

PolRess AP3 – Quantitative Szenarien

Handlungsbedarf bei der Modellierung des Ressourcenverbrauchs

Empirischer Befund und Methodische Anmerkungen

Arbeitspapier AS 3.2

Mark Meyer

Martin Distelkamp

Bernd Meyer

Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS)



PolRess – Ressourcenpolitik

Ein Projekt im Auftrag des Bundesumweltministeriums und des Umweltbundesamtes

Laufzeit 01/2012 – 05/2015

FKZ: 3711 93 103



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



Fachbegleitung UBA

Judit Kanthak

Umweltbundesamt

E-Mail: judit.kanthak@uba.de

Tel.: 0340 – 2103 – 2072

Ansprechpartner Projektteam

Dr. Klaus Jacob

Freie Universität Berlin

E-Mail: klaus.jacob@fu-berlin.de

Tel.: 030 – 838 54492

Projektpartner:



Die veröffentlichten Papiere sind Zwischen- bzw. Arbeitsergebnisse der Forschungsnehmer. Sie spiegeln nicht notwendig Positionen der Auftraggeber oder der Ressorts der Bundesregierung wider. Sie stellen Beiträge zur Weiterentwicklung der Debatte dar.

Zitationsweise: Mark Meyer, M./ Distelkamp, M./ Meyer, B. (2013): Handlungsbedarf bei der Modellierung des Ressourcenverbrauchs. Empirischer Befund und Methodische Anmerkungen. Arbeitspapier AS 3.2 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRess).

Inhaltsverzeichnis

Empirischer Befund	V
1. Einführung	1
2. Die nationale Perspektive.....	1
2.1 Ex post Analyse.....	1
2.2 Eigene ex ante Szenarienrechnungen	4
3. Die globale Perspektive	10
3.1 Ex post Analyse.....	10
3.2 Risiken der Ressourcennutzung	12
Fazit	14
Literatur	16
Methodische Anmerkungen	17
1. Einführung	17
2. Allgemeine Anforderungen	19
Der Modelltyp.....	19
Die theoretische Fundierung.....	20
Die Parametrisierung.....	20
Die Skalierung in der Zeit.....	21
3. Die spezifischen Anforderungen an die Materialmodellierung	21
Ist der geeignete Indikator modelliert?.....	21
In welcher Disaggregation können die Indikatoren vorliegen?	22
Wie ist generell die Modellierung des Materialmoduls zu wählen?.....	22
Ein Spezialproblem der Materialmodellierung: Recycling.	23
4. Zur Rolle von Partialmodellen	24
5. Die Modellierung der anderen Ressourceninputs	25
Die Modellierung des Energieverbrauchs und der CO ₂ - Emissionen	25
Die Flächeninanspruchnahme	25
6. Anforderungen an die Modellierung des sozioökonomischen Systems	26
Der Wirtschaftskreislauf.....	26
Anforderungen an die Modellierung der Branchenentwicklung	28
7. Die Berücksichtigung von Unsicherheit.....	31
Unsicherheit bei der Vorgabe der exogenen Variablen	32
Unsicherheit bezüglich kurz- bis mittelfristiger Schocks	33
8. Schlussfolgerungen.....	34
9. Literatur	36

Abbildungen

Abbildung 1: Materialeinsatz abiotischer Rohstoffe (DMI) - Projektionsergebnisse von PANTA RHEI aus dem MaRes-Projekt (2011 = 100)	5
Abbildung 2: Materialeinsatz abiotischer Rohstoffe in Rohstoffäquivalenten (DMI_{RME}) – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI / MaRes (2011 = 100)	6
Abbildung 3: Total Material Requirement (TMR) abiotischer Rohstoffe nach Materialkategorien Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI / MaRes	7
Abbildung 4: Metalle - Total Material Requirement (TMR) nach Unterkategorien Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI / MaRes.....	7
Abbildung 5: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts in konstanten Preisen (2000=100) – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI und GINFORS	8
Abbildung 6: Projektion der Rohstoffproduktivität (2011=100) bezogen auf den TMR abiotischer Rohstoffe ohne Energieträger – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI und GINFORS	9
Abbildung 7: Total Material Requirement (TMR) abiotischer Rohstoffe ohne Energieträger – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI (MaRes) und GINFORS (MACMOD) (2011 = 100)	9
Abbildung 8: Metalle – Anteile am abiotischen Total Material Requirement (TMR) inklusive Energieträger in v.H. – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI und GINFORS	10
Abbildung 9: Historische Entwicklung der weltweiten Ressourcenextraktionen im Zeitraum 1980 bis 2008	11
Abbildung 10: Matrix der mit der Ressourcennutzung in der EU verbundenen Risiken	13
Abbildung 11: Der Wirtschaftskreislauf. Eigene Darstellung	27

Empirischer Befund

1. Einführung

Im Februar 2012 hat die Bundesregierung ein „Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen (ProgRess)“ beschlossen, welches auf eine Vielzahl von Konkretisierungen zu Gegenstand, Zielsetzung und Handlungsansätzen einer Politik zur Steigerung der Ressourceneffizienz abzielt. Als Argumente für weitergehende Anstrengungen in Richtung Ressourceneffizienz werden dabei insbesondere zwei historische Befunde zur Nutzung natürlicher Ressourcen angeführt: Das weltweite Wachstum der Rohstoffnutzung wie es beispielsweise in Studien von Krausmann et al. aus dem Jahr 2009 (update 2011) und vom Sustainable Europe Research Institute (SERI) dokumentiert ist sowie die bisherige Entwicklung des Nachhaltigkeitsindikators „Rohstoffproduktivität“ in Deutschland. Vor diesem Hintergrund ergänzt das vorliegende Arbeitspapier die oben genannten Befunde um eine komprimierte Wiedergabe persönlicher Anmerkungen auf Basis eigener Forschungsarbeiten (MaRess, MACMOD) zur Rohstoffnutzung.

2. Die nationale Perspektive

2.1 Ex post Analyse

Um zu Hinweisen auf Handlungsbedarf zur Steigerung der Ressourceneffizienz und der Ressourcenschonung aus nationaler Perspektive zu gelangen gilt es im Folgenden zunächst einen differenzierteren Blick auf die Entwicklung von Entnahmen und Importen abiotischer Rohstoffe im Zeitraum 1994 bis 2008 zu werfen.¹ Hier zeigt sich (vgl. Tabelle 1), dass die Entnahmen und Importe von abiotischen Rohstoffen ohne Energieträger (= Gegenstand von ProgRess²) stärker zurückgegangen sind als die Entnahmen und Importe abiotischer Rohstoffe insgesamt (= Gegenstand der Fortschrittsberichte zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie). Dementsprechend ist für diesen eingegrenzten Rohstoffbegriff auch die Entwicklung der Produktivität³ dynamischer.

Des Weiteren zeigt sich, dass bei Zugrundelegung eines eingegrenzten Rohstoffbegriffs der Einsatz im Inland ganz überwiegend ($\approx 80\%$) durch die Entnahmen und Importe von Baumineralien dominiert wird. Für diese Rohstoffkategorie spielen Importe kaum eine Rolle. Auf den ersten Blick erweisen sich die Entwicklungen bei den **Baumineralien** aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten als sehr positiv. So ist der Einsatz im Inland innerhalb von 14 Jahren um fast 30% zurückgegangen und die Rohstoffproduktivität mit Bezug auf das Bruttoinlandsprodukt um mehr als 70% gestiegen. Bei der Interpretation dieser Zahlen ist jedoch zu beachten, dass es sich bei dem Bezugsjahr des Nachhaltigkeits-

¹ Bei den folgenden Ausführungen wird bewusst auf das Jahr 2008 bzw. den Zeitraum 1994 bis 2008 Bezug genommen. Statistische Informationen zur Rohstoffnutzung in Deutschland liegen zwar auch bereits für das Jahr 2009 vor. Eine Einbeziehung dieses Krisenjahres in die Betrachtung birgt jedoch die Gefahr von Fehlinterpretationen.

² Gegenstand von ProgRess sind zudem biotische Rohstoffe, soweit sie zur stofflichen Nutzung verwendet werden. Für eine Darstellung der Entwicklung der Ressourcennutzung im Hinblick auf diesen Teilaspekt fehlen bis dato jedoch sowohl für eine ex-post-Analyse als auch für Szenariorechnungen entsprechende Datengrundlagen.

³ Bruttoinlandsprodukt, preisbereinigt / Einsatz von abiotischem Primärmaterial (Rohstoffen) im Inland

indikator (1994) um den Höhepunkt des wiedervereinigungsbedingten Baumbooms in den neuen Bundesländern handelt. Im Zeitraum von 1994 bis 2008 kam es zu einem Rückgang der Bauleistungen⁴ in Deutschland von 24%. Bezieht man die Rohstoffproduktivität für Baumineralien statt auf das BIP auf die Bauleistungen reduziert sich der erzielte Fortschritt im Zeitraum 1994 bis 2008 von 73,2% auf 6,1%.

Im Hinblick auf die Materialkategorie „Erze“ ergibt sich ein diametral entgegengesetztes Bild: Hier ist der Einsatz im Inland innerhalb von 14 Jahren um mehr als 50% gestiegen und die Rohstoffproduktivität mit Bezug auf das Bruttoinlandsprodukt sogar um 19% gesunken. Auch im Hinblick auf die Erze kann die Betrachtung dieser Produktivitätsentwicklung zu Fehlinterpretationen führen. Auf der einen Seite ist zu beachten, dass im DMI-Konzept die Importe lediglich mit ihrem Eigengewicht eingehen und somit weder indirekt genutzte Rohstoffflüsse noch die Umweltwirkungen aus den ungenutzten Entnahmen (Abraum, Bergematerial und Bodenaushub) im Ausland Berücksichtigung finden. Wie die Materialflussanalysen sowohl des Statistischen Bundesamtes als auch des Wuppertal-Instituts zeigen sind diese Faktoren bei den Erzen von erheblicher Bedeutung. Auf der anderen Seite können Veränderungen der Rohstoffproduktivität, wie vorab bereits für die Baumineralien verdeutlicht, auch in einem sektoralen Strukturwandel begründet liegen. Bezieht man die Rohstoffentnahmen und Importe von Erzen statt auf das Bruttoinlandsprodukt auf das gesamte preisbereinigte Aufkommen (= Produktion im Inland + Importe) derjenigen Produktionsbereiche/Gütergruppen, die laut Materialflussanalysen einen Großteil des direkten Einsatzes von Metallen und Metallprodukten auf sich vereinen (Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen, Maschinenbau, Fahrzeugbau), so zeigt sich dass die „Rohstoffproduktivität“ im Zeitraum 1995 bis 2008 um 15% gestiegen ist.

Die Entnahmen und direkten Importe von **Industriemineralien** sind im Zeitraum von 1994 um 2008 um 7% zurückgegangen. Von dem Ziel einer Verdoppelung der Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020 ist Deutschland im Hinblick auf diese Materialkategorie somit noch sehr weit entfernt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die historische Entwicklung der Rohstoffproduktivität in Deutschland bezogen auf den Einsatz von Erzen, Bau- und Industriemineralien im Inland nur auf den ersten Blick ein positives Bild liefert. Ein Großteil dieser Dynamik geht weniger auf einen Wandel der Produktionsprozesse als vielmehr auf einen sektoralen Strukturwandel und hier insbesondere auf den Rückgang der Bauleistungen seit 1994 zurück.

⁴ Produktionswert des Baugewerbes, preisbereinigt (Kettenindex 2005=100)

Tabelle 1: Historische Entwicklung der Rohstoffentnahmen und Importe Deutschlands von 1980 bis 2008

		<i>Entnahme und Importe = Einsatz im Inland</i>				
		abiotische Rohstoffe		darunter:		
		insgesamt	ohne Energie- träger	Erze	Bau- mineralien	Industrie- mineralien
1994	<i>in Mio.</i>	1.500	986	87	796	102
2008	<i>Tonnen</i>	1.320	801	134	572	95
Veränderung 2008 gegenüber 1994		-12,0%	-18,8%	53,5%	-28,2%	-7,0%
Importanteil in 2008		37,8%	23,5%	99,7%	3,4%	37,1%
Rohstoffproduktivität bezogen auf das BIP in 2008 (1994 = 100)		141,3	153,1	81,0	173,2	133,7

Datenquelle: Statistisches Bundesamt, Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Ausgabe 2011

Mit ProgRess ist nicht nur eine Fokussierung auf bestimmte Rohstoffe, sondern auch eine Weiterentwicklung der Indikatoren und Ziele verbunden. Auf der einen Seite wird angestrebt, die indirekten Materialflüsse (DMI \rightarrow DMI_{RME}) zu berücksichtigen, auf der anderen Seite statt wie bisher auf den Materialeinsatz im Inland (DMI) auf den inländischen Materialverbrauch (DMC) zu fokussieren. Zudem sollen auch die ungenutzten Entnahmen (Abraum bei der Gewinnung von Rohstoffen, Erdaushub bei Bautätigkeiten) im In- und Ausland unter der Voraussetzung einer ausreichenden Datenqualität an die Berechnungen der Indikatoren angeknüpft werden (TMR, TMC).

Wie sowohl durch die bisherigen Analysen des Statistischen Bundesamtes als auch durch die Arbeiten des Wuppertal-Instituts im Rahmen des MaRess- und des MACMOD-Projektes nachgewiesen werden konnte, haben diese Weiterentwicklungen erheblichen Einfluss auf die Aussagen zu Stand und Dynamik von Rohstoffnutzung und Ressourceneffizienz in Deutschland. Dies gilt in besonderem Maße für die von ProgRess fokussierten Ressourcen. Mit Blick auf Erze, Bau- und Industriemineralien lassen sich die zentralen Erkenntnisse der bisherigen Arbeiten hierzu wie folgt zusammenfassen:

- Bezieht man die indirekten Materialflüsse mit ein, so erhöht sich der Materialeinsatz im Inland um ein Vielfaches (1,3 Mrd. Tonnen gegenüber 3,6 Mrd. Tonnen). Fast 80% der indirekten Materialflüsse entfallen auf die Erze. Damit steigt die Bedeutung der Erze für den gesamten Materialeinsatz im Inland deutlich (53% gegenüber 10%), wohingegen die Bedeutung der Baumineralien (20% gegenüber 43%) und der Industriemineralien (4% gegenüber 7%) abnimmt.⁵ Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn der inländische

⁵ Zahlenangaben jeweils bezogen auf das Jahr 2008.

