen. Diese gilt es zunächst transparent zu dokumentieren.
- Im Idealfall lassen sich alle Annahmen eines Simulationsexperiments hinreichend valide durch wissenschaftliche Studien belegen. Ist dies, wie u.a. im SimRess-Beispiel, nicht der Fall, so besagt das Simulationsexperiment nicht welche Effekte aus dem Politikinstrument oder der Systemtransformation resultieren, sondern welche Effekte bei Richtigkeit und Vollständigkeit der Annahmen aus dem Politikinstrument oder der Systemtransformation resultieren.

<sup>128</sup> Vgl. auch Fußnote 121

Abbildung 92: SimRess-Potenzialanalysen, beispielhafte Veranschaulichung von Primärimpulsen

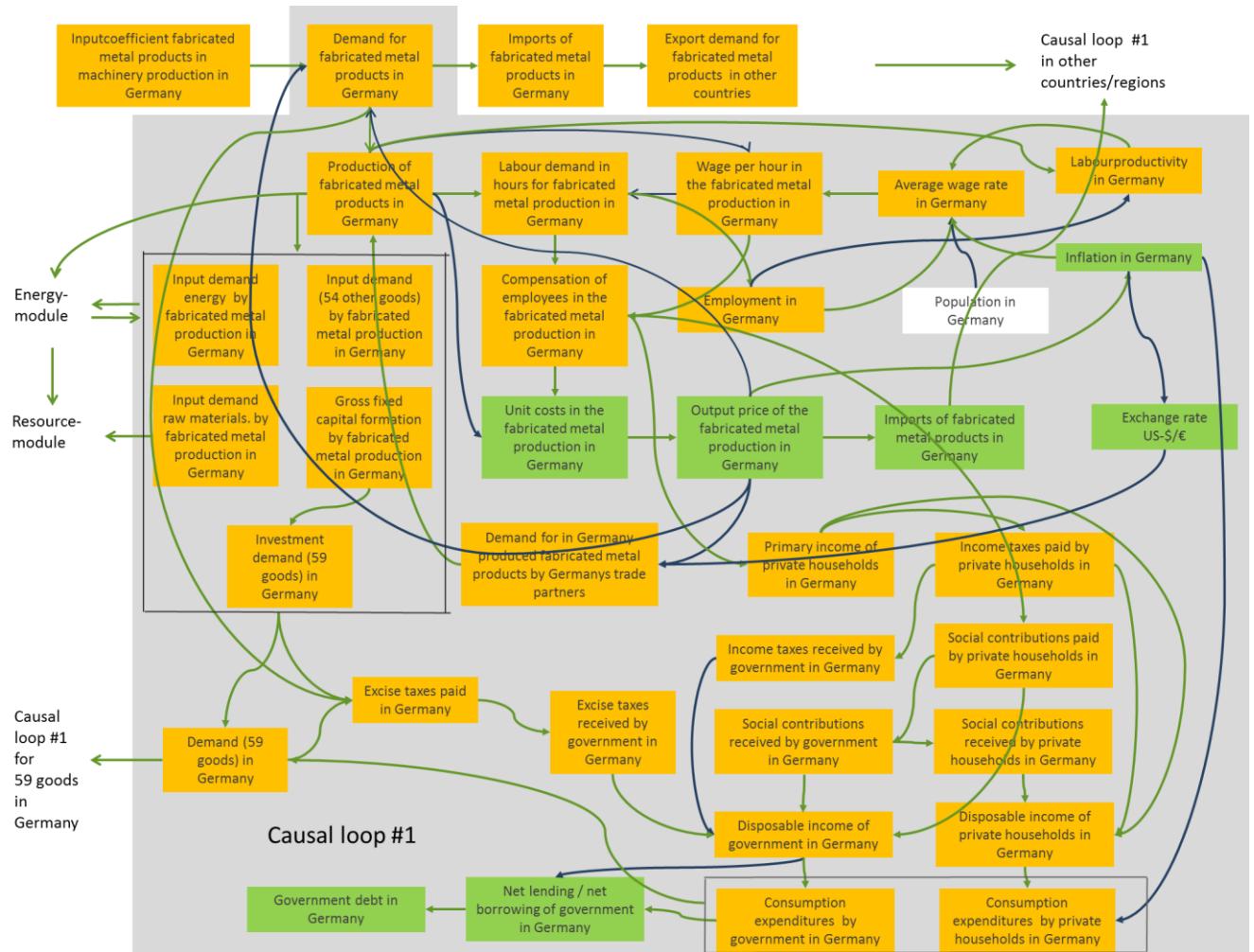


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Doch was bedeuten diese Annahmen und Vorgaben zu den Primärimpulsen einer ressourceneffizienz-orientierten produktionsseitigen Systemtransformation? Dieser Frage wollen wir auf den folgenden Seiten nachgehen. In Abbildung 92 wird zunächst für zwei Beispiele gezeigt, welche Dynamiken sich im Referenzszenario klimaktiv und in den drei Transformationsszenarien für einen der identifizierten wichtigsten Inputkoeffizienten, dem Input von Metallerzeugnissen im Maschinenbau, ergeben. Im linken Diagramm finden sich die projizierten Entwicklungen für Deutschland dargestellt. Es zeigt sich, dass der Inputkoeffizient „Metallerzeugnisse im Maschinenbau“ in Deutschland bereits im Referenzszenario um gut 17% bzw. 0,6% p.a. zurückgeht. Wird nun ein stärkerer technischer Fortschritt unterstellt, so kommt es zu deutlich stärkeren Rückgängen bis 2050, nämlich um 46% bis 59% gegenüber 2020. Das rechte Diagramm der Abbildung zeigt die entsprechenden Entwicklungen für China. Auch dort kommt es bereits in der Referenzprojektion zu einem Rückgang des Inputkoeffizienten. Annahmegemäß finden in China sowohl im moderaten als auch im mittleren Transformationsszenario die produktionsseitigen Effizienzgewinne jedoch erst mit zeitlicher Verzögerung statt. Dies hat zur Folge, dass die im Zeitraum bis 2050 projizierten Rückgänge des Inputkoeffizienten mit 36% bis 59% gegenüber 2020 eine größere Bandbreite als in Deutschland aufweisen.

In Bezug auf die Kostenannahmen ließe sich zudem kritisch anmerken, dass diese nur proportional zu den erzielten Produktivitätsfortschritten steigen. Diesbezüglich gilt es aber zu bedenken, dass es nicht Ziel des Forschungsvorhabens war alle denkbaren Annahmen-Konstellationen durchzuspielen. Vielmehr galt es aufzuzeigen wie auf Grundlage eines transparenten, experimentellen Untersuchungsdesigns ein Ausweg aus einem fundamentalen Dilemma bei der Folgenabschätzung von nicht marktbasierter Politikinstrumenten und/oder von autonomen Verhaltensänderungen der Produzenten oder Konsumenten gefunden werden kann: der Nicht-Existenz von hinreichend wissenschaftlich fundierten Erkenntnissen zur Dimension der direkten Effekte. Umfassendere Anwendungen dieses experimentellen Untersuchungsdesigns wären aus Sicht der Autoren in künftigen Forschungsvorhaben zu begrüßen.

Abbildung 93: SimRess-Potenzialanalysen, Ausgelöste Kausalitäten #1

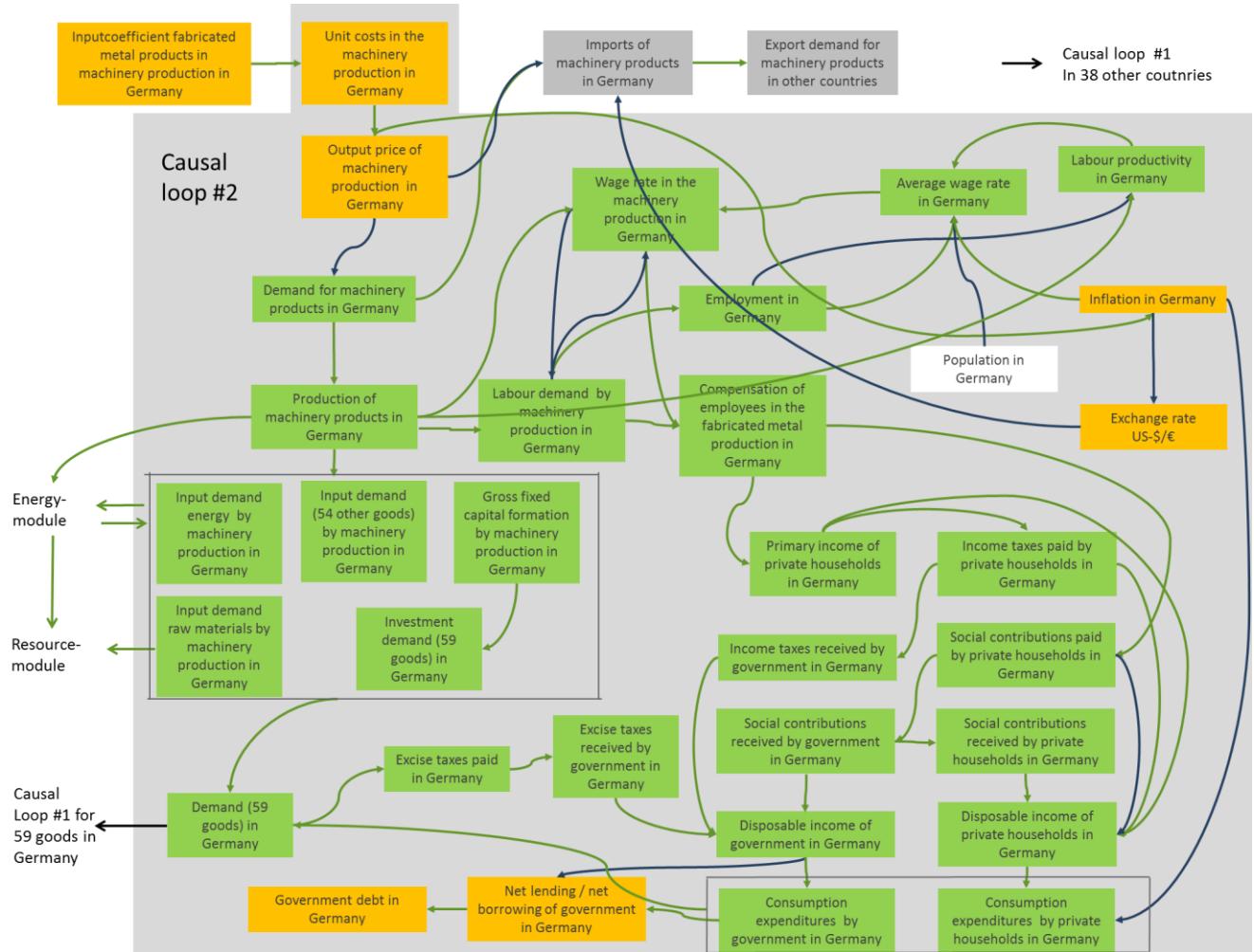


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Bereits in Kapitel 2.3 und dort insbesondere in Abbildung 19 wurde versucht, die komplexe Systemdynamik des Modells GINFORS3 darzustellen. In Ergänzung hierzu versuchen nun Abbildung 93 und Abbildung 94 wesentliche, durch die Primärimpulse der Simulationsexperimente ausgelöste Reaktionen im sozio-ökonomischen System zu visualisieren. Grundlage für diese Visualisierungen ist wiederum das Beispiel eines (zusätzlichen) Effizienzgewinns im Hinblick auf den Einsatz von Metallerzeugnissen im Maschinenbau. Abbildung 93 geht in diesem Zusammenhang zunächst der Frage nach, welche Implikationen der hiermit verbundene Rückgang der Nachfrage nach Metallerzeugnissen auslöst. In der Abbildung sind Beobachtungen, die tendenziell negativ betroffen sind orange dargestellt. Beobachtungen für die aufgrund des analysierten Primärimpulses tendenziell mit einer Zunahme zu rechnen ist finden sich grün dargestellt. Grüne Pfeile zwischen den Beobachtungen/Variablen weisen auf einen positiven Zusammenhang und blaue Pfeile auf einen negativen Zusammenhang hin.

Es zeigt sich, dass der ursprüngliche Impuls über den Wirtschaftskreislauf sehr umfassende Wirkungen entfaltet. Hierbei zeigen sich eine ganze Reihe von nachfrageseitigen Folgen, die den Primärimpuls verstärken aber auch einige Kausalketten (beispielsweise über den Arbeitsmarkt), die den Primärimpuls auf die Wirtschaftsdynamik wieder abschwächen.

Abbildung 94: SimRess-Potenzialanalysen, Ausgelöste Kausalitäten #2



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Aber der Primärimpuls auf die reduzierte (Vorleistungs-) Nachfrage ist auch nur eine Seite der Medaille. Gleichzeitig führt der Primärimpuls auch zu weitreichenden Konsequenzen, die sich aus der gesteigerten Produktivität, in unserem Beispiel derjenigen des Maschinenbaus, ergeben (vgl. Abbildung 94). Zunächst führt dies zu einer Reduktion der Stückkosten im Maschinenbau. In der Abbildung dargestellt finden sich diejenigen Wirkungsketten, die sich ergeben, wenn diese verminderten Stückkosten über eine Preisreduktion weitergegeben werden. Auf eine Darstellung der Implikationen für den Fall, dass dies nicht geschieht (oder nicht vollständig geschieht) wird an dieser Stelle verzichtet. Aber auch hier geht im in den Simulationsexperimenten mit dem Modell GINFORS3 „nichts verloren“.<sup>129</sup> Letztlich sei einschränkend zu den beiden nachstehenden Causal-loop-Darstellungen angemerkt, dass diese keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben.

<sup>129</sup> Werden Reduktionen der Stückkosten aufgrund von erzielten Effizienzsteigerungen nicht via Preisreduktionen an die Nachfrager weitergegeben, so führt dies zunächst zu einer Erhöhung der Gewinne (des Maschinenbaus). Da in GINFORS großen Wert auf die Geschlossenheit des Analysedesigns gelegt wird, kommt es letztlich über die Implikationen im Kontensystem der VGR zu einer Erhöhung der verfügbaren Einkommen der privaten Haushalte und damit zu einem Impuls auf die Konsumnachfrage.

### 5.3.2 Ergebnisse - Die Implikationen für Wirtschaft und Umwelt

Die Analyse der durch die produktionsseitigen Effizienzgewinne ausgelösten Wirkungen auf Wirtschaft und Umwelt wollen wir wiederum zunächst aus der globalen Perspektive beginnen. Wie im vorhergehenden Abschnitt dargelegt, umfassen die in den Simulationsexperimenten vorgegebenen Primärimpulse sowohl Elemente, die den Wirtschaftskreislauf anregen als auch solche, die eher dämpfenden Charakter haben. Vor diesem Hintergrund stellt sich zunächst die Frage nach den Wirkungen auf die globale Wirtschaftsleistung. Abbildung 91 zeigt im linken Diagramm, dass teils mit einem deutlichen Anstieg der globalen Wirtschaftsleistung von bis zu 5,5% mehr als in der Referenz zu rechnen ist. Interessant erscheinen aber die dargestellten zeitlichen Verläufe der Wirkungen auf das globale Bruttoinlandsprodukt. 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 den Umbau notwendige Forschungs- und Investitionsbedarf zu Buche. Im weiteren Verlauf ist dann eine Phase zu beobachten in der der Wachstumsimpuls stagniert oder sogar leicht abnimmt bevor zum Ende wieder zunehmende Beiträge zum globalen Wirtschaftswachstum simuliert werden.

Ökonomisch kann dieses dynamische Muster der Simulationsergebnisse in erster Linie auf die in der Modellierung berücksichtigten Wirkungen der Investitionen zurückgeführt werden. Zu Beginn des Simulationszeitraums entfalten diese eine eindeutig expansive ökonomische Wirkung, da die im Vergleich zur Referenz zusätzlich notwendigen Investitionen gesamtwirtschaftliche Multiplikatoreffekte freisetzen. Die zu Beginn des Simulationszeitraums erfolgenden zusätzlichen Investitionen lassen allerdings *ceteris paribus* auch die Fixkosten der Produzenten (aufgrund zusätzlicher kalkulatorischer Abschreibungskosten) ansteigen. Mittelfristig werden diese Kostensteigerungen durch die zusätzlichen Materialeinsparungen vollständig kompensiert, weshalb zum Ende des Simulationszeitraums im Vergleich zur Referenz auch eine schwächere Preisdynamik beobachtet werden kann. Diese Abschwächung der Preisdynamik befördert wiederum die Nachfrage, weshalb zum Ende der Simulationsperiode ein weiterer Anstieg des Bruttoinlandsprodukts beobachtet werden kann.

Neben dem Blick auf das Wirtschaftswachstum erscheint es auch besonders interessant, ob eine Transformation hin zu mehr (produktionsseitiger) Ressourceneffizienz möglicherweise negative Implikationen auf die globale Gerechtigkeit hat. Um einen (sicher nicht umfassenden) Beitrag zu dieser Frage zu geben, wurde im rechten Diagramm der Abbildung danach gefragt, wie sich das durchschnittliche Bruttoinlandsprodukt pro Kopf in den ärmsten Ländern (Indien und die Region „Rest der Welt“) im Verhältnis zu demjenigen in den reichsten Ländern<sup>130</sup> entwickelt. Es zeigt sich, dass es infolge der Systemtransformation zunächst zu negativen Implikationen auf die globale Gerechtigkeit kommt. Das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf in den ärmsten Ländern ist weniger stark positiv tangiert als dasjenige in den reichsten Ländern.

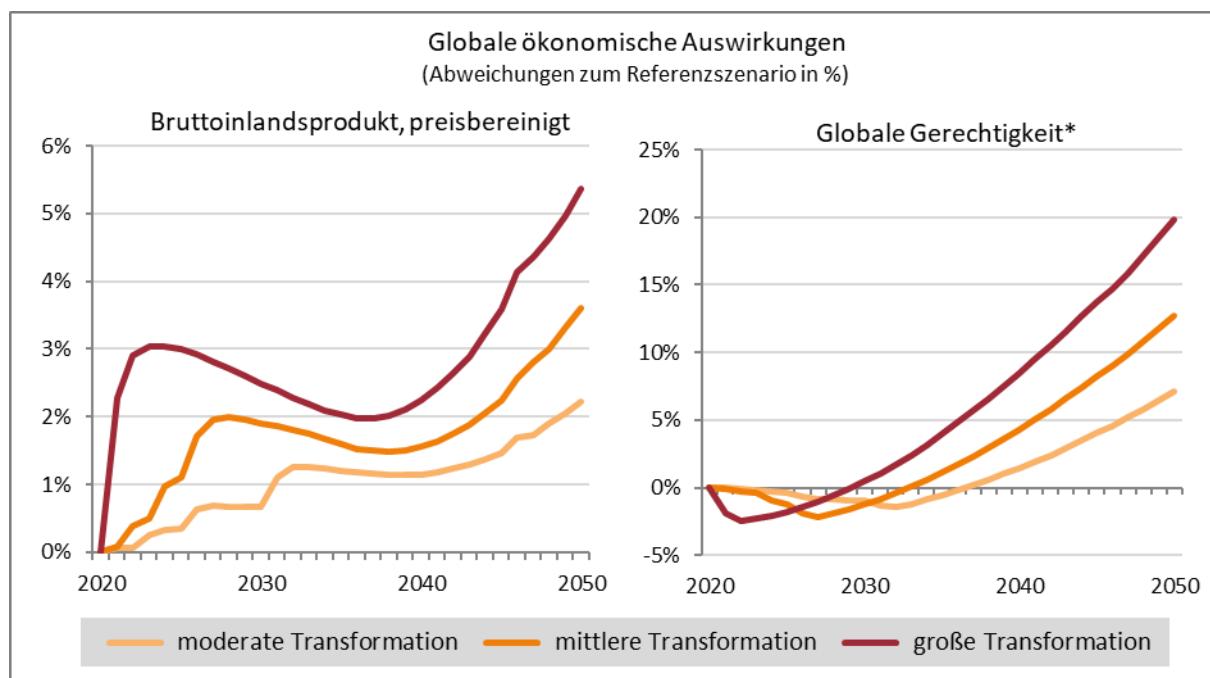
Im weiteren Verlauf kommt es jedoch zu einer Umkehrung dieser Verhältnisse, so dass in der mittleren bis langen Frist mit teils erheblichen Beiträgen zu einer gerechteren Weltwirtschaft in Folge der Systemtransformation gerechnet wird.

Eine sicher nicht vollständige Interpretation der für dieses Simulationsergebnis verantwortlich zeichnenden Wirkmechanismen lautet: Zunächst profitieren in erster Linie weite Bereich des Verarbeitenden Gewerbes, die vornehmlich in den reichsten Ländern zu verorten sind, von der Systemtransformation. Im weiteren Verlauf machen sich aber mehr und mehr auch die ausgelösten Preisimpulse bemerkbar. So sinkt beispielsweise der Weltmarktpreis für Nahrungspflanzen um 10 bis 20%, wovon wiederum ärmere Länder stärker profitieren als die reichsten Länder.

---

<sup>130</sup> EU27, Kanada, USA, Japan, Südkorea und Australien.

Abbildung 95: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die weltwirtschaftliche Entwicklung



\* Als Indikator für globale Gerechtigkeit wird das Verhältnis aus durchschnittlichem BIP pro Kopf (gemessen in konstanten 2010 US-\$) in Indien und der Region „Rest der Welt“ und demjenigen in den Industrieländern ausgewiesen.

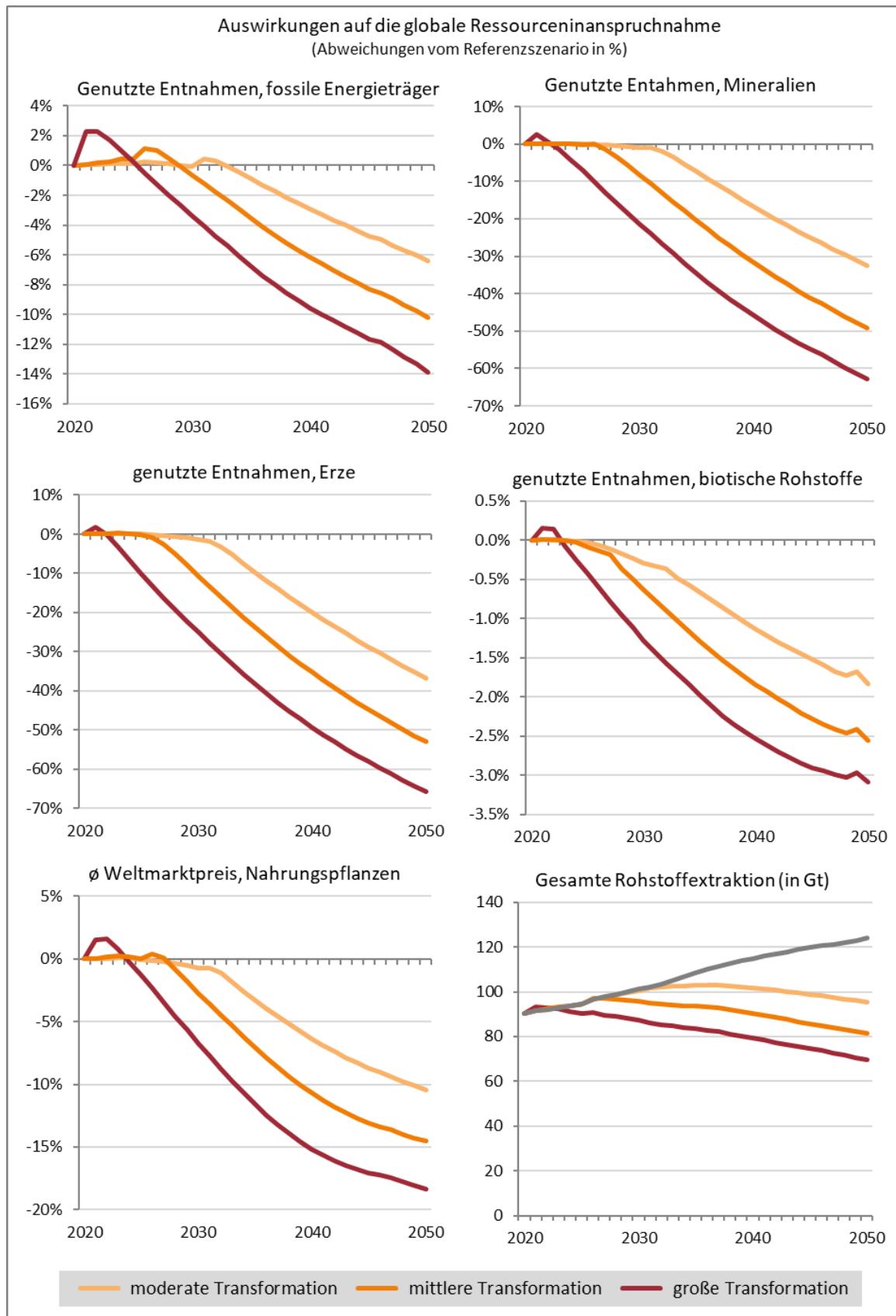
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Primäres Ziel einer Systemtransformation hin zu einem effizienteren Umgang mit Primär-Rohstoffen ist es aber natürlich nicht die wirtschaftliche Dynamik zu beflügeln. Daher gilt unser nächster Blick den Wirkungen der Simulationsexperimente auf die globale Ressourceninanspruchnahme. Abbildung 96 zeigt die diesbezüglich zunächst die Wirkungen auf die globalen Extraktionen von fossilen Energieträgern, Mineralien, Erzen und Biomasse. Besonders deutlich (mit minus 30% bis zu mehr als minus 60%) fallen diese Wirkungen im Bereich der Mineralien und Erze aus.<sup>131</sup> Im Hinblick auf die Wirkungen auf die globale Extraktion von fossilen Energieträgern ist jedoch zu bedenken, dass Inputkoeffizienten, die sich direkt auf den intermediären Einsatz von Kohle, Öl, Gas, Mineralölerzeugnissen oder Strom und Wärme beziehen im Simulationsexperiment ausgeschlossen wurden, da deren Reduktion bereits Gegenstand des klimaaktiven Referenzszenarios sind. Vor diesem Hintergrund zeigen die simulierten Wirkungen auf die globale Extraktion von fossilen Energieträgern, dass eine Ressourceneffizienztransformation allein durch den Minderbedarf von fossilen Energieträgern für die Verarbeitung anderer Rohstoffe (z.B. in der Stahl- oder Zementindustrie) einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten würde, worauf auch in Abbildung 93 noch näher eingegangen wird.

Nur sehr geringe Reduktionen der Rohstoffextraktionen werden hingegen für die biotischen Rohstoffe simuliert. Hintergrund für diesen Befund ist, dass hier vor dem Hintergrund einer steigenden Weltbevölkerung sehr ausgeprägte Rebound-Effekte zum Tragen kommen. Die durch Effizienzgewinne ausgelöste Minder nachfrage nach Biomasse durch die Industrie führt zu Preiseffekten für Nahrungspflanzen (siehe linkes unteres Diagramm in der Abbildung), die wiederum zu einer Mehrnachfrage durch die Verbraucher führen.

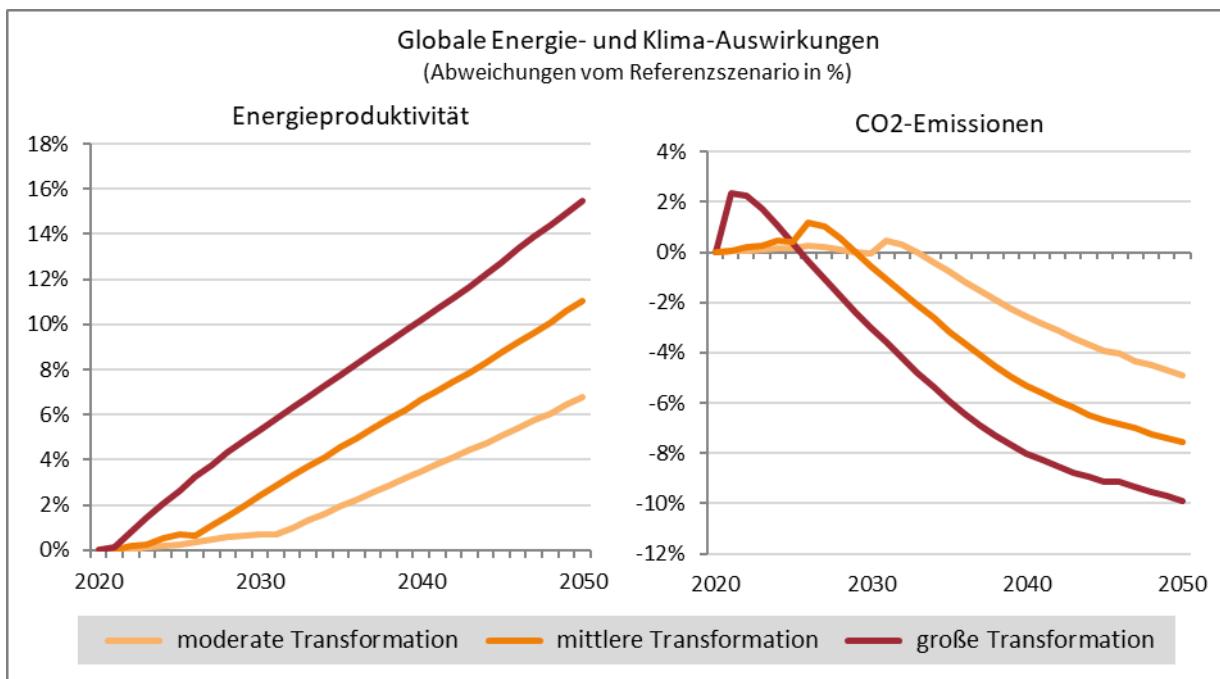
<sup>131</sup> Insbesondere die Ergebnisse für die Auswirkungen auf die globalen Extraktionen von Mineralien und Erze verdeutlichen zudem, dass Alleingänge Deutschlands oder gar der EU kaum Wirkungen auf die globalen Extraktionen entfalten können. Erst mit einer weitgehenden Diffusion der Effizienzfortschritte setzen sich deutliche Reduktionen der Extraktionen im globalen Maßstab durch.

Abbildung 96: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die globale Ressourceninanspruchnahme



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Abbildung 97: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die globale Energieproduktivität und die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen



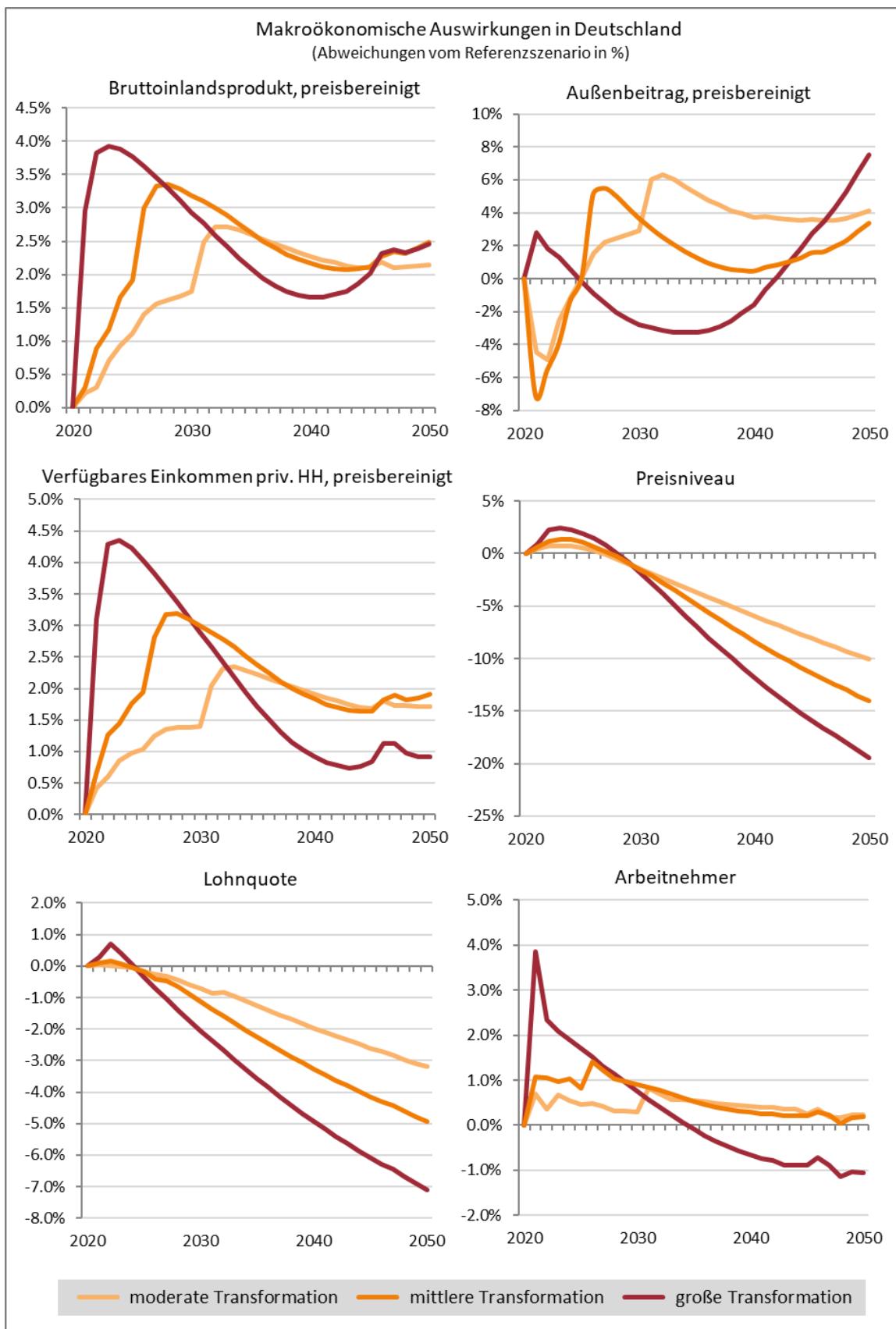
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Da es im Hinblick auf die globalen Rohstoffextraktionen nicht nur um relative Veränderungen (zum Referenzszenario), sondern auch die Frage zu klären ist, inwiefern eine absolute Reduktion gelingt, finden sich im rechten unteren Diagramm die Simulationsergebnisse für die gesamte globale Rohstoffextraktion in Gigatonnen in den drei Simulationsexperimenten sowie in dem klimaaktiven Referenzszenario (graue Linie) dargestellt. Es zeigt sich, dass beim Simulationsexperiment „moderate Transformation“ erst ab etwa Mitte der 30iger Jahre mit einer absoluten Reduktion der globalen Rohstoffextraktionen gerechnet wird. Aber selbst bei der „großen Transformation“ werden selbst im Jahr 2050 global mit knapp 70 Gigatonnen immer noch mehr Rohstoffe extrahiert als zu Beginn des Jahrtausends (52 Gigatonnen).

Unsere letzte Analyse im Hinblick auf die globalen Auswirkungen der Simulationsexperimente gilt der Energieproduktivität und den CO<sub>2</sub>-Emissionen (siehe Abbildung 97). Wie bereits im Hinblick auf die Wirkungen auf die globalen Extraktionen von fossilen Energieträgern thematisiert, entfaltet die gesteigerte produktionsseitige Ressourceneffizienz über die indirekten Kanäle sowohl einen deutlichen Beitrag sowohl zur Steigerung der Energieproduktivität (+7% bis +16% im Jahr 2050) als auch zur Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen (-5% bis -10% im Jahr 2050).

Doch welche Wirkungen auf Ökonomie und Ökologie sind für Deutschland infolge einer produktionsseitigen Systemtransformation zu erwarten? Abbildung 98 beleuchtet diese Frage zunächst aus makroökonomischer Perspektive. Das linke obere Diagramm in der Abbildung zeigt, dass auch für Deutschland mit einem positiven Impuls auf die Wirtschaftsleistung gerechnet wird. Anders als aus globaler Perspektive kommt es in Deutschland hingegen zum Ende des Simulationszeitraums nicht zu einem sich weiter steigernden Impuls. Interessant erscheinen auch die Implikationen auf den deutschen Außenbeitrag. Nimmt die deutsche Wirtschaft eine Vorreiterrolle ein, wie dies sowohl im Simulationsexperiment „moderate Transformation“ als auch im Simulationsexperiment „mittlere Transformation“ der Fall ist, so „bezahlt“ sie dies zunächst durch negative Wirkungen auf den Außenbeitrag. Im weiteren Verlauf kommt es dann aber zu einem Wiedererstarken der Position der deutschen Exporteure auf den Weltmärkten.

Abbildung 98: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf makroökonomische Indikatoren Deutschlands



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Deutliche andere Wirkungen auf den deutschen Außenbeitrag ergeben sich beim Simulationsexperiment „große Transformation“, in dem angenommen wird, dass sich die Effizienzgewinne auf der ganzen Welt gleichzeitig realisieren lassen. Hier ist die Wirkung auf den deutschen Außenbeitrag ganz wesentlich determiniert durch die weltwirtschaftliche Entwicklung.

Im linken mittleren Diagramm der Abbildung sind die Wirkungen auf das Verfügbare Einkommen der privaten Haushalte dargestellt. Hier zeigen sich deutliche Parallelen zu den Wirkungen auf das Bruttoinlandsprodukt. Das rechte mittlere Diagramm widmet sich der Frage nach den Implikationen auf das Preisniveau in Deutschland. Es zeigt sich, dass die durch die Effizienzgewinne ausgelösten Impulse auf die Stückkosten eine deutlich dämpfende Wirkung auf die Preisentwicklung entfalten.<sup>132</sup>

Bereits bei den globalen Wirkungen haben wir versucht, eine Indikation auf die Frage nach Implikationen auf Verteilungsaspekte aus den Simulationsergebnissen abzuleiten. Dies wollen wir auch für die nationale Perspektive tun, indem nach den Wirkungen auf die gesamtwirtschaftliche Lohnquote gefragt wird (vgl. linkes unteres Diagramm in Abbildung 98). Es zeigt sich, dass in allen drei Simulationsexperimenten die Arbeitnehmer weniger stark von der Transformation profitieren als die Unternehmen und Selbständigen. Auch sind die Wirkungen auf die Anzahl der Arbeitnehmer deutlich geringer als diejenigen auf die Wirtschaftsleistung. Im Simulationsexperiment „große Transformation“ kommt es ab Mitte der 30iger Jahre sogar zu einem negativen Beschäftigungsimpuls.<sup>133</sup>

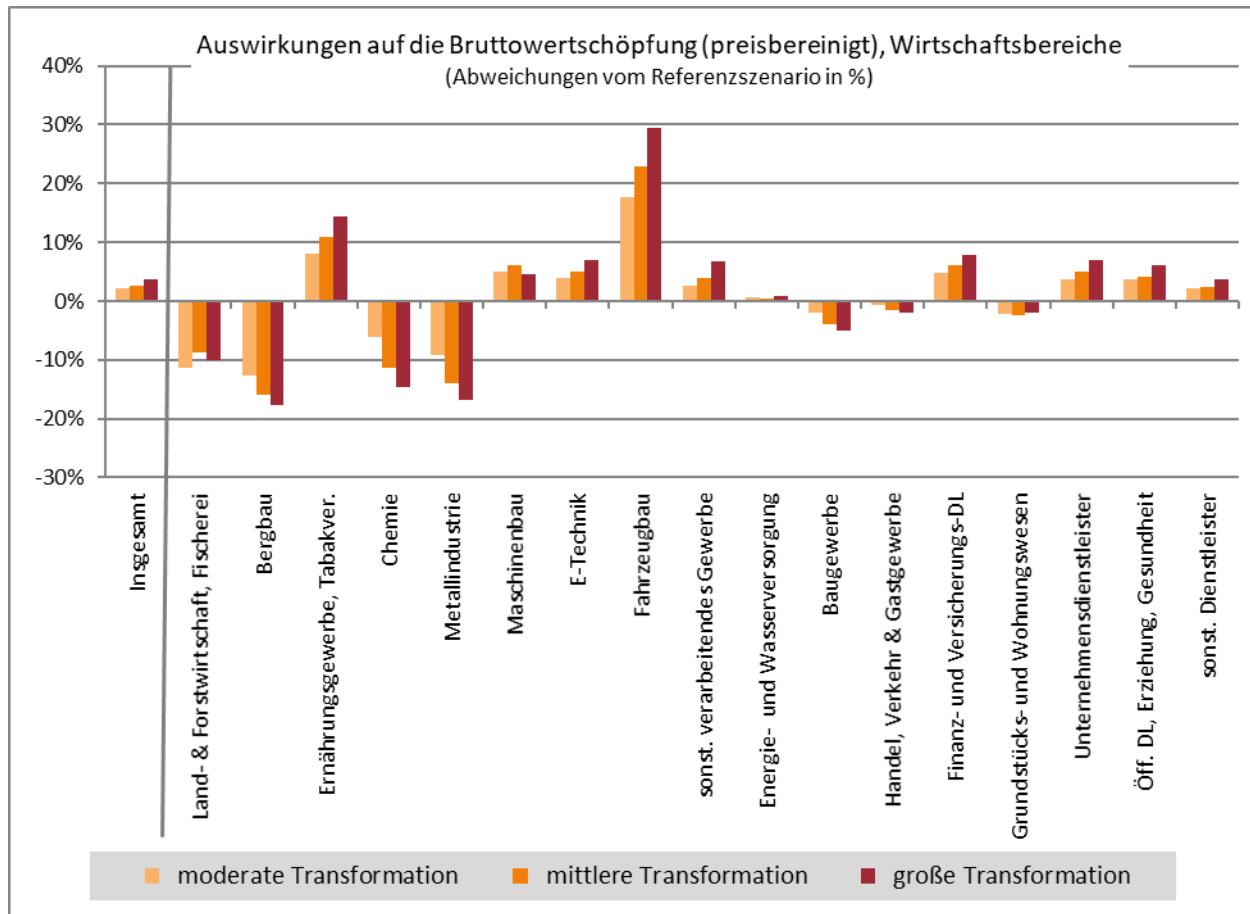
Im Hinblick auf die Wirkungen der Simulationsexperimente interessiert aber nicht nur die Frage nach Implikationen auf die gesamte Wirtschaft in Deutschland, sondern auch inwiefern die verschiedenen Branchen von der Systemtransformation tangiert werden. Diesbezüglich gilt unser erster Blick (siehe Abbildung 99) den Wirkungen auf die Bruttowertschöpfung (preisbereinigt). Es zeigt sich, dass diese insgesamt über alle Wirtschaftsbereiche zwar in allen drei Simulationsexperimenten positiv beeinflusst wird (+2,2% bis +3,6%), aber deutliche Unterschiede zwischen den Branchen zutage treten. Verluste gegenüber den Ergebnissen des Referenzszenarios im Jahr 2050 sind demnach insbesondere für die Grundstoffindustrien Bergbau, Chemie und Metall sowie für die Land- und Forstwirtschaft zu erwarten. Für diese Branchen macht sich der negative Impuls aus den Nachfragerückgängen (als Vorleistungslieferanten von rohstoff-basierten Gütern) stärker bemerkbar als die positiven Impulse aus den Effizienzgewinnen und der höheren gesamtwirtschaftlichen Wachstumsdynamik. Die höchste negative Wirkung wird mit -18% für den Bergbau im Simulationsexperiment „große Transformation“ erwartet. Besonders deutlich profitieren von einer Systemtransformation würden hingegen der Fahrzeugbau (+18% bis +30%) und das Ernährungsgewerbe (+8% bis +14%), also zwei Sektoren, die auf der einen Seite nicht oder kaum als Lieferanten von Vorleistungsprodukten betroffen, auf der anderen Seite aber erhebliche Effizienzgewinne realisieren können.

---

<sup>132</sup> Im Jahr 2015 entfielen auf die als für die Rohstofffinanzspruchnahme 100 wichtigsten Inputkoeffizienten gut 21% aller intermedien Inputs in der deutschen Wirtschaft. Im Referenzszenario wird projiziert, dass dieser Anteil bis zum Jahr 2050 nahezu konstant bleiben wird. Im Simulationsexperiment „große Transformation“ reduziert sich dieser Anteil hingegen auf etwa 11%. In der Folge sinkt die gesamtwirtschaftliche Vorleistungsquote um mehr als 5 Prozentpunkte auf unter 43%. Die Unternehmen reagieren auf die Stück-Kostendegression mit Preis-Anpassungen nach unten und es wird eine negative Preis-Lohnspirale in Gang gesetzt.

<sup>133</sup> Insgesamt kommt es in Folge der dämpfenden Wirkungen auf die Preisentwicklung auch zu einer Reduktion der Durchschnitts-Löhne. In denjenigen Wirtschaftsbereichen, die die Produktivitätsfortschritte erzielen, wollen die Arbeitnehmer aber auch an diesen Fortschritten partizipieren und die Lohnanpassungen nach unten fallen in diesen Branchen moderater aus. Die Arbeitgeber wiederum reagieren auf die damit verbundene relative Verteuerung des Faktors Arbeit mit einer reduzierten Arbeitsnachfrage.

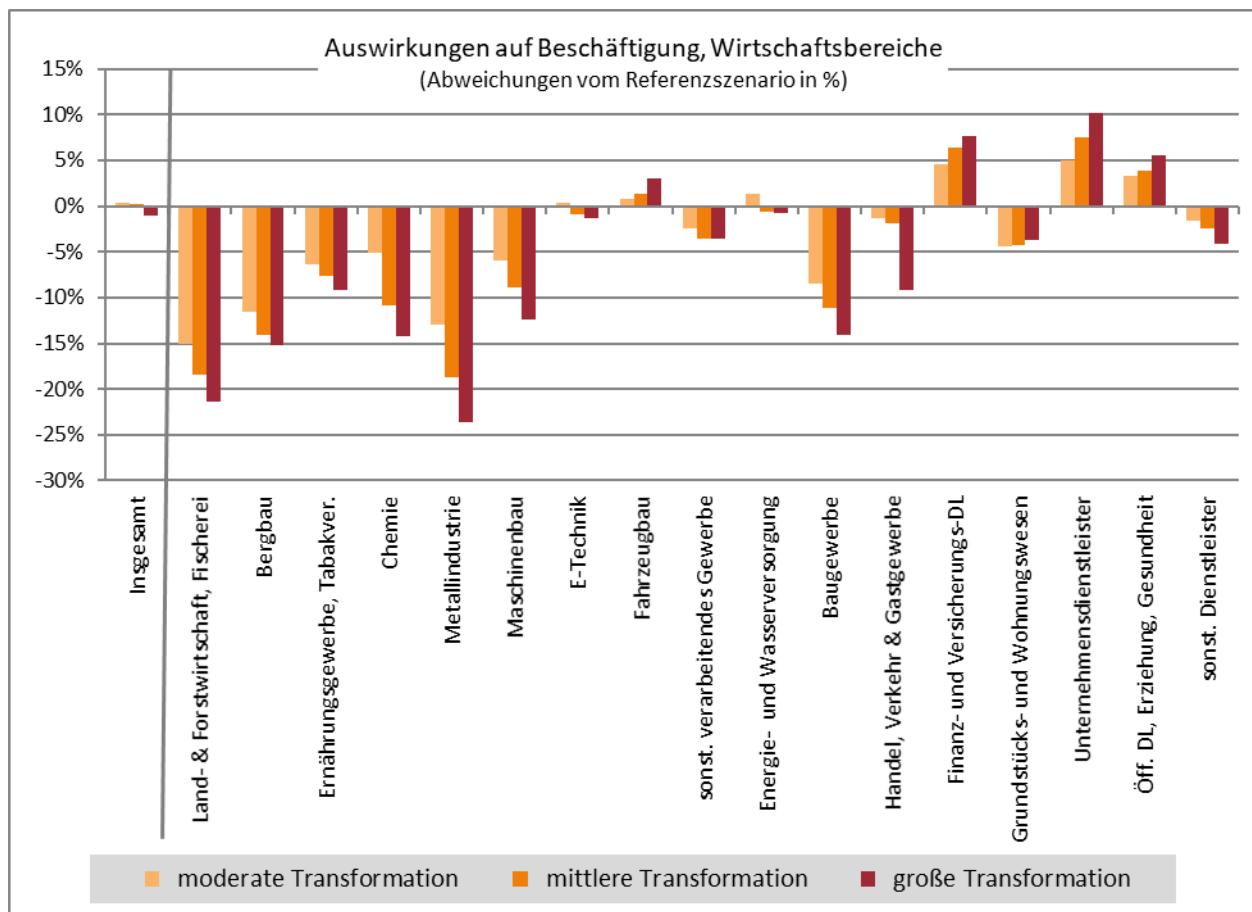
Abbildung 99: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Ein nochmals anderes Bild ergibt sich im Hinblick auf die sektoralen Beschäftigungswirkungen. Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive erweisen sich die Simulationsexperimente als weitgehend beschäftigungsneutral (-1,0% bis +0,3% im Jahr 2050). Auf sektoraler Ebene erweist sich der Fahrzeugbau als einzige Branche des verarbeitenden Gewerbes für die ein positiver Beschäftigungsimpuls erwartet wird (+0,7% bis 3%). So wohl für die Land- und Forstwirtschaft, das Baugewerbe als auch für alle übrigen Bereiche des verarbeitenden Gewerbes werden hingegen Beschäftigungsverluste gegenüber den Ergebnissen des Referenzszenarios simuliert. Beim Simulationsexperiment „moderate Transformation“ fällt dieser relative Beschäftigungsverlust mit -15% am höchsten in der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei aus. Bei der „großen Transformation“ zeigt sich die Beschäftigung in der Metallindustrie (-24%) am Deutlichsten negativ tangiert. Diesen relativen Beschäftigungsverlusten stehen jedoch relative Beschäftigungsgewinne bei den Unternehmensdienstleistern (+5% bis +10%), bei den Finanz- und Versicherungsdienstleistern (+5% bis +8%) und im Bereich öffentliche Dienstleistungen, Erziehung und Gesundheit (+3% bis +6%) gegenüber.

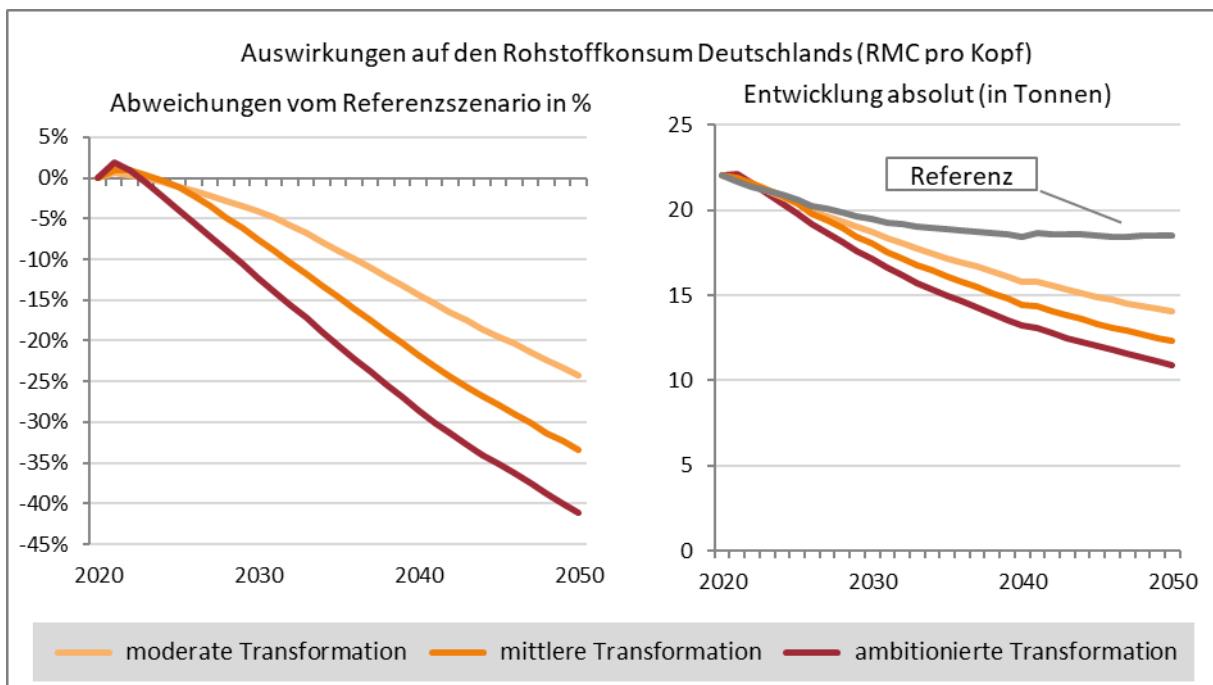
Abbildung 100: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf die Beschäftigung nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Zum Abschluss unserer Analysen zu den Simulationsexperimenten wollen wir uns den Wirkungen auf Umweltindikatoren für Deutschland widmen. Abbildung 101 zeigt die Implikationen einer produktionsseitigen Transformation auf den Rohstoffkonsum (RMC pro Kopf) Deutschlands. Die Auswertung zeigt, dass unter Berücksichtigung aller direkten, indirekten und Rebound-Effekte, Einsparungen in einer Größenordnung von 25% (moderate Transformation) bis 40% (große Transformation) simuliert werden. Das rechte Diagramm in der Abbildung verdeutlicht, dass dies in Absolut-Werten dargestellt einer Reduktion des deutschen RMC pro Kopf auf 11 bis 14 Tonnen im Jahr 2050 entspricht. Damit kommen die Simulationsexperimente zu dem Ergebnis, dass Deutschlands RMC pro Kopf sich selbst bei einer großen produktionsseitigen Systemtransformation nicht der in ressourcenpolitischen Diskussionen häufig genannte langfristige Zielkorridor von 5-8 Tonnen pro Kopf erreichen lässt.