Materialverbrauch (DMC) betrachtet wird. Auch hier führt eine Berücksichtigung von Rohstoffäquivalenten zu einer erheblichen Veränderung von Volumen (417 Mio. Tonnen gegenüber 37 Mio. Tonnen) und Relevanz der Materialströme von Erzen (29% gegenüber 4%).⁶

- Während der abiotische Materialeinsatz im Inland ohne die Berücksichtigung von indirekten Importen im Zeitraum von 2000 bis 2008 um knapp 6% zurückgegangen ist, wandelt sich das Bild bei Einbeziehung der indirekten Materialströme komplett (+3%). Dies führt aber auch zu einem deutlich anderen Bild für die Entwicklung der Rohstoffproduktivität. Diese ist bezogen auf den DMI_{RME} innerhalb von 8 Jahren lediglich um 8% gestiegen (gegenüber 18% bezogen auf den DMI). Geht man noch einen Schritt weiter und unterstellt, dass die vom Statistischen Bundesamt ermittelten Relationen zwischen direkten und indirekten Importen für die einzelnen Materialkategorien im Jahr 2000 auch für den Zeitraum 1994 bis 1999 gegolten haben, so kommt man zu der Einschätzung, dass die Rohstoffproduktivität (1994=100) in Deutschland bis zum Jahr 2008 lediglich auf einen Wert von 113,2 (statt 141,3) gestiegen ist.
- TMR-Berechnungen des Wuppertal-Instituts für die Jahre 1995 bis 2004 (MaRess) bzw. 1995, 2000 und 2005 (MACMOD) bestätigen diese grundlegenden Aussagen zu Höhe und Relevanz einzelner Materialkategorien sowie der Dynamik von Rohstoffnutzung und Ressourceneffizienz bei allgemein. Trotz dieser generellen Übereinstimmung zeigt ein Vergleich der Berechnungen des Statistischen Bundesamtes mit denjenigen des Wuppertal-Instituts aber auch, dass noch Unsicherheiten bezüglich der genauen Dimensionen der „Rucksäcke“ einzelner Rohstoffe bzw. Rohstoffkategorien bestehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass neben den eingangs erwähnten strukturellen Effekten auch die bisherige Definition des Ressourcenindikators in der Nachhaltigkeitsstrategie dazu führt, dass die tatsächlichen Ressourceneffizienzgewinne überschätzt werden.

2.2 Eigene ex ante Szenarienrechnungen

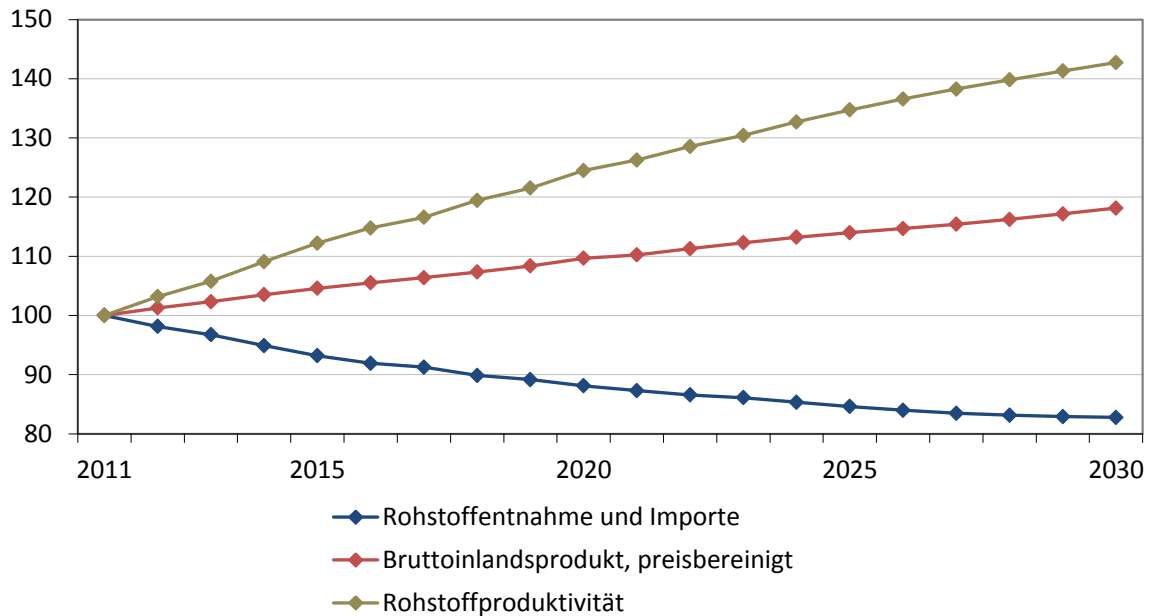
Sowohl im MaRess-Projekt⁷ als auch im MACMOD-Projekt⁸ wurden modellbasierte Szenarien zur Entwicklung der Rohstoffnutzung in Deutschland bis zum Jahr 2030 erstellt. Nachstehende Abbildung 1 zeigt zunächst die Projektionen auf Grundlage von PANTA RHEI für den Indikator gemäß Nachhaltigkeitsstrategie aus dem MaRess-Projekt (für weitergehende Anmerkungen zum Modellierungsansatz sowie ergänzende TMR-Ergebnisse siehe bspw. Meyer et al. 2011).

⁶ dito

⁷ Siehe <http://ressourcen.wupperinst.org/> für weiterführende Informationen

⁸ Vollständiger Projekttitle: Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment (ENV.F.1/ETU/2010/0033). Weiterführende Anmerkungen zum MACMOD-Projekt finden sich auf der Homepage der Europäischen Kommission unter http://ec.europa.eu/environment/enveco/studies_modelling/.

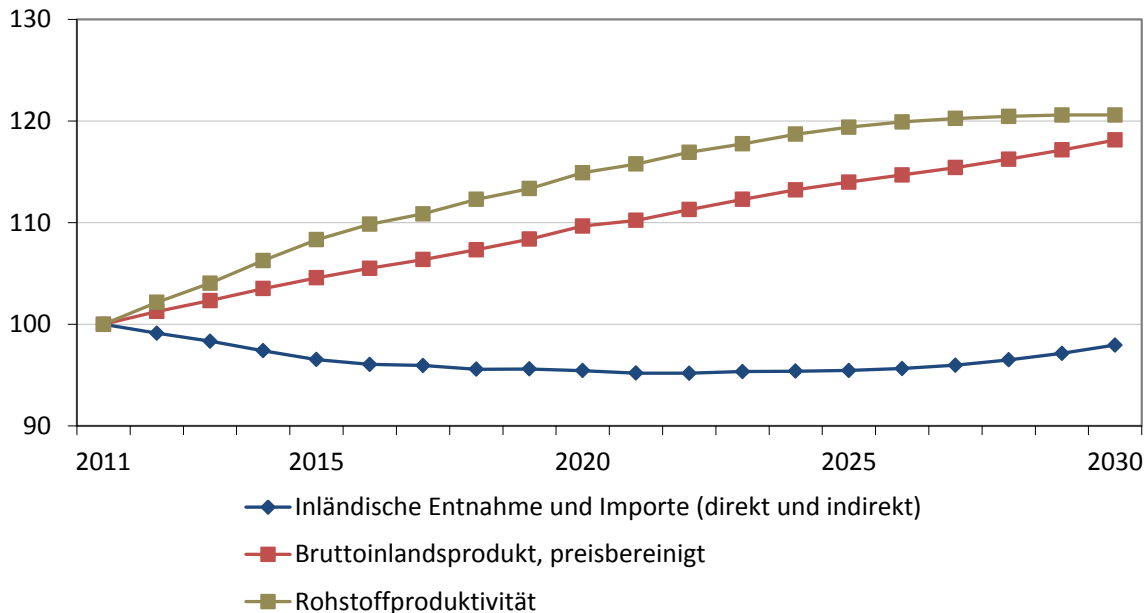
Abbildung 1: Materialeinsatz abiotischer Rohstoffe (DMI) - Projektionsergebnisse von PANTA RHEI aus dem MaRes-Projekt (2011 = 100)



Es wird folglich erwartet, dass sich Rohstoffentnahme und Importe abiotischer Rohstoffe im laufenden Jahrzehnt in Deutschland zunächst weiter rückläufig entwickeln, langfristig jedoch auf einem Niveau von gut 80% des 2011er Wertes verharren werden. Setzt man diese Modellergebnisse in Relation zu den mittel- bis langfristigen Projektionsergebnissen für die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts ergibt sich folgendes Bild für die Rohstoffproduktivität: Diese nimmt zwar im Projektionshorizont weiter zu. Zu Beginn werden jährliche Wachstumsraten um die 3 Prozent erwartet. Dies entspricht auch der langfristigen Zielsetzung der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung. Allerdings nehmen die Produktivitätsfortschritte im Zeitverlauf kontinuierlich ab und liegen in den Jahren 2025 bis 2030 nur noch bei etwa 1% pro Jahr. Bereits in Bezug auf den Indikator DMI kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass das Ziel einer Verdoppelung der Rohstoffproduktivität bis 2020 verfehlt wird.

Wie eingangs gezeigt wurde, wandelt sich das Bild zu Ausmaß, Struktur und Dynamik von Rohstoffnutzung und Ressourceneffizienz deutlich, wenn zusätzlich zu den direkten Importen auch die Rohstoffäquivalente von Importen (= indirekte Importe) einbezogen werden. Vor diesem Hintergrund wurde auf Grundlage von Modellergebnissen zu den direkten Materialflüssen aus PANTA RHEI / MaRes und Informationen zu den Relationen zwischen direkten und indirekten Importen aus den Analysen des Statistischen Bundesamtes für einzelne Materialkategorien eine einfache Zeitreihenbetrachtung für den Materialeinsatz im Inland in Rohstoffäquivalenten angestellt. Dieser Zeitreihenbetrachtung liegt die Annahme zugrunde, dass sich die Relationen zwischen direkten und indirekten Importen bei den einzelnen Materialarten im Zeitablauf nicht verändern. Unter dieser Annahme signalisiert der Indikator DMI_{RME} auf Basis der MaRes-Ergebnisse langfristig keine signifikanten Veränderungen der Rohstoffentnahmen abiotischer Rohstoffe bis zum Jahr 2030.

Abbildung 2: Materialeinsatz abiotischer Rohstoffe in Rohstoffäquivalenten (DMI_{RME}) – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI / MaRes (2011 = 100)



Für das Bruttoinlandsprodukt in konstanten Preisen wird über den gleichen Zeitraum ein Anstieg von annähernd 20% projiziert. Hinsichtlich der Entwicklung der Rohstoffproduktivität ergibt sich somit ebenfalls ein Anstieg von gut 20% zwischen 2011 und 2030. Hierbei ist aber bemerkenswert, dass die Modellsimulation eine langfristig stagnierende Entwicklung der Rohstoffproduktivität andeutet.

Es bedarf einer Betrachtung individueller Materialkategorien um die wesentlichen Treiber dieser Entwicklung identifizieren zu können. Abbildung 3 verdeutlicht, dass für die Kategorie der nicht-metallischen Mineralien zwischen 2011 und 2030 ein sich im Zeitablauf leicht abschwächender rückläufiger TMR-Trend projiziert wird. Gleichzeitig wird für Metalle ein ansteigender und sich im Zeitablauf intensivierender TMR-Trend projiziert. Aus der Überlagerung beider Effekte resultiert der in Abbildung 2 für die Jahre nach 2020 beobachtbare Wiederanstieg der Rohstoffentnahme und Importe. Ab 2025 ist dieser Gesamteffekt stark genug, um eine leicht rückläufige Tendenz der Ressourcenproduktivität zu initiieren.

Die markante Dynamik der Materialkategorie Metalle wird hierbei wesentlich durch die Entwicklung der Unterkategorien „Roheisen, Stahl, Rohre und Halbzeug daraus“ sowie „NE-Metalle und Halbzeug daraus“ hervorgerufen.

Abbildung 4 verdeutlicht, dass für diese beiden Unterkategorien ein anhaltender Anstieg des TMR-Indikators projiziert wird. Bemerkenswert ist hierbei, dass sich der Anteil beider Unterkategorien am Gesamttaggregat „Metalle“ bereits Mitte der 1990er Jahre auf gut 2/3 summierte. Die hier betrachtete MaRes-Simulation signalisiert eine zunehmende gesamtwirtschaftliche Konzentration beider Metallgruppen auf einen Anteil von mehr als 80% des gesamten Metall-TMRs im Jahr 2030. Folglich lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass eine aktive Politik zum Schutz natürlicher Ressourcen unter den abiotischen Rohstoffen insbesondere die Unterkategorien „Roheisen, Stahl, Rohre und Halbzeug daraus“ sowie „NE-Metalle und Halbzeug daraus“ ins Auge fassen sollte.

Abbildung 3: Total Material Requirement (TMR) abiotischer Rohstoffe nach Materialkategorien Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI / MaRes

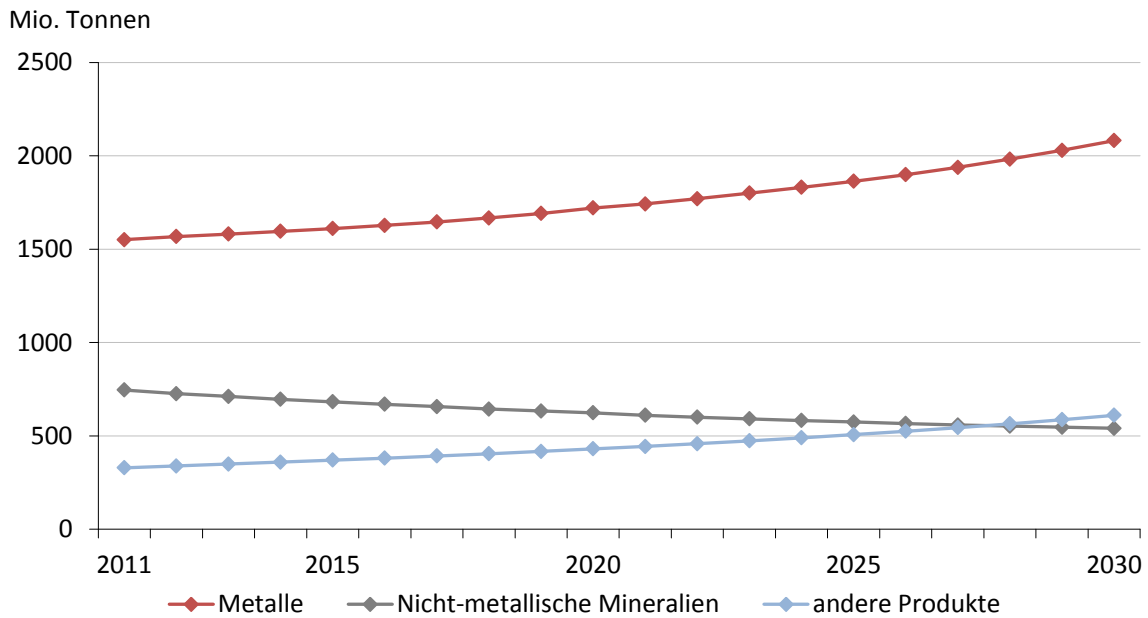


Abbildung 4: Metalle - Total Material Requirement (TMR) nach Unterkategorien Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI / MaRes