Abbildung 101: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Rohstoffkonsum

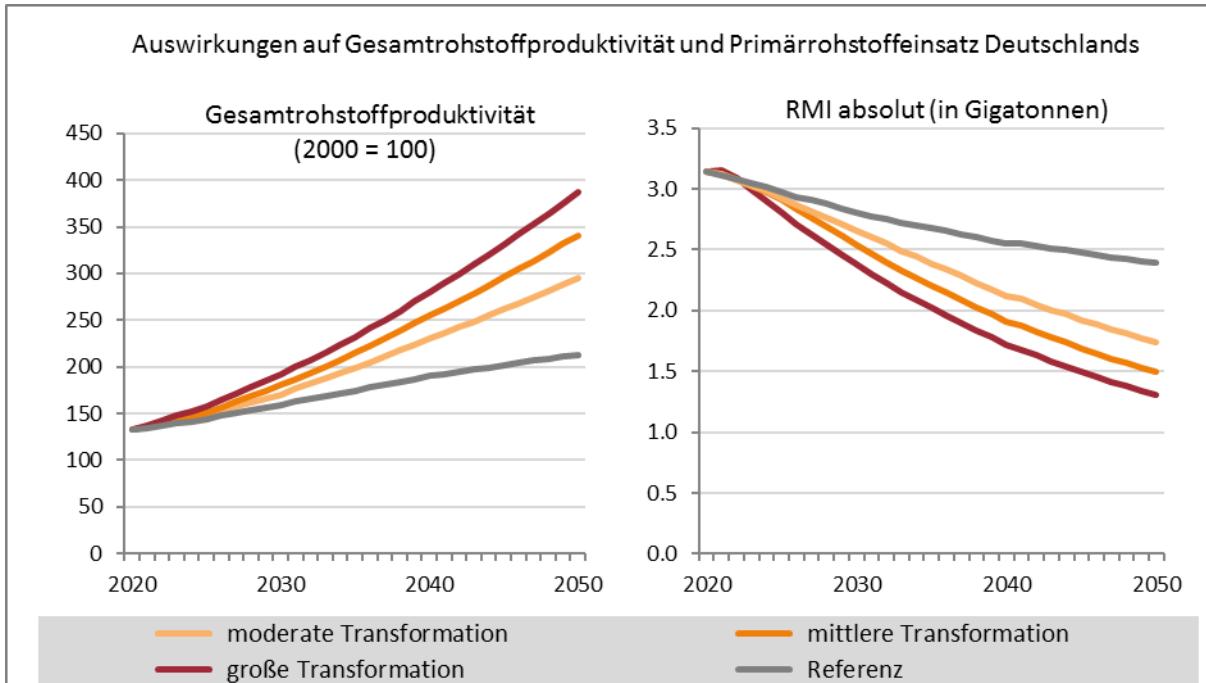


Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse bleibt aber auch zu bedenken, dass in den Simulationsexperimenten ein deutlich höherer Anteil des RMC auf den Konsum von biotischen Rohstoffen entfällt als dies im Referenzszenario der Fall ist. Während in der Referenz im Jahr 2050 auf Biomasse 29% des gesamten RMC Deutschlands entfallen, so erhöht sich dieser Anteil in den Simulationsexperimenten deutlich auf 36% (moderate Transformation) bis 44% (große Transformation). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass der Konsum von abiotischen Rohstoffen in den Simulationsexperimenten von heute 17,3 Tonnen pro Kopf deutlich zurückgeht (auf 8,9 Tonnen pro Kopf in der „moderaten Transformation, 7,4 Tonnen pro Kopf in der „mittleren Transformation“ und 6,1 Tonnen pro Kopf in „großen Transformation“).

Abbildung 102 zeigt die Implikationen auf die Gesamtrohstoffproduktivität und den Primärrohstoffeinsatz (RMI) Deutschlands. Während in der Referenz ein durchschnittlicher jährlicher Gesamtrohstoffproduktivitätsfortschritt von 1,6% p.a. projiziert wird, erhöhen sich diese Fortschrittsraten in den Simulationsexperimenten auf 2,6% p.a. (moderate Transformation) bis 3,4% p.a. (große Transformation). Damit würde sich der Primärrohstoffeinsatz (RMI) Deutschlands bis 2050 auf 1,3 Gigatonnen (große Transformation) bis 1,7 Gigatonnen (moderate Transformation) reduzieren.

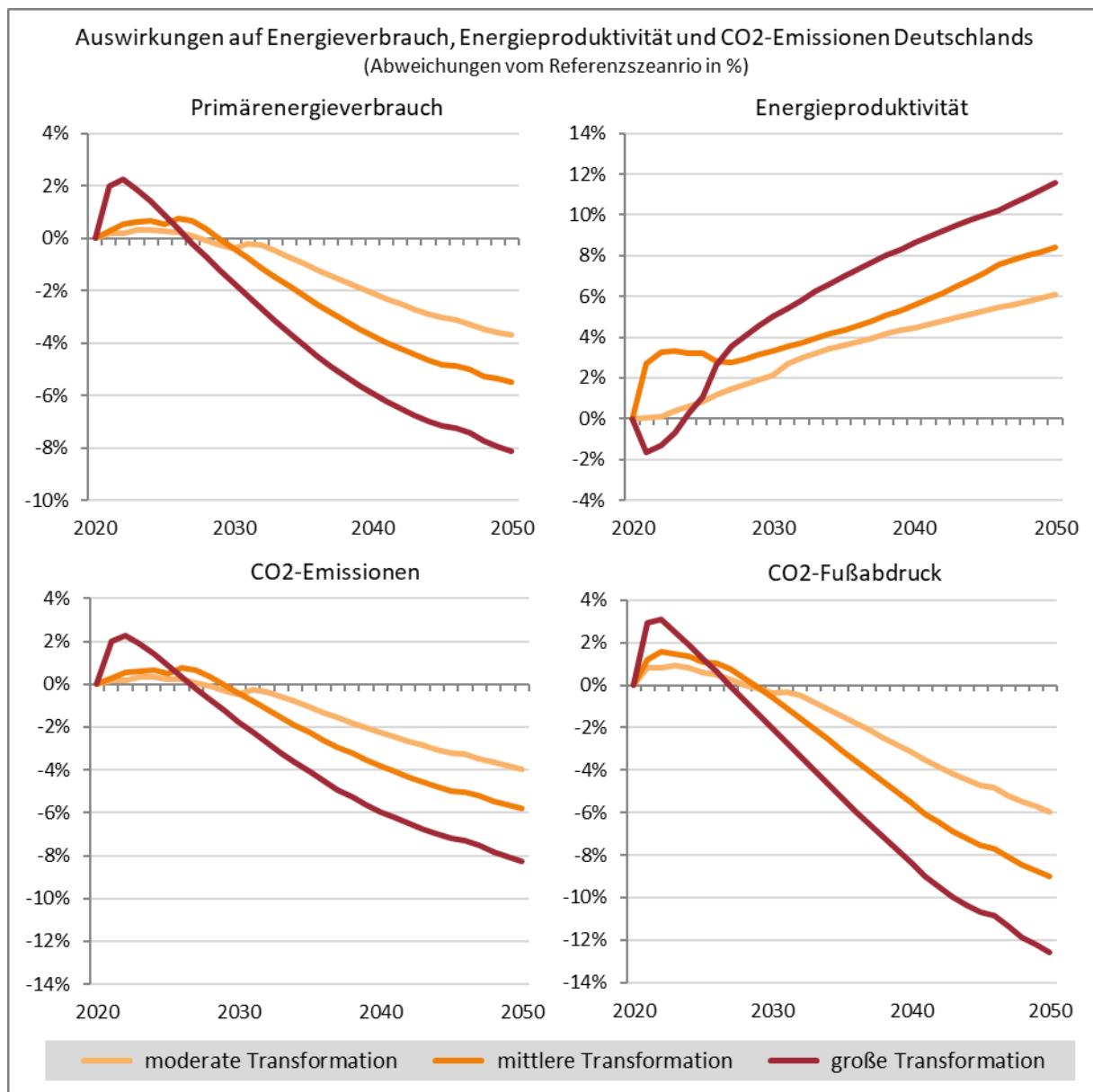
Abbildung 102: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Gesamtrohstoffproduktivität und Primärrohstoffeinsatz



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Unser letzter Blick bei der Darstellung und Analyse von Ergebnissen der Simulationsexperimente gilt den Implikationen auf Primärenergieverbrauch, Energieproduktivität und CO2-Emissionen Deutschlands (s. Abbildung 103). Die Abbildung zeigt, dass sich durch eine produktions-seitige Transformation hin zu mehr Ressourceneffizienz auch positive Implikationen auf Primärenergieverbrauch und CO2-Emissionen realisieren ließen. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass im Simulationsexperiment für Energie-Inputkoeffizienten keine zusätzlichen Produktivitätsfortschritte angenommen wurden. Bei den identifizierten Effekten handelt es sich folglich ausschließlich um indirekte Effekte, die dadurch auftreten, dass die Verarbeitung von Primär-Rohstoffen energieintensiv ist. Anders ausgedrückt: Eine Systemtransformation hin zu mehr Ressourceneffizienz kann einen nicht unerheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Abbildung 103: SimRess-Potenzialanalysen, Wirkungen auf Deutschlands Primärenergieverbrauch, Energieproduktivität und CO<sub>2</sub>-Emissionen



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

### 5.3.3 Fazit zu den Simulationsexperimenten

Das Modell GINFORS3 ist aufgrund seiner detaillierten und konsistenten Abbildung von Steuern und Subventionen (auf den Güter- und Arbeitsmärkten und im Kontensystem der VGR) und deren Implikationen auf das Verhalten der Wirtschaftsakteure geradezu prädestiniert für Fragestellungen im Kontext der Folgenabschätzung eines ökologischen Umbaus des Steuer-, Abgaben- und Subventionssystems.

Darüber hinaus sind Modelle wie GINFORS3 jedoch grundsätzlich auch in der Lage modellbasierte Folgenabschätzungen für andere Instrumente und/oder für sich von der jeweiligen Referenzprojektion unterscheidende Entwicklungspfade beim Verhalten einzelner Akteure, durchzuführen. Für derartige Simulationsanwendungen bedarf es jedoch der Kenntnis zu Umfang und Höhe der direkten Impulse auf das System.

Wenn überhaupt liegen solche, hinreichend wissenschaftlich fundierten Kenntnisse jedoch nur einen sehr begrenzten Ausschnitt der intendierten umfassenden Analyse von Potenzialen der Ressourceneffizienz vor.

Wie anhand des Beispiels „Produktionsseitige Rohstoffproduktivitätsfortschritte“ gezeigt, wurde vor diesem Hintergrund ein Untersuchungsdesign entworfen, das es experimentell erlaubt verschiedene Hypothesen zu Umfang und Höhe der direkten Impulse einer umfassenden Systemtransformation zu testen. Solche modellbasierten Experimente befreien nicht von der Notwendigkeit, weitere wissenschaftliche Fortschritte bei der empirischen Fundierung der Hypothesen anzustreben. Sehr wohl befreien sie jedoch von der Notwendigkeit auf ein, potentiell ewiges, Zuwarten auf vollständige und hinreichend valide Parametrisierungs-Grundlagen.

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente haben gezeigt, dass unter den getroffenen Annahmen produktionsseitige Rohstoffproduktivitätssteigerungen sowohl global als national nicht unerhebliche positive Impulse auf das Wirtschaftswachstum hätten. Aufgrund der induzierten Kosten- und Preisdegressionen in Kombination mit den Anpassungsreaktionen der Tarifpartner auf dem Arbeitsmarkt ist jedoch zumindest langfristig, auf dem dann weitgehend geräumten Arbeitsmarkt, nicht mit positiven Beschäftigungsimpulsen in Deutschland zu rechnen.

Wenn es in Deutschland und global gelingen würde in den 100 wichtigsten von insgesamt potentiell 1600 Technologien (Inputkoeffizienten) ein um 2,5% p.a. höheren Produktivitätsfortschritt zu erzielen, würde sich Deutschlands Primärrohstoffeinsatz (RMI) bis zum Jahr 2050 mehr als halbieren. Die globalen Rohstoffextraktionen würden statt auf über 120 Gigatonnen anzuwachsen auf etwa 70 Gigatonnen zurückgehen. Gleichzeitig würde sich Deutschlands Rohstoffkonsum (RMC) pro Kopf auf etwa 11 Tonnen reduzieren.

Wenn sich stattdessen lediglich in den 50 wichtigsten Technologien Produktivitätsfortschritte in Höhe von 1,5% p.a. realisieren ließen und diese mit einer zeitlichen Verzögerung von bis zu 10 Jahren global diffundieren, würde sich Deutschlands Primärrohstoffeinsatz (RMI) bis zum Jahr 2050 auf gut 1,7 Gigatonnen reduzieren. Die globalen Rohstoffextraktionen würden sich ab Mitte der 30er Jahre von dann etwa 105 Gigatonnen langsam auf gut 95 Gigatonnen reduzieren. Deutschlands Rohstoffkonsum (RMC) pro Kopf würde sich unter diesen Annahmen auf etwa 14 Tonnen reduzieren.

Aus Sicht der Autoren haben die Simulationsexperimente folgende zentrale Erkenntnisse geliefert:

- Produktivitätsfortschritte, die sich auf die aus Rohstoffsicht wichtigsten Technologien konzentrieren, bergen – sofern sie sich auch technisch/physikalisch als realisierbar erweisen – erhebliche Potentiale zur Erhöhung der Gesamtrohstoffproduktivität.
- Weitergehende Forschungsaktivitäten sollten (unter Einbeziehung ingenieurwissenschaftlicher Expertise) der Frage nachgehen, unter welchen Bedingungen entsprechende Entwicklungen technisch realisierbar erscheinen.
- Da gleichzeitig jedoch nicht unerhebliche Wachstumsimpulse und Rebound-Effekte ausgelöst werden sind die Auswirkungen auf die Rohstofffinanzspruchnahme deutlich begrenzter.
- Sollen die deutsche Gesamtrohstoffproduktivität gesteigert und die deutsche Rohstofffinanzspruchnahme für Konsum und Investitionen (RMC) vermindert werden, so können nennenswerte Beiträge aus einer produktionsseitigen Systemtransformation nur erreicht werden, wenn die Produktivitätsfortschritte nicht auf Deutschland begrenzt stattfinden.
- Selbst bei optimistischsten (und damit wahrscheinlich höchst unrealistischen) Annahmen zu Umfang und Dynamik der Produktivitätsfortschritte würde lediglich ein Rückgang des deutschen RMC auf etwa 11 Tonnen pro Kopf gelingen. Wenn weitergehende Reduktionen erreicht werden sollen, besteht zusätzlich Bedarf für eine Systemtransformation in Richtung ressourceneffizienteres oder gar ressourcensuffizientes Verhalten der Konsumenten (und Investoren).

## 6 Fazit und Ausblick

Im Hinblick auf die weitere Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms hält ProgRess II folgendes fest: „Des Weiteren werden Modelle auf Makroebene entwickelt, die es erlauben, zentrale Indikatoren zu ergänzen, die die ökonomischen, sozialen und ökologischen Wirkungen der Ressourcenpolitik transparenter machen. Damit können Synergien für andere Umweltbereiche (zum Beispiel Klima, Erhalt der Biodiversität) und für die Gesamtwirtschaft (zum Beispiel Arbeitsplätze, Wettbewerbsfähigkeit, Exporte von Effizienztechnologieanbietern) aufgezeigt werden. ...“

Was bisher noch kaum betrachtet wird, ist die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen im Ausland, die durch deutsche Güterimporte verursacht wird. Mit der Zunahme der Importe wird dieser Aspekt der deutschen Ressourceninanspruchnahme immer wichtiger. Daher soll zukünftig auch die mit Produktion und Transport der Importgüter einhergehende Inanspruchnahme von Boden, Wasser, Fläche, Energie und Rohstoffen sowie die Wirkung auf Luftqualität, Klima und Biodiversität ermittelt und einzeln ausgewiesen werden. So können die Größenordnungen der „exportierten“ Ressourceninanspruchnahmen dargestellt und Verlagerungseffekte ins Ausland erkannt werden.“ (BMUB 2016, S. 44).

Das von uns im Verlauf des SimRess-Projekts weiterentwickelte dynamische Multi-Regionale (MR) makroökonomische Simulationsmodell GINFORS3 zeichnet sich dadurch aus, dass die im obigen Zitat als bisher kaum betrachtet klassifizierten Inanspruchnahmen von Rohstoffen durch Güterimporte sowohl rückblickend für die vergangenen 20 Jahre evaluiert wie auch vorausschauend für die kommenden Dekaden bis zum Jahr 2050 projiziert werden können, wobei auch die energetische Nutzung verschiedener Rohstoffkategorien automatisch mitberücksichtigt wird. Besonders erwähnenswert erscheint dabei der hohe Konsistenzgrad der ökonomischen Modellierung. Da für sämtliche modellierten Weltregionen die makroökonomischen Einkommenskreisläufe stets geschlossen abgebildet werden, zeichnen sich sämtliche GINFORS-Simulationen auch durch eine umfassende modellendogene Berücksichtigung von Rebound-Effekten (Sorrell und Dimitropoulos 2008, Sorrell et al. 2009) aus.

Die durch das SimRess-Projekt ermöglichten Parametrisierungs- und Modellieraktivitäten zur simultanen Berechnung von CO<sub>2</sub>- und Material-Footprints markieren auch im internationalen Vergleich einen wesentlichen methodischen Fortschritt. So identifizierte bspw. jüngst UNEP (2017) in einem Literaturüberblick die beiden makroökonomischen Modelle E3ME und GINFORS3 als wesentliche Referenzen für Simulationsmodelle mit der Fähigkeit einer expliziten Abbildung zukünftiger Entwicklungen der Primärrohstoffinanspruchnahme. Im Vergleich zu den dort angesprochenen eigenen Vorarbeiten (KRU 2016, Distelkamp und Meyer 2016) ermöglichte das SimRess-Projekt insbesondere einen wesentlich detaillierteren Ausweis von Ressourcenindikatoren und CO<sub>2</sub>-Footprints durch die nun vorliegende GINFORS3-Version.

Die Anwendungsmöglichkeiten dieses Analyserahmens wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „SimRess - Modelle, Potenziale und Langfristszenarien für Ressourceneffizienz“ in drei inhaltlichen Themenblöcke konkret aufgezeigt:

- Dem ex-post-Monitoring von nationalen und globalen Fortschritten bei der Ressourceneffizienz.
- Der Parametrisierung und Quantifizierung von konsistenten Zukunftsszenarien bis zum Jahr 2050.
- Der (explorativen) Simulation von Effekten auf Wirtschaft und Umwelt aufgrund von schnelleren produktionsseitigen Ressourceneffizienzfortschritten.

In jedem Themenblock wurden dabei verbleibende Herausforderungen sichtbar, welche angesichts der gegebenen Projektziele sowie der damit einhergehenden Budgetrestriktionen im Projektverlauf nicht weiterverfolgt werden konnten.

Da es im Rahmen des ex-post Monitorings beispielsweise nicht möglich war, eigenständige Detailanalysen zur inhaltlichen Identifikation der Triebfedern der aufgezeigten historischen Entwicklungen durchzuführen, können die aufgezeigten Befunde derzeit nur auf Basis vorläufiger Plausibilitätsüberlegungen interpretiert

werden. Methodische Evaluationen dieser Plausibilitätsüberlegungen verbleiben für zukünftige Forschungsprojekte, wobei die von uns in Kapitel 3 erstmals in diesem Detailreichtum durchgeführte historische Berichterstattung hierzu umfassende Ansatzpunkte liefert. Vor Hintergrund dieses Detailreichtums können diverse inhaltliche Fragestellungen identifiziert werden, welche zur Weiterentwicklung politischer Handlungsstrategien sinnvollerweise verlässlich evaluiert werden sollten.<sup>134</sup> Insbesondere im Hinblick auf internationale Vergleiche lassen sich aber auch relevante methodische Fragen identifizieren, welche auf die Notwendigkeit weitergehender Evaluationsstudien hinweisen: Während unsere Analysen auf Informationen der WIOD-Datenbank (Dietzenbacher et al. 2013) fundieren, wurden thematisch vergleichbare Studien in jüngster Vergangenheit u.a. auch auf Basis der Datenbanken EXIOBASE (WU Wien 2016) sowie EORA (UNEP 2016) durchgeführt. Eine umfassende Prüfung der Robustheit der jeweiligen nationalen Befunde auf Basis unterschiedlicher Datenbanken wurde bislang allerdings noch nicht durchgeführt.

In Kapitel 2 wurde thematisiert, dass bislang lediglich sporadisch Zukunftsszenarien parametrisiert wurden, welche einen simultanen Ausblick auf die bis zum Jahr 2050 erwartbaren globalen Entwicklungen von Energie- wie auch Materialnachfrage und daraus resultierenden Emissionstrajektorien ermöglichen (siehe hierzu insbesondere Hatfield-Dodds et al. 2017, UNEP 2016). Ansätze zur Reflexion von Befunden dieser Analysen mit eigenen Erfahrungen aus der Parametrisierung von Umfeldszenarien werden bspw. in Distelkamp und Meyer (2017) aufgezeigt. Ein weitergehender Austausch über Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den jeweiligen methodischen Ansätzen war in SimRess nicht intendiert, sollte aber zukünftig auf Basis der dort angesprochenen Diskussionspunkte weiter vorangetrieben werden.

Zudem empfiehlt sich eine detailliertere inhaltliche Auseinandersetzung mit den jeweiligen Projektionsergebnissen. Die von uns in Kapitel 4 zusammengestellten Befunde der SimRess-Referenzszenarien implizieren einen anhaltenden Anstieg der globalen Rohstoff-Extraktionen, welcher mit einem Zuwachs auf etwa 120 Gigatonnen bis zum Jahr 2050 allerdings im Vergleich zu Hatfield-Dodds et al. (2017) und UNEP (2016) relativ moderat erscheint. Diese Unterschiede lassen sich grundsätzlich relativ klar auf systematische Abweichungen der jeweiligen Projektionsergebnisse für nicht-metallische Mineralien zurückführen. Ein intensiver methodischer Austausch hierzu mit den Autoren der UNEP-Simulationsstudie wäre zukünftig wünschenswert. Nachdem die Arbeiten von Hatfield-Dodds et al. (2017) und UNEP (2016) auf Initiative der Staats- und Regierungschefs beim G7-Gipfel auf Schloss Elmau erfolgten, bleibt zu hoffen, dass die G7-Allianz für Ressourceneffizienz wie auch der jüngst in Hamburg initiierte G20 Resource Efficiency Dialogue zukünftig auch auf eine entsprechende Weiterentwicklung der angewandten Simulationsmethoden und -grundlagen einwirkt.

Die in Kapitel 5 zusammengefassten Simulationsergebnisse der Effekte von produktionsseitigen Ressourceneffizienzfortschritten auf Wirtschaft und Umwelt ermöglichen eine explorative Abschätzung der Wirkungspotenziale von gesamtwirtschaftlichen Effizienzfortschritten. Da für einen Großteil der ressourcenpolitisch diskutierten Instrument-Vorschläge keine hinreichend belastbaren Parametrisierungs-Annahmen verfügbar waren, verbleibt eine weitergehende Analyse konkreter politischer Maßnahmen zur Realisation die-

---

<sup>134</sup> International mag bspw. der seit der Jahrtausendwende beobachtbare Anstieg der CO2-Intensitäten in Relation zum BIP der Region Ostasien & Pazifik bei gleichzeitig ausdauernd rückläufigen CO2-Intensitäten in Europa und Nord-Amerika als vorläufiges Anzeichen sogenannter „pollution haven“-Effekte (siehe hierzu bspw. auch Eskeland und Harrison 2003) interpretiert werden. Ob eine solche Interpretation allerdings tatsächlich gerechtfertigt ist, wäre im Zuge weitergehender inhaltlicher Analysen zu überprüfen. Siehe hierzu bspw. auch die methodisch mit unseren Arbeiten eng verwandte Analyse von Dietzenbacher und Mukhopadhyay (2007) für Indien.

Vor Hintergrund der nationalen Befunde erscheint es bspw. interessant, die für zentrale Produktgruppen der deutschen Industrie (wie Fahrzeuge, Maschinenbauprodukte oder chemischen Erzeugnisse) beobachtbaren RMC-Anstiege inhaltlich näher zu interpretieren.

ser Effizienzfortschritte allerdings für zukünftige Forschungsaktivitäten. Um dabei der weitreichenden Komplexität und thematischen Vielfalt ressourcenpolitischer Fragestellungen angemessen nachgehen zu können, empfehlen wir hierzu die Anwendung integrierter Modellverbünde.<sup>135</sup>

Während unser Bericht somit vielfältige Ansatzpunkte für weitergehende zukünftige Forschungsvorhaben aufzeigt, lassen sich die hierzu soweit etablierten zentralen Erkenntnisse folgendermaßen zusammenfassen:

### **Ex post-Monitoring**

In Folge der Globalisierung und des Strukturwandels der deutschen Wirtschaft ist der Anteil der inländischen Extraktionen am Primärrohstoffbedarf für Konsum und Investitionen in Deutschland von mehr als 50% Mitte der 90er Jahre auf heute nur noch ein Drittel zurückgegangen.

Die Entwicklung des deutschen (pro Kopf-) Primärrohstoffkonsum (RMC) war in den vergangenen 20 Jahren durch eine absolute Entkopplung vom Wirtschaftswachstum gekennzeichnet: Deutschlands Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen ist seit 1995 um gut 300 Mio. Tonnen bzw. 14% zurückgegangen. Im internationalen Vergleich ist diese Beobachtung auffällig, da im globalen Durchschnitt üblicherweise Anstiege der Wirtschaftsleistung bislang mit einem Anstieg der Primärrohstoffanspruchnahme einhergingen. Trotz der aus Sicht der Ressourcenschonungspolitik grundsätzlich begrüßenswerten Entwicklungsdynamik des deutschen pro Kopf- RMC ist festzustellen, dass das im Jahr 2015 erreichte deutsche pro Kopf-Niveau des RMC noch ungefähr dem Doppelten des globalen Durchschnitts entspricht.

Die eigenen Abschätzungsergebnisse des deutschen RMC-Niveaus weisen eine erhebliche Diskrepanz zu den Ergebnissen des Statistischen Bundesamtes auf. Während das Statistische Bundesamt bspw. für das Jahr 2011 den deutschen RMC auf 16,2 Tonnen pro Kopf beziffert, resultieren unsere Berechnungen für dieses Berichtsjahr in einem Wert von 23,4 Tonnen pro Kopf. Bei diesem Vergleich zeigen sich insbesondere bei den Rohstoffkategorien Metallerze und Biomasse deutliche Diskrepanzen, wobei die Dimension unserer Befunde durch alternative Analysen grundsätzlich bestätigt wird (siehe hierzu UNEP 2017, Giljum et al. 2017, WU Wien 2016, Giljum et al. 2015, Wiedmann et al. 2015).