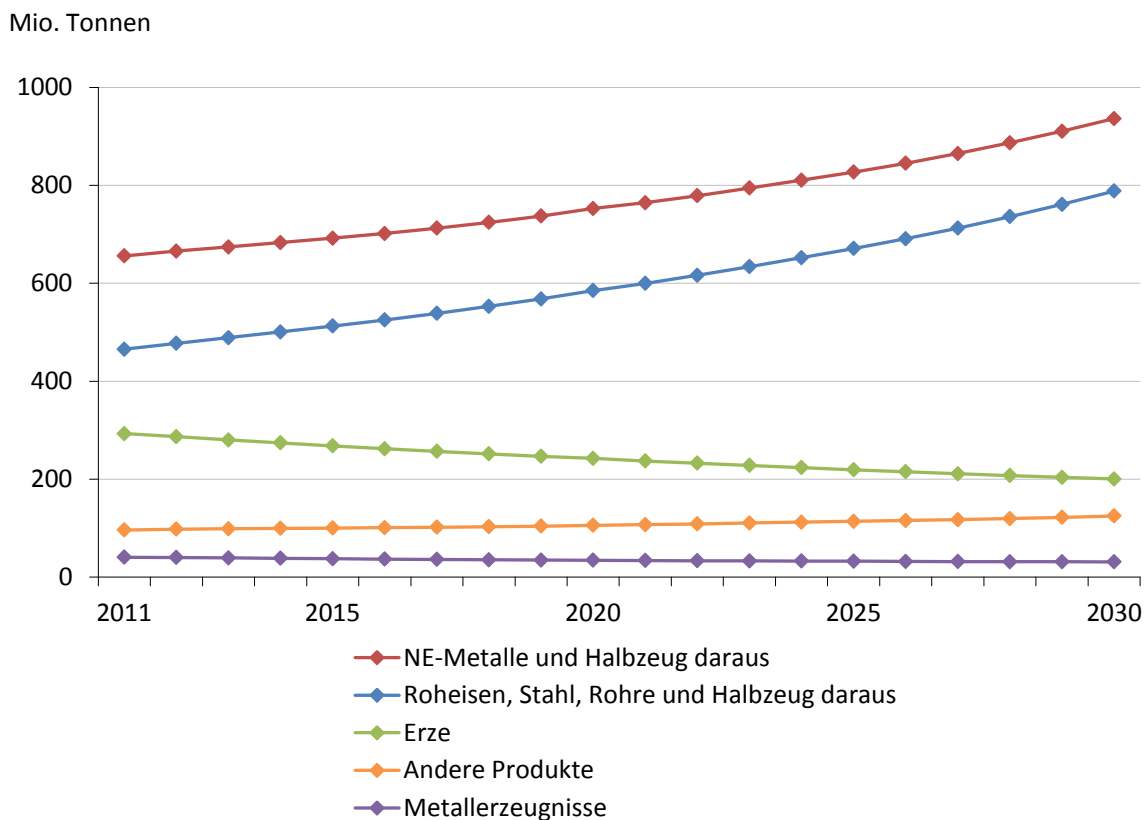
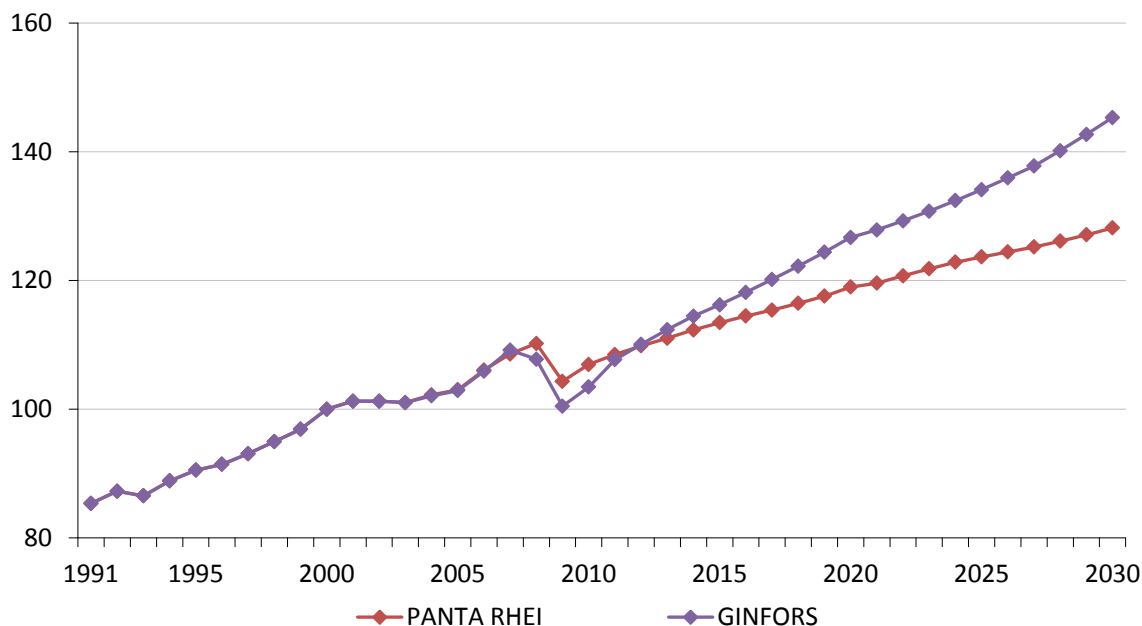


Abbildung 5: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts in konstanten Preisen (2000=100) – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI und GINFORS



Die soweit getroffenen Aussagen können dadurch evaluiert werden, indem die bisher isoliert betrachteten MaRes-Ergebnisse mit jenen des jüngst abgeschlossenen MACMOD-Projektes verglichen werden. In diesem Projekt wurden auf Basis aktualisierter Datensätze des Wuppertal-Instituts die globalen TMR-Entwicklungen sämtlicher EU-Mitgliedsstaaten mit Hilfe des GINFORS-Modells projiziert.⁹ Zur Kalibrierung der Baseline wurden dabei die Rahmendaten der internationalen ökonomischen Entwicklung auf das PRIMES-Szenario 2009 abgestimmt (Capros et al. 2010). Ohne auf die hierdurch ausgelösten Unterschiede der MACMOD-Ergebnisse im Vergleich zu den MaRes-Simulationen im Detail eingehen zu wollen, kann hierzu in Kürze festgehalten werden, dass den MACMOD-Simulationen eine optimistischere Einschätzung der langfristigen wirtschaftlichen Dynamik zu Grunde liegt (siehe hierzu Abbildung 5).

Da gleichzeitig von einem anhaltenden Rückgang der Bauleistungen in Deutschland ausgegangen wird, (die MaRes-Simulationen unterstellten stattdessen eine langfristige Rückkehr des preisbereinigten Produktionswertes des Baugewerbes zum Vor-Wiedervereinigungsniveau), resultiert hieraus eine deutlich optimistischere Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Ressourcenproduktivität (siehe hierzu Abbildung 6). Doch obwohl die MACMOD-Simulationen einen nachhaltigen Anstieg der Ressourcenproduktivität implizieren, steigt auch in dem hier betrachteten Szenario der abiotische TMR langfristig an (siehe hierzu Abbildung 7).

⁹ Siehe bspw. auch Distelkamp et al. (2012) und die dort aufgeführten Referenzen für eine komprimierte Darstellung der zu Grunde liegenden Modellierungsannahmen sowie zu methodischen Grundlagen des GINFORS-Modells.

Abbildung 6: Projektion der Rohstoffproduktivität (2011=100) bezogen auf den TMR abiotischer Rohstoffe ohne Energieträger – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI und GINFORS

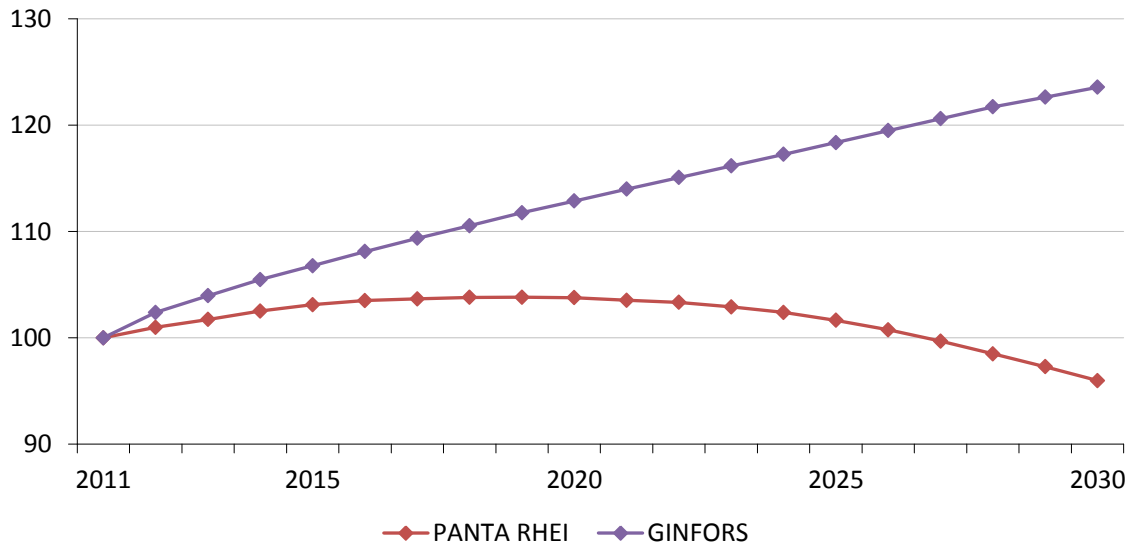
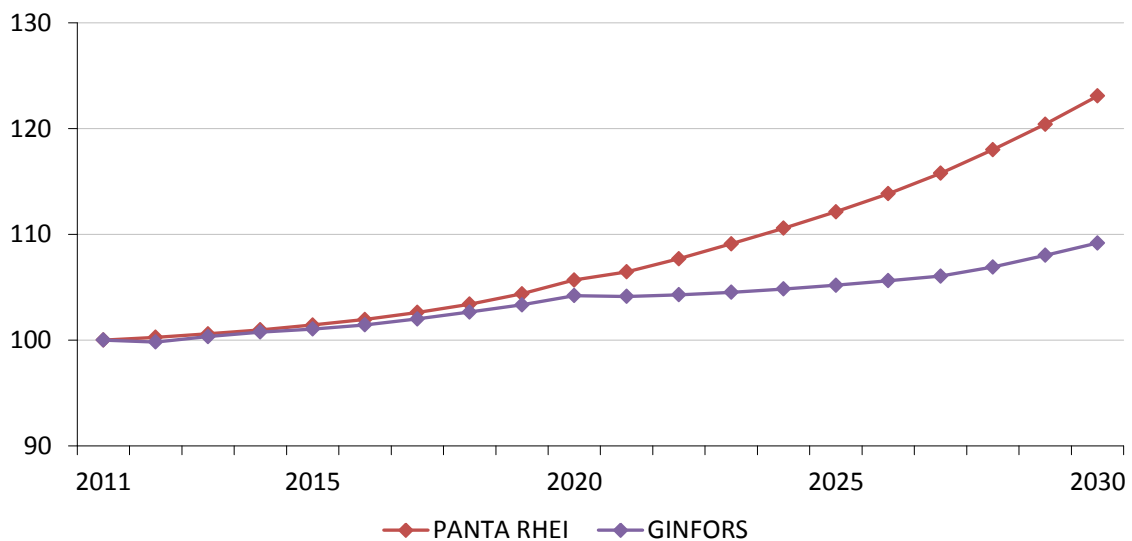
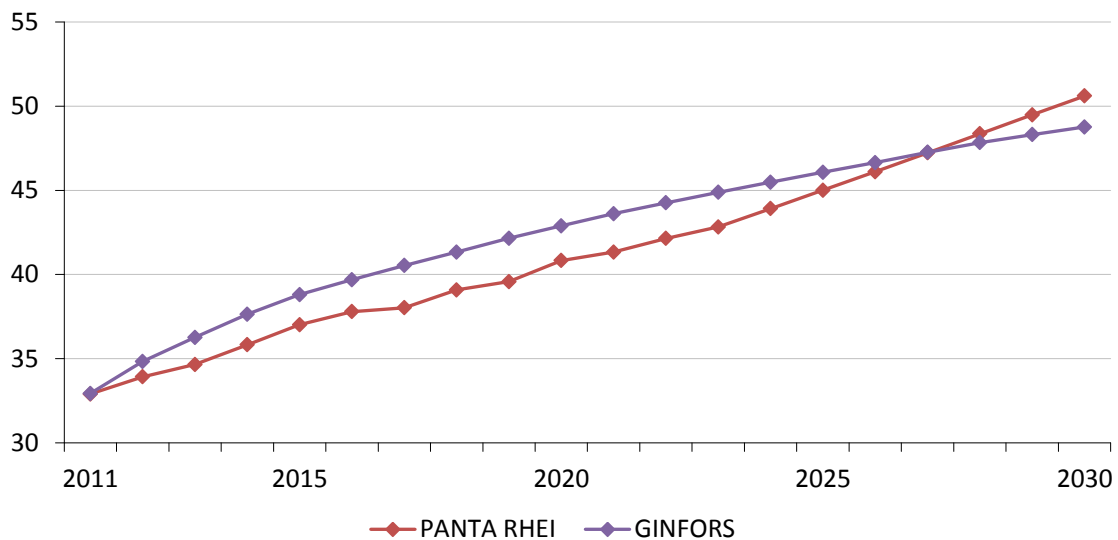


Abbildung 7: Total Material Requirement (TMR) abiotischer Rohstoffe ohne Energieträger – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI (MaRes) und GINFORS (MACMOD) (2011 = 100)



Auffällig ist, dass wiederum Metalle als treibende Kraft des beobachteten Indikatoranstiegs ausgemacht werden können. Im Vergleich beider Simulationsergebnisse zeigt sich außerdem, dass beide Modelle einen markanten Anstieg des Anteils der Metalle am gesamten abiotischen TMR projizieren. In den MaRes-Projektionen beläuft sich dieser am Ende des Simulationszeitraums auf 50,6%, in den MACMOD-Berechnungen wird ein Anteil von 48,8% für das Jahr 2030 ausgewiesen.

Abbildung 8: Metalle – Anteile am abiotischen Total Material Requirement (TMR) inklusive Energieträger in v.H. – Berechnungen auf Grundlage von PANTA RHEI und GINFORS



3. Die globale Perspektive

Die bislang betrachteten eigenen Vorarbeiten erlauben keine weltweite Analyse der Rohstoffnutzung. Dies ist auf der einen Seite den in diesen Forschungsarbeiten adressierten Fragestellungen und auf der anderen Seite den internationalen Datenverfügbarkeiten zur Ressourcenextraktion geschuldet. Zur Abbildung globaler historischen Entwicklungstendenzen wird in diesem Abschnitt daher auf die Ergebnisse von Krausmann et al. und von SERI zurückgegriffen. Umfassende globale ex ante Simulationsrechnungen sind im Moment nicht verfügbar.¹⁰ Der abschließende Unterabschnitt fasst daher lediglich die Kernergebnisse einer Risikoanalyse von Pirgmaier et al. (2011) zusammen.