Die von uns für Deutschland durchgeführten weitergehenden Detailanalysen können zu einer zielgerichteten Identifikation zentraler Triebkräfte der historischen Dynamik des Primärrohstoffbedarfs genutzt werden. Unser Bericht legt hierzu Abschätzung der Beiträge einzelner Verwendungen, Gütergruppen wie auch Rohstoffgruppen vor. Im Zeitraum 1995 bis 2015 kann dabei für Deutschlands Rohstoffkonsum (RMC) insgesamt festgehalten werden, dass die Nachfrage nach Bauleistungen eine abnehmende Bedeutung aufweist, wohingegen insbesondere die Nachfrage nach Büromaschinen, DV-Geräten, E-Technik, Feinmechanik u. Optik in deutlich zunehmendem Maße zum RMC beiträgt: Mehr als die Hälfte der beobachteten RMC-Reduktion kann allein auf den verminderten Rohstoffbedarf für Bauarbeiten zurückgeführt werden. Für die Gütergruppe „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik und Optik“ ist hingegen nahezu eine Verdreifachung des Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen zu beobachten. Im Hinblick auf die Entwicklung der Rohmaterialäquivalente des deutschen Außenhandels sind zudem folgende Beobachtungen festzuhalten:

### **Rohmaterialäquivalente der Exporte**

- Gut 60% des Primär-Rohstoffbedarfs Biomasse der deutschen Exporte entfallen auf die Gütergruppen „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ sowie „Erzeugnisse der Land-

---

<sup>135</sup> Als ein erster Ansatz zur Etablierung des hierzu notwendigen interdisziplinären Austausches zwischen Experten und Modellbauern unterschiedlicher Fachdisziplinen kann dabei die ebenfalls vom SimRess-Projekt durchgeführte Bestandsaufnahme dienen, welche in Biemann et al. (2017) dokumentiert wurde.

und Forstwirtschaft, Fischerei“. Für diese Gütergruppen gilt zudem, dass der Primär-Rohstoffbedarf Biomasse im Zeitraum von 1995 bis 2015 um 159% bzw. 136% anstieg.

- Für die deutschen Exporte erweisen sich die Gütergruppen „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnisse“, „Fahrzeuge“ sowie „chemischen Erzeugnissen“ als wesentliche Treiber des Primär-Rohstoffbedarfs fossiler Energieträger. Über 40% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs fossiler Energieträger der deutschen Exporte lässt sich auf diese Gütergruppen zurückführen.
- Lediglich gut 20% des Primär-Rohstoffbedarfs an Mineralien der deutschen Exporte ist unmittelbar auf Exporte von unverarbeiteten Steinen und Erden zurückzuführen. Stattdessen kann annähernd die Hälfte des Primär-Rohstoffbedarfs an Mineralien sämtlicher Exporte auf die Exporte von „chemischen Erzeugnissen“, „Fahrzeugen“, „Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden“ sowie „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnisse“ zurückgeführt werden.
- Die Rangliste der im Hinblick auf den Primär-Rohstoffbedarf Metallerze der deutschen Exporte wichtigsten Waren und Dienstleistungen wird deutlich angeführt von den „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnissen“. Allein auf die Exporte dieser Gütergruppe entfallen knapp 50% des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs Metallerze der deutschen Exporte. Auf den weiteren Rängen folgen die Exporte von „Fahrzeugen“ und „Maschinen“.

#### **Rohmaterialäquivalente der Importe**

- Der Primär-Rohstoffbedarfs Biomasse der deutschen Importe ist zu über 50% auf Importe von „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ und „Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“ zurückzuführen.
- Der Primär-Rohstoffbedarf fossiler Energieträger deutscher Importe wird in erster Linie durch Importe von „Kokereierzeugnissen, Mineralölerzeugnissen, Spalt- u. Brutstoffen“ beeinflusst. Fünf weitere Gütergruppen des Verarbeitenden Gewerbes erweisen sich allerdings ebenfalls als wichtige Triebfedern: Unter sämtlichen deutschen Importen verursachen Einfuhren der Güterkategorien „Fahrzeuge“, „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“, „Chemische Erzeugnisse“, „Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnissen“ und „Maschinen“ ca. 40% des Primär-Rohstoffbedarfs fossiler Energieträger.
- Der Primär-Rohstoffbedarf an Mineralien der deutschen Importe kann zu annähernd 40% den Gütergruppen: „Chemische Erzeugnisse“, „Fahrzeuge“ sowie „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“ zugerechnet werden.
- Die Rangliste der im Hinblick auf den Primär-Rohstoffbedarf Metallerze der deutschen Importe wichtigsten Waren und Dienstleistungen wird wie bei den Exporten deutlich angeführt von den „Metallen u. Halbzeug daraus, Metallerzeugnissen“. Allein auf die Importe dieser Gütergruppe entfällt knapp ein Drittel des gesamten Primär-Rohstoffbedarfs Metallerze der deutschen Importe. Auf den weiteren Rängen folgen die Importe von „Fahrzeugen“, von „Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik“ und von „Maschinen“.

Die an dieser Stelle vorgenommene Fokussierung der Ergebniszusammenfassung auf Befunde zur Entwicklung des RMC reflektiert die Tatsache, dass entsprechende Analysen von internationalen Organisationen (wie der OECD oder der Vereinten Nationen) zur Entwicklung der Primärrohstoffanspruchsnahme üblicherweise auf einer Betrachtung dieses Indikators beruhen. Im Vergleich hierzu nimmt die deutsche Umweltpolitik mit ihrer Fokussierung auf den Indikator „Gesamtrohstoffproduktivität“ eine internationale Sonderrolle ein. Die deutsche Gesamtrohstoffproduktivität konnte seit 1995 um 33% gesteigert werden. Dieser Produktivitätsfortschritt um durchschnittlich ca. 1,4% p.a. reichte allerdings nicht aus, um auch den Primärrohstoffeinsatz (RMI) absolut vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln.

Die ex post Betrachtung unserer Ergebnisse verdeutlicht (u.a.), dass eine vergleichende Bewertung internationaler Entwicklungsdynamiken auf Basis von Produktivitätskennziffern keine verlässlichen Rückschlüsse auf die absolute Primärrohstofffinanzspruchnahme erlaubt. So wurden in einem von uns durchgeführten Ranking der internationalen Produktivitätsfortschritte für Indien und China zwei Länder mit relativ hohen Produktivitätssteigerungen ausgewiesen, deren pro Kopf – RMC im selben Zeitraum jeweils deutlich gestiegen ist. Zudem konnte hierbei der paradoxe Befund festgestellt werden, dass für beinahe sämtliche Länder/Regionen Zuwächse bei der Gesamtrohstoffproduktivität zu beobachten sind, während gleichzeitig für die globale Rohstoffproduktivität ein Rückgang zu beobachten war.

Die zukünftige Ausweitung des deutschen Monitorings sowie der nationalen ressourcenpolitischen Agenda um explizite Bezüge zum Indikator RMC erscheint uns vor Hintergrund dieser Beobachtungen ausgesprochen wünschenswert.

### **Ex-ante-Projektionen**

Im SimRess-Projekt wurden zwei eigenständige Umfeld-Szenarien in GINFORS3 parametrisiert. Diese Szenarien können als ein „business as usual“ Szenario sowie ein starker Innovations-orientiertes Transformationsszenario aufgefasst werden. In beiden Szenarien wird bis 2050 sowohl ein Anstieg der Weltbevölkerung als auch des BIP pro Kopf erwartet. Projiziert wird, dass sich die globale Wirtschaftsleistung bis zum Jahr 2050 um 82% bzw. 97% erhöht. Gleichzeitig wird auch ein weiterer Anstieg der globalen Rohstoff-Extraktionen auf etwa 120 Gigatonnen im Jahr 2050 erwartet. Wie bereits zuvor erwähnt wurde, erscheinen diese Steigerungen im Vergleich zu anderen Simulationsrechnungen relativ gering. Diese Unterschiede lassen sich insbesondere auf systematische Abweichungen der jeweiligen Projektionsergebnisse für nicht-metallische Mineralien zurückführen.<sup>136</sup>

Sowohl für Deutschland als auch global sind beide Szenarien durch eine sich langfristig abschwächende wirtschaftliche Dynamik gekennzeichnet. Diese gilt aber in erster Linie für eine Absolut-Betrachtung und in sehr begrenztem Maße für eine pro-Kopf-Betrachtung. Für die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen wird im Szenario Industrieland Deutschland ein leichter Anstieg bis etwa der 30er-Jahre projiziert, wohingegen im Szenario Klimaaktives Deutschland bis 2050 eine Reduktion um 11 Gigatonnen auf dann 23 Gigatonnen erreicht wird.

Für Deutschland wird in beiden Umfeldszenarien ein moderater Rückgang sowohl des Rohstoffkonsums (RMC) pro Kopf als auch des Primärrohstoffeinsatzes (RMI) projiziert. Für den gesamten Materialkonsum (TMC pro Kopf) wird ein deutlicherer Rückgang erwartet. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass in den Umfeldszenarien von einem langfristigen Ausstieg Deutschlands aus der Braunkohleförderung ausgegangen wird, einer Wirtschafts-Aktivität, die mit extrem hohen ungenutzten Entnahmen verbunden ist. Da der Umbau in eine (weitgehend) de-karbonisierte Gesellschaft mit einem sinkenden Primär-Rohstoffbedarf für fossile Energieträger sowie einem steigenden Primär-Rohstoffbedarf für den Umbau der Infrastrukturen verbunden ist, impliziert der relativ ähnliche Verlauf sämtlicher Indikatoren in beiden Umfeldszenarien, dass sich beide Effekte mittelfristig nahezu neutralisieren.

Für den derzeit in der nationalen Ressourcenpolitik betrachteten Indikator der Gesamtrohstoffproduktivität werden für Deutschland in beiden Umfeldszenarien durchschnittliche jährliche Steigerungen um 0,7-0,8 % projiziert. In der Projektion wird im Vergleich zu Deutschland für Länder und Regionen mit einer niedrigeren Gesamtrohstoffproduktivität tendenziell eine deutlich höhere wirtschaftliche Dynamik ausgewiesen. Angesichts der hieraus resultierenden Implikationen auf die globale Rohstoffproduktion

---

<sup>136</sup> Von zentraler Bedeutung erscheint diesbezüglich insbesondere die mittelfristige Entwicklung der chinesischen Bauaktivitäten.

tivität kann daher kritisch hinterfragt werden, ob Deutschland mit projizierten Gesamtrohproduktivitätsfortschritten von 0,7 bis 0,8% pro Jahr seiner globalen Verantwortung gerecht wird. Der mittelfristig angestrebte Zielkorridor von 2-2,5 % wird jedenfalls deutlich verfehlt.

Für Deutschlands pro Kopf Rohstoffkonsum (RMC) wird bis zum Jahr 2050 ein Rückgang um 4 bis 5 Tonnen auf 18 bis 19 Tonnen projiziert. Zur Erreichung wissenschaftlich diskutierter Zielwerte (siehe hierzu bspw. Bringezu 2015) müsste dieser Indikator allerdings bis zum Jahr 2050 um weitere 70% reduziert werden. Unsere Projektionsergebnisse veranschaulichen somit insgesamt einen erheblichen Transformationsbedarf nationaler wie auch globaler Wirtschaftsprozesse zur Steigerung der Ressourceneffizienz.

### Simulationsexperimente

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente zeigen, dass produktions-seitige Rohstoffproduktivitätssteigerungen sowohl global als national nicht unerhebliche positive Impulse auf das Wirtschaftswachstum freisetzen würden. Aufgrund der induzierten Kosten- und Preisdegressionen in Kombination mit nach unten weitgehend starren Löhnen ist jedoch zumindest langfristig nicht von positiven Arbeitsmarkteffekten auszugehen.

Trotz hiermit einhergehender Rebound-Effekte könnte durch umfassende Produktivitätsfortschritte auch eine wesentliche Reduktion der Primärrohstoffanspruchnahme erreicht werden. Gemäß unseren exemplarischen Modellrechnungen könnte der deutsche Primärrohstoffeinsatz (RMI) bis zum Jahr 2050 mehr als halbiert werden, wenn für 100 ausgewählte Inputkoeffizienten weltweit ein um 2,5% p.a. höherer Produktivitätsfortschritt realisiert würde. Deutschlands pro Kopf-RMC würde dann auf etwa 11 Tonnen reduziert, während die globalen Rohstoffextraktionen auf etwa 70 Gigatonnen zurückgeführt würden.

Hierzu muss angemerkt werden, dass dieses Szenario auf extrem optimistischen Annahmen hinsichtlich des erzielbaren technologischen Fortschritts basiert. Über einen Zeitraum von 30 Jahren betrachtet impliziert ein zusätzlicher Effizienzfortschritt um 2,5% p.a. ungefähr eine Halbierung des Bedarfs an rohstoffintensiven Inputs in der Produktion im Vergleich zur Baseline. Es ist sicherlich berechtigt, die technischen Möglichkeiten zur Realisierung solcher Effizienzfortschritte grundsätzlich in Frage zu stellen.

Uns ist an dieser Stelle allerdings lediglich wichtig festzuhalten, dass selbst solch optimistischen Annahmen hinsichtlich der mittelfristigen Möglichkeiten zur Realisierung zusätzlicher Effizienzfortschritte nicht hinreichend erscheinen, um den deutschen pro Kopf-RMC bis zum Jahr 2050 in die Bereiche eines Zielkorridors von 5 bis 8 Tonnen zurück zu führen.

Damit verdeutlichen unsere Simulationsrechnungen anschaulich, dass solch umfassende Verminderungen der Primärrohstoffanspruchnahme nur im Rahmen einer weitreichenden ökologischen Transformation erzielbar erscheinen. Anstelle einer Weiterentwicklung vereinzelter Maßnahmen in ausgewählten Handlungsfeldern oder aber individuellen Industriesektoren wird es also zukünftig vermehrt darauf ankommen, das interdependente Zusammenspiel aus soziokulturellen, sozio-technischen und sozioökonomischen Treibern der Ressourcenanspruchnahme nachhaltig zu verändern.<sup>137</sup>

---

<sup>137</sup> Der Sachverständigenrat für Umweltfragen kommt zu einer ähnlichen Schlussfolgerung: „Eine ökologische Modernisierung wird nicht mehr ausreichen, die [...] verankerte Vision eines ‚guten Lebens innerhalb planetarischer Grenzen‘ zu erreichen. [...] Es bedarf daher einer Erweiterung des Innovationsverständnisses um die Dimensionen kulturellen, gesellschaftlichen und institutionellen Wandels. Vorrangige Aufgabe der Umweltpolitik wird es sein, die Idee entsprechend umfassend ausgerichteter ökologischer Transformationen weiterzuentwickeln und in konkrete Handlungskonzepte umzusetzen.“ (SRU 2016, S. 71).

## 7 Quellenverzeichnis

- Ahlert, G., Meyer, B., Zieschank, R., Diefenbacher, H. (2014): Basic Structures and Political Implications of a Sustainable Welfare Model. *Journal of Environmental Science and Engineering. A* 3 (2014). 189-203.
- Almon, C. (1991): The INFORUM Approach to Interindustry Modeling. *Economic Systems Research*, 3(1), 1-7.
- Bahn-Walkowiak, B.; Wilts, H.; Meyer, M.; Distelkamp, M. (im Erscheinen): Conceptualising a tax policy mix for resource efficiency: selected results from a three-transition pathways approach. In: Weishaar, S., Kreiser, L., Milne, J., Ashiabor, H., Mehling, M. (eds.) *The Green Market Transition. Carbon Taxes, Energy Subsidies and Smart Instrument Mixes. Critical issues in environmental taxation, XIX. CRITICAL ISSUES IN ENVIRONMENTAL TAXATION*. Edward Elgar. Cheltenham, UK, Northampton, MA., 174-192.
- Beier, W. (2009): Biologisch abbaubare Kunststoffe. UBA Hintergrundpapier.
- Bergmann, Doris und Lehr, Thomas (2015): Qualitative Umfeldszenarien für die Ressourcenpolitik. Endbericht zum Arbeitspaket 4 des Projekts Ressourcenpolitik (PolRess). <http://www.ressourcenpolitik.de/2016/02/bergmann-doris-lehr-thomas-2015-qualitative-umfeldszenarien-fuer-die-ressourcenpolitik/>. Aufgerufen am 7.02.2017.
- Beringer, T., Lucht, W., Schaphoff, S. (2011): Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *GCB Bioenergy*, 3(4), 299-312.
- Biemann, K., Distelkamp, M., Dittrich, M., Dünnebeil, F., Greiner, B., Hirschnitz-Garbers, M., Koca, D., Kosow, H., Lorenz, U., Mellwig, P., Neumann, K., Meyer, M., Schör, K., Sverdrup, H., von Oehsen, A., Weimer-Jehle, W. (2017): Annahmen, Konsistenzen und Modellinteraktionen in der Modellierung von Ressourcenschonung und Treibhausgasminderungen. Dessau-Roßlau.
- BMU (2012): German Resource Efficiency Programme (ProgRess). Programme for the Sustainable Use and Conservation of Natural Resources. BMU.
- BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm Zur Nachhaltigen Nutzung Und Zum Schutz Der Natürlichen Ressourcen. Berlin.
- BMUB (2016b): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin.
- Boumans, M. (2006): The Difference Between Answering a „Why“ Question and Answering a „How Much“ Question. In: Lenhard, J., Küppers, G., Shinn, T. (eds.) *Simulation: Pragmatic Construction of Reality, Sociology of the Sciences Yearbook 25*, Springer Netherlands, 107-124.
- Box, G., Jenkins, G. (1970): *Time Series Analysis - Forecasting and Control*, San Francisco: Holden Day.
- Bringezu, S. (2015): Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. *Resources* (4), S. 25-54
- Bruckner, M., Giljum, S., Lutz, C., Wiebe, K. (2012): Materials embodied in international trade - Global material extraction and consumption between 1995 and 2005. *Global Environmental Change*, 22, S. 568-576.
- Brümmerhoff, D., Grömling, M. (2015): *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen*. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 10. Auflage.
- Carus, M., Dammer, L., Hermann, A., Essel, R. (2014): Proposals for a Reform of the Renewable Energy Directive to a Renewable Energy and Materials Directive (REMD). *nova paper #4 on bio-based economy*, Hürth 2014-05. Download at [www.bio-based.eu/policy](http://www.bio-based.eu/policy).
- Carus, M., Eder, A., Beckmann, J. (2014): Industry Report: GreenPremium Prices Along the Value Chain of Biobased Products. In: *Industrial Biotechnology*, Vol. 10, No. 2, April 2014.
- Carus, M.; A. Raschka, H. Fehrenbach, N. Rettenmaier, L. Dammer, S. Köppen, M. Thöne, S. Dobroschke, L. Diekmann, A. Hermann, K. Hennenberg, R. Essel, S. Piotrowski, A. Detzel, H. Keller, B. Kauertz, S. Gärtnert, J. Reinhardt (2013): *Ökologische Innovationspolitik - Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse*. Abschlussbericht zu (UFOPLAN)-Forschungskennzahl 3710 93 10 9.
- CE und BioS (2014): Study on modelling of the economic and environmental impacts of raw material consumption. Brussels: European Commission technical report 2014-2478. [http://ec.europa.eu/environment/enveco/studies\\_modelling/index.htm](http://ec.europa.eu/environment/enveco/studies_modelling/index.htm).
- Cellier, F. (2008): World3 in Modelica: Creating System Dynamics Models in the Modelica Framework. *Proceedings of the 6th International Modelica Conference*, 393-400, Bielefeld, Germany. Aufgerufen am 30.05.2017.

- Chertow, M. (2000): The IPAT Equation and Its Variants. *Journal of Industrial Ecology*. 4, 13–29.
- Christ, C. (1994): The Cowles Commission's contributions to econometrics at Chicago, 1939–1955. *Journal of Economic Literature*, 32(1), 30–59.
- Cole, H., Curnow, R. (1973): 9. An evaluation of the world models. *Futures*, 5, 108–134.
- COM (European Commission) (2011): Roadmap to a resource efficient Europe. Brussels, Communication from the Commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. 571 final.
- Costanza, R., Leemans, R., Boumans, R., Gaddis, E. (2007): Integrated Global Models. In: W. Steffen (ed.) *Sustainability or Collapse? An Integrated History and Future of people on Earth*. Cambridge MA, MIT Press, 417–446.
- Coyle, G. (2000): Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. *System Dynamics Review*, Vol. 16 (3), pp. 225–244.
- Croson, R., Gächter, S. (2010): The Science of Experimental Economics. *Journal of Economic Behavior and Organization*. 73 (1), 122 - 131. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00737932>. Aufgerufen am 20.01.2017
- Daly, H. (1992): From Empty World to Full World Economics. In: Goodland, R., Daly, H., Serafy, S. (eds) *Population, Technology and Lifestyle: The Transition to Sustainability*. Washington DC: Island Press.
- Dammer, L., M. Carus, A. Raschka, L. Scholz (2013): Market Developments of and Opportunities for biobased products and chemicals. Final Report
- den Butter, F., Morgan, M. (1998): What makes the models–policy interaction successful? *Economic Modelling*, 15(3), 443–475.
- 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.
- Dietzenbacher, E., Mukhopadhyay, K. (2007): An Empirical Examination of the Pollution Haven Hypothesis for India: Towards a Green Leontief Paradox? *Environmental and Resource Economics*, 36, pp. 427-449.
- Distelkamp, M., Meyer, M. (2017): Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe. *Ecological Economics*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.014>.
- Distelkamp, M., Meyer, M. (2016): Quantitative Assessment of Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe. GWS Discussion Paper 2016/10, Osnabrück.
- Distelkamp, M., Meyer, M., & Meyer, B. (2012): Prospects and Drivers of Future European Resource Requirements – Evidence from a Multi-National Macroeconomic Simulation Study. Paper prepared for the final WIOD Conference: Causes and Consequences of Globalization, Groningen. [http://www.wiod.org/conferences/groningen/Paper\\_Distelkamp\\_et\\_al.pdf](http://www.wiod.org/conferences/groningen/Paper_Distelkamp_et_al.pdf). Aufgerufen am 10.01.2017.
- Dittrich, M., Dünnebeil, F., Biemann, K., von Oehsen, A., Mellwig, P., Neumann, K., Gerhardt, N., Schoer, K., (2017): Konsistenz im Modellverbund im Projekt RTD. In: Biemann et al.: Annahmen, Konsistenzen und Modellinteraktionen in der Modellierung von Resourcenschonung und Treibhausgasminderungen. Dessau-Roßlau.
- Dittrich, M., Giljum, S., Lutter, S., Polzin, C. (2012): Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment. Vienna.
- Dittrich, M.; Schoer, K.; Kämper, C.; Ludmann, S.; Giegrich, J.; Lauwigi, C.; Sartorius, C.; Hummen, T.; Marscheider-Weidemann, F. (im Erscheinen): Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess), Dessau-Roßlau.
- 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.
- Ehrlich, P., Holdren, J., (1971): Impact of population growth. *Science* 171, 1212–1217.
- Ekins, P. (1997): The Kuznets Curve for the Environment and Economic Growth: Examining the Evidence. *Environment and Planning A*, 29, 805–830.
- Elshkaki, A., Graedel, T., Ciacci, L., Reck, B. (2016): Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change*, 39, 305-315.

EMF (2015): *Growth Within: a Circular Economy Vision for a Competitive Europe*. Cowes, United Kingdom. Ellen MacArthur Foundation.

EREP (European Resource Efficiency Platform) (2014): *Manifesto & Policy Recommendations*; Brussels. [http://ec.europa.eu/environment/resource\\_efficiency/documents/erep\\_manifesto\\_and\\_policy\\_recommendations\\_31-03-2014.pdf](http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/documents/erep_manifesto_and_policy_recommendations_31-03-2014.pdf). Aufgerufen am 11.04.2017

Eskeland, G., Harrison, A. (2003): Moving to greener pastures? Multinationals and the pollution haven hypothesis. *Journal of Development Economics*, Vol. 70 (1), pp. 1-23.

Europäische Kommission (2014): *Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten. Allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020*. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union.

Europäische Kommission (2009). *Taking bio-based from promise to market: measures to promote the market introduction of innovative bio-based products*.

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., Krausmann, F., Giljum, S., Lutter, S., Mayer, A., Bringezu, S., Moriguchi, Y., Schütz, H., Schandl, H., Weisz, H. (2011): *Methodology and Indicators of Economy-wide Material Flow Accounting*. *Journal of Industrial Ecology*, 15, 855–876.

Fishman, T., Schandl, H., Tanikawa, H. (2015): The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan's prefectures, *Ecological Economics*, 113, 76–84.

Fishman, T., Schandl, H., Tanikawa, H. (2016): *Stochastic Analysis and Forecasts of the Patterns of Speed, Acceleration, and Levels of Material Stock Accumulation in Society*. *Environmental Science & Technology*, Vol. 50 (7), pp. 3729-3737.

Frenkel, M., John, K. (2011): *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung*. 7., vollständig überarbeitete Auflage. München: Vahlen.

Giljum, S., Behrens, A., Hinterberger, F., Lutz, C., Meyer, B. (2008): Modelling scenarios towards a sustainable use of natural resources in Europe. *Environ. Sci. Policy* 11, 204–216.

Giljum, S., Bruckner, M., Martinez, A. (2015): *Material Footprint Assessment in a Global Input-Output Framework*. *Journal of Industrial Ecology*, 19, 792–804.

Giljum, S., Eisenmenger, N., Schandl, H. (2017): Empirical assessment of the OECD Inter-Country Input-Output database to calculate demand-based material flows. *OECD ENV/EPOC/WPEI(2017)1*, Paris.

Giljum, S., Lutz, C., Jungnitz, A. (2008): *The Global Resource Accounting Model (GRAM) - a methodological concept paper*."

Günther, Jens und Golde, Michael (2015): *Gesamtwirtschaftliche Ziele und Indikatoren zur Rohstofffinanzspruchnahme*. UBA-Hintergrundpapier, Dessau-Roßlau.

Grossman, G., Krueger, A. (1995): Economic environment and the economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 110, 353–377.

Güth, W., Kliemt, H. (2003): *Experimentelle Ökonomik, Modell-Platonismus in neuem Gewande?* In: Held, M., Kubon-Gilke, G., Sturm, R. (eds.) *Jahrbuch normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik 2: Experimente in der Ökonomik*, Metropolis, Marburg. <ftp://papers.econ.mpg.de/esi/discussionpapers/2002-21.pdf>. Aufgerufen am 16.01.2017

Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Martinez-Alier, J., Winiwarter, V. (2011): A socio-metabolic transition towards sustainability? Challenges for another Great Transformation. *Sustainable Development*, 19: 1–14.

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, 403–414.

Heckman, J. (2000): *Causal Parameters and Policy Analysis In Economics: A Twentieth Century Retrospective*. *Quarterly Journal of Economics*, 45–97.

Helmers, E. (2015): *Die Modellentwicklung in der deutschen Autoindustrie: Gewicht contra Effizienz*. Gutachten im Auftrag von BUND und VCD, Trier.