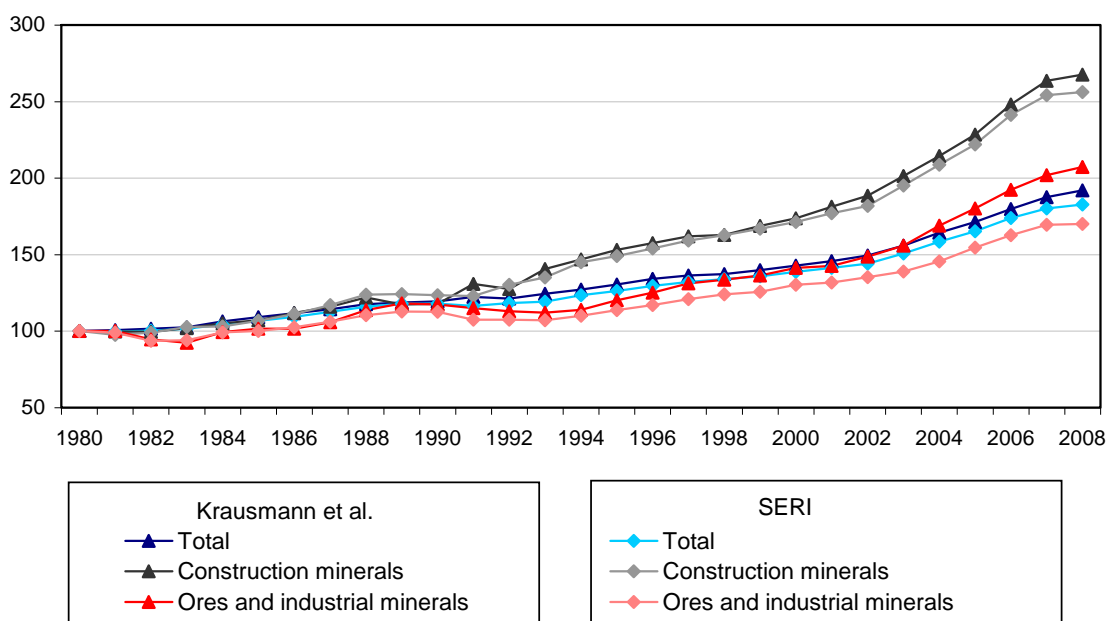
3.1 Ex post Analyse

Nachstehende Abbildung zeigt die Entwicklung der weltweiten Ressourcenextraktionen insgesamt sowie für die Materialkategorien „Baumineralien“ und „Metalle und Industriemineralien“, jeweils dargestellt als Index 1980=100 für den Zeitraum von 1980 bis 2008. Aus dieser Gegenüberstellung lässt sich Folgendes ablesen:

- Zur Entwicklung der weltweiten Ressourcenextraktionen **insgesamt** (Biomasse + fossile Energieträger + Erze + Baumineralien + Industriemineralien) kommen beide Untersuchungen zu sehr ähnlichen Abschätzungen: Innerhalb von 28 Jahren hat sich die weltweite Ressourceninanspruchnahme nahezu verdoppelt. Insbesondere seit Beginn des neuen Jahrtausends ist es zu einer Beschleunigung der Entwicklung gekommen. Auch im Hinblick auf die absolute Dimension unterscheiden sich die jeweiligen Abschätzungen nicht wesentlich (in 2000: Krausmann et al. 49,7 Mrd. Tonnen; SERI 52,7 Mrd. Tonnen).

¹⁰ Hier zeigt sich dringender Forschungsbedarf. Ein möglicher Ansatzpunkt könnte auf den aktuellen Arbeiten von Lutz und Wiebe (2012) ansetzen.

Abbildung 9: Historische Entwicklung der weltweiten Ressourcenextraktionen im Zeitraum 1980 bis 2008



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Daten aus Krausmann et al. 2011 und aktuellen Daten des online Portals für material flow data des Sustainable Europe Research Institute (SERI)¹¹.

- Trotz sehr unterschiedlicher empirischer Fundierung kommen beide Untersuchungen auch bei den **Baumineralien** zu sehr ähnlichen Abschätzungen: Im Vergleich zu 1980 lag die weltweite Extraktion im Jahr 2008 um mehr als eine Faktor 2,5 höher. Auch hier wird von beiden Studien eine Beschleunigung der Dynamik seit der Jahrtausendwende gesehen und auch Abweichungen im Hinblick auf die absolute Dimension fallen vergleichsweise gering aus (in 2000: Krausmann et al. 17,5 Mrd. Tonnen; SERI 19,2 Mrd. Tonnen).
- Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch im Hinblick auf die Materialkategorie **Erze und Industriemineralien**. Während die materialflows.net-Datenbank von SERI hier „lediglich“ einen Anstieg der weltweiten Extraktionen um rund 70% seit 1980 und damit ein geringeres Wachstum als bei den Ressourcenextraktionen insgesamt dokumentiert, kommen Krausmann et al. zu dem Ergebnis, dass sich die weltweiten Extraktionen im gleichen Zeitraum mehr als verdoppelt haben. Auch im Hinblick auf die absolute Dimension zeigen sich deutliche Unterschiede (in 2000: Krausmann et al. 4,5 Mrd. Tonnen; SERI 6,9 Mrd. Tonnen).

¹¹ Die in materialflows.net dokumentierten Daten zur Extraktion von Industriemineralien in den Vereinigten Staaten von Amerika in den Jahren 2005ff. wurden aufgrund offensichtlicher Fehlerhaftigkeit bereinigt.

Diese kurze Analyse zu den weltweiten Entwicklungstendenzen bei der Ressourcenextraktion liefert im Hinblick auf den Handlungsbedarf für Ressourceneffizienz in Deutschland folgende Erkenntnisse:

- Dass es in den letzten 30 Jahren zu einem erheblichen Anstieg der weltweiten Ressourcenextraktionen gekommen ist, gilt auch für die im Zentrum des deutschen Ressourceneffizienzprogramms stehenden Rohstoffe (Erze, Bau- sowie Industriemineralien).
- Nach übereinstimmenden Erkenntnissen der analysierten Studien gilt dies in besonderem Maße für die Baumineralien. Dennoch ist der sich aus weltweiten Extraktionspfaden abzuleitende Handlungsbedarf in Deutschland bei Baumineralien nur eingeschränkt: Zum einen handelt es sich um eine Materialkategorie, die in nur geringem Maße Gegenstand des Welthandels ist. Damit sind die wirtschaftlichen Akteure in Deutschland aber auch nur in sehr geringem Maße für die Extraktion von Baumineralien in anderen Ländern verantwortlich. Zum anderen ist auch eine Argumentation über die begrenzte (weltweite) Verfügbarkeit für Baumineralien wenig zielführend. Handlungsbedarf im Hinblick auf Baumineralien ist vielmehr primär aus einer nationalen Sichtweise abzuleiten.
- Die deutlichen Schätz-Unterschiede der absoluten Dimension der im Rahmen dieses Textes näher fokussierten Materialkategorie Erze und Industriemineralien lässt weiteren Forschungsbedarf erkennen. Hieraus kann jedoch kein grundlegendes Misstrauen gegenüber den Methoden der Materialflussrechnung genährt werden (vgl. zu diesem Punkt bspw. auch Fischer-Kowalski et al. 2011).
- Unabhängig davon, ob die weltweiten Extraktionen von Erzen und Industriemineralien im Zeitraum von 1980 bis 2008 nun um 70 oder um 107% gestiegen sind, zeigen die Preisentwicklungen auf den Rohstoffmärkten in den letzten Jahren, dass zumindest bei einigen Erzen und nicht-metallischen Mineralien bereits heute eine weltweite Nachfrage erreicht ist, die nicht ohne Weiteres durch bereits erschlossene Vorkommen befriedigt werden kann.

3.2 Risiken der Ressourcennutzung

Im Rahmen des MACMOD-Projektes wurden von Pirgmaier et al. verschiedene Risiken, die mit der zukünftigen Ressourcennutzung in Europa verbunden sind, analysiert. Zentrales Ergebnis dieser Analysen ist eine Risiko-Matrix für wichtige Ressourcenkategorien mit Informationen zu den Risikoarten, der zeitlichen Dimension, Beispielen und quantitativen Aussagen zu den Risiken. Zudem werden Hinweise auf ökonomische, ökologische und soziale Folgen gegeben. Die Risikoanalyse umfasst acht Ressourcenkategorien, von denen in folgender Abbildung lediglich diejenigen vier enthalten sind, die im Zentrum des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes) stehen:

1. Metalle – Eisen und Stahl
2. Metalle – Andere Metalle
3. Mineralische Rohstoffe – Baumineralien
4. Mineralische Rohstoffe – Industriemineralien

Diese Ressourcenkategorien stellen die eine Dimension der Risiko-Matrix dar.

Abbildung 10: Matrix der mit der Ressourcennutzung in der EU verbundenen Risiken

		Eisen & Stahl	Andere Metalle	Baumineralien	Industriemineralien
Verfügbarkeit	Geologische Verfügbarkeit	Produktion ist energieintensiv, erschließbare Vorkommen von Eisenerzen sind geographisch breit gestreut	Seltene Erden: weitverbreitete Vorkommen auf allen Kontinenten	In einigen EU-Ländern eingeschränkte geologische Verfügbarkeit und topografische Zugänglichkeit	Die meisten Industriemineralien sind in der Erdkruste hinreichend verfügbar, daher gemeinhin geringe Risiken
Technologie	Substitutions- und Recyclingoptionen	Möglichkeiten zur Substitution von Eisen & Stahl steigen; steigende Anteile von Eisenschrott	Seltene Erden: begrenzte Recyclingoptionen	Recyclingpotentiale sind hoch; Anteile in der Praxis sehr unterschiedlich	Eingeschränkte Substituierbarkeit; nicht verfügbar für Recycling, trotz indirekter Gewinnung (z.B. Feldspate in Glas)
Ökonomische und politische Aspekte	Ökonomische Verfügbarkeit			Einschränkungen aufgrund von Bodennutzungskonkurrenzen	
	Marktmacht	3 größte Eisenerzproduzenten kontrollieren 75-80% des globalen Angebotes	Hohe Marktkonzentration für einige kritische Metalle (z.B. Antimon, Gallium, Germanium, Indium, Seltene Erden, Wolframit weitgehend durch China)		Hohe Angebotskonzentration bei bestimmten Mineralien (z.B. Graphit); Handelsbarrieren
	Importabhängigkeit	Hohe aber nicht kritische Abhängigkeit der EU von importierten Eisenerzen	Europa ist zu 100% importabhängig bei einer Vielzahl von seltenen Metallen (z.B. Seltene Erden)		Hohe Importabhängigkeit in Bezug auf einige Industriemineralien (z. B. Phosphor)
	Ressourcenpreise	Zählen immer noch zu den preiswertesten Metallen, erwartete künftige Preisanstiege können jedoch ökonomische Folgen haben	Metallindustrie ist auf verschiedene Energiequellen angewiesen, insbesondere auf Elektrizität	Auf lange Sicht Anstieg, falls Raumplanung nicht implementiert	Globale Nachfragetrends führen zu einem Preisanstieg für bestimmte Industriemineralien
	Ökonomische Verwundbarkeit	Hohe ökonomische Bedeutung, da nahezu alle Industriesektoren auf Eisenerze angewiesen sind; EU ist zweitgrößter Hersteller von Eisen und Stahl in der Welt	Hohe Relevanz von seltenen Metallen in vielen kohlenstoffarmen Technologien; Abhängigkeit moderner Technologien von Aluminium, Blei und Kupfer	Transportkostensensitiv, müssen lokal bezogen werden	Hohe Bedeutung in einer großen Auswahl an Wirtschaftszweigen; viele Industriemineralien können nicht substituiert werden
Umwelt	Umweltwirkungen	Aus globaler Perspektive hat in erster Linie die Eisen- und Stahlproduktion die größten negativen Umweltwirkungen von allen Metallen (Wirtschaftszweig mit hoher Energieintensität)	Der Abbau kritischer Metalle geht häufig mit beträchtlichen Umweltwirkungen einher, andererseits kann deren Einsatz in kohlenstoffarmen Technologien (z.B. EE-Anlagen) zu Umweltentlastungen führen	Landschafts- und Biotopzerschneidung. Emissionen in Verbindung mit Abbau, Transport, Verarbeitung und Abfalllagerung	In Verbindung mit Abbau, Transport, Verarbeitung und Abfalllagerung
	Risiken von Naturkatastrophen	Japan ist weltweit größter Anbieter von Eisen und Stahl; 5 japanische Produktionsstätten sind in von Tsunamis betroffenen Regionen angesiedelt			

Quelle: Pirgmaier et al. 2011, S. 9

Im Gegensatz zu den meisten anderen Studien zu Risiken der Ressourcennutzung, werden von Pirgmaier et al. Risiken für diese breiten Kategorien und nicht auf einer tiefer disaggregierten Ebene (z.B. für einzelne Erze oder Mineralarten) beschrieben. Sehr wohl werden Beispiele für spezifische Rohstoffe angeführt, es wurde jedoch versucht Risiken für die angeführten Ressourcenkategorien zu generalisieren um einen möglichst umfassenden Überblick zu den potentiellen zukünftigen Risiken im Zusammenhang mit der Ressourcennutzung auf Basis von Literaturstudien zu liefern.

Eine strukturierte Analyse und Beschreibung der Risiken bedarf einer gründlichen und umfangreichen Rahmens. Aufbauend auf existierende Studien wurde ein System von Risiken entwickelt, welches diese den folgenden vier Hauptkategorien zuordnet:

- **Verfügbarkeit:** geologische und ökologische Verfügbarkeit
- **Technologiebezogene Risiken:** Abbautechnik, Substitutions- und Recyclingoptionen
- **Risiken mit ökonomischem und politischem Bezug:** Ökonomische Verfügbarkeit, Marktmacht, Importabhängigkeit, Entwicklung von Ressourcenpreisen, ökonomische Verwundbarkeit
- **Risiken mit ökologischem Bezug:** Umweltwirkungen, Risiken von Umweltkatastrophen

Diese Kategorien stellen die zweite Dimension der Risiko-Matrix dar. Einen umfangreichen Überblick zu den Risiken, welche mit jeder der vier Materialkategorien verbunden sind, gibt Abbildung 10.

Die Analyse von Pirgmaier et al. zeigt auf, dass in Bezug auf Metalle und nichtmetallische Mineralien die Hauptrisiken in ähnlichen Kategorien zu finden sind. Vornehmlich hohe Marktkonzentrationen führen zu hohen Risiken von Angebotsbeschränkungen und der Ausnutzung von Marktmacht einiger weniger globaler Akteure zur Beeinflussung der Weltmarktpreise. Zudem ist eine hohe Importabhängigkeit für eine Vielzahl von Rohstoffen in diesen Materialkategorien gegeben. Zweites wichtiges Risiko im Hinblick auf eine Vielzahl von Rohstoffen in den Materialkategorien Metalle und nichtmetallische Mineralien sind die begrenzten Möglichkeiten zur Substitution oder zum Recycling.

Fazit

Die ex-post Analyse der Entwicklung von Rohstoffnutzung und Ressourcenproduktivität in Deutschland hat gezeigt, dass die im Nachhaltigkeitsindikator „Rohstoffproduktivität“ abgebildete Dynamik die dahinterliegenden Prozesse nur zum Teil wiedergeben kann. Ein Großteil des dokumentierten Produktivitätsfortschritts ist auf den Rückgang der Extraktionen von Baumineralien zurückzuführen. Da jedoch die Wahl des Basisjahres für den Indikator mit dem Höhepunkt des vereinigungsbedingten Baubooms in den neuen Bundesländern zusammenfällt, ist dieser Rückgang weniger auf einen effizienteren Umgang mit Baumineralien als in ganz überwiegendem Maße auf eine reduzierte Bauleistung zurückzuführen.

Zudem hat die Nichtberücksichtigung von indirekten Importen und ungenutzten Entnahmen im Nachhaltigkeitsindikator zur Folge, dass auf der einen Seite die Dynamik der Produktivitätsentwicklung zu positiv dargestellt ist und auf der anderen Seite die Bedeutung der Materialkategorie „Erze“ für die Rohstoffnutzung in Deutschland deutlich unterschätzt wird.

Bisherige Projektionen zur Entwicklung von Rohstoffnutzung und Ressourcenproduktivität in Deutschland auf Grundlage der umweltökonomischen Modelle PANTA RHEI und GINFORS kommen

zu der Einschätzung, dass der Materialeinsatz abiotischer Rohstoffe im Inland auch in Zukunft weiter leicht rückläufig sein wird. Bis zum Jahr 2030 wird mit einer Steigerung der Rohstoffproduktivität bezogen auf den DMI-Indikator um rund 40% gegenüber dem Wert des Jahres 2011 gerechnet.

Bezieht man jedoch die indirekten Importe und die ungenutzten Extraktionen mit ein, so wandelt sich dieses Bild deutlich. Bezogen auf den TMR-Indikator wird in beiden Modellen erwartet, dass sich die Rohstoffinanspruchnahme (ohne Biomasse und Energieträger) in Deutschland in Zukunft weiter erhöhen wird. Lediglich im Hinblick auf die Frage, ob dies mit einer stagnierenden (PANTA RHEI) oder leicht steigenden (GINFORS) Ressourcenproduktivität einhergeht, kommen die Projektionen zu unterschiedlichen Einschätzungen. Beiden Projektionen gemein ist die Einschätzung, dass insbesondere die Inanspruchnahme von Metallen in Deutschland bis 2030 direkt und indirekt dramatisch ansteigen wird.

In beiden Studien wurden bereits Simulationsrechnungen durchgeführt, welche nahelegen, dass eine ambitionierte Rohstoffpolitik eine absolute Entkopplung der Entwicklung von TMR und Bruttoinlandsprodukt bei gleichzeitig positiven Wirkungen auf das Wirtschaftswachstum erreichen kann. Hierzu muss allerdings kritisch angemerkt werden, dass auf Basis derzeit verfügbarer Datensätze der volkswirtschaftliche Einsatz einzelner in ProgRes angesprochener Materialien wie auch die stofflichen Nutzung biotischer Rohstoffe oder die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Abfallwirtschaft (Sekundärrohstoffe) nicht in wünschenswerter Auflösung abgebildet werden können. Diesbezügliche Erweiterungen des empirischen Fundaments sowie darauf aufbauende weitergehende Simulationsrechnungen verbleiben somit als wünschenswerte Zukunftsaufgaben.

Literatur

- Capros, P., Mantzos, L., Tasios, N., De Vita, A. and Kouvaritakis, N. (2010): EU Energy Trends to 2030 – Update 2009. ICIS-NTUA, Athens, Greece. Client: European Commission.
- Distelkamp, M., Meyer, B. and Meyer, M. (2010): Quantitative and qualitative Effects of a forced Resource Efficiency Strategy. Summary Report of Task 5 within the framework of the “Material Efficiency and Resource Conservation” (MaRes) Project.
- Distelkamp, M., Meyer, M. and 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 Groningen, April 2012.
http://www.wiod.org/conferences/groningen/Paper_Distelkamp_et_al.pdf
- 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. State of the Art and Reliability Across Sources. In: Journal of Industrial Ecology, 15 (6), 855-875.
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H. and Fischer-Kowalski, M. (2009): Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. Ecological Economics, 68, 2696–2705.
- Lutz, C. and Wiebe, K. (2012): Consumption-based carbon emissions in a post-Kyoto regime until 2020. Paper prepared for the Final WIOD Conference: Causes and Consequences of Globalization, Groningen.
- Meyer, B. (2011): Macroeconomic Modelling of Sustainable Development and the Links between the Economy and the Environment. ENV.F.1/ETU/2010/0033. Final Report to the EU Commission.
http://ec.europa.eu/environment/enveco/studies_modelling/pdf/report_macro-economic.pdf
- Meyer, B., Meyer, M., Distelkamp, M. (2011): Modelling Green Growth and Resource Efficiency: New Results. In: Mineral Economics (Doi: 10.1007/s13563-011-0008-3).
- Pirgmaier, E., Kalcik, R., Lugschitz, B., Polzin, C., Giljum, S. (2011): Risks associated with future European resource use. Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment. Task 3.2. SERI, Vienna.

Methodische Anmerkungen

1. Einführung

Die Bundesregierung hat am 29.2.2012 das Programm „ProgRes (Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen)“ beschlossen.¹² Es handelt sich um eine umweltpolitische und ökonomische Initiative zur Steigerung der Produktivität des Einsatzes derjenigen natürlichen Ressourcen in Deutschland, die bislang eher weniger im Blickfeld politischen Handelns gewesen sind – die abiotischen Rohstoffe mit Ausnahme der fossilen Energieträger sowie die biotischen Rohstoffe, soweit sie stofflich genutzt werden. Der wirtschaftliche Sinn dieses Programms liegt auf der Hand: Deutschland ist einerseits ein rohstoffarmes Land, produziert und exportiert aber in hohem Maße Industrieprodukte, die aus eben diesen Rohstoffen hergestellt werden. Mit Blick auf die geringe Zahl der Anbieter vor allem bei den verschiedenen Metallen (Pirgmaier et al. 2011) und der starken Nachfrage nach Rohstoffen aus den Schwellenländern wird ein enormes Gefährdungspotential für die Wirtschaft in Deutschland sichtbar. Die ökologische Problematik der dramatisch ansteigenden Nachfrage nach Rohstoffen ist gleichfalls unübersehbar: Die Gewinnung von Rohstoffen schädigt die Böden, die Luft und die Biodiversität. Ihr Transport und ihre Verarbeitung führen zu Emissionen von vielfältigen Schadstoffen in die Natur.

Die nationale Nachhaltigkeitsstrategie enthält bereits ein ambitioniertes Ziel: Die Rohstoffproduktivität soll im Jahre 2020 doppelt so hoch sein wie im Jahre 1994. Um dieses Ziel zu erreichen, setzt die Bundesregierung auf ein Evaluierungsverfahren, bei dem das Statistische Bundesamt jährlich über die Entwicklung der Indikatoren zur Ressourcenproduktivität berichtet.

Ferner wird die Regierung selbst im Vierjahresrhythmus über den Fortgang der Initiative berichten, die Fortschritte bewerten und das Programm fortentwickeln (Bundesregierung 2012, S. 7). Bei der Bewertung der ergriffenen Maßnahmen sowie der Fortentwicklung des Programms ist der Einsatz von umweltökonomischen Modellen unerlässlich, weil der Zusammenhang zwischen den ergriffenen Maßnahmen und der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung einerseits und dem Rohstoffverbrauch andererseits außerordentlich komplex ist.

Die Literatur zur ex-post Analyse des Rohstoffverbrauchs ist sehr umfassend (Krausmann et al. 2009). Die Erfahrungen zur Modellierung des Materialverbrauchs mit vollintegrierten Modellen sind zumindest im Vergleich zur Modellierung umweltökonomischer Maßnahmen im Kontext von Energieverbrauch und Klima noch überschaubar: Im Rahmen des MOSUS Projektes (Giljum et al. 2008) wurde das Modell GINFORS (GWS) zur Analyse des Materialverbrauchs in ausgewählten europäischen Ländern eingesetzt, die umweltökonomischen Simulationen des Modellierungsprojektes der Aachener Stiftung (Meyer et al. 2007) und des MaRes Projektes (Distelkamp et al. 2010) für Deutschland wurden mit PANTA RHEI (GWS) gerechnet. Auf der europäischen Ebene liegen mit dem Projekt PETRE (Ekins und Speck 2011) Erfahrungen zu den Wirkungen einer ökologischen Steuerreform auf den direkten Materialverbrauch vor. Ferner wurde kürzlich das MACMOD Projekt

¹² Bundesregierung (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012.

abgeschlossen (Meyer 2011), in dem verschiedene Maßnahmen zur Minderung des Ressourcenverbrauchs für 18 bzw. alle europäischen Länder für den Indikator TMR simuliert wurden, der nicht nur den direkten Materialeinsatz, sondern auch den indirekt in den importierten Gütern enthaltenen Materialeinsatz misst. In beiden Studien wurden parallel das europäische Modell E3ME (Cambridge Econometrics) und das globale Modell GINFORS (GWS) eingesetzt.

Vor Hintergrund der mehrjährigen Erfahrungen, welche die Autoren des vorliegenden Papiers in den genannten Projekten sammeln konnten, sollen die folgenden Seiten dazu dienen, die wesentlichen Anforderungskriterien an ein idealtypisches Analyseinstrument zur Evaluierung umweltpolitischer Maßnahmen im Kontext des Deutschen Ressourceneffizienzprogramm aufzuzeigen und diese exemplarisch zu konkretisieren. In diesem Sinne folgen unsere Anmerkungen einem normativen Ansatz, welcher die in AP 3.1 geleistete Bestandsaufnahme der derzeit verfügbaren und in der Literatur beschriebenen Modelle komplementär ergänzt.

Hierzu sei grundsätzlich angemerkt, dass mit der Ressourcennutzung vielfältige Fragestellungen verbunden sind, welche auf aggregierter Ebene mit makroökonomischen Simulationsmodellen analysiert werden können, deren detaillierte Betrachtung aber mitunter erst beim ergänzenden Einsatz spezialisierter Partialmodelle umfassend möglich wird. Da also für spezifische Fragestellungen individuelle Modellkombinationen zur Abbildung der jeweiligen Herausforderungen benötigt werden, kann allein auf Basis einer methodologischen Diskussion kein generell anwendbarer idealer Modellrahmen hergeleitet werden.

Solange Wirkungen ressourcenpolitischer Maßnahmen auf das sozioökonomische System und die Umwelt abgebildet werden sollen ist jedoch offensichtlich, dass die jeweiligen Berechnungen auf einem vollintegrierten Modellkern basieren sollten, welcher sämtliche Aspekte der Einkommensentstehung, Einkommensverteilung, Einkommensumverteilung und Einkommensverwendung umfasst. Hinsichtlich der Umweltwirkungen können hierbei zumindest Auswirkungen auf die „pressures“ – also Entnahmen aus der Natur und Emissionen in die Natur – durch geeignete physische Indikatoren abgeschätzt werden. Weitergehende Modellierungen konkreter Beeinträchtigungen der Umwelt könnten dann von bio- physikalischen naturwissenschaftlichen Modellen geleistet werden, die mit dem sozioökonomischen Kern zu koppeln wären. Sollen zudem detaillierte Materialkategorien betrachtet werden, welche nicht mehr im Rahmen der üblichen Disaggregations-ebene der Input Output Rechnung erfasst werden können, wäre die Ankopplung diesbezüglich geeigneter Partialmodelle wünschenswert.

Ohne spezifischen Anwendungsbezug erscheint eine konkrete kombinatorische Auflistung sämtlicher wünschenswerter Modellkonstellationen allerdings wenig zielführend. Daher werden sich die folgenden Anmerkungen auf eine Diskussion des makroökonomischen Modellierkerns konzentrieren, hierbei jedoch auch auf die soeben angesprochenen Kopplungspotenziale exemplarisch eingehen. Folgende Gliederungspunkte werden hierbei explizit angesprochen: Allgemeine Anforderungen, spezifische Anforderungen an die Materialmodellierung, die Rolle von Partialmodellen, Fragen der Modellierung anderer Ressourcen, Anforderungen an die Modellierung des sozioökonomischen Systems sowie Möglichkeiten zur Erfassung von Unsicherheit.

Die allgemeinen Anforderungen beziehen sich auf den Modelltyp, die theoretische Fundierung des Modells, seine Parametrisierung und die Wahl der zeitlichen Skalierung.

Die spezifischen Fragen zur Materialmodellierung sind: Ist der geeignete Indikator modelliert? Reflektiert die Tiefengliederung der Materialien die grundsätzliche Zielsetzung des ProgRes Programms? Ist die Kreislaufwirtschaft in ökonomischer und physischer Hinsicht ausreichend abgebildet? Sind die Schnittstellen zwischen ökonomischen und physischen Variablen adäquat modelliert?

Exemplarische Ansatzstellen zur Einbindung von Partialmodellen werden mit Blick auf seltene Erden sowie Recyclingoptionen angesprochen.

Im Hinblick auf den Einsatz der anderen Ressourcen ist zunächst zu fragen, welche Ressourcen einbezogen werden müssen. Ferner ist zu prüfen, welche Anforderungen an die Modellierung des Einsatzes der anderen Ressourcen gestellt werden müssen.

Die Anforderungen an die Modellierung des sozioökonomischen Systems richten sich auf die Abbildungen des Wirtschaftskreislaufs und der Interdependenz der Branchenentwicklung mit dem gesamtwirtschaftlichen Geschehen.

Als Instrumente zur Gestaltung der Umweltpolitik haben Modelle zum einen die Aufgabe, den sich in Langfristprojektionen der wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Entwicklung abzeichnenden Handlungsbedarf zu identifizieren. Ferner können in Simulationsrechnungen geeignete umweltpolitische Maßnahmen zur Behebung von Zielverletzungen gefunden werden. Hierbei sollte sich der Anwender aber stets darüber bewusst sein, dass jedes Modell die komplexen Wirkungszusammenhänge der Realität nur vereinfacht abbilden soll und kann. Jede modellbasierte Analyse ist daher zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet. Idealerweise sollte daher angestrebt werden, den jeweiligen Unsicherheitsgrad einer betrachteten Modellrechnung explizit sichtbar zu machen, womit sich die Frage stellt, ob und wie man diese Unsicherheiten methodisch abbilden kann.

Im Hinblick auf die Erfassung von Unsicherheit geht es zunächst um die Frage, ob die Modellierung geeignet ist, die Auswirkungen politischer, kultureller und technischer Entwicklungen grundsätzlich aufzunehmen, die nicht endogen im Modellzusammenhang erklärt werden, aber als exogene Variablen das Ergebnis mitbestimmen. Hier kann es z. B. um die künftige Entwicklung wichtiger Rohstoffpreise oder den zu erwartenden langfristigen demografischen Wandel gehen. Ferner sollte geprüft werden, ob Informationen über die Fehler der Modellparameter vorliegen, die bei geeigneter technischer Ausstattung des Modells die Berechnung von Konfidenzintervallen bei der Wirkungsanalyse von Politikmaßnahmen gestatten.

2. Allgemeine Anforderungen

Der Modelltyp

Es sollte sich um ein Simulations- und Prognosemodell handeln, das für alternative Vorgaben der exogenen Variablen Zeitpfade der endogenen Variablen generiert. Wie bereits einleitend angesprochen, sollte der Modellkern dabei durch ein makroökonomisches Totalmodell gegeben sein, welches alle Aspekte der Einkommensentstehung, Einkommensverteilung, Einkommensumverteilung und Einkommensverwendung umfasst. Hierbei sollte es sich um ein nach Branchen gegliedertes System handeln, bei dem sich die gesamtwirtschaftlichen Variablen bottom up aus den

sektoralen Größen per expliziter Aggregation bilden lassen. Nur bei dieser integrierten Modellierung ist gewährleistet, dass sektoraler Strukturwandel und die makroökonomischen Aggregate sich konsistent entwickeln. Die tiefe sektorale Disaggregation ist unausweichlich, weil nur so eine verlässliche Anknüpfung der physischen Materialinputs möglich ist. Was dies konkret für die Modellierung bedeutet, wird im Abschnitt 6 näher erläutert.