Hirschnitz-Garbers, M., Sverdrup, H., Koca, D., Distelkamp, M., Meyer, M. (2017a): *System analysis for environmental policy – System thinking through system dynamic modeling and policy mixing as used in the SimRess project*.

- Hirschnitz-Garbers, M., Distelkamp, M., Koca, D., Meyer, M., Sverdrup, H. (2017b): Potentiale und Kernergebnisse der Simulationen von Ressourcenschonung(spolitik). [SimRess Volume 0b]
- Hirschnitz-Garbers, M., Tan, A., Gradmann, A., Srebotnjak, T. (2016): Key drivers for unsustainable resource use – categories, effects and policy pointers. *Journal of Cleaner Production*. 132, 13–31.
- Hoekstra, A., Wiedmann, T. (2014): Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science* 344, 1114-1117.
- Hoffmann, R., Lee, C., Ramasamy, B., Yeung, M. (2005): FDI and pollution: A Granger Causality Test using panel data. *Journal of International Development*, 17, 311–317.
- Holub, H. (2002): Wirtschaftskreislauf. In: Brümmerhoff, D., Lützel, H. (eds.) *Lexikon der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen*, dritte, völlig überarbeitete Auflage, Oldenbourg, München, 475-478.
- Hu, J., Moghayer, S., Reynes, F. (2015): Report about integrated scenario interpretation: EXIOMOD/LPJmL results. Deliverable 3.7b POLFREE project.
- IEA (2012): *World Energy Outlook*. Paris, France.
- IEA (2015): *Energy Technology Perspectives 2015: Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*. Paris: OECD/IEA.
- Imhof, P (2000): Computer Simulation in the Controversy over Limits of Growth. Working Paper. Hamburg: Technische Universität Hamburg, Institut für Technik und Gesellschaft, <https://doi.org/10.15480/882.114>.
- IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jacob, K., Werland, S., Graaf, L., Hirschnitz-Garbers, M., Langsdorf, S., Hinzmann, M., Bergmann, D., Lehr, T., Meyer, M., Scholl, G., Schulze, F., Hermann, A., Keimeyer, F., Bringezu, S., Bahn-Walkowiak, B., Wilts, H. (2015): Innovationsorientierte Ressourcenpolitik in planetaren Grenzen. Endbericht des Projekts Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRess).
- Koca, D., Sverdrup, H., Ragnarsdottir, V. (2017): Use of Causal Loop Diagrams as Narrative Visualization Tools for Communicating and Analysing Dynamic Complex Systems: Conceptual Modeling and System Analysis of Complex Human-Nature Systems Interactions in a Resource Constrained World as an example. In: Biemann et al.: Annahmen, Konsistenzen und Modellinteraktionen in der Modellierung von Ressourcenschonung und Treibhausgasminderungen. Dessau-Roßlau.
- Köhler, J., Glöser, S., Pfaff, M., Corbin, M., Hogg, D., Sørensen, M. M., Maratou, A. (2016): Scoping study on modelling of EU environment policy: Final report for DG Environment. Luxembourg: Publications Office, 2016.
- Krausmann, F., Fischer-Kowalski, M., Schandl, H., Eisenmenger, N. (2008): The Global Sociometabolic Transition, *Journal of Industrial Ecology*, 12, 637–656.
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M. (2009): Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68, 10, 2696-2705.
- Keywords: MFA; Global materials use; Economic development; Material productivity; Industrial metabolism
- Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K., Geschke, A. (2013): Building EORA: A Global Multi-Region Input-Output Database at high Country and Sector Resolution. *Economic Systems Research*, 25, 20-49.
- Lorenz, U. (2017): Bedingungen und Möglichkeiten der Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen unterschiedlicher Modellierungsansätze. In: Biemann et al.: Annahmen, Konsistenzen und Modellinteraktionen in der Modellierung von Ressourcenschonung und Treibhausgasminderungen. Dessau-Roßlau.
- Lutz C. (2011): How to increase global resource productivity? Findings from modelling in the petrE project. In: Bleischwitz R, Welfens PJJ, Zhang H, (eds.) *International Economics of Resource Efficiency: Eco-Innovation Policies for a Green Economy*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2011, 14:317–334.
- Meadows D.H, Meadows D.L., Randers J. (1993): *Beyond the limits. Global collapse or a sustainable future*. Earthscan Publications, .
- Meadows D.H, Randers, J., Meadows D.L., Randers, J. (2004): *Limits to growth: The 30 year update*. Chelsea Green.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L. Randers, J., Behrens, W. (1972): *Limits to growth*. Universe Books, New York.

- Meyer, B. (2016): Die Modellierung der Großen Transformation. In: Held, M., Kubon-Gilke, G., Sturm, R. (eds.): Normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik, Jahrbuch 15. S. 165-190.
- Meyer, B. & Ahlert, G. (2017): Imperfect Markets and the Properties of Macro-economic-environmental Models as Tools for Policy Evaluation. *Ecological Economics*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.017>.
- Meyer, B., Barker, A., Barton, J., Long, K., Pollitt, H., Distelkamp, M., Meyer, M., Walter, H., Giljum, S., Kalcik, R.: (2011) Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment. Final Report of the Mac-Mod project (ENV.F.1/ETU/2010/0033) to the European Commission. 2011. [http://ec.europa.eu/environment/enveco/studies\\_modelling/pdf/report\\_macaroeconomic.pdf](http://ec.europa.eu/environment/enveco/studies_modelling/pdf/report_macaroeconomic.pdf). Aufgerufen am 10.01.2017.
- Meyer, B., Distelkamp, M., Beringer, T. (2015). Report about integrated scenario interpretation: GINFORS/LPJmL results. Deliverable 3.7a POLFREE project.
- Meyer, B., Drummond, P., Ekins, P., Distelkamp, M. (2016): Pathways to a Resource Efficient and Low-Carbon Europe – Lessons from the Modelling. POLFREE Policy Brief N. 5, London.
- 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 Model GINFORS. GWS Discussion Paper 13/5, Osnabrück.
- Morrison, M., Morgan, M.S. (1999): Models as Mediating Instruments. In: Morgan, M.S., Morrison, M. (eds.) Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science, Cambridge: Cambridge University Press.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., Olsson, L. (2007): Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60, 498 – 508.
- nova (2015): Schlussbericht zum Vorhaben „Nachhaltig nutzbare Potenziale für Biokraftstoffe in Nutzungskonkurrenz zur Lebens- und Futtermittelproduktion, Bioenergie sowie zur stofflichen Nutzung in Deutschland, Europa und der Welt.“ (FKZ 22501112 bzw. 12BMU011)
- OECD (2012), OECD Environmental Outlook to 2050. OECD, Paris.
- Oertel, D. (2007). Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe: Sachstandsbericht zum Monitoring "Nach-wachsende Rohstoffe". Bonn : TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag.
- Özokcu, S., Özdemir, Ö. (2017): Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 639 – 647.
- Pagan, A. (2003): An examination of some tools for macro-econometric model building. Mimeo, Australian National University. [https://www.researchgate.net/publication/249824702\\_An\\_Examination\\_of\\_Some\\_Tools\\_for\\_Macro-Econometric\\_Model\\_Building](https://www.researchgate.net/publication/249824702_An_Examination_of_Some_Tools_for_Macro-Econometric_Model_Building). Aufgerufen am 25.01.2017.
- Pao, H., Tsai, C. (2011): Multivariate Granger causality between CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption, FDI (foreign direct investment) and GDP (gross domestic product): Evidence from a panel of BRIC (Brazil, Russian Federation, India, and China) countries. *Energy*, 36, 685 – 693.
- Peters, G., Andrew, R., Lennox, J.,(2011): Constructing a Multi-regional Input–Output Table using the GTAP Database. *Economic Systems Research*, 23, 131–152.
- 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.
- Ressourcenkommission am Umweltbundesamt, KRU (2016): Ein ressourceneffizientes Europa – Ein Programm für Klima, Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung. Stellungnahme der Ressourcenkommission des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ein-ressourceneffizientes-europa-ein-programm-fuer>. Aufgerufen am 10.01.2017
- Retortillo, P., Mediavilla, M., Miguel, L., Castro, C. (2008): An attempt to automate the analysis of complex system dynamics models: an example of WORLD 3. Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society, Athens, Greece. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.408.5673&rep=rep1&type=pdf>. Aufgerufen am 30.05.2017.
- Rezai, A., Taylor, L., Mechler, R. (2013): Ecological Macroeconomics: An application to climate change. *Ecological Economics*, 85. pp. 69-76.

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. (2009): Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14, S. 32.
- Schaffartzik, A., Mayer, A., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Loy, C., Krausmann, F. (2014): The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950–2010, *Global Environmental Change*, 26, 87–97.
- 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.
- Schandl, H., Schulz, N. (2002): Changes in United Kingdom's natural relations in terms of society's metabolism and land use from 1850 to the present day. *Ecological Economics* 41, 203–221.
- Schandl, H., West, J. (2012): Material Flows and Material Productivity in China, Australia, and Japan. *Journal of Industrial Ecology*, 16, 352–364.
- Schnell, R. (1990): Computersimulation und Theoriebildung in den Sozialwissenschaften. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 42 (1), 109–128.
- Schoer, K.; Dittrich, M.; Kovanda, J.; Weinzettel, J.; Ewers, B.; Moll, S.; Bouwmeester, M. (2016): Documentation of the EU RME model. Luxembourg. <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6191533/Documentation-EU-RME-model/>. Aufgerufen am 01.06.2017.
- Schoer, K.; Dittrich, M.; Sartorius, C. (2017): Konsistenz im Projekt DeteRess, Anforderungen durch das umwelt-ökonomische Rohstoffmodell. In: Biemann et al.: Annahmen, Konsistenzen und Modellinteraktionen in der Modellierung von Ressourcenschonung und Treibhausgasminderungen. Dessau-Roßlau.
- Schoer, K.; Wood, R.; Arto, I., Weinzettel, J. (2013): Estimating Raw Material Equivalents on a Macro-Level: Comparison of Multi-Regional Input-Output Analysis and Hybrid LCI-IO. *Environmental Science & Technology*, 47, 14282–14289.
- Scricciu, 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 modeling. *WENE*, 2: 251–268.
- Selden, T., Song, D. (1995): Neoclassical growth, the J curve for abatement, and the inverted U curve for pollution. *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 162–168.
- Shen, L., Haufe, J., Patel, M. (2009): Product overview and market projection of emerging bio-based plastics, PRO-BIB Studie, Universität Utrecht.
- Sorrell, S. (2009): Jevons' Paradox revisited: the evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy*, 37, 1456–1469.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J. (2007): The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecol Econ*, 65(3), 636–649
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2016): Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik. SRU. [http://www.umweltrat.de/DE/Publikationen/Umweltgutachten/umweltgutachten\\_node.html](http://www.umweltrat.de/DE/Publikationen/Umweltgutachten/umweltgutachten_node.html). Aufgerufen am 11.04.2017.
- Statistisches Bundesamt (2010): Input-Output-Rechnung im Überblick. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2015): Deutscher Außenhandel. Export und Import im Zeichen der Globalisierung. Ausgabe 2015, geändert am 17. Juni 2016. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Wichtige Zusammenhänge im Überblick. Wiesbaden.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J. , Cornell, S., Fetzer, I. , Bennett, E., Biggs, R. et al. (2015): Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science* 347, 6223:1259855.
- Steinberger, J., Krausmann, F. (2011): Material and Energy Productivity. *Environmental Science & Technology*, 45, 1169–1176.
- Sverdrup, H. (2016): Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model. *Resources, Conservation and Recycling*, 114: 112–129

- Sverdrup, H., Koca, D. (2017): Longterm scenarios and potentials of resource efficiency on a global scale - quantitative assessments using the model WORLD5. [SimRess Volume 2]
- Sverdrup, H., Koca, D., Ragnarsdottir, K. (2014): Investigating the sustainability of the global silver supply, re-serves, stocks in society and market price using different approaches. *Resources, Conservation and Recycling*. 83; 121–140.
- Sverdrup, H., Koca, D., Ragnarsdottir, K. (2015): 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., (2016): A system dynamics model for platinum group metal supply, market price, depletion of extractable amounts, ore grade, recycling and stocks-in-use. *Resources, Conservation and Recycling*, 114:130–152.
- Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K., Koca, D., (2014): On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resources, Conservation and Recycling* 87:158–174.
- 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.
- Timmer, Marcel P.; Los, Bart; Stehrer, Robert & de Vries, Gaaitzen J. (2016): An Anatomy of the Global Trade Slowdown based on the WIOD 2016 Release. GGDC Research Memorandum 162. Groningen.
- Tinbergen, J. (1930): Bestimmung und Deutung von Angebotskurven. Ein Beispiel. *Zeitschrift für Nationalökonomie*, I, 669–679.
- Tukker, A., Dietzenbacher, E. (2013): Global Multiregional Input-Output Frameworks: An Introduction and Outlook. *Economic Systems Research*, 25, 1-19.
- Umweltbundesamt (2016): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, UBA-Hintergrund, Dessau-Roßlau.
- UNEP (2012): Global environment outlook GEO 5: environment for the future we want. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Program.
- UNEP (2014): Using Models for Green Economy Policymaking.
- UNEP (2016): Resource Efficiency: Potential and Economic Implications. A report of the International Resource Panel.
- UNEP (2017): Resource Efficiency: Potential and Economic Implications. A report of the International Resource Panel.
- [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). Aufgerufen am 12.04.2017.
- UN Environment (2011): Green Economy Report. Nairobi.
- United Nations (2013): World Population Prospects. The 2012 Revision. In: Comprehensive Tables, Vol. I. United Nations Economic and Social Affairs Department, New York.
- 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.
- VCI (2016): Daten und Fakten. Rohstoffbasis der chemischen Industrie. Stand 24. Februar 2016. <https://www.vci.de/vci/.../daten-fakten-rohstoffbasis-der-chemischen-industrie-de.pdf>
- von Weizsaecker, 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 (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz, Sondergutachten, Berlin.
- WBGU (2014): Klimaschutz als Weltbürgerbewegung, Sondergutachten, Berlin.
- 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 Treibhausgasminderungen. Dessau-Roßlau.
- Wiebe, K. S.; Bruckner, M.; Giljum, S.; Lutz, C. & Polzin, C. (2012): Carbon and Materials Embodied in the International Trade of Emerging Economies A Multiregional Input-Output Assessment of Trends Between 1995 and 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 16, 636-646.

- Wiedmann, T., (2009): A review of recent Multi-Region Input-Output Models used for Consumption-based Emission and Resource Accounting. *Ecological Economics*, 69, 211-222.
- Wiedmann, T., Barrett, J. (2013): Policy-Relevant Applications of Environmentally Extended MRIO Databases - Experiences from the UK. *Economic Systems Research*, 25, 143-156.
- Wiedmann, T., Lenzen, M., Turner, K., Barrett, J. (2007): Examining the global environmental impact of regional consumption activities—Part 2: Review of input–output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade. *Ecological economics* 61, 15-26.
- Wiedmann, T., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J., Kanemoto, K. (2015): The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 6271-6276.
- Wood, R., Stadler, K., Bulavskaya, T., Lutter, S., Giljum, S., de Koning, A., Kuenen, J., Schuetz, H., Acosta-Fernandez, J., Usabiaga, A., Simas, M., Ivanova, O., Weinzettel, J., Schmidt, J. H., Merciai, S., Tukker, A. (2015): Global Sustainability Accounting—Developing EXI-OBASE for Multi-Regional Footprint Analysis. *SUSTAINABILITY*, 7, 138-163.
- WU Wien (2016): Berechnungen basierend auf Exiobase 3.1 im Rahmen des UBA Projektes „Wissenschaftliche Konzeption und Ausarbeitung eines Berichts „Ressourcennutzung in Deutschland““ (FKZ 3714 93 105 0), Wien.
- Wu, R., Geng, Y., Liu, W. (2017): Trends of natural resource footprints in the BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries. *Journal of Cleaner Production*, 142, 775–782.

## 8 Appendix

### 8.1 Gliederungssystematiken

Tabelle 42: Gliederungssystematik der Wirtschaftsregionen

Nr.	Land/Region	Nr.	Land/Region	Nr.	Land/Region	Nr.	Land/Region
1	Österreich	11	Luxemburg	21	Ungarn	31	Kanada
2	Belgien	12	Malta	22	Lettland	32	Mexiko
3	Zypern	13	Niederlande	23	Litauen	33	Vereinigte Staaten
4	Estland	14	Portugal	24	Polen	34	China
5	Finnland	15	Slowakei	25	Rumänien	35	Indien
6	Frankreich	16	Slowenien	26	Schweden	36	Japan
7	Deutschland	17	Spanien	27	Vereinigtes Königreich	37	Korea
8	Griechenland	18	Bulgarien	28	Russland	38	Australien
9	Irland	19	Tschechien	29	Türkei	39	Rest der Welt
10	Italien	20	Dänemark	30	Brasilien	40	Welt

Quelle: Eigene Darstellung, GWS, basierend auf WIOD-Database

Tabelle 43: Gliederungssystematik der Gütergruppen

Nr.	Gütergruppe	Nr.	Gütergruppe
1	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	31	Sekundärrohstoffe
2	Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und DL	32	Energie (Strom, Gas) u. DL d. Energieversorgung
3	Fische und Fischereierzeugnisse	33	Wasser und DL der Wasserversorgung
4	Kohle und Torf	34	Bauarbeiten
5	Erdöl, Erdgas; DL f. Erdöl-, Erdgasgewinnung	35	Handelsleist. m. Kfz; Rep. an Kfz; Tankleistungen
6	Uran- und Thoriumerze	36	Handelsvermittlungs- u. Großhandelsleistungen
7	Erze	37	Einzelhandelsleistungen; Rep. an Gebrauchsgütern
8	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	38	Beherbergungs- u. Gaststätten-DL
9	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke	39	Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleitungen
10	Tabakerzeugnisse	40	Schiffahrtsleistungen
11	Textilien	41	Luftfahrtsleistungen
12	Bekleidung	42	DL bezügl. Hilfs- u. Nebentätigkeiten f. d. Verkehr
13	Leder und Lederwaren	43	Nachrichtenübermittlungs-DL
14	Holz; Holz-, Kork-, Flechtwaren (oh. Möbel)	44	DL der Kreditinstitute
15	Papier, Pappe und Waren daraus	45	DL der Versicherungen (oh. Sozialversicherung)
16	Verlags- u. Druckerz., besp. Ton-, Bild- & Datenträger	46	DL des Kredit- u. Versicherungshilfsgewerbes
17	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe	47	DL des Grundstücks- u. Wohnungswesens
18	Chemische Erzeugnisse	48	DL der Vermietung bewegl. Sachen (oh. Personal)
19	Gummi- und Kunststoffwaren	49	DL der Datenverarbeitung und von Datenbanken
20	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	50	Forschungs- und Entwicklungsleistungen
21	Metalle und Halbzeug daraus	51	Unternehmensbezogene DL
22	Metallerzeugnisse	52	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers.
23	Maschinen	53	Erziehungs- u. Unterrichts-DL
24	Büromasch., DV-Geräte u. -einricht.	54	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens
25	Geräte d. Elektrizitätserz., -verteilung u.ä.	55	Abwasser-, Abfallbeseitig.-u. sonst. Entsorg.leist.
26	Nachrichtentechn., Rundf.-, Fernsehger. elektro. Bauelem.	56	DL von Interessenvertretungen, Kirchen u.ä.
27	Medizin., meß-, regelungstechn., opt. Erz., Uhren	57	Kultur-, Sport- u. Unterhaltungs-DL
28	Kraftwagen und Kraftwagenteile	58	Sonstige DL
29	Sonst. Fahrzeuge	59	DL privater Haushalte
30	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sportger., Spielw. u. ä.		

Quelle: Eigene Darstellung, GWS, basierend auf NACE Rev. 2

Tabelle 44: Gliederungssystematik der Wirtschaftssektoren

Nr.	Wirtschaftsbereich	Nr.	Wirtschaftsbereich
1	Landwirtschaft, Jagd, Forstwirts. und Fischerei	19	Kfz-Handel, Rep. von Kfz; Tankstellen
2	Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden	20	Handelsverm. und Großhandel (o. Handel mit Kfz)
3	Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung	21	Einzelhandel (o. Handel mit Kfz u. Tankst.); Rep. v. Gebrauchsgütern
4	Textil- und Bekleidungsgewerbe	22	Gastgewerbe
5	Ledergewerbe	23	Landverkehr; Transport in Rohrfernleitungen
6	Holzgewerbe (ohne H.v. Möbeln)	24	Schifffahrt
7	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe	25	Luftfahrt
8	Kokerei, Mineralölverarbeitung, H. v. Brutstoffen	26	Hilfs- und Nebentätigkeiten für den Verkehr; Verkehrsvermittlung
9	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	27	Nachrichtenübermittlung
10	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	28	Kredit- und Versicherungswesen
11	Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	29	Grundstücks- und Wohnungswesen
12	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen	30	Vermietung beweglicher Sachen ohne Bedienungspersonal; sonstige Tätigkeiten
13	Maschinenbau	31	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
14	Herstellung v. Büromaschinen, DV-Geräten und -einr.; E-Technik, Feinmechanik und Optik	32	Erziehung und Unterricht
15	Fahrzeugbau	33	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen
16	Herstellung von Möbeln u.a., Recycling	34	Erbringung von sonstigen öffentlichen und persönlichen Dienstleistungen
17	Energie- und Wasserversorgung	35	Private Haushalte mit Hauspersonal
18	Baugewerbe		

Quelle: Eigene Darstellung, GWS, basierend auf ISIC Rev. 3.1

Tabelle 45: Gliederungssystematik in den Kontensystemen der VGR

Konto	Transaktionen und Kontensalden	Unterneh- men S.11 & S.12	Staat S.13	Priv. Haushalte & priv. Org. o. E. S.14 & S.15	Übrige Welt S.2
II.1.1	Einkommensentstehungskonto				
B.1g	Bruttowertschöpfung	x	x	x	
D.1	- Arbeitnehmerentgelt (Verwen- dung)	x	x	x	x
D.29	- Sonstige Produktionsabgaben	x	x	x	
D.39	+ Sonstige Produktionssubventio- nen (Aufkommen)	x	x	x	
B.2g	= Bruttobetriebsüberschuss	x	x	x	
II.1.2	Primäres Einkommensverteilungskonto				
D.1	+ Arbeitnehmerentgelt (Aufkom- men)			x	x
D.2	+ Empfangene Produktions- und Importabgaben		x		x
D.3	- Geleistete Subventionen		x		x
D.4	+ Empfangene Vermögenseinkom- men	x	x	x	x
D.4	- Geleistete Vermögenseinkom- men	x	x	x	x
B.5g	= Primäreinkommensbilanz	x	x	x	
II.2	Konto der sekundären Einkommensverteilung				
D.4	+ Einkommen- und Vermögens- steuern (Aufkommen)		x		x
D.5	- Einkommen- und Vermögens- steuern (Verwendung)	x	x	x	x
D.61+ D.62	- Nettosozialbeiträge und mone- täre Sozialleistungen (Verwen- dung)	x	x	x	x
D.61+ D.62	+ Nettosozialbeiträge und mone- täre Sozialleistungen (Aufkom- men)	x	x	x	x
D.7	- Sonstige laufende Transfers (Ver- wendung)	x	x	x	x
D.7	+ Sonstige laufende Transfers (Auf- kommen)	x	x	x	x
B.6g	= Verfügbares Einkommen	x	x	x	
II.4	Einkommensverwendungskonto				
D.8	- Nettoveränderung betrieblicher Versorgungsansprüche	x	x	x	
P.3	- Konsumausgaben		x	x	
B.8g	= Sparen (brutto)	x	x	x	

III.1. Konten zur Reinvermögensänderung und Sachvermögensbildung						
P.51	-	Bruttoanlageinvestitionen	x	x	x	
P.52	-	Vorratsveränderungen	x			
P.53	-	Nettozugang an Wertsachen	x			
D.9	-	Vermögenstransfers (Verwendung)	x	x	x	x
D.9	+	Vermögenstransfers (Aufkommen)	x	x	x	x
B.9	=	Finanzierungssaldo	x	x	x	x

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 46: Gliederungssystematik der Energieträger

Nr.	Energieträger	Nr.	Energieträger
1	Steinkohle	11	Andere Mineralölprodukte
2	Braunkohle	12	Erdgas
3	Koks	13	Abgeleitetes Gas
4	Rohöl, Erdgaskondensate	14	Industrie- und Siedlungsabfälle
5	Diesel	15	Biobenzin
6	Benzin	16	Biodiesel
7	Kerosin	17	Andere brennbare erneuerbare Energieträger
8	Leichtes Heizöl	18	Strom
9	Schweres Heizöl	19	Wärme
10	Naphta	20	Strom für E-Mobilität (Kfz)

Quelle: Eigene Darstellung, GWS, basierend auf WIOD Database

Tabelle 47: Gliederungssystematik der Energieträger in der Strom- und Wärmerzeugung

Nr.	Energieträger	Nr.	Energieträger
1	Biogas	7	Windkraft
2	Wasserkraft	8	Kernenergie
3	Geothermie	9	Kohle
4	Photovoltaik	10	Gas
5	Solarthermie (Warmwasser)	11	Öl
6	Solarthermie (Elektrizität)		

Quelle: Eigene Darstellung, GWS, basierend auf WIOD Database

Tabelle 48: Gliederungssystematiken der viehwirtschaftlichen Produktgruppen und landwirtschaftlichen Pflanzenarten

Nr.	Viehwirtschaftliche Produktgruppe	Nr.	Landwirtschaftliche Pflanzenart
1	Fleisch	1	Getreide (gemäßigte Klimazonen)
2	Wolle	2	Reis
3	Sonstige viehwirtschaftliche Produkte (Milch, Eier, Honig, etc.)	3	Mais
		4	Getreide (tropische Klimazonen)
		5	Hülsenfrüchte
		6	Wurzelgemüse (gemäßigte Klimazonen)
		7	Wurzelgemüse (tropische Klimazonen)
		8	Sonnenblumen
		9	Soja
		10	Erdnüsse
		11	Raps
		12	Zuckerrohr
		13	Übrige Pflanzenarten

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

## 8.2 Ergänzende Ergebnistabellen der ex-post-Analysen

Tabelle 49: SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 1995

Rohstoffe	Erstmaliges Aufkommen (RMI) bzw. letzte Verwendung						
	insge- samt	und zwar					
		Aufkommen		Letzte Verwendung			
		inl. Ent- nahme	Im- porte in RME	inländisch (RMC)	insge- samt	Konsum	Investiti- onen
insgesamt	2810	1308	1501	2195	1305	890	615
insgesamt abiotisch	2240	1080	1160	1716	878	838	525
Metallerze	431	0	431	216	116	100	215
fossile Energieträger	751	267	484	575	480	95	176
Kohle u. Torf	392	252	141	293	235	58	100
Erdöl, Erdgas	358	16	343	282	245	37	76
sonst. Mineralien	1058	813	246	924	282	642	134
Biomasse	569	228	341	479	428	52	90
aus der Landwirtschaft	473	204	268	405	377	28	67
aus der Forstwirtschaft	95	24	71	73	49	24	22
aus der Fischerei u. Jagd	2	0	2	1	1	0	0

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 50: SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2000

Rohstoffe	Erstmaliges Aufkommen (RMI) bzw. letzte Verwendung						
	insgesamt	und zwar					
		Aufkommen		Letzte Verwendung			Exporte in RME
		inl. Entnahmen	Importe in RME	inländisch (RMC)	Konsum	Investitionen	
insgesamt	2968	1209	1760	2107	1313	794	862
insgesamt abiotisch	2361	960	1401	1628	890	738	733
Metallerze	478	0	477	212	112	100	266
fossile Energieträger	865	222	644	590	506	84	275
Kohle u. Torf	349	205	144	228	192	37	121
Erdöl, Erdgas	516	16	500	362	314	47	154
sonst. Mineralien	1018	738	280	826	272	554	192
Biomasse	608	248	359	479	422	56	129
aus der Landwirtschaft	491	216	275	400	370	30	91
aus der Forstwirtschaft	115	33	83	78	51	27	37
aus der Fischerei u. Jagd	2	0	1	1	1	0	0

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 51: SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2005

Rohstoffe	Erstmaliges Aufkommen (RMI) bzw. letzte Verwendung						
	insgesamt	und zwar					
		Aufkommen		Letzte Verwendung			Exporte in RME
		inl. Entnahmen	Importe in RME	inländisch (RMC)	Konsum	Investitionen	
insgesamt	3028	1060	1967	1918	1281	637	1109
insgesamt abiotisch	2403	822	1581	1452	862	590	951
Metallerze	557	0	556	209	116	93	348
fossile Energieträger	915	222	693	563	484	78	352
Kohle u. Torf	423	206	217	251	206	45	172
Erdöl, Erdgas	492	15	477	312	279	33	180
sonst. Mineralien	931	600	331	681	262	419	251
Biomasse	625	238	387	466	419	47	158
aus der Landwirtschaft	509	203	306	397	370	27	112
aus der Forstwirtschaft	115	35	80	69	49	20	46
aus der Fischerei u. Jagd	2	0	1	1	1	0	0

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 52: SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2010

Rohstoffe	Erstmaliges Aufkommen (RMI) bzw. letzte Verwendung						
	insgesamt	und zwar					
		Aufkommen		Letzte Verwendung			Exporte in RME
		inl. Entnahmen	Importe in RME	inländisch (RMC)	Konsum	Investitionen	
insgesamt	2955	996	1958	1745	1168	577	1210
insgesamt abiotisch	2283	762	1521	1283	758	526	1000
Metallerze	572	0	572	202	111	91	370
fossile Energieträger	814	195	618	475	407	68	339
Kohle u. Torf	454	184	270	253	214	38	201
Erdöl, Erdgas	360	12	348	222	192	30	138
sonst. Mineralien	897	566	331	606	240	366	291
Biomasse	672	234	437	461	410	51	210
aus der Landwirtschaft	552	201	351	394	361	33	159
aus der Forstwirtschaft	118	33	85	66	48	19	51
aus der Fischerei u. Jagd	1	0	1	1	1	0	0

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 53: SimRess/GWS-Abschätzungen, Aufkommen und Verwendung von Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen in Millionen Tonnen, 2015

Rohstoffe	Erstmaliges Aufkommen (RMI) bzw. letzte Verwendung						
	insgesamt	und zwar					
		Aufkommen		Letzte Verwendung			Exporte in RME
		inl. Entnahmen	Importe in RME	inländisch (RMC)	Konsum	Investitionen	
insgesamt	3207	995	2212	1877	1199	678	1330
insgesamt abiotisch	2526	753	1773	1412	784	628	1115
Metallerze	716	0	716	278	130	148	438
fossile Energieträger	861	191	670	498	400	98	364
Kohle u. Torf	499	181	318	280	216	64	219
Erdöl, Erdgas	362	9	352	218	184	34	144
sonst. Mineralien	950	563	387	636	255	382	313
Biomasse	681	242	439	466	415	51	215
aus der Landwirtschaft	557	207	351	396	365	30	162
aus der Forstwirtschaft	122	35	87	69	49	20	53
aus der Fischerei u. Jagd	1	0	1	1	1	0	0

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 54: Biomasse - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 5 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Exporte von Produktgruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	EX RME PRIEX	33 1,79	43 1,59	53 1,47	86 1,55	86 1,37	+159% -24%
2 [2]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	EX RME PRIEX	20 7,00	33 7,06	38 6,31	43 5,18	47 4,95	+136% -29%
3 [4]	Fahrzeuge [DM]	EX RME PRIEX	5 0,06	8 0,06	10 0,06	10 0,05	11 0,05	+124% -26%
4 [6]	Erz. des Papier, Verlags- und Druckgewerbes [DE]	EX RME PRIEX	4 0,31	7 0,35	8 0,30	11 0,28	11 0,23	+186% -24%
5 [3]	Chemische Erzeugnisse [DG]	EX RME PRIEX	6 0,12	6 0,09	8 0,08	11 0,08	11 0,06	+80% -46%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	EX RME PRIEX	22 0,08	32 0,08	41 0,08	49 0,08	48 0,06	+121% -28%
Insgesamt		EX RME PRIEX	90 0,21	129 0,20	158 0,18	210 0,20	215 0,16	+139% -24%

EX RME = Primär-Rohstoffbedarf Biomasse für Exporte (Exporte in RME) in Mio. t

PRIEX = Primär-Rohstoffintensität Biomasse der Exporte in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 55: Fossile Energieträger - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Exporte von Produktgruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [2]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	EX RME PRIEX	27 0,61	35 0,55	47 0,60	50 0,51	53 0,44	+95% -29%
2 [3]	Fahrzeuge [DM]	EX RME PRIEX	22 0,29	37 0,28	46 0,26	42 0,23	50 0,22	+124% -25%
3 [1]	Chemische Erzeugnisse [DG]	EX RME PRIEX	30 0,57	43 0,57	49 0,47	45 0,32	44 0,26	+50% -55%
4 [7]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	EX RME PRIEX	12 12,08	19 14,83	20 16,62	35 13,81	38 15,53	+218% +29%
5 [5]	Maschinen [DK]	EX RME PRIEX	16 0,24	19 0,22	25 0,22	29 0,21	31 0,18	+95% -23%
6 [6]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	EX RME PRIEX	13 0,21	19 0,20	23 0,20	25 0,19	29 0,18	+128% -15%
7 [4]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	EX RME PRIEX	18 3,48	43 4,12	58 3,27	26 2,11	26 1,90	+44% -45%
8 [11]	Verkehrsleist., Nachrichten-übermittlungs-DL [I]	EX RME PRIEX	5 0,28	9 0,37	11 0,30	14 0,24	17 0,23	+284% -17%
9 [12]	Gummi- und Kunststoffwaren [DH]	EX RME PRIEX	4 0,36	6 0,31	9 0,33	10 0,27	10 0,23	+143% -37%
10 [10]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	EX RME PRIEX	5 0,28	8 0,28	9 0,25	11 0,20	10 0,17	+103% -40%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	EX RME PRIEX	24 0,33	36 0,31	55 0,34	53 0,24	53 0,20	+123% -41%
Insgesamt		EX RME PRIEX	176 0,41	275 0,41	352 0,40	339 0,31	364 0,27	+107% -34%

EX RME = Primär-Rohstoffbedarf fossile Energieträger für Exporte (Exporte in RME) in Mio. t

PRIEX = Primär-Rohstoffintensität fossile Energieträger der Exporte in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 56: Mineralien - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 5 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Exporte von Produkt- gruppe ...	EX RME	1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Erze, Steine u. Erden [CB]	EX RME PRIEX	28 54,3	42 74,2	47 43,2	72 43,6	67 41,9	+138% -23%
2 [2]	Chemische Erzeugnisse [DG]	EX RME PRIEX	16 0,31	23 0,30	38 0,37	38 0,27	42 0,24	+165% -20%
3 [3]	Fahrzeuge [DM]	EX RME PRIEX	16 0,20	24 0,18	33 0,18	31 0,17	40 0,17	+150% -17%
4 [4]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	EX RME PRIEX	15 2,77	24 2,91	33 3,18	32 2,99	33 2,58	+117% -7%
5 [5]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	EX RME PRIEX	12 0,27	14 0,23	21 0,27	26 0,27	29 0,24	+144% -11%
	Sonstige Waren und Dienst- leistungen	EX RME PRIEX	47 0,19	64 0,17	79 0,16	91 0,14	102 0,13	+118% -32%
Insgesamt		EX RME PRIEX	134 0,32	192 0,29	251 0,29	291 0,27	313 0,24	+134% -25%

EX RME = Primär-Rohstoffbedarf Mineralien für Exporte (Exporte in RME) in Mio. t

PRIEX = Primär-Rohstoffintensität Mineralien der Exporte in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 57: Metallerze - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Exporte von Waren und Dienstleistungen (Exporte in RME) der 5 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Exporte von Produkt- gruppe ...	EX RME	1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	EX RME PRIEX	99 2,22	119 1,89	159 2,02	180 1,87	208 1,70	+110% -23%
2 [2]	Fahrzeuge [DM]	EX RME PRIEX	41 0,53	61 0,45	78 0,44	67 0,37	86 0,37	+108% -31%
3 [3]	Maschinen [DK]	EX RME PRIEX	31 0,46	34 0,38	47 0,40	51 0,37	59 0,34	+90% -25%
4 [4]	Büromaschinen, DV-Geräte, E- Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	EX RME PRIEX	20 0,34	24 0,26	31 0,27	33 0,25	40 0,25	+101% -25%
5 [5]	Chemische Erzeugnisse [DG]	EX RME PRIEX	12 0,24	13 0,17	14 0,14	17 0,12	20 0,11	+58% -52%
	Sonstige Waren und Dienstleis- tungen	EX RME PRIEX	11 0,09	16 0,08	19 0,07	22 0,06	25 0,05	+128% -40%
Insgesamt		EX RME PRIEX	215 0,51	266 0,41	348 0,40	370 0,35	438 0,33	+104% -35%

EX RME = Primär-Rohstoffbedarf Metallerze für Exporte (Exporte in RME) in Mio. t

PRIEX = Primär-Rohstoffintensität Metallerze der Exporte in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 58: Biomasse - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Importe von Produkt- gruppe ...		1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	IM RME PRIIM	128 6,08	131 4,54	141 4,33	169 3,15	170 2,51	+33% -59%
2 [2]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	IM RME PRIIM	67 5,07	68 4,24	74 4,42	71 2,96	67 2,77	0% -45%
3 [3]	Textilien, Bekleidung [DB]	IM RME PRIIM	22 0,86	17 0,55	20 0,68	22 0,74	20 0,64	-8% -25%
4 [6]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	IM RME PRIIM	13 1,23	13 0,91	13 0,86	18 0,70	19 0,61	+51% -50%
5 [4]	Beherbergungs- u. Gaststätten-DL [H]	IM RME PRIIM	16 6,81	16 2,42	15 2,27	17 2,28	17 1,88	+11% -72%
6 [7]	Fahrzeuge [DM]	IM RME PRIIM	9 0,22	12 0,17	15 0,16	16 0,13	17 0,12	+86% -47%
7 [9]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	IM RME PRIIM	6 0,11	9 0,08	10 0,09	12 0,10	15 0,10	+131% -13%
8 [8]	Chemische Erzeugnisse [DG]	IM RME PRIIM	7 0,22	8 0,16	11 0,16	14 0,16	14 0,15	+93% -32%
9 [15]	Erz. des Papier, Verlags- und Druckgewerbes [DE]	IM RME PRIIM	5 0,44	8 0,49	9 0,48	11 0,45	11 0,40	+120% -8%
10 [5]	Bauarbeiten [F]	IM RME PRIIM	15 4,08	14 3,38	10 3,03	10 3,31	10 2,80	-33% -32%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	IM RME PRIIM	53 0,28	63 0,23	68 0,21	78 0,19	78 0,16	+48% -43%
Insgesamt		IM RME PRIIM	341 0,83	359 0,59	387 0,53	437 0,49	439 0,40	+29% -51%

IM RME = Primär-Rohstoffbedarf Biomasse für Importe (Importe in RME) in Mio. t

PRIIM = Primär-Rohstoffintensität Biomasse der Importe in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 59: Fossile Energieträger - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Importe von Produktgruppe ...	Pro- duktgruppe ...	1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Kokereierz., Mineralölierz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	IM RME PRIIM	77 7,81	153 7,58	149 7,50	89 3,25	90 3,23	+17% -59%
2 [3]	Fahrzeuge [DM]	IM RME PRIIM	34 0,84	50 0,72	64 0,68	63 0,54	72 0,50	+112% -40%
3 [9]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	IM RME PRIIM	21 0,37	29 0,28	35 0,31	44 0,37	64 0,42	+199% 13%
4 [4]	Chemische Erzeugnisse [DG]	IM RME PRIIM	31 0,92	48 0,99	56 0,81	55 0,63	56 0,58	+79% -37%
5 [7]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	IM RME PRIIM	24 0,60	30 0,54	43 0,65	45 0,52	52 0,45	+113% -25%
6 [6]	Maschinen [DK]	IM RME PRIIM	25 1,06	30 0,85	38 0,84	44 0,67	50 0,62	+105% -42%
7 [2]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	IM RME PRIIM	74 1,90	66 1,26	62 1,05	34 1,07	33 1,10	-55% -42%
8 [12]	Verkehrsleist., Nachrichtenübermittlungs-DL [I]	IM RME PRIIM	16 1,03	22 0,86	24 0,80	27 0,55	30 0,50	+93% -51%
9 [8]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	IM RME PRIIM	23 1,08	26 0,90	27 0,81	24 0,45	24 0,36	+7% -67%
10 [5]	Bauarbeiten [F]	IM RME PRIIM	28 7,57	32 7,65	25 7,67	24 7,60	24 6,59	-15% -13%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	IM RME PRIIM	130 1,04	158 0,93	172 0,89	169 0,66	174 0,57	+34% -45%
Insgesamt		IM RME PRIIM	484 1,18	644 1,05	693 0,95	618 0,69	670 0,62	+39% -48%

IM RME = Primär-Rohstoffbedarf fossile Energieträger für Importe (Importe in RME) in Mio. t

PRIIM = Primär-Rohstoffintensität fossile Energieträger der Importe in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 60: Mineralien - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Importe von Produktgruppe ...	Pro- duktgruppe ...	1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [3]	Chemische Erzeugnisse [DG]	IM RME PRIIM	19 0,55	27 0,54	43 0,63	44 0,51	52 0,54	+180% -2%
2 [2]	Fahrzeuge [DM]	IM RME PRIIM	19 0,47	28 0,40	39 0,41	42 0,36	52 0,36	+169% -24%
3 [4]	Büromaschinen, DV-Ge- räte, E-Technik, Feinme- chanik u. Optik [DL]	IM RME PRIIM	15 0,25	21 0,20	25 0,22	33 0,27	49 0,32	+237% +27%
4 [1]	Bauarbeiten [F]	IM RME PRIIM	69 18,52	68 16,34	59 18,31	42 13,19	42 11,56	-39% -38%
5 [6]	Maschinen [DK]	IM RME PRIIM	13 0,57	16 0,47	23 0,50	29 0,44	34 0,42	+156% -27%
6 [8]	Metalle u. Halbzeug dar- aus, Metallerz. [DJ]	IM RME PRIIM	9 0,23	11 0,20	17 0,26	23 0,27	28 0,24	+196% +4%
7 [5]	Nahrungs- und Futtermit- tel, Getränke, Tabakerz. [DA]	IM RME PRIIM	14 0,68	16 0,55	18 0,56	17 0,32	18 0,27	+29% -60%
8 [10]	Möbel, Schmuck, Musikin- str., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	IM RME PRIIM	8 0,82	9 0,62	10 0,62	12 0,48	14 0,47	+73% -43%
9 [19]	Gummi- und Kunststoffwa- ren [DH]	IM RME PRIIM	4 0,42	5 0,35	7 0,40	9 0,30	11 0,29	+199% -32%
10 [9]	Textilien, Bekleidung [DB]	IM RME PRIIM	9 0,35	10 0,31	11 0,36	10 0,35	11 0,35	+24% 0%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	IM RME PRIIM	66 0,46	70 0,33	78 0,33	71 0,25	75 0,23	+14% -49%
Insgesamt		IM RME PRIIM	246 0,60	280 0,46	331 0,45	331 0,37	387 0,36	57% -41%

IM RME = Primär-Rohstoffbedarf Mineralien für Importe (Importe in RME Mineralien) in Mio. t

PRIIM = Primär-Rohstoffintensität Mineralien der Importe in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 61: Metallerze - Deutschlands Primär-Rohstoffbedarf für Importe von Waren und Dienstleistungen (Importe in RME) der 10 wichtigsten Produktgruppen, 1995 bis 2015

Rang 2015 [Rang 1995]	Importe von Produktgruppe ...	IM RME PRIIM	1995	2000	2005	2010	2015	Δ
1 [1]	Metalle u. Halbzeug dar- aus, Metallerz. [DJ]	IM RME PRIIM	116 2,87	134 2,37	172 2,61	185 2,12	224 1,97	+94% -32%
2 [2]	Fahrzeuge [DM]	IM RME PRIIM	79 1,94	100 1,44	125 1,32	110 0,94	133 0,93	+69% -52%
3 [4]	Büromaschinen, DV-Ge- räte, E-Technik, Feinme- chanik u. Optik [DL]	IM RME PRIIM	42 0,72	44 0,43	50 0,44	63 0,52	106 0,68	+154% -4%
4 [3]	Maschinen [DK]	IM RME PRIIM	63 2,72	69 1,96	81 1,79	84 1,28	103 1,26	+63% -54%
5 [6]	Chemische Erzeugnisse [DG]	IM RME PRIIM	21 0,63	22 0,44	23 0,33	26 0,29	30 0,31	+40% -51%
6 [5]	Bauarbeiten [F]	IM RME PRIIM	31 8,34	28 6,64	23 7,04	24 7,42	26 7,12	-17% -15%
7 [7]	Möbel, Schmuck, Musikin- str., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	IM RME PRIIM	12 1,22	11 0,79	11 0,69	13 0,51	15 0,50	+23% -59%
8 [13]	Verkehrsleist., Nachrich- tenübermittlungs-DL [I]	IM RME PRIIM	5 0,32	5 0,20	6 0,20	7 0,15	9 0,14	+79% -55%
9 [8]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	IM RME PRIIM	8 1,89	8 2,41	8 2,15	7 1,15	8 1,03	-1% -45%
10 [9]	Nahrungs- und Futtermit- tel, Getränke, Tabakerz. [DA]	IM RME PRIIM	8 0,37	8 0,28	8 0,24	7 0,14	8 0,12	+5% -68%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	IM RME PRIIM	46 0,29	49 0,22	51 0,20	48 0,17	54 0,17	+18% -42%
Insgesamt		IM RME PRIIM	431 1,05	477 0,78	556 0,76	572 0,64	716 0,66	66% -37%

IM RME = Primär-Rohstoffbedarf Metallerze für Importe (Importe in RME Metallerze) in Mio. t

PRIIM = Primär-Rohstoffintensität Metallerze der Importe in kg je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

### 8.3 Ergänzende Ergebnisdarstellungen des Umfeldszenarios „Klimaaktives Deutschland“

Tabelle 62: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität Biomasse von Konsum und Investitionen (RMC Biomasse) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [2]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	PRB PRI 150 4,35	145 bis 148 3,52 bis 3,73	161 bis 169 2,87 bis 3,42	+7% bis +13% -21% bis -34%
2 [1]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI 155 1,39	126 bis 130 1,01 bis 1,08	118 bis 127 0,81 bis 0,98	-18% bis -24% -30% bis -42%
3 [3]	Beherbergungs- u. Gaststät- ten-DL [H]	PRB PRI 21,9 0,29	17,8 bis 18,4 0,21 bis 0,23	15,9 bis 17,1 0,17 bis 0,2	-22% bis -27% -30% bis -42%
4 [5]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	PRB PRI 15,4 0,45	13,1 bis 13,3 0,33 bis 0,33	12,6 bis 13 0,26 bis 0,28	-15% bis -18% -38% bis -43%
5 [6]	DL d. Gesundheits-, Veteri- när- u. Sozialwesens [N]	PRB PRI 14,9 0,054	12,5 bis 12,9 0,039 bis 0,041	11,5 bis 12,3 0,03 bis 0,036	-18% bis -23% -34% bis -45%
6 [7]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	PRB PRI 12,2 0,059	10,8 bis 11,1 0,045 bis 0,047	10,4 bis 11 0,036 bis 0,043	-10% bis -15% -28% bis -39%
7 [4]	Textilien, Bekleidung [DB]	PRB PRI 17,2 0,56	11,7 bis 11,8 0,32 bis 0,34	10,4 bis 10,5 0,24 bis 0,27	-39% bis -40% -51% bis -57%
8 [9]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI 8,8 0,094	7,5 bis 7,5 0,063 bis 0,066	9,2 bis 9,6 0,047 bis 0,054	+4% bis +9% -43% bis -50%
9 [8]	Bauarbeiten [F]	PRB PRI 12 0,056	8,8 bis 9 0,042 bis 0,043	7,9 bis 8,2 0,032 bis 0,034	-32% bis -35% -39% bis -43%
10 [10]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI 6,7 0,049	5,8 bis 5,8 0,038 bis 0,039	5,7 bis 5,7 0,031 bis 0,035	-14% bis -15% -29% bis -36%
	Sonstige Waren und Dienst- leistungen	PRB PRI 52 0,037	41,3 bis 41,6 0,027 bis 0,028	37 bis 37,5 0,02 bis 0,023	-27% bis -28% -39% bis -46%
Insgesamt		PRB PRI 466 0,18	400 bis 409 0,14 bis 0,14	401 bis 420 0,11 bis 0,13	-10% bis -14% -26% bis -37%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf Biomasse für Konsum und Investitionen (RMC) in 1000 t

PRI = Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen in kg Biomasse je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 63: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität fossile Energieträger für Konsum und Investitionen (RMC fossile Energieträger) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 15 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [1]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	PRB PRI 2,05	75 57 bis 57 2,14 bis 2,14	30,6 bis 32,6 2,25 bis 2,29	-57% bis -59% +10% bis +12%
2 [4]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI 0,42	39,3 31,3 bis 32,2 0,27 bis 0,27	21,1 bis 22 0,11 bis 0,12	-44% bis -46% -72% bis -73%
3 [3]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	PRB PRI 8,5	57 41,5 bis 41,9 8,4 bis 8,4	17,3 bis 17,3 0,047 bis 0,047	-70% bis -70% -33% bis -33%
4 [5]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI 0,21	28,5 19,4 bis 20 0,13 bis 0,13	8,7 bis 9,6 0,05 bis 0,05	-66% bis -69% -75% bis -75%
5 [8]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI 0,43	19,7 14,5 bis 15 0,28 bis 0,28	7,4 bis 8,2 0,12 bis 0,12	-58% bis -63% -71% bis -71%
6 [12]	Verkehrsleist., Nachrichten-übermittlungs-DL [I]	PRB PRI 0,17	16,3 11,9 bis 12,4 0,12 bis 0,12	7,1 bis 8 0,07 bis 0,07	-51% bis -56% -58% bis -58%
7 [7]	Maschinen [DK]	PRB PRI 0,31	22,9 15,7 bis 16,2 0,19 bis 0,19	7,1 bis 7,8 0,073 bis 0,073	-66% bis -69% -76% bis -77%
8 [6]	Bauarbeiten [F]	PRB PRI 0,12	26,8 15 bis 15,7 0,073 bis 0,073	6,9 bis 7,9 0,03 bis 0,031	-71% bis -74% -75% bis -75%
9 [9]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	PRB PRI 0,072	19,2 12,5 bis 12,9 0,05 bis 0,05	6,4 bis 7,1 0,02 bis 0,02	-63% bis -67% -70% bis -70%
10 [11]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	PRB PRI 0,083	17,3 11,4 bis 11,7 0,05 bis 0,05	5,3 bis 5,9 0,02 bis 0,02	-66% bis -70% -75% bis -75%
11 [10]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI 0,16	18 11,4 bis 11,9 0,095 bis 0,095	5 bis 5,7 0,039 bis 0,039	-69% bis -72% -76% bis -76%
12 [14]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	PRB PRI 0,36	12 8,5 bis 8,7 0,21 bis 0,22	4 bis 4,4 0,09 bis 0,09	-64% bis -67% -76% bis -76%
13 [13]	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens [N]	PRB PRI 0,05	14 8,7 bis 9 0,03 bis 0,03	3,7 bis 4,2 0,01 bis 0,01	-71% bis -74% -79% bis -79%
14 [15]	Textilien, Bekleidung [DB]	PRB PRI 0,37	11 7,7 bis 7,9 0,22 bis 0,22	3,3 bis 3,7 0,08 bis 0,09	-68% bis -71% -77% bis -77%
15 [16]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	PRB PRI 0,34	9 6 bis 6,2 0,2 bis 0,2	2,8 bis 3,1 0,07 bis 0,07	-63% bis -67% -80% bis -80%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	PRB PRI 0,119	111 63 bis 66 0,06 bis 0,06	16,9 bis 18,8 0,01 bis 0,02	-83% bis -85% -88% bis -88%
Insgesamt		PRB PRI 0,19	498 336 bis 344 0,12 bis 0,12	154 bis 166 0,05 bis 0,05	-67% bis -69% -75% bis -75%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf fossile Energieträger für Konsum und Investitionen (RMC) in 1000 t

PRI = Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen in kg fossile Energieträger je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 64: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität Mineralien von Konsum und Investitionen (RMC Mineralien) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050	
1 [1]	Bauarbeiten [F]	PRB PRI	333 1,55	279 bis 292 1,36 bis 1,37	273 bis 315 1,2 bis 1,22	-5% bis -18% -21% bis -23%
2 [2]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI	31 0,33	35,4 bis 36,8 0,31 bis 0,31	49 bis 52,3 0,27 bis 0,27	+58% bis +69% -17% bis -18%
3 [3]	DL des Grundstücks- u. Wohnungsw., der Verm. bewegl. Sachen, wirts. DL a.n.g. [K]	PRB PRI	29,1 0,077	28,1 bis 29,4 0,066 bis 0,066	26,8 bis 31 0,056 bis 0,057	-8% bis +7% -27% bis -27%
4 [4]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI	28,6 0,62	28 bis 29,5 0,53 bis 0,54	26,7 bis 31,4 0,45 bis 0,48	-7% bis +10% -23% bis -27%
5 [5]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	PRB PRI	25,8 0,12	26,1 bis 27 0,11 bis 0,11	25,9 bis 29,5 0,1 bis 0,1	+0% bis +14% -14% bis -16%
6 [7]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	PRB PRI	19 3,45	20,3 bis 21,1 3,24 bis 3,25	21,7 bis 24,7 3,04 bis 3,09	+14% bis +30% -11% bis -12%
7 [6]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI	21,7 0,16	21,3 bis 22,2 0,14 bis 0,15	21,4 bis 24,2 0,13 bis 0,13	-1% bis +12% -17% bis -19%
8 [8]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI	18,9 0,17	16,7 bis 17,5 0,14 bis 0,14	15 bis 17,5 0,12 bis 0,12	-7% bis -20% -30% bis -32%
9 [9]	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens [N]	PRB PRI	16,2 0,059	15,5 bis 16,1 0,049 bis 0,05	14,1 bis 16,2 0,041 bis 0,042	0% bis -13% -29% bis -30%
10 [10]	Maschinen [DK]	PRB PRI	15,4 0,21	14,5 bis 15,1 0,18 bis 0,18	13,9 bis 15,8 0,14 bis 0,15	-10% bis +2% -30% bis -32%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	PRB PRI	98 0,093	92 bis 96 0,082 bis 0,082	88 bis 101 0,073 bis 0,075	-10% bis +3% -20% bis -22%
Insgesamt		PRB PRI	636 0,25	577 bis 603 0,2 bis 0,21	576 bis 658 0,18 bis 0,19	-9% bis +3% -24% bis -25%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf Mineralien für Konsum und Investitionen (RMC) in 1000 t