Die theoretische Fundierung

Empirische Validität erfordert, dass die Modellierung begrenzte Rationalität der Agenten und Marktunvollkommenheiten zulässt. Van den Bergh et al. (2000) betonen, dass in umweltökonomischen Modellen diese Eigenschaften generell von großer Bedeutung sind. Bleischwitz und Ritsche (2011) haben gezeigt, dass Marktunvollkommenheiten in Form von Informationsdefiziten bei den Agenten, aber auch Marktzutrittsbarrieren gerade beim Materialeinsatz eine große Rolle spielen. Fischer et al. (2004) und Oakdene Hollins (2011) geben dafür empirische Belege.

Ferner sollten auf dem Arbeitsmarkt Marktungleichgewichte in Form der Nichträumung des Marktes zugelassen werden. Hinsichtlich der Marktformen sollte gefordert werden, dass oligopolistische Marktstrukturen, die Preissetzungsverhalten der Anbieter gestatten, möglich sind.

Der technische Fortschritt ist in Form der „eco – innovation“ eine zentrale Größe in der umweltpolitischen Diskussion. Bei der Modellierung des Materialeinsatzes muss bedacht werden, dass das Material Bestandteil des Produktes ist. Eine Änderung des Materialeinsatzes ist daher immer mit einer Änderung der Qualität des Produktes gegeben (Georgescu- Roegen 1990). Bei gegebener Produktqualität ist eine Reduktion des Materialeinsatzes nur durch die Vermeidung von Abfall möglich. Dies kann durch den Einsatz neuer Technologien, aber auch durch organisatorische Fortschritte in der Produktion geschehen. Über die Vermeidung von Abfall hinaus ist die Reduktion des Materialeinsatzes immer mit Änderungen der Produktqualität verbunden. Technischer Fortschritt beim Materialeinsatz ist also nicht nur in der Form der Prozessinnovation, sondern auch als Produktinnovation zu denken. Da die Auswirkungen der Produkt- und Prozessinnovationen in den Daten über Materialinputs nicht identifiziert werden können, empfiehlt sich der Ansatz einer reduzierten Form zur Endogenisierung des technischen Fortschritts: Der Kostendruck der relativen Preise der Materialinputs wird in beiden Fällen (Prozessinnovation und Produktinnovation) Fortschritte induzieren.

Der beschriebene Ansatz ist in der Lage, die inkrementellen Fortschritte zu erfassen. Darüber hinaus findet aber auch umwälzender i.d.R. abrupt auftretender technischer Fortschritt statt, der nicht endogenisiert werden kann. Die Modellstruktur sollte es erlauben, dass diese Art des technischen Fortschritts durch exogene Eingriffe in seiner Wirkung auf die Materialinputs abgebildet werden kann.

Die Parametrisierung

Die Modellierung von Entscheidungen bei begrenzter Rationalität auf unvollkommenen Märkten eröffnet eine Fülle von Spezifikationsmöglichkeiten, so dass der Selektion der „wahren“ Struktur sehr viel mehr Beachtung geschenkt werden muss als es im engen neoklassischen Rahmen der Fall ist. Die Parametrisierung des Modells sollte deshalb nach Möglichkeit durch den Einsatz ökonomisch- statistischer Verfahren erfolgen. Dies setzt voraus, dass Zeitreihendaten vorliegen, die eine

hinreichend große Zahl von Freiheitsgraden bei der Schätzung der Parameter ermöglichen. Damit ist dann gleichzeitig empirische Validität des Modells gewährleistet.

Gegen die ökonometrische Schätzung der Parameter wird gelegentlich eingewandt, dass damit nur das Verhalten der Vergangenheit abgebildet werden kann und damit tiefere Umwälzungen (sei es technischer oder gesellschaftlicher Art) nicht abgebildet werden können. Der Einwand ist gerechtfertigt, wenn wir konkrete Informationen über solche bevorstehenden Strukturbrüche haben. Deshalb muss die Technik des Modells so ausgelegt sein, dass diese zusätzlichen a priori Informationen in das System eingebaut werden können.

Die Skalierung in der Zeit

ProgRess ist ein langfristig angelegtes Projekt, das immer im Zusammenhang mit den anderen umweltökonomischen Analysebereichen gesehen werden muss. Die Strategien zur Bewältigung der Klimaproblematik werden inzwischen international überwiegend in ihren Auswirkungen bis zum Jahr 2050 diskutiert, was dann auch diesen Zeitrahmen für die Anwendung des Materialmodells als sinnvoll erscheinen lässt.

Die Berichterstattung des Statistischen Bundesamtes über den Materialeinsatz in Deutschland wird im Jahresrhythmus erfolgen, die Evaluierung der Entwicklung durch die Bundesregierung wird mit einer Periodizität von 4 Jahren stattfinden. Somit ist das Jahr als Grundperiode der Modellierung plausibel. Insofern ist auch eine jährliche Aktualisierung der einzusetzenden Modelle angesagt.

Die lange Frist schließt einfache statische Modellierungsansätze mit konstanten Strukturen definitiv aus. Eine anspruchsvolle Modellstruktur mit weitgehender Endogenisierung seiner Variablen ist gefragt.

3. Die spezifischen Anforderungen an die Materialmodellierung

Ist der geeignete Indikator modelliert?

Der in der Nachhaltigkeitsstrategie beobachtete Indikator der Rohstoffproduktivität ist als Quotient aus dem preisbereinigten Bruttoinlandsprodukt in € und dem direkten Materialinput (DMI) in physischen Einheiten definiert. Der direkte Materialinput enthält die Gewichte der inländisch entnommenen Rohstoffe und die der importierten Rohstoffe, Halb- und Fertigfabrikate. Die Entwicklung dieses Indikators kann allerdings fehl interpretiert werden, weil Stoffflüsse, die durch die Produktion dieser Importe im Ausland erzeugt werden, nicht in die Betrachtung eingehen. Eine Substitution von rohstoffintensiver Produktion im Inland durch entsprechende Güterimporte wird den direkten Materialinput somit senken und die Materialproduktivität in Deutschland steigern. Analysen im Rahmen des MaRess Projektes (Distelkamp et al. 2010) haben gezeigt, dass ein beträchtlicher Teil der beobachtbaren Produktivitätssteigerungen in Deutschland auf diesen Effekt zurück zu führen ist. Das MACMOD Projekt hat gezeigt, dass auch in vielen europäischen Ländern diese Problematik beobachtbar ist (Meyer 2011). Aus diesem Grunde empfiehlt sich die Umrechnung der Importe in Rohstoffäquivalente (raw material equivalents, RME). Dabei werden alle importierten Güter mit ihren direkten und indirekten Rohstoffflüssen gewichtet, die zu ihrer Herstellung notwendig sind. Das Statistische Bundesamt geht dabei häufig davon aus, dass die importierten Güter im Ausland mit der in Deutschland verwendeten Technologie erzeugt werden. Das ist zunächst

eine erste und gute Annäherung an die tatsächlichen Relationen. Es sollte aber geprüft werden, ob an dieser Stelle nicht ergänzend das von der GWS und SERI entwickelte multiregionale Input Output Modell GRAM eingesetzt werden sollte, das für 50 Länder alle Informationen über die Input Output Verflechtungen und die Handelsverflechtungen in tiefer Gütergruppengliederung enthält (Wiebe et al. 2012).

Allerdings muss beachtet werden, dass alle Input basierten Indikatoren den Nachteil haben, dass sie nicht über Länder aggregiert werden können, weil Doppelzählungen durch den Handel zwischen den beteiligten Ländern auftreten. Dies wird beim Indikator Domestic Material Consumption DMC_{RME} vermieden, bei dem vom Indikator DMI_{RME} die Exporte und die in ihnen enthaltenen Stoffflüsse abgezogen werden. Man ermittelt dann den im Inland entstandenen Rohstoffverbrauch.

Dieser Indikator wird vom Statistischen Bundesamt für die Jahre ab 2000 zur Verfügung gestellt und sollte neben DMI und DMI_{RME} bei der Modellierung verwendet werden. Durch die Berücksichtigung des Abraums und des Aushubs, die bei der Materialentnahme anfallen, ist es möglich, den gesamten Materialverbrauch (TMC: total material consumption) einschließlich des nicht zur Güterproduktion genutzten zu ermitteln.

In welcher Disaggregation können die Indikatoren vorliegen?

Bei der Frage nach einer sinnvollen Disaggregation der Indikatoren nach Sektoren und Rohstoffarten muss die Antwort aus der Perspektive der Anschlussmöglichkeiten der physischen Daten an die ökonomischen Daten gegeben werden. Auf der ökonomischen Seite geben die Daten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (insbesondere die Detaillierten Jahresergebnisse der Inlandsproduktsberechnung und die Input-Output-Rechnung) die Anschlussmöglichkeiten vor. Vor diesem Hintergrund ist eine möglichst weitgehende Differenzierung der Materialinputs nach Sektoren und Materialarten wünschenswert, um einen bestmöglichen Anschluss an die den Materialinput treibende ökonomische Welt und eine Differenzierung in den Aussagen bezüglich der Umweltproblematik der Knappheitsdebatte zu ermöglichen. Diese Sicht macht zweierlei deutlich: Zum einen ist klar, dass die Modellierung der Ökonomie die tiefe sektorale Gliederung in den Mittelpunkt stellen muss. Zum anderen wird sichtbar, dass die Möglichkeiten der Materialmodellierung weit über bisherige Modellierungen hinaus reichen. Dieser Punkt ist wichtig im Hinblick auf die Analyse des Potenzials der im ProgRes Programm besonders hervorgehobenen Rolle der Substitution von nicht-biotischem Material durch biotisches Material für den Verbrauch nicht erneuerbarer Materialien. Ferner kann über eine generell tief gegliederte Struktur des Materials hinaus auch für einzelne Rohstoffe – wie etwa seltene Erden – bei entsprechend tiefer Disaggregation der ökonomischen Zusammenhänge ein geeigneter ökonomischer Treiber gefunden werden. Dies muss nicht bedeuten, dass der ökonomische Input-Output Datensatz generell tiefer disaggregiert werden müsste. Die Weiterentwicklung geht dann eher in die Richtung der Koppelung eines Partialmodells mit dem vollintegrierten Makromodell.

Wie ist generell die Modellierung des Materialmoduls zu wählen?

Im Idealfall existiert für jeden Rohstoff eine physische Input Output Tabelle. Als erklärende Größe des betrachteten physischen Inputs dient dann der entsprechende preisbereinigte monetäre Input, wobei der jeweilige Rohstoffpreis zur Preisbereinigung heran zu ziehen wäre. Dies ist aber nicht die

Realität der Datenverfügbarkeit. Rohstoffe sind i. d. R. zu Gruppen zusammengefasst, und es existiert häufig auch keine Zuordnung der physischen Inputs zu den produzierenden Branchen.

Bei der Modellierung der inländischen Extraktion ist zunächst an die preisbereinigte Bruttoproduktion der extrahierenden Branchen als die unmittelbare ökonomische Anschlussvariable zu denken. Allerdings wird auf diese Weise nicht immer eine eindeutige Relation zwischen der physischen und der ökonomischen Welt des Materialeinsatzes herstellbar sein, wie das folgende Beispiel zeigt: Handelt es sich bei dem Rohstoff um nichtmetallische Mineralien, so ist die preisbereinigte Bruttoproduktion des Sektors „Steine und Erden“ der adäquate Treiber. Wenn dagegen Bau- und Industriemineralien unterschieden werden, dann ist zwar nach wie vor der Sektor „Steine und Erden“ der extrahierende Bereich beider Materialkategorien, aber wenn dessen Bruttoproduktion steigt, würde dies auf eine Steigerung der Extraktion beider Rohstoffe hinweisen, obwohl beispielsweise nur die Nachfrage nach Baumineralien nicht aber nach Industriemineralien zugenommen hat. Es empfiehlt sich deshalb, differenzierte Informationen der Vorleistungsverflechtung zu nutzen. Man würde in diesem Fall die Lieferungen der Gütergruppe „Steine und Erden“ an Industriesektoren aufsummieren und damit die Extraktion der Industriemineralien und ferner mit den Lieferungen von „Steine und Erden“ an den Sektor „Hoch- und Tiefbau“ die Extraktion der Baumineralien treiben.

In analoger Weise dient die gesamte Importmatrix zur Auffindung geeigneter ökonomischer Treiber für die importierten physischen Materialien.

Schwieriger ist die Kopplung der direkt und indirekt in den importierten Halb- und Fertigfabrikaten enthaltenen Rohstoffe mit der ökonomischen Welt. Nur wenn die betreffenden direkten Materialinputs auf Grund von entsprechend detaillierten Materialflussrechnungen den verschiedenen Halb- und Fertigfabrikaten bereits zugerechnet wurden, kann eine sinnvolle Kopplung der physischen Inputs mit den preisbereinigten monetären Importen durchgeführt werden. Die indirekten Materialinputs, die durch die Produktion der Güter im Ausland erforderlich gewesen sind sollten auf der Basis internationaler Materialflussrechnungen erstellt worden sein.

Die enge Verzahnung von Vorleistungsverflechtung in der monetären Dimension und physischem Materialinput gewährleistet außerdem die für die Analyse von Politikmaßnahmen absolut wichtige simultane und konsistente Abbildung der Wirkung der Maßnahmen in beiden Dimensionen.

Die Schnittstelle zwischen der physischen und der ökonomischen Welt sind die Materialintensitäten. Für jede physische Materialinputvariable gemessen in Tonnen wird die zugehörige Materialintensität berechnet, indem der physische Materialinput durch den Wert des ökonomischen Treibers in preisbereinigten Währungseinheiten dividiert wird. Das Materialmodul dient also nur als Schnittstelle zwischen der ökonomischen Welt und der physischen Welt. Alle Vorgänge, die die Steigerung der Rohstoffproduktivität betreffen, sind auf der Ebene der ökonomischen Input- Output Modellierung abzubilden, worauf später einzugehen sein wird.

Ein Spezialproblem der Materialmodellierung: Recycling.

Recycling ist eine wichtige Strategie zur Steigerung der Rohstoffproduktivität im Rahmen des ProgRes Programm. Sowohl das MaRes Projekt (Distelkamp et al. 2010) als auch das MACMOD Projekt (Meyer 2011) haben gezeigt, dass in der Tat zumindest bei Metallen ein enormes Potenzial

zur Senkung des Rohstoffverbrauchs gegeben ist. Allerdings ist bei diesen Studien auch deutlich geworden, dass die Modellierung durch Datenlücken erheblich eingeschränkt ist (Meyer et al. 2012).

Die Input Output Tabellen weisen mit dem Sektor „Sekundärrohstoffe“ die ökonomische Seite des Einsatzes der Sekundärrohstoffe aus. Man kann auch in der Absatzstruktur des Sektors die verschiedenen Materialien identifizieren. So bestehen die Lieferungen des Sektors an die Stahlindustrie aus Eisen und Stahlschrott, die Lieferungen an die NE- Metallherstellung aus NE- Metallschrott und die Lieferungen an die Bauindustrie aus sekundärem Baumaterial. Es fehlt aber die physische Seite des Recycling völlig. Wir haben keine Information über das Aufkommen der verschiedenen Sekundärmaterialien und kennen auch nicht die physische Seite der Lieferungen des Recyclingsektors an die anderen Sektoren. Eine mit der Input Output Rechnung abgestimmte Bilanzierung des Sekundärmaterials gegliedert nach den verschiedenen Materialarten ist notwendig. In der MACMOD Studie hat man das Recycling auf der monetären Ebene per Annahmen modelliert und die Rückwirkungen auf den Einsatz des Primärmaterials berechnen können. Ob das dafür erforderliche Sekundärmaterial auch bereit stand, konnte man nur unterstellen. Insofern hatten die entsprechenden Simulationen den Charakter von Potenzialrechnungen (Meyer et al. 2012).