PRI = Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen in kg Mineralien je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 65: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität Metallerze von Konsum und Investitionen (RMC Metallerze) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 10 wichtigsten Produktgruppen

Rang 2050 [2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050	
1 [1]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI	65 0,7	64 bis 70 0,56 bis 0,59	77 bis 89 0,43 bis 0,46	+19% bis +36% -35% bis -38%
2 [2]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI	47 0,34	40,3 bis 43,7 0,27 bis 0,29	31,7 bis 38,8 0,19 bis 0,21	-18% bis -33% -38% bis -43%
3 [3]	Maschinen [DK]	PRB PRI	44,1 0,6	37,3 bis 40,3 0,45 bis 0,48	29,6 bis 35,8 0,31 bis 0,33	-19% bis -33% -44% bis -49%
4 [5]	Metalle u. Halbzeug daraus, Metallerz. [DJ]	PRB PRI	16,4 0,67	16,2 bis 17,5 0,54 bis 0,57	15,2 bis 18,4 0,37 bis 0,41	-7% bis +12% -39% bis -45%
5 [4]	Bauarbeiten [F]	PRB PRI	25,9 0,12	18,5 bis 20,2 0,09 bis 0,095	13,9 bis 17,4 0,061 bis 0,068	-33% bis -46% -44% bis -49%
6 [7]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI	10,2 0,22	9,9 bis 10,6 0,19 bis 0,19	9 bis 10,7 0,15 bis 0,16	-12% bis +5% -26% bis -31%
7 [6]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	PRB PRI	11,7 0,34	9,5 bis 10,3 0,24 bis 0,25	7 bis 8,5 0,16 bis 0,17	-27% bis -40% -50% bis -54%
8 [8]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	PRB PRI	7,6 0,029	6,6 bis 7,1 0,024 bis 0,025	5,5 bis 6,5 0,018 bis 0,02	-14% bis -28% -32% bis -37%
9 [9]	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers. [L]	PRB PRI	6,7 0,032	5,6 bis 6 0,024 bis 0,025	4 bis 5 0,016 bis 0,017	-26% bis -40% -46% bis -51%
10 [11]	DL d. Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens [N]	PRB PRI	5,2 0,019	4,4 bis 4,7 0,014 bis 0,014	3,2 bis 3,9 0,009 bis 0,01	-26% bis -39% -47% bis -51%
	Sonstige Waren und Dienstleistungen	PRB PRI	38 0,031	29,7 bis 31,8 0,022 bis 0,023	21,5 bis 25,8 0,015 bis 0,016	-32% bis -43% -49% bis -52%
Insgesamt		PRB PRI	278 0,11	242 bis 262 0,086 bis 0,089	218 bis 260 0,069 bis 0,073	-7% bis -21% -31% bis -35%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf Metallerze für Konsum und Investitionen (RMC) in 1000 t

PRI = Primär-Rohstoffintensität von Konsum und Investitionen in kg Metallerze je 2010€

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 66: Klimaaktives Deutschland: Primär-Rohstoffbedarf und Primär-Rohstoffintensität von privatem Konsum (RMC privater Konsum) in Deutschland, 2015 bis 2050 – die 15 wichtigsten Produktgruppen

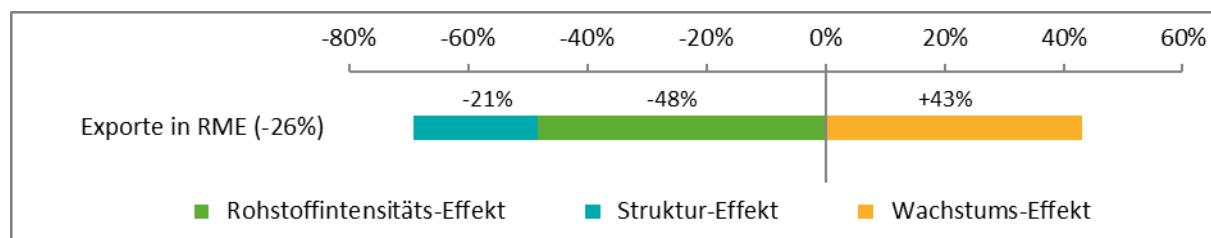
Rang 2050 [2015]	Ausgaben für Produktgruppe ...	2015	2030	2050	Δ 2015 – 2050
1 [2]	Erz. der Land- und Forstwirts. [A]	PRB PRI 4,81	148 3,86 bis 4,07	144 bis 146 3,07 bis 3,6	158 bis 163 +7% bis +10% -25% bis -36%
2 [1]	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerz. [DA]	PRB PRI 1,76	196 1,26 bis 1,33	159 bis 162 0,96 bis 1,12	-24% bis -26% -36% bis -45%
3 [6]	Fahrzeuge [DM]	PRB PRI 0,73	58 0,57 bis 0,58	47,3 bis 50,1 0,39 bis 0,41	-28% bis -38% -44% bis -46%
4 [3]	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe [DF]	PRB PRI 2,29	86 2,32 bis 2,33	62 bis 63 2,37 bis 2,41	-59% bis -62% +3% bis +5%
5 [9]	DL des Grundstücks- u. Woh- nungsw., der Verm. bewegl. Sachen, wirts. DL a.n.g. [K]	PRB PRI 39,1	35,2 bis 36,7 0,097 bis 0,098	30,8 bis 35,2 0,076 bis 0,077	-10% bis -21% -36% bis -37%
6 [7]	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sport- und Spielw., sonst. Erz., Recycling [DN]	PRB PRI 44,5 1,5	37,5 bis 39,1 1,1 bis 1,1	30,8 bis 34,5 0,78 bis 0,78	-23% bis -31% -48% bis -48%
7 [11]	Chemische Erzeugnisse [DG]	PRB PRI 34,2 1,36	29,5 bis 30,9 1,06 bis 1,07	24,3 bis 28,1 0,76 bis 0,79	-18% bis -29% -42% bis -44%
8 [12]	Beherbergungs- u. Gaststät- ten-DL [H]	PRB PRI 33,9 0,44	27,1 bis 27,2 0,32 bis 0,33	23,1 bis 23,3 0,24 bis 0,27	-31% bis -32% -39% bis -46%
9 [8]	Textilien, Bekleidung [DB]	PRB PRI 40,6 1,29	29,5 bis 30,2 0,82 bis 0,84	22,2 bis 23,7 0,54 bis 0,57	-42% bis -45% -56% bis -58%
10 [15]	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden [DI]	PRB PRI 19,9 3,91	21,2 bis 22 3,5 bis 3,52	21,8 bis 24,8 3,12 bis 3,18	+9% bis +24% -19% bis -20%
11 [10]	Handelsleist., Rep. von KFZ u. Gebrauchsgütern [G]	PRB PRI 34,3 0,16	26,4 bis 27,4 0,12 bis 0,12	19,2 bis 21,6 0,088 bis 0,088	-37% bis -44% -45% bis -45%
12 [14]	Büromaschinen, DV-Geräte, E-Technik, Feinmechanik u. Optik [DL]	PRB PRI 29,6 1,15	23,9 bis 25,1 0,82 bis 0,83	17,5 bis 20 0,51 bis 0,52	-32% bis -41% -55% bis -56%
13 [13]	Verkehrsleist., Nachrichten- übermittlungs-DL [I]	PRB PRI 29,8 0,33	23,3 bis 24,3 0,25 bis 0,25	16,7 bis 19 0,17 bis 0,17	-36% bis -44% -48% bis -48%
14 [5]	Kohle, Torf, Erdöl, Erdgas [CA]	PRB PRI 60 9,4	41,8 bis 42,1 8,5 bis 8,6	17,1 bis 17,1 0,59 bis 0,71	-71% bis -72% -39% bis -39%
15 [17]	Sonstige öffentliche und per- sönliche DL [O]	PRB PRI 18,2 0,16	15,3 bis 15,8 0,12 bis 0,12	12,5 bis 14 0,087 bis 0,088	-23% bis -31% -45% bis -45%
	Sonstige Waren und Dienst- leistungen	PRB PRI 181 0,539	132 bis 137 0,35 bis 0,35	84 bis 94 0,2 bis 0,2	-48% bis -54% -62% bis -62%
Insgesamt		PRB PRI 1053 0,68	861 bis 874 0,51 bis 0,52	702 bis 735 0,36 bis 0,39	-30% bis -33% -43% bis -47%

PRB = Primär-Rohstoffbedarf für privaten Konsum (RMC privater Konsum) in 1000 t

PRI = Primär-Rohstoffintensität von privatem Konsum in kg je 2010€

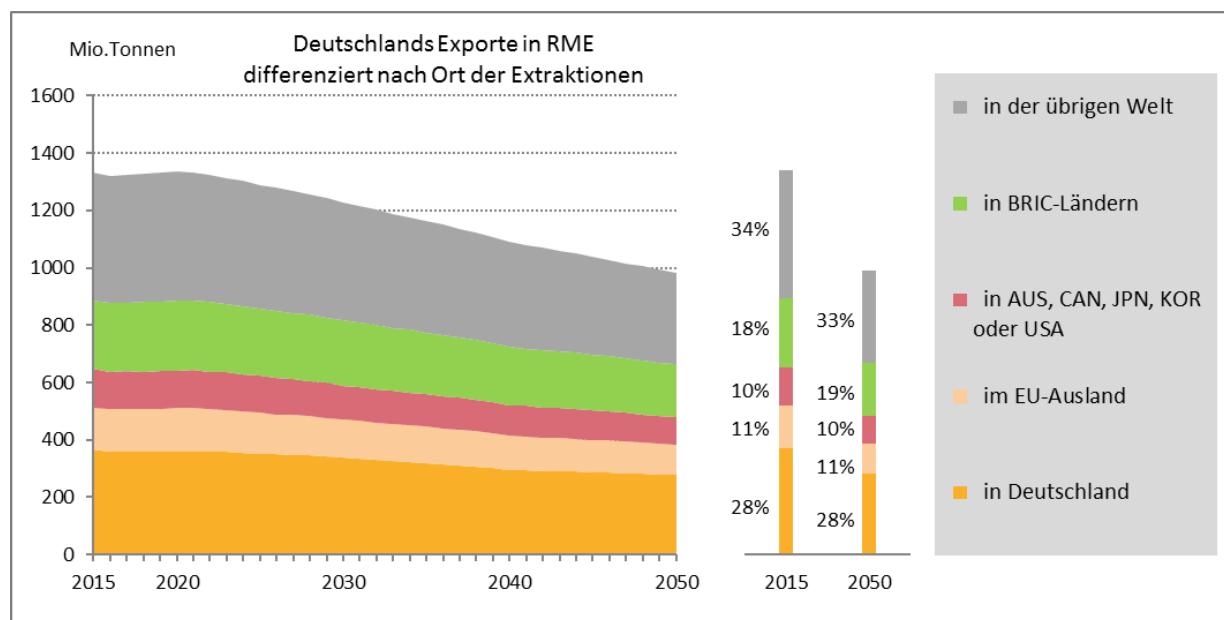
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Abbildung 104: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs Exporte (Exporte in RME), 2015 - 2050



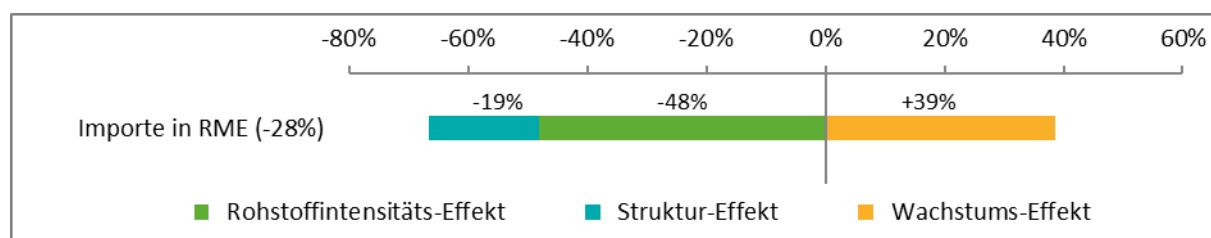
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Abbildung 105: Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf der Exporte (Exporte in RME), 2015 - 2050



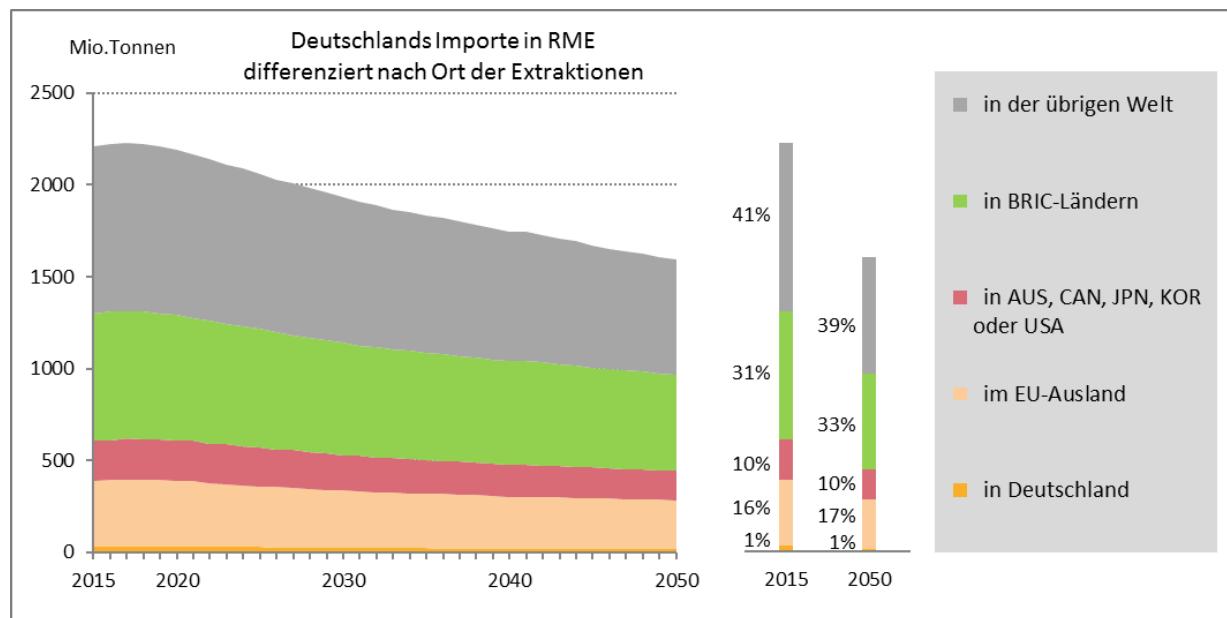
Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Abbildung 106: Klimaaktives Deutschland: Wachstums-, Struktur- und Rohstoffintensitäts-Effekte bei der Entwicklung des deutschen Primär-Rohstoffbedarfs Importe (Importe in RME), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Abbildung 107: Klimaaktives Deutschland: Provenienz der Extraktionen für den deutschen Primär-Rohstoffbedarf der Importe (Importe in RME), 2015 - 2050



Quelle: Eigene Darstellung, GWS

Tabelle 67: Klimaaktives Deutschland: Internationaler Vergleich der Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung, 2015 bis 2050

Rang 2050 [2015]	Land / Region	2015	2030	2050
1 [2]	Japan	0,46	0,35 bis 0,35	0,23 bis 0,23
2 [3]	Italien	0,49	0,36 bis 0,36	0,24 bis 0,24
3 [1]	Großbritannien	0,42	0,31 bis 0,32	0,23 bis 0,25
4 [4]	Frankreich	0,50	0,38 bis 0,38	0,28 bis 0,29
5 [5]	Spanien	0,54	0,41 bis 0,41	0,31 bis 0,32
6 [7]	Niederlande	0,60	0,45 bis 0,46	0,32 bis 0,34
7 [8]	Deutschland	0,61	0,46 bis 0,46	0,34 bis 0,34
8 [6]	USA	0,58	0,47 bis 0,47	0,35 bis 0,36
9 [13]	Griechenland	0,77	0,55 bis 0,57	0,34 bis 0,37
10 [9]	Belgien	0,62	0,48 bis 0,48	0,36 bis 0,37
11 [11]	Österreich	0,69	0,52 bis 0,52	0,39 bis 0,4
12 [10]	Schweden	0,66	0,51 bis 0,52	0,4 bis 0,41
13 [15]	Tschechien	0,93	0,61 bis 0,62	0,41 bis 0,42
14 [12]	Portugal	0,75	0,59 bis 0,59	0,46 bis 0,47
15 [17]	Südkorea	1,06	0,74 bis 0,74	0,49 bis 0,5
16 [14]	Ungarn	0,87	0,64 bis 0,64	0,5 bis 0,51
17 [16]	Kanada	1,03	0,78 bis 0,79	0,54 bis 0,56
18 [18]	Mexiko	1,13	0,9 bis 0,9	0,68 bis 0,68
19 [21]	Australien	1,53	1,09 bis 1,1	0,75 bis 0,76
20 [19]	Polen	1,32	1,01 bis 1,02	0,76 bis 0,78
21 [20]	Türkei	1,36	1,12 bis 1,12	0,88 bis 0,89
22 [25]	Rest der Welt	1,88	1,27 bis 1,34	0,85 bis 0,96
23 [24]	Brasilien	1,78	1,48 bis 1,5	1,08 bis 1,11
24 [23]	Rumänien	1,70	1,41 bis 1,43	1,19 bis 1,22
25 [22]	Russland	1,64	1,55 bis 1,55	1,25 bis 1,26
26 [26]	Indien	2,62	1,98 bis 1,99	1,63 bis 1,64
27 [27]	China	3,22	2,27 bis 2,28	1,75 bis 1,76

Primär-Rohstoffintensität der letzten Verwendung (= RMI / [BIP + Importe]) in kg je 2010USD

Quelle: Eigene Darstellung, GWS

## 8.4 Details der Parametrisierung zur Folgenabschätzung eines ProgRess II-konformen Politikmixes

Während einige ausgewählte Politikinstrumente als Re-Parametrisierungen vorheriger Simulationsrechnungen identifiziert werden können (siehe bspw. Meyer et al. 2015 zu Parametrisierung und weiteren Referenzen zu Materialeffizienz-Beratungsprogrammen, nachhaltigeren Konsumstrukturen im Hinblick auf die Nachfrage nach Recyclingpapier oder einer restriktiveren Ausweispraxis für Siedlungs- und Gewerbegebiete), repräsentieren insbesondere die Beispiele der Substitution fossiler Inputs in der chemischen Industrie sowie der Umstellung der Konsummuster Privater Haushalte in Richtung eines stärkeren Marktanteils langlebiger Elektrogeräte eigenständige Parametrisierungsbeispiele des SimRess-Projekts.

Dieses Unterkapitel dient zunächst einer kurzen Vorstellung konkreter Parametrisierungsschritte bei der Simulation von Politikinstrumenten in GINFORS3. Hiermit soll das im Projektverlauf verfolgte Prinzip einer Clusterung verschiedener ProgRess II Handlungsansätze zu modellspezifischen Maßnahmenbündeln nachvollziehbar nahegelegt werden. Unabhängig davon, welche individuelle Maßnahme unterstellt wird, sind die direkten Auswirkungen eines modellierten Instruments in der Regel durch Veränderungen der gesamtwirtschaftlichen „Verhaltensweise“ ausgewählter Adressaten zu parametrisieren. In der ökonomischen Struktur des GINFORS-Modells können grundsätzlich folgende Akteure adressiert werden: Private Haushalte (und Non-profit Organisationen, bspw. Parteien, Kirchen, ...), der Staat, Unternehmen sowie der Rest der Welt. Wird dabei auf inländische Adressaten fokussiert (die Entwicklung im Rest der Welt resultiert letztlich ebenfalls aus sämtlichen inländischen Entwicklungen in allen Weltregionen), können somit in der makroökonomischen Modellstruktur drei sogenannte „institutionelle Transaktoren“ identifiziert werden (Unternehmen, Staat sowie Private Haushalte und private Organisationen ohne Erwerbszweck).

Für die inländischen Akteure ist dabei zu berücksichtigen, dass die gesamtwirtschaftlichen Produktionsaktivitäten der Unternehmen in einem detaillierten Input Output Buchungssystem abgebildet werden. Hierbei werden 35 Wirtschaftszweige und 59 Gütergruppen unterschieden.

Für ein ausgewähltes Instrument (bspw. Beratungsprogramm zur Steigerung der Effizienz in der Produktion) sind die direkt betroffenen Adressaten in der Regel eindeutig identifizierbar (bspw. Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes). Zur Simulation eines ProgRess II Politikmixes wurden hierzu in SimRess generelle Vorarbeiten für sämtliche Handlungsansätze durchgeführt. Auf Basis dieser Vorarbeiten ließen sich die ProgRess II-Handlungsansätze gemäß ihren zentralen Modellansatzpunkten gruppieren. Wie anhand der ausgewählten Beispiele exemplarisch gezeigt wird, erwies sich allerdings die Festlegung konkreter Parametrisierungs-Annahmen bezüglich der zu modellierenden Stärke der abgebildeten direkten Effekte mitunter als herausfordernd.<sup>138</sup>

### Handlungsansatz 7.1: Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe umweltverträglich ausbauen

Für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe finden sich insbesondere in der Kunststoffindustrie umfassende Ansatzpotenziale. Technologisch erscheint es möglich, bis zu 90% der derzeit auf Erdöl-Basis hergestellten Polymere durch nachwachsende Substitute zu ersetzen (Shen et al. 2009). Trotz markanter

---

<sup>138</sup> Hierzu sei angemerkt, dass dieser Anhang lediglich umgesetzte Parametrisierungsbeispiele zu vier ausgewählten Handlungsansätzen dokumentiert. In Ergänzung zu den hier explizit aufgeführten Modellierungsansätzen wurden von uns zudem außenwirtschaftliche Aspekte (siehe hierzu die Handlungsansätze 7.10.1 Internationale Verankerung der Ressourceneffizienz fördern & 7.10.2 Ressourceneffizienz in Europa unterstützen umsetzen & 7.10.3 Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern) sowie die Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Handlungsansatzes 7.4 im Hinblick auf ein verstärktes Phosphorrecycling eingehend geprüft. Zudem wurde auch UBA-intern geprüft, ob im Zuge eines bilateralen Expertendialogs zentrale „Hot-spots“ aus dem Nationalen Aktionsplan nachhaltiger Konsum zusätzlich in der Modellierung berücksichtigt werden könnten. Da in diesen Fällen allerdings eine Festlegung konkreter Parametrisierungsannahmen jeweils wesentlich schwieriger erschien, verzichten wir auf entsprechend weitergehende Dokumentationen im Rahmen dieses Abschlussberichts. (Weitergehende Details sind aber selbstverständlich auf Anfrage von den Autoren erhältlich).

Wachstumsraten werden für Biokunststoffe allerdings in den nächsten Jahren lediglich Anteile in einer Größenordnung von max. 2% an der globalen Kunststoffproduktion erwartet.<sup>139</sup> Das Wachstum der globalen Produktionskapazitäten findet dabei überwiegend außerhalb Europas (insbesondere in Südamerika und Asien) statt.<sup>140</sup> Vor diesem Hintergrund werden insbesondere die derzeitig in Europa einseitige verfolgte Förderung der energetischen Nutzung von Biomasse kritisch diskutiert und entsprechende Änderungen der Rahmenbedingungen zur Reduzierung von Wettbewerbsverzerrungen gefordert.<sup>141</sup>

Eine explizite Abbildung dezidierter Instrument-Vorschläge aus externen Forschungsprojekten konnte (aufgrund des hierzu notwendigen Implementationsaufwands) nicht im Rahmen des SimRess-Projekts umgesetzt werden.<sup>142</sup> Um die Potenziale einer weitergehenden stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe dennoch im simulierten Politikmix zu berücksichtigen, wurde stattdessen die Einführung einer verpflichtenden europaweiten Quote zum Anteil biobasierter Grundstoffe in der Produktion von chemischen Erzeugnissen simuliert.<sup>143</sup>

Die chemische Industrie nutzt derzeit ca. 14 Prozent des gesamten in Deutschland verbrauchten Erdöls zur stofflichen Verarbeitung (VCI 2016). Während von der chemischen Industrie im Jahr 2013 rund 17,3 Millionen Tonnen an fossilen Rohstoffen stofflich eingesetzt wurde, entfielen lediglich 2,7 Millionen Tonnen auf nachwachsende Rohstoffe (VCI 2016). Gemäß aktuellen Analysen scheint es durchaus realistisch, in Deutschland den Anteil der Biomasse an sämtlichen Chemierohstoffen bis zum Jahr 2050 auf 40% steigern zu können (nova 2015). Um ein effektives Instrument simulieren zu können, unterstellen wir daher, dass die Quote der nachwachsenden Rohstoffe an sämtlichen von der chemischen Industrie genutzten Rohstoffen bis 2050 auf 80% gesteigert wird.

Für unsere gesamtwirtschaftliche Wirkungsanalyse konnte im SimRess-Projekt keine eigenständige Zuordnung der jeweils ausgelösten Veränderungen der Vorleistungsnachfrage durchgeführt werden. Die parametrisierten Annahmen zur Modellierung einer verbindlichen Quote nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie mussten daher im Sinne einer vorläufigen Potenzialstudie interpretiert werden, welche (in Ermangelung detaillierter Szenario-Vorgaben) Möglichkeiten zur Abbildung einer verstärkten stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe exemplarisch aufzeigt.

Eine bundesweite Umsetzung von Bioraffineriekonzepten kann in diesem Zusammenhang nicht abgebildet werden.<sup>144</sup> Hierzu wären verlässliche Annahmen bezüglich der damit einhergehenden direkten Investitionskosten notwendig. Bislang liegen hierzu allerdings keine allgemein akzeptierten empirisch belastbaren Kostenschätzungen vor.<sup>145</sup> In Ermangelung entsprechender Vorgaben beschränken wir uns in diesen Analysen daher auf ein Szenario, welches lediglich eine Nutzung ausgereifter Technologien auf Basis bereits bestehender Strukturen unterstellt. Diese Voraussetzungen scheinen in erster Linie für Zucker- bzw. Stärke-basierte und für Pflanzenöl-basierte sowie Cellulose-basierte Biokunststoffe gegeben. Bezuglich der in den Simulationen zu beobachtenden ökonomischen Effekte ist diese Annahme als sehr konservativ anzusehen,

---

<sup>139</sup> Siehe hierzu bspw. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hg., 2013): Biokunststoffe.

<sup>140</sup> „So sind z.B. in Asien etliche Entwicklungen schon serienreif, die bei uns noch F&E-Themen sind. Wichtig sind daher anwendungsorientierte Entwicklung und Unterstützung bei der Markteinführung, nicht die Erforschung und Entwicklung neuer Polymere.“ (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hg., 2007, S. 14) Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teil II.)

<sup>141</sup> Siehe hierzu bspw. auch Carus et al. (2013).

<sup>142</sup> Zu entsprechenden Vorschlägen siehe bspw. Carus et al. (2014).

<sup>143</sup> Entsprechende Quotenvorgaben werden bspw. auch von der ad-hoc Advisory Group zur Entwicklung der Leitmarktinitiative für biobasierte Produkte in der EU in Erwägung gezogen. Siehe hierzu Europäische Kommission (2009).

<sup>144</sup> Die Roadmap Bioraffinerien klassifiziert 4 alternative Bioraffineriekonzepte zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Zucker-Bioraffinerie bzw. Stärke-Bioraffinerie, Pflanzenöl-Bioraffinerie bzw. Algenlipid-Bioraffinerie, Lignocellulose-Bioraffinerie bzw. grüne Bioraffinerie, Synthesegas-Bioraffinerie).

<sup>145</sup> „Allgemein ist die Datenbasis in vielen Bereichen der ökonomischen und ökologischen Analyse und Bewertung von Bioraffineriekonzepten noch unzureichend und wenig validiert.“ (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2012: Roadmap Bioraffinerien, S.63)

da ein Anstieg der gesamtwirtschaftlichen Investitionstätigkeit expansive Einkommenseffekte freisetzen würde.

Als direkte Änderung der Vorleistungsnachfrage wird eine Reduktion des Inputs von Erdöl (Gütergruppe 5) sowie von Mineralölerzeugnissen (Gütergruppe 17) in der chemischen Industrie unterstellt. Diese Inputs werden substituiert durch Stärke-, Zucker- und Pflanzenölinputs (Gütergruppe 9) sowie Rest- und Abfallstoffen der Papierherstellung (Gütergruppe 15). Zur Abschätzung der dabei in den monetären Strukturen der Input-Output Rechnung abzubildenden direkten Effekte orientieren wir uns an Studien zu den Preisunterschieden zwischen biobasierten und petrochemischen Kunststoffen.

Gegenwärtig sind petrochemische Kunststoffe in der Regel noch deutlich günstiger als ihre biobasierten Substitute. Biobasierte Kunststoffe finden daher bislang in erster Linie in Marktnischen Verwendung, in denen ein entsprechender Kostenaufschlag durch zusätzliche emotionale oder aber strategische Marketingaspekte gerechtfertigt werden kann.<sup>146</sup> Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die umfassende Einführung biobasierter Kunststoffproduktionen Skaleneffekte freisetzen würde, welche die derzeitigen Preisdifferenzen mittelfristig nivellieren würden.<sup>147</sup> Da Preisinformationen zu biobasierten Kunststoffen allerdings nicht allgemein erhoben werden,<sup>148</sup> kann lediglich eine grobe Einordnung der gesamtwirtschaftlichen Preisdifferenz vorgenommen werden. So beziffert bspw. Oertel (2007) den Preisunterschied von Biokunststoffen gegenüber herkömmlichen Massenkunststoffen mit einem Faktor 3 bis 3,75. Für biologisch abbaubare Kunststoffe schätzt Beier (2009) hingegen die entsprechenden Preisunterschiede in der Größenordnung eines Faktors 2 bis 5. Die Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen (2015) geht wiederum davon aus, dass biobasierte Kunststoffe generell ca. drei- bis fünfmal so teuer sind wie konventionelle.<sup>149</sup>

Der in diesem Szenario unterstellte Anstieg der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in der chemischen Industrie von gegenwärtig ca. 13% auf 80% im Jahr 2050 korrespondiert mit einem Rückgang der fossilen Rohstoffinputs von 87% auf 20%. Wenn vereinfacht von der (relativ unbedeutenden) energetischen Nutzung fossiler Rohstoffe in der chemischen Industrie abgesehen wird, kann dieser Rückgang durch eine Reduktion der preisbereinigten Inputs von Erdöl-, Erdgas und Erdölprodukten um ca. 75% (1-20/87) gegenüber ihren aktuellen Niveaus abgebildet werden. Die hieraus resultierende partielle Kostenersparnis wird gemäß obiger Vorüberlegung durch eine erhöhte Nachfrage nach biobasierten Vorleistungen überkompensiert. Um diesen Effekt abilden zu können, unterstellen wir, dass zu Beginn des Simulationszeitraums die zusätzlichen Ausgaben für biobasierte Vorleistungen dem 3,5-fachen der im Vergleich zur Baseline eingesparten Summe für fossil-basierte Rohstoffinputs entsprechen. In den Simulationen werden dazu die Inputkoeffizienten der substituierenden biobasierten Vorleistungen entsprechend (proportional) angehoben.

Um mittelfristig zu erwartende technologische Effizienzsteigerungen sowie skalenbedingte Kostendegressionseffekte zu berücksichtigen, unterstellen wir im Zeitablauf linear abnehmende Substitutionskosten. Für

---

<sup>146</sup> Carus, M., Eder, A., Beckmann, J. (2014).

<sup>147</sup> Siehe hierzu bspw. folgendes Zitat: „Policies for bioplastics in the context of a bioeconomy: “Although there is currently a price differential between petro- and bioplastics, in recent years the prices of bioplastics have been dropping while prices for petro-plastics have been increasing. It is also arguable that bioplastics have the greatest potential for price decreases as a result of on-going advances in process engineering and scale-up, whereas the manufacture of petro-plastics has reached a plateau of efficiency and maturity. Moreover, taking into account other factors, such as the increased supply of bioplastics and the growing awareness of the true disposal costs of petro-plastics, it can be expected that the price differential will become less of an issue.” OECD Working Party on Biotechnology (2013, S. 31)

<sup>148</sup> Siehe hierzu bspw. auch die entsprechenden Anmerkungen in Dammer et al. (2013).

<sup>149</sup> Abschlussbericht der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren (Enquetekommission II) zu dem Auftrag des Landtags Nordrhein-Westfalen vom 04. Dezember 2012

das Jahr 2050 wird daher angenommen, dass die zusätzlichen Ausgaben für biobasierte Vorleistungen lediglich die Einsparungen durch den reduzierten Einsatz fossiler Rohstoffe im Vergleich zu Baselinewerten des Jahres 2050 egalisieren.

#### Handlungsansatz 7.2: Beratung ausgewählter Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes

Für die Modellierung eines Beratungsprogramms zur Erhöhung der Ressourceneffizienz im Verarbeitenden Gewerbe wird davon ausgegangen, dass im Verarbeitenden Gewerbe gesamtwirtschaftlich durchschnittliche Einsparpotenziale in Höhe von ca. 6% der Materialkosten realisiert werden können.<sup>150</sup> Die unterstellte Anzahl der im Rahmen eines bundesweiten Beratungsprogramms ansprechbaren Unternehmen orientiert sich an den entsprechenden PolRess-Annahmen (jährlich werden 2500 Unternehmen aktiv auf die Möglichkeiten einer Effizienzberatung hingewiesen). In den SimRess-Simulationen wird dabei angenommen, dass lediglich Unternehmen folgender ausgewählter Wirtschaftsbereiche im Rahmen dieses Beratungsprogramms angesprochen werden: Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden; Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen; Maschinenbau; Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, sonstiger Fahrzeugbau.<sup>151</sup> Auf Basis der aktuellen Anzahl der in diesen Wirtschaftszweigen tätigen Unternehmen kann davon ausgegangen werden, dass über dieses Beratungsprogramm innerhalb von 30 Jahren sämtliche Unternehmen dieser Wirtschaftszweige in Deutschland angesprochen werden können.<sup>152</sup>

Zur Abschätzung des Kostenvolumens dieses Beratungsangebots wird davon ausgegangen, dass 2/3 der initiativ angesprochenen Unternehmen tatsächlich eine Effizienz-beratung in Anspruch nehmen.<sup>153</sup> Unter Rückgriff auf entsprechende Vorarbeiten aus den PolRess-Simulationen, wird daher davon ausgegangen, dass sich die jährlichen Beratungskosten auf ca. 42,4 Mio. € p.a. summieren. Unterstellt ist, dass der Staat diese Beratungstätigkeiten finanziert, die Beratungskosten werden daher als staatliche Konsumausgaben für unternehmensbezogene Dienstleistungen verbucht. Da keine belastbaren aktuellen Informationen zu notwendigen Investitionskosten für die Realisierung der Einsparpotenziale verfügbar sind, wird dieses Instrument unter zwei Varianten simuliert (Szenario a: kein zusätzlicher Bedarf, Szenario b: Notwendige Investitionen der beratenden Unternehmen entsprechen der doppelten Summe der jährlichen Kostenersparnis).

#### Handlungsansatz 7.3: Umsetzungskosten eines nationalen Informationsprogramms

Handlungsansatz 7.3 zielt zu weiten Teilen darauf ab, den Konsum ressourcenschonender zu gestalten. Zur Parametrisierung entsprechender Wirkungen muss unterstellt werden, dass es zentralen Akteuren (wie bspw. dem Staat oder dem Handel) möglich ist, entsprechende Veränderungen der Nachfragegewohnheiten der Konsumenten zu initiieren. Für sämtliche aufgeführte Parametrisierungs-Beispiele dieses Handlungsansatzes wurde daher begleitend ein umfassendes nationales Informationsprogramm unterstellt.

Hierzu wird davon ausgegangen, dass der Staat je kreisfreie Stadt und Landkreis eine Beratungsstelle „nachhaltiger Konsum“ ins Leben ruft. Wenn hierzu ein Jahresgehalt der entsprechenden Berater in Höhe von 100.000 € unterstellt wird, so resultieren aus dieser Annahme zusätzliche Arbeitskosten der öffentlichen Verwaltung in einer Höhe von ca. 40 Mio. € pro Jahr.<sup>154</sup> Signifikante zusätzliche Ausgaben für Arbeitsmittel

---

<sup>150</sup> Quelle: Katharina Mattes, Christian Lerch, Angela Jäger (2015). Ressourceneffiziente Produktion jenseits technischer Lösungen. Modernisierung der Produktion, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung. Nr. 69; Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

<sup>151</sup> Vorbereitende Simulationsexperimente deuten darauf hin, dass die Vorleistungsnachfrage insbesondere dieser Wirtschaftszweige ein signifikantes Potenzial zur Reduktion der deutschen Rohstofffinanzierungsbedarf repräsentiert.

<sup>152</sup> Statistisches Bundesamt, Statistisches Jahrbuch (2015).

<sup>153</sup> Heuristische Festlegung auf Basis der in Mattes, Lerch und Jäger (2015) berichteten Materialeinsparpotenziale befragter Betriebe.

<sup>154</sup> Laut Statistischem Jahrbuch (2015) wies die Verwaltungsgliederung Deutschlands im Jahr 2014 402 Kreise (kreisfreie Städte und Landkreise) auf.

und Büroräume scheinen diesbezüglich nicht anzufallen und werden daher in den Modellierungen nicht berücksichtigt. Allerdings gehen wir davon aus, dass diese Informationsangebote auch bundesweit bekanntgemacht werden müssen sowie eine generelle Aktionskampagne zur öffentlichen Bewusstseinsprägung notwendig ist, um die Konsumenten zu nachhaltigen Verhaltensänderungen zu aktivieren. Zur Abbildung dieser Effekte werden in den ProgRess II Simulationen pro Jahr weitere 40 Mio. €. als zusätzliche Nachfrage des Staates nach unternehmensbezogene Dienstleistungen verbucht.

#### Handlungsansatz 7.3: Ressourcenschonung als Kriterium für Handel und Verbraucher einführen

Unter Handlungsansatz 7.3 soll (u.a.) der Handel verstärkt für die Umsetzung von Maßnahmen aktiviert werden, um ressourceneffiziente Produkte besser im Markt zu platzieren. In SimRess wurde ein Baustein des PolRess-Politikmix übernommen, um exemplarisch entsprechende Wirkungseffekte abbilden zu können. Unter dem Stichwort „Recyclingpapier“ wurde in PolRess eine nationale Selbstverpflichtung zur Verdopplung der Absatzmengen von Papierprodukten (Hygienepapiere und Büropapiere) aus Recyclingpapier innerhalb eines zehn Jahreszeitraums modelliert.

Damit einhergehende Umstellungskosten des Handels können nicht verlässlich abgeschätzt werden, scheinen aber eher vernachlässigbar.<sup>155</sup> Daher werden keine zusätzlichen Kosten bei Einführung dieses Instruments für die Handelsunternehmen unterstellt.

Der Erfolg der Maßnahme reduziert die Nachfrage nach Primärfaser und steigert die Nachfrage nach Sekundärfaser in der Papierherstellung. Wie in den PolRess-Simulationen wird für den direkt wirkenden Effekt eine Reduktion der realen Vorleistungslieferungen der Gütergruppe „Papier, Pappe und Waren daraus“ an den Wirtschaftszweig „Papier-, Verlags- und Druckgewerbe“ um insgesamt 9,1% modelliert. Gleichzeitig steigen die realen Vorleistungsinputs von Recyclingprodukten im Wirtschaftszweig „Papier-, Verlags- und Druckgewerbe“ um 3,1%. Über hierfür ev. notwendige direkte Investitionskosten der Papierindustrie liegen keine verlässlichen Angaben vor, so dass diesbezüglich Kostenneutralität unterstellt werden muss.

#### Handlungsansatz 7.3: Ressourcenschonung in die Produktentwicklung einbeziehen

Unter Handlungsansatz 7.3 wird ebenfalls eine stärkere Berücksichtigung von Mindest- und Informationsanforderungen zur Lebensdauer von Produkten angestrebt. Die SimRess-Simulationen konzentrieren sich diesbezüglich auf das Konsumentenverhalten beim Kauf langlebiger Elektrogeräte, da aktuelle Untersuchungen darauf hindeuten, dass bei diesen Gütergruppen deutliche Potenziale zur Rohstoffschonung vermutet werden können.<sup>156</sup>

Der Parametrisierungs-Ansatz beruht auf der Annahme, dass höhere Umsatzanteile langlebiger Elektrogeräte einen Anstieg des Konsumentenpreisindex induzieren.<sup>157</sup> Ursächlich hierfür sind die durch eine hochwertigere Produktion der Geräte induzierten Kostensteigerungen in den betroffenen Industrien. Diese Kostensteigerungen können in den Simulationen durch einen Anstieg der entsprechenden Vorleistungsinputs implementiert werden.

---

<sup>155</sup> Bezuglich der Beschaffungskosten ist aus dem PolRess-Projekt bekannt, dass Recyclingpapier mit nicht-100% Weißgrad in der Anschaffung tendenziell günstiger ist als Primärfaserpapier.

<sup>156</sup> Prakash, Dehoust, Gsell, Schleicher und Stamminger (2015). Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen Obsoleszenz berichten bspw., dass im Bereich der Haushaltsgroßgeräte der Anteil der bereits nach weniger als 5 Jahren notwendigen Ersatz-/Verbesserungsanschaffungen von 7% im Jahr 2004 auf 13% in den Jahren 2012/13 angestiegen ist.

<sup>157</sup> Ein anschauliches Beispiel für diese Überlegung wird bspw. von Prakash, Dehoust, Gsell, Schleicher und Stamminger: Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“ (2016, S. 257) quantifiziert, welche für Deutschland den durchschnittlichen Kaufpreis einer Waschmaschine auf ca. 600 € einschätzen, während der Kaufpreis einer langlebigen Waschmaschine in einer Größenordnung von 1000 € eingeordnet wird.

Wir unterstellen eine vollständige Strukturveränderung des privaten Konsums dahingehend, dass langfristig nur noch langlebige Elektrogeräte von den Konsumenten nachgefragt werden. In Ermangelung weitergehender empirischer Referenzwerte orientieren sich die hierdurch für diese Gütergruppe angenommenen Preissteigerungen an den Referenzwerten von Prakash et al. (2016, S. 257), welche am Beispiel der Waschmaschinen andeuten, dass der Preis für langlebige Produkte ungefähr 2/3 über den aktuellen Durchschnittspreisen liegt. Zur Übersetzung dieses Preisanstiegs für Elektrogeräte in den aggregierten Konsumentenpreisindex für Maschinenbauprodukte (die dem Modell zugrundeliegenden Strukturen verbuchen die hier betrachteten privat genutzten Elektrogeräte als Produktion des Maschinenbausektors) bedarf es einer Abschätzung der entsprechenden Umsatzanteile. Der aktuelle Anteil der Produktgruppe „Kühl- und Gefriermöbel“ sowie der „sonstigen größeren Haushaltsgeräte“ an sämtlichen privaten Konsumausgaben für Maschinenbauprodukte beträgt ca. 1/3.<sup>158</sup> Daher wird in den Simulationen dadurch ausgegangen, dass die abzubildende umfassende Strukturveränderung des privaten Konsums von Elektrogeräten durch einen Anstieg des aggregierten Konsumgüterpreisindex für Maschinenbauprodukte um ca. 20% (0,33\*0,66) modelliert werden kann.

Dieser Anstieg des betrachteten Konsumgüterpreisindex muss durch korrespondierende Preisanstiege des Herstellerpreisindex für Maschinenbauprodukte parametrisiert werden. Hierzu gehen wir davon aus, dass der Anteil privater Konsumausgaben am gesamten Güteraufkommen der Maschinenbauprodukte ca. 5% beträgt.<sup>159</sup> Für den aggregierten Erzeugerpreisindex von Maschinenbauprodukten ist demnach lediglich von einem Anstieg in der Größenordnung von 1% auszugehen (ca. 0,05\*0,2). Zur Abbildung dieses Effekts werden die Vorleistungsinputs des Maschinenbaus entsprechend proportional angehoben. Weitergehende Details (bspw. internationale Preiseffekte auf Basis von Informationen der Außenhandelsstatistik) konnten im Rahmen des SimRess-Projekts nicht erhoben werden.

#### Handlungsansatz 7.5: Ressourcenschonende Infrastrukturen

Zur Berücksichtigung des Ansatzpunktes „Ressourcenschonende Infrastrukturen“ kann auf die Vorarbeiten der PolRess-Kurzanalyse „Handlungspotenziale und Gestaltungsmöglichkeiten der Kommunen“ zurückgegriffen werden. Dort wurde die Einführung von Bedarfnachweisen für die Ausweisung von Siedlungs- und Gewerbegebieten in der kommunalen Planung analysiert. Dieses Instrument zielt darauf ab, dass sich Kommunen bei Raumplanung und Wirtschaftsförderung (Ausweisung von Siedlungs- und Gewerbegebieten) am Leitbild einer möglichst kompakten Siedlungsstruktur orientieren, indem die Neuausweisung von Siedlungs- und Gewerbegebieten an den Nachweis eines entsprechenden Bedarfs geknüpft wird, welcher nicht durch die Nutzung von Flächen im bestehenden Siedlungsraum gedeckt werden kann. Im Ergebnis weisen die Kommunen hierdurch weniger neue Flächen für Bau- und Industriegebiete aus, weshalb weniger Baustoffe für neue Infrastrukturen benötigt werden. Investitionen in den Infrastruktur-Bestand (Erhalt und Sanierung) ändern sich nicht.

In der Modellierung wird als auslösender Impuls eine Reduktion der Investitionen des Wirtschaftszweigs „Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung“ für den Neubau von Gemeindestraßen um rund 0,85 Milliarden Euro p.a. im Vergleich zur Baseline unterstellt. Annahmegemäß wird hierdurch eine Reduktion des Materialaufwands für den Neubau von Gemeindestraßen um rund 6,3 Millionen t p.a. gegenüber der Baseline ausgelöst. Hierzu erfolgte eine entsprechende Anpassung der Vorleistungsinputs der Gütergruppe „Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse“ im Wirtschaftszweig „Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“.

<sup>158</sup> Eigene Abschätzung auf Basis Statistisches Bundesamt, Fachserie 15, Reihe 1, LWR sowie der GINFORS WIOD Database.

<sup>159</sup> Eigene Abschätzung auf Basis der GINFORS WIOD Database.

## 8.5 Ergänzende Informationen zu den Simulationsexperimenten

Tabelle 68: Liste der 100 wichtigsten Input-Koeffizienten

Nr.	Vorleistungseinsatz von Gütergruppe ...	im Wirtschaftsbereich ...
1	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung
2	Erze	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
3	Metalle und Halbzeug daraus	Fahrzeugbau
4	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
5	Bauarbeiten	Grundstücks- und Wohnungswesen
6	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Baugewerbe
7	Metalle und Halbzeug daraus	Maschinenbau
8	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	Baugewerbe
9	Metalle und Halbzeug daraus	Herstellung v. Büromaschinen, DV-Geräten und -einr.; E-Technik, Feinmechanik und Optik
10	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke	Gastgewerbe
11	Chemische Erzeugnisse	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
12	Bauarbeiten	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
13	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
14	Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und DL	Holzgewerbe (ohne H.v. Möbeln)
15	Geräte d. Elektrizitätserz., -verteilung u.ä.	Baugewerbe
16	Chemische Erzeugnisse	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen
17	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
18	Bauarbeiten	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen
19	Geräte d. Elektrizitätserz., -verteilung u.ä.	Fahrzeugbau
20	Metallerzeugnisse	Fahrzeugbau
21	Gummi- und Kunststoffwaren	Fahrzeugbau
22	Metalle und Halbzeug daraus	Baugewerbe
23	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Landwirtschaft, Jagd, Forstwirts. und Fischerei
24	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen
25	Geräte d. Elektrizitätserz., -verteilung u.ä.	Maschinenbau
26	Holz; Holz-, Kork-, Flechtwaren (oh. Möbel)	Baugewerbe
27	Metallerzeugnisse	Maschinenbau
28	Chemische Erzeugnisse	Fahrzeugbau
29	Bauarbeiten	Vermietung beweglicher Sachen ohne Bedienungspersonal; sonstige Tätigkeiten
30	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
31	Metalle und Halbzeug daraus	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
32	Maschinen	Fahrzeugbau
33	Bauarbeiten	Energie- und Wasserversorgung
34	Bauarbeiten	Erbringung von sonstigen öffentlichen und persönlichen Dienstleistungen
35	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung
36	Gummi- und Kunststoffwaren	Baugewerbe
37	Metallerzeugnisse	Baugewerbe

38	Chemische Erzeugnisse	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
39	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	Fahrzeugbau
40	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke	Landwirtschaft, Jagd, Forstwirts. und Fischerei
41	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	Gastgewerbe
42	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen
43	Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und DL	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe
44	Bauarbeiten	Erziehung und Unterricht
45	Chemische Erzeugnisse	Baugewerbe
46	Chemische Erzeugnisse	Herstellung v. Büromaschinen, DV-Geräten und -einr.; E-Technik, Feinmechanik und Optik
47	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	Herstellung v. Büromaschinen, DV-Geräten und -einr.; E-Technik, Feinmechanik und Optik
48	Holz; Holz-, Kork-, Flechtwaren (oh. Möbel)	Herstellung von Möbeln u.a., Recycling
49	Gummi- und Kunststoffwaren	Maschinenbau
50	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
51	Chemische Erzeugnisse	Landwirtschaft, Jagd, Forstwirts. und Fischerei
52	Medizin., meß-, regelungstechn., opt. Erz., Uhren	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen
53	Geräte d. Elektrizitätserz., -verteilung u.ä.	Energie- und Wasserversorgung
54	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
55	Chemische Erzeugnisse	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe
56	Chemische Erzeugnisse	Textil- und Bekleidungsgewerbe
57	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteidigung, Sozialvers.	Energie- und Wasserversorgung
58	Bauarbeiten	Kredit- und Versicherungswesen
59	Nachrtechn., Rundf.-, Fernsehger. elektron. Bau-elem.	Maschinenbau
60	Bauarbeiten	Hilfs- und Nebentätigkeiten für den Verkehr; Verkehrsvermittlung
61	Sonst. Fahrzeuge	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
62	Chemische Erzeugnisse	Maschinenbau
63	Papier, Pappe und Waren daraus	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
64	Metallerzeugnisse	Herstellung v. Büromaschinen, DV-Geräten und -einr.; E-Technik, Feinmechanik und Optik
65	Metalle und Halbzeug daraus	Energie- und Wasserversorgung
66	Bauarbeiten	Fahrzeugbau
67	Sonst. Fahrzeuge	Luftfahrt
68	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	Grundstücks- und Wohnungswesen
69	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Erbringung von sonstigen öffentlichen und persönlichen Dienstleistungen
70	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
71	Möbel, Schmuck, Musikinstr., Sportger., Spielw. u. ä.	Fahrzeugbau
72	Bauarbeiten	Einzelhandel (o. Handel mit Kfz u. Tankst.); Rep. v. Gebrauchsgütern
73	Bauarbeiten	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
74	Papier, Pappe und Waren daraus	Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung
75	Bauarbeiten	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen

76	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
77	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Energie- und Wasserversorgung
78	Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleitungen	Hilfs- und Nebentätigkeiten für den Verkehr; Verkehrsvermittlung
79	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
80	Bauarbeiten	Nachrichtenübermittlung
81	Chemische Erzeugnisse	Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung
82	Chemische Erzeugnisse	Kokerei, Mineralölverarbeitung, H. v. Brutstoffen
83	Maschinen	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
84	Metalle und Halbzeug daraus	Herstellung von Möbeln u.a., Recycling
85	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
86	DL bezügl. Hilfs- u. Nebentätigkeiten f. d. Verkehr	Schifffahrt
87	Chemische Erzeugnisse	Holzgewerbe (ohne H.v. Möbeln)
88	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	Energie- und Wasserversorgung
89	Metalle und Halbzeug daraus	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
90	Nachrtechn., Rundf.-, Fernsehger. elektron. Bauelem.	Nachrichtenübermittlung
91	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	Handelsverm. und Großhandel (o. Handel mit Kfz)
92	Maschinen	Baugewerbe
93	Maschinen	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
94	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe
95	DL bezügl. Hilfs- u. Nebentätigkeiten f. d. Verkehr	Handelsverm. und Großhandel (o. Handel mit Kfz)
96	Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleitungen	Handelsverm. und Großhandel (o. Handel mit Kfz)
97	Papier, Pappe und Waren daraus	Einzelhandel (o. Handel mit Kfz u. Tankst.); Rep. v. Gebrauchsgütern
98	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	Kokerei, Mineralölverarbeitung, H. v. Brutstoffen
99	Chemische Erzeugnisse	Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
100	Bauarbeiten	Landverkehr; Transport in Rohrfernleitungen

Quelle: Eigene Darstellung, GWS