4. Zur Rolle von Partialmodellen

Die bisherige Darlegung hat betont, dass vollintegrierte Makromodelle natürlich nur dann ein geeignetes Fundament der Materialmodellierung sein können, wenn sie sowohl in ihren ökonomischen Strukturen als auch in der Erfassung des Materialeinsatzes eine tiefe Gliederung aufweisen. Modelle wie PANTA RHEI oder GINFORS z. B. leisten dies prinzipiell. Der Materialverbrauch wird in diesen Modellen immer in tiefem Sektor- und Produktgruppendedetail erklärt und es kann sehr differenziert gezeigt werden, welche Wirkungen vom Einsatz politischer Instrumente ausgehen. Darüberhinaus werden Summenaggregate wie DMI, DMC, TMC oder TMR für die gesamte Volkswirtschaft gebildet, die dann weitere Informationen liefern. Der Zusammenhang des Materialverbrauchs mit der ökonomischen Entwicklung und die Beeinflussung durch die Politik werden aber immer im Detail abgebildet.

Gleichwohl kann der Fall auftreten, dass eine sehr detaillierte Materialkategorie von erheblicher wirtschaftlicher oder ökologischer Bedeutung ist, die in der Disaggregationsebene der Input Output Rechnung nicht mit der ökonomischen Entwicklung verknüpft werden kann. Wir haben in diesem Zusammenhang die „seltenen Erden“ als ein Beispiel angesprochen, die bei der Herstellung bestimmter Telekommunikationsgeräte von großer Bedeutung sind. Hier wäre die Entwicklung eines Partialmodells sinnvoll, das die für die Erklärung des Einsatzes der seltenen Erden notwendigen ökonomischen Daten, die jenseits der Disaggregationsebene der Input- Output – Rechnung liegen, in einen sinnvollen Zusammenhang bringt. Als Beispiel für einen solchen Ansatz ist das partielle Gleichgewichtsmodell des ZEW (Pothen 2013) zu nennen. Um die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von Politikmaßnahmen abschätzen zu können, sollte man ein solches Partialmodell dann mit einem vollintegrierten Makromodell koppeln.

Bei der Diskussion der besonderen Probleme der Modellierung des Recycling wurde gezeigt, dass auch hier die ökonomische Datenbasis der Input Output Rechnung völlig unzureichend ist. Insofern ist auch hier der Einsatz eines Partialmodells zu empfehlen. Jochem et al. (2009) beschreiben die Kopplung des Stoffstrommodells MATEF mit dem ASTRA Modell sowie einem anderen ökonomischen

Modell (E3ME), bei der die sektorale Aufteilung der Produktion und Nachfrage als Input in das Modell eingehen, und umgekehrt die Impulse aus dem Materialmodell als Input in die Makromodelle eingehen. Hierzu wurden die Modelle durch ein EDV-basierte Datenaustausch-Modul – dem IMPULSE-Modul – miteinander gekoppelt. Der ISI-Modellierungsansatz erlaubt die explizite Analyse ausgewählter Stoffflüsse, die die Rohstoffproduktivität in hohem Maß bestimmen und für die Recycling technisch gesehen eine relevante Strategie darstellt.

5. Die Modellierung der anderen Ressourceninputs

Maßnahmen zur Steigerung der Materialproduktivität haben vielfältige Auswirkungen auf die Vorleistungsverflechtung und die Produktion der einzelnen Branchen sowie den Konsum. Damit gehen natürlich auch Wirkungen auf den Verbrauch der anderen Ressourcen einher, die man bei der Evaluierung von Maßnahmen beachten sollte. Auch wenn diese Effekte nicht im Zentrum der Betrachtung stehen, so sind sie doch wie bei jeder Therapiemaßnahme als „Nebenwirkungen“ zu berücksichtigen. Dies liegt auf der Hand beim Verbrauch fossiler Energieträger und den damit verbundenen CO₂ Emissionen. Die Inanspruchnahme von Flächen durch die zu untersuchenden Strategien und Maßnahmen ist deshalb von Bedeutung, weil die Substitution von nichtbiologischen Materialien durch biologische Materialien im Programm ProgRes in besonderer Weise akzentuiert wird.

Die Modellierung des Energieverbrauchs und der CO₂- Emissionen

Eine explizite Erklärung der Energieendnachfrage in physischen Einheiten, die in tiefer Gliederung von der Nachfrage der Unternehmen und dem Verbrauch der Haushalte getrieben wird, sollte Ausgangspunkt der Energiemodellierung sein. Dabei sollte die Substitution der einzelnen Energieträger unter angemessener Berücksichtigung der erneuerbaren Energien abgebildet werden. Ferner ist der Übergang von der Primär- zur Sekundärenergie darzustellen. Die Bilanzierung von Inlandsnachfrage, Exporten und Importen gestattet für die Primärenergie die residuale Bestimmung der Produktion. Aus der Inlandsnachfrage der fossilen Energieträger lassen sich über die Emissionskoeffizienten die energiebedingten CO₂ Emissionen berechnen. Bei der Bestimmung der Energienachfrage in physischen Einheiten ist wichtig, dass Konsistenz mit der monetären Seite im Rahmen der Input- Output Rechnung besteht, was je nach Modellierungsrahmen entweder implizit in der Modellierung simultan angelegt sein kann, oder durch feed back Schleifen vom Energiesystem in das Input Output System erreicht werden kann.

Die Flächeninanspruchnahme

Bei der Flächennutzung stehen die Inanspruchnahme für den Verkehr, für das Wohnen, für die Wirtschaft sowie für die Land- und Forstwirtschaft und die Erholung der Bevölkerung in Konkurrenz miteinander. Das Modell müsste in der Lage sein, die Verkehrsaktivitäten und die Siedlungsflächen in physischen Einheiten aus den ökonomischen Aktivitäten abzuleiten. In einer einfacheren Variante könnten Verkehrs- und Siedlungsflächen auch als exogene Szenario Variablen in ex ante Rechnungen vorgegeben werden. In analoger Weise könnte man mit der Erholungsfläche und der Fläche für das Produzierende und das Dienstleistungsgewerbe verfahren. Die für die Produktion der Land- und Forstwirtschaft vorhandene Fläche bliebe dann als Rest bestimmbar.

Aus der Relation zwischen der Flächeninanspruchnahme durch eine bestimmte Güterproduktion in Quadratmetern und dem preisbereinigten Produktionswert dieser Gütergruppe lässt sich die Flächenintensität der betreffenden Gütergruppe berechnen. Ökonometrische Analysen dieser historischen Zeitreihen geben Information darüber, inwieweit sie durch Preisrelationen (Preis der Fläche/Preis der Bruttoproduktion des Gutes) und Zeittrends erklärt werden können (Meyer et al. 1998).

Simulationsrechnungen zu den Wirkungen von Maßnahmen zur Steigerung der Substitution von abiotischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe können nun wie folgt angelegt werden: Soll die inländische Produktion von biotischen Rohstoffen gesteigert werden, so nimmt die Flächennutzung in diesem Bereich zu, was durch eine Erhöhung der Flächenintensität in der sonstigen landwirtschaftlichen Produktion kompensiert werden könnte. Etwaige Brachflächen mögen dies ermöglichen. Wird ein kritischer Wert in der Flächenintensität erreicht, wird die zusätzlich gewünschte Nachfrage nach abiotischen Materialien aus Importen bedient. An dieser Stelle wird deutlich, dass eine Koppelung mit einem globalen biophysikalischen Modell sinnvoll ist.

6. Anforderungen an die Modellierung des sozioökonomischen Systems

Bereits eingangs wurde die zentrale Bedeutung von sektoral tief disaggregierten makroökonomischen Modellen zur endogenen Simulation der wirtschaftlichen Entwicklung sowie des physischen Stoffwechsels mit der Natur angesprochen. Die Endogenität der Modellierung der wirtschaftlichen Entwicklung ist notwendig, damit das Modell in der Lage ist, die Auswirkungen von umweltpolitischen Maßnahmen auf die sozioökonomische Entwicklung abzubilden. Die tiefe sektorale Gliederung ist unverzichtbar, weil – wie gezeigt wurde – die Schnittstellen zwischen wirtschaftlicher Aktivität und Nutzung der Natur nur im Branchendetail sichtbar gemacht werden können.

Die endogene Modellierung der wirtschaftlichen Entwicklung erfordert die vollständige Abbildung des Wirtschaftskreislaufs. Dies wird im Überblick im nachfolgenden Abschnitt diskutiert. Um ein vollintegriertes System zu erhalten, das die Interdependenz zwischen gesamtwirtschaftlicher Entwicklung und dem für die Naturnutzung entscheidenden wirtschaftlichen Strukturwandel ermöglicht, sind im darauf folgenden Abschnitt Anforderungen an die Modellierung der Branchenentwicklung zu stellen.

Der Wirtschaftskreislauf

Die in der Abbildung 11 dargestellten schwarzen Pfeile repräsentieren die Geldströme, die innerhalb einer Periode zwischen den Akteuren des Wirtschaftsprozesses fließen. Die Bestandsgrößen wie Forderungen und Verbindlichkeiten, deren Wert zu einem Stichtag bestimmt wird, sind hier nicht dargestellt. Für zwei wichtige Bestände – den Kapitalstock der Produzenten und die Staatsverschuldung – wird aber gezeigt, wie sie durch die Ströme beeinflusst werden.

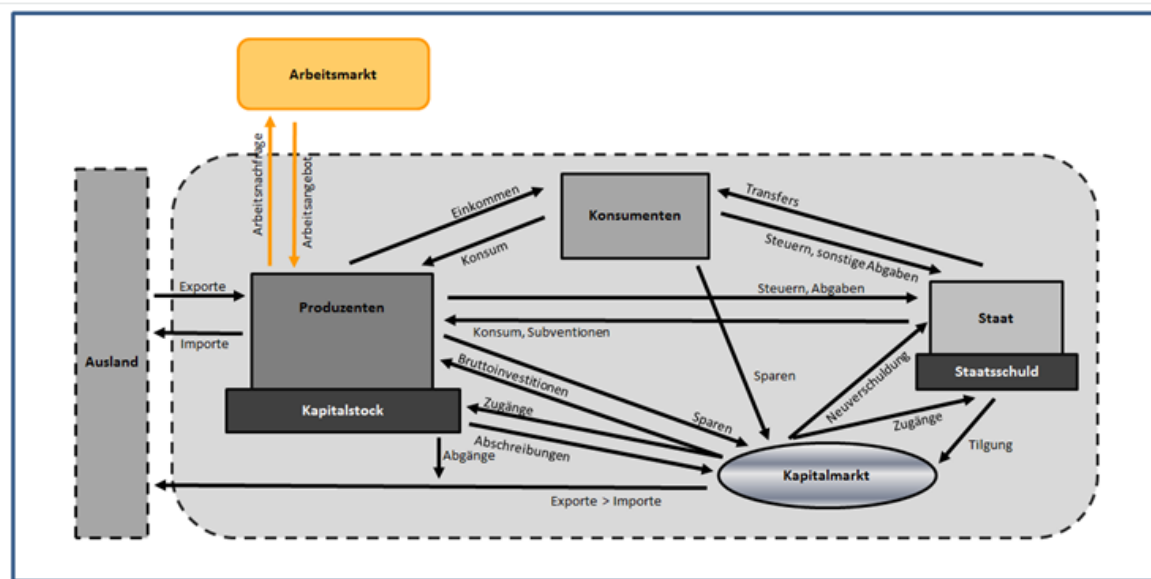


Abbildung 11: Der Wirtschaftskreislauf. Eigene Darstellung

Die Haushalte beziehen von den Produzenten bzw. Unternehmen für den Einsatz von Arbeit und Kapital Einkommen, von dem sie einen Teil als Steuern und Abgaben an den Staat zahlen müssen. Ferner erhalten die Haushalte Transfereinkommen vom Staat in Form von Leistungen aus der Sozialversicherung. Das verfügbare Einkommen verwenden die Haushalte für den Konsum, als Rest verbleibt die Ersparnis.

Die Unternehmen erzielen ihren Umsatz durch den Verkauf von Konsum- und Investitionsgütern sowie durch Exporte an das Ausland, denen Zahlungen an das Ausland für die Importe gegenüber stehen. Die Unternehmen zahlen die Einkommen an die Haushalte sowie Steuern und Abgaben an den Staat, von dem sie wiederum Subventionen beziehen.

Die Ersparnis der Haushalte ist die zentrale Komponente des Angebotes auf dem Kapitalmarkt, weil die anderen Akteure – die Produzenten und der Staat – in der Regel Kapital nachfragen. Das Ausland ist in Deutschland seit geraumer Zeit Kapitalnachfrager, weil Deutschland seit Jahren kräftige Überschüsse aus dem Warenhandel erzielt. Bildet sich der Wechselkurs im Gleichgewicht auf dem Devisenmarkt, dann muss der Handelsüberschuss einem Nettokapitalexport entsprechen, was in der Grafik als Strom vom Kapitalmarkt an das Ausland, also als Kapitalnachfrage des Auslands dargestellt ist. Wenn der Staat mehr konsumiert als ihm aus Steuern und Abgaben zukommen, muss er sich neu verschulden. Neben dem Ausland und dem Staat sind die Investoren die wichtigste Gruppe der Kapitalnachfrager. Sofern sie investieren, führt dieses zum einen zu einer Erhöhung des Umsatzes der Unternehmen, die die Investitionsgüter produzieren und zum anderen nimmt der Kapitalstock derjenigen Unternehmen zu, die die Investitionsgüter nachfragen.

Auf dem Arbeitsmarkt stehen sich das Arbeitsangebot der Haushalte und die Arbeitsnachfrage der Unternehmen gegenüber. Das Arbeitsangebot ist von der demographischen Entwicklung, dem Lohn und von vielen sozioökonomischen Faktoren bestimmt. Eine Grundvoraussetzung für das Arbeitsangebot ist ein gewisser Gesundheitszustand. Eine wichtige Rolle spielen ferner die Ausbildung, die

Einbindung in eine Partnerschaft und die Sicherheit dieser Bindung. Die Arbeitsnachfrage ist von der Produktionsentwicklung, vom Lohn und der technologischen Entwicklung bestimmt.

In welchem Ausmaß Arbeitsangebot und Arbeitsnachfrage koordiniert werden können, hängt von der Verteilung der Unternehmen und der Haushalte in der Fläche des Wirtschaftsraumes und vor allem von der Übereinstimmung der angebotenen und nachgefragten Qualität ab. Dabei sind zwei Dimensionen zu unterscheiden: Die berufliche Ausrichtung und die Güte der Ausbildung. Für die Wohlfahrt eines Landes ist von entscheidender Bedeutung, dass diese Abstimmung gelingt, damit ein möglichst großer Teil der Bevölkerung an der wirtschaftlichen Entwicklung teilhaben kann. Ferner bedeutet eine mangelhafte Koordinierung auf dem Arbeitsmarkt immer auch höhere Einkommensumverteilung und damit höhere Lasten für die Beschäftigten.

Anforderungen an die Modellierung der Branchenentwicklung

Wie bereits erläutert, wird die Güterproduktion als Treiber des Rohstoffverbrauchs in tiefem Branchendetail der Input Output Rechnung benötigt. Die Modellierung der ökonomischen Welt muss folglich alle Differenzierungsmöglichkeiten, die die disaggregierten Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen erlauben, auch tatsächlich nutzen. Insbesondere die Erfahrungen bei der Abbildung von Politikmaßnahmen im Rahmen des MaRes Projekt (Distelkamp et al. 2010) und des MACMOD Projektes (Meyer 2011) haben gezeigt, dass die von der Fragestellung gebotene Komplexität und Differenziertheit der ökonomischen Modellierung eher jenseits der von den ökonomischen Datensätzen gegebenen Differenziertheit liegt. Dies bedeutet in einem ersten Schritt, dass alle Nachfragekomponenten, die in Abbildung 11 als dem Produktionsbereich zugehende Ströme dargestellt sind, und alle abfließenden Ströme in dieser Tiefe der 71 Gütergruppen bzw. Produktionsbereiche der Input Output Rechnung des Statistischen Bundesamtes abgebildet werden müssen. Dazu gehören die Konsumnachfrage der Privaten Haushalte und die des Staates, die Nachfrage der Unternehmen nach Investitionsgütern sowie die Exporte. Ferner sind die Importe und die Arbeitsnachfrage als abfließende Ströme zu erfassen. Darüber hinaus ist die Vorleistungsnachfrage der Unternehmen, die in Abbildung 11 innerhalb des Produktionsbereichs stattfindet und deshalb nicht enthalten ist, explizit in demselben Detail abzubilden.

Die Konsumnachfrage der Privaten Haushalte wird im Standardansatz der neoklassischen Theorie des Haushalts als Ergebnis einer Nutzenmaximierung dargestellt: Ein repräsentativer Haushalt teilt sein Einkommen bei gegebenen Güterpreisen so auf die verschiedenen Verwendungszwecke auf, dass sein Nutzen maximiert wird. Dieser Ansatz liegt explizit oder implizit allen Modellierungen zu Grunde, die eine reine Preis- und möglicherweise noch Trendabhängigkeit der Konsumstruktur der Privaten Haushalte unterstellen. Die Vorstellung eines repräsentativen Haushalts bedeutet letztlich Identität der einzelnen Haushalte. Hildenbrand (1998) betont dagegen, dass die Heterogenität im Konsumverhalten der Haushalte durch demographische Faktoren, Anzahl der Personen und die Zugehörigkeit der Haushalte zu sozioökonomischen Gruppen nicht übersehen werden darf. Dies führt letztlich zur Zerlegung des Sektors Private Haushalte in sozioökonomische Haushaltstypen, wie sie im Modell DEMOS realisiert worden ist (Drosdowski et al. 2011). Allerdings ist damit eine enorme Aufblähung der Einkommensumverteilungsrechnung notwendig, um die verfügbaren Einkommen der verschiedenen Haushaltstypen ermitteln zu können. Eine einfache Variante besteht darin, dass man bei einem Sektor Private Haushalte bleibt, die Erklärung der einzelnen Konsumverwendungszwecke aber

um weitere sozioökonomische Variable anreichert. Eine weitere Schwäche des Standardansatzes ist, dass die Eigenschaften von Kapitalstöcken, die die Konsumenten nutzen, keinen Einfluss auf die Konsumententscheidung haben. Bei den Ausgaben für das Heizen von Wohnungen sind z. B. die Dämmeigenschaften der Wohngebäude von zentraler Bedeutung für die Nachfrageentscheidung. Analoges gilt für Haushaltsgeräte, PKW und andere dauerhafte Konsumgüter.

Wichtig erscheint noch, dass zwischen Konsumverwendungszwecken und Branchen bzw. Sektoren zu unterscheiden ist. Die Konsumenten treffen ihre Entscheidung für Güterbündel, wie z. B. „Pauschalreisen“. Die Aufteilung der dabei zu erbringenden Leistungen auf die beteiligten Branchen erfolgt über eine sogenannte „bridge-Matrix“ oder auch Konsumverflechtungsmatrix.

Die Konsumnachfrage des Staates muss vor folgendem Hintergrund interpretiert werden: In den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen werden beim Sektor „Staat“ nur seine Haushaltsaktivitäten erfasst. Die Produktion des Staates wird dagegen dem Unternehmensbereich zugerechnet. Hierbei handelt es sich vornehmlich um die Produktion von Dienstleistungen wie äußere und innere Sicherheit, Justiz, öffentliche Verwaltung, Bildung etc., die der Staat i.d.R. unentgeltlich an die Gesellschaft abgibt. Finanziert werden diese Leistungen durch den Staat mit der Konsumnachfrage des Staates. Der Staat kauft also quasi die von ihm erstellten öffentlichen Dienstleistungen. Die Konsumnachfrage des Staates besteht somit aus den Ausgaben für Verteidigung, öffentliche Verwaltung, Justiz etc. Der Anteil dieser Staatsausgaben an den Einnahmen des Staates ist Gegenstand politischer Entscheidungen und sollte deshalb mit einer exogenen Struktur aus den Staateinnahmen berechnet werden.

Die Nachfrage nach Investitionsgütern wird durch die Entscheidung der Unternehmen über den gewünschten Kapitaleinsatz bestimmt. Hier ist eine Differenzierung nach investierenden Wirtschaftsbereichen notwendig, um zum einen die strukturell unterschiedlichen Entwicklungen im Aufbau des Kapitalstocks erfassen zu können. Ferner ist der in den Branchen investierte Kapitalstock eine wichtige Ursache für Pfadabhängigkeiten des Gesamtsystems, die gerade im Hinblick auf umweltökonomische Fragestellungen sehr bedeutsam sind. Daneben muss eine zweite Dimension der Disaggregation erfasst werden: Jede Investition hat eine Güterstruktur: Fahrzeuge, Maschinen, Schiffe oder andere Investitionsgüter. Die Frage ist, bei welchem Sektor wird die Investitionstätigkeit eines Wirtschaftsbereichs zur Güternachfrage? Eine Matrix der Investitionsverflechtung stellt die Verbindung zwischen beiden Dimensionen der Investitionstätigkeit her. Die Investitionsentscheidung trifft der investierende Wirtschaftsbereich. An dieser Stelle müssen die Investitionsfunktionen spezifiziert werden. Die Investitionsgüternachfrage ergibt sich dann konsistent über die Matrix der Investitionsverflechtung.

Die Nachfrage nach Vorleistungsgütern bezieht sich auf den Einsatz von Material, Energie und Dienstleistungen im Produktionsprozess. Der Einsatz von Energie ist vornehmlich technologisch bestimmt, der Einsatz von Dienstleistungen hängt von der Entscheidung ab, in welchem Ausmaß das Arbeitsvolumen im Unternehmen selbst oder außerhalb bewältigt wird. Im Focus unserer Betrachtung stehen die monetären Ströme, die durch den Einsatz von Material induziert sind.

Der Einsatz von Material kann von den Unternehmen relativ frei gewählt werden. Zunächst stellt sich die Frage, ob man selbst produziert oder von anderen Unternehmen Vorleistungen bezieht. Auf der Sektorebene ist dies die Frage nach der Tiefengliederung der Produktion, was am Beispiel der Automobilindustrie erläutert werden soll: Werden Motor und Karosserie vollständig in der inländischen

Industrie hergestellt, oder bezieht man vorgefertigte Teile aus dem Ausland, die schließlich im Inland nur noch zusammengesetzt werden? Unabhängig von der Herkunft des Materials stellt sich zusätzlich die Frage, wie viel und welches Material in dem Endprodukt des Sektors enthalten sein sollen. Dies ist häufig eine Frage des Produktdesigns, das zwar von den Wünschen der Konsumenten mitbestimmt ist, bei dem aber erhebliche Gestaltungsspielräume der Produzenten gegeben sind. Hat das Auto eine Stahl-, Aluminium- oder Kohlefaserkarosserie? Welche Ansprüche an die Festigkeit der Karosserie werden gestellt? Werden eher leichtere oder schwerere große oder kleinere Fahrzeuge produziert?

Alle angesprochenen Entscheidungen treffen die Unternehmen wohl nicht auf der Basis einer perfekten Rationalität. Gerade bei den Materialinputs gibt es starke Belege für Marktunvollkommenheiten (Bleischwitz und Ritsche 2011). Gleichwohl wird Kostendruck eine wichtige Ursache für die Änderungen der Inputstrukturen sein. Die Ausgaben der Unternehmen für die verschiedenen Materialinputs sind zum einen von der Bruttoproduktion, zum anderen von der Preisrelation zwischen dem betreffenden Materialinput und dem Preis des eigenen Produktes abhängig. Die Inputkoeffizienten sollten somit nicht als konstant sondern als abhängig von den relativen Preisen angesehen werden.

Die Importe einer bestimmten Gütergruppe können Vorleistungen oder Fertigprodukte sein. Bei den Vorleistungen ist davon auszugehen, dass eine starke Konkurrenz zwischen den inländischen Erzeugnissen der Gütergruppe und den Importen besteht. Insofern sollte der Anteil der Importe an den gesamten Vorleistungsinputs einer Gütergruppe in einem Produktionsbereich von der Relation zwischen dem Importpreis und dem Inlandspreis der Gütergruppe sein. Bei Fertigprodukten ist eine analoge Modellierung zu wählen, die sich aber natürlich auf die Endnachfrage der betreffenden Gütergruppe bezieht.

Die Modellierung der Exporte in tiefer Gütergruppengliederung hängt von der Antwort auf die Frage ab, ob das betreffende Modell Teil eines globalen Systems mit einer expliziten Modellierung des Welthandels ist, oder ob es „stand-alone“ betrieben wird. Im ersten Fall sind die Exporte Deutschlands Teil der Lösung des globalen Modells und müssen nicht explizit für Deutschland modelliert werden. Im zweiten Fall müssten für die einzelnen Gütergruppen Exportfunktionen spezifiziert werden, in denen das Welthandelsvolumen der betreffenden Gütergruppe und die Relation zwischen dem Inlandspreis und dem Weltmarktpreis der Gütergruppe erklärende Variable sind.

Auf einem nicht geräumten Arbeitsmarkt ist das Ergebnis der Lohnverhandlungen zwischen Arbeitgeberverbänden und Gewerkschaften in starkem Maße durch die Entwicklung des Konsumgüterpreises und die der Produktivität bestimmt (Phillips Kurven Diskussion). In Deutschland entwickeln sich die Lohnsätze in den einzelnen Branchen sehr unterschiedlich. Zur Erklärung der sektoralen Lohnsätze empfiehlt sich deshalb ein Ansatz, der neben der Entwicklung des gesamtwirtschaftlichen Konsumgüterpreises die Produktivität der Branche berücksichtigt.

Die Arbeitsnachfrage einer Branche ist durch das Produktionsniveau der Branche und die Entwicklung des Reallohnes, die die Substitution zwischen Arbeit und Kapital, aber auch Wirkungen technischen Fortschritts erfasst, bestimmt. Daneben mag noch ein autonomer technischer Fortschritt eine Rolle spielen. Dieser Ansatz ist sowohl das Ergebnis einer Optimierungsentscheidung bei gegebener substitutionaler Produktionsfunktion als auch Resultat empirischer Analysen. Als Produktionsniveau

kann entweder die Wertschöpfung oder die Bruttoproduktion verwendet werden. Wählt man die Wertschöpfung, dann besteht implizit Substitution zwischen dem Einsatz von Vorleistungen und dem Arbeitseinsatz. Eine Minderung des Materialeinsatzes hat dann sehr starke direkte positive Beschäftigungseffekte zur Folge. Wählt man die Bruttoproduktion, so gibt es keine direkten Beschäftigungseffekte, aber die Stückkosten reduzieren sich, wodurch der Preis des betrachteten Gutes fällt, was wiederum die Nachfrage nach dem Gut und damit seine Produktion und somit indirekt auch die Beschäftigung anhebt.

In diesem Modellierungsrahmen lassen sich in tiefer sektoraler Gliederung die Bruttoproduktion, die Wertschöpfung, die Gewinne, die Lohnsummen, die Kosten und die Stückkosten definitorisch berechnen. Die Produktionssteuern sind über einen exogenen Steuersatz mit der Bruttoproduktion verknüpft und werden dem Staatsbudget zugeführt. Zur Bestimmung der Güterpreise können zwei Ansätze unterschieden werden:

Der neoklassische Ansatz unterstellt für jede Branche die Existenz einer Produktionsfunktion, die den Zusammenhang aller Inputs (Arbeit, Kapital, Vorleistungen) mit der Produktionsmenge beschreibt. Unter der Voraussetzung, dass die Unternehmen stets ihren Gewinn maximieren, kann daraus eine Angebotsfunktion (Grenzkostenfunktion) ermittelt werden. Die Preise werden dann so bestimmt, dass die angebotene und nachgefragte Menge gerade übereinstimmen. Man spricht dann von einem Konkurrenzmarktgleichgewicht.

Die Alternative dazu unterstellt, dass die Voraussetzungen für ein Konkurrenzmarktgleichgewicht (homogene Produkte, große Anzahl von Anbietern mit jeweils marginalem Marktanteil) nicht gegeben sind. In diesem Fall sind die Anbieter nicht Preisnehmer, sondern sie setzen den Preis. Sie ermitteln die Kosten, die pro Stück des erzeugten Gutes anfallen und setzen den Preis so, dass ein gewünschter Stückgewinn realisiert wird (Satisficing Hypothese).

Welcher der beiden Ansätze auch realisiert wird: In jedem Fall gehen alle Preise und alle Mengen in die Bestimmung eines jeden Preises ein.

Da die Nachfrager zusätzlich zu dem Entgelt für den Hersteller der Güter auch noch Gütersteuern (Mehrwertsteuer, Mineralölsteuer, Energiesteuer, Tabaksteuer etc.) zu entrichten haben, müssen im Modell die Herstellerpreise von den Anschaffungspreisen unterschieden werden, wobei die Steuersätze als exogene Variablen zu modellieren sind. Das jeweilige Steueraufkommen kann dann definitorisch bestimmt und dem Staatsbudget zugeführt werden.

7. Die Berücksichtigung von Unsicherheit

Der Einsatz von Modellen zur Simulation der Wirkungen umweltpolitischer Maßnahmen besteht in dem Vergleich von Modelllösungen ohne die betrachtete Maßnahme (Referenz) mit einer Lösung des Modells, in der die Maßnahme enthalten ist (Alternativlösung). Alle direkten und indirekten Wirkungen der Einführung der Maßnahme auf eine der Modellvariablen kann durch den Vergleich der Entwicklung der Pfade dieser Variablen in beiden Lösungen identifiziert werden. Zwei Ursachen sind Quellen für Unsicherheiten bei den Ergebnissen. Einerseits besteht Unsicherheit über die „richtigen“ Vorgaben bezüglich der unterstellten Entwicklung der exogenen Variablen. Andererseits können die Modellgleichungen lediglich langfristig stabile systematische Kreislaufzusammenhänge abbilden,

welche in der Realität stets von kurz- bis mittelfristigen unsystematischen „Schocks“ überlagert werden. Es stellt sich die Frage, wie man diese Unsicherheiten bei der Analyse berücksichtigen kann.

Unsicherheit bei der Vorgabe der exogenen Variablen

Alle Annahmen, die der Referenz zu Grunde liegen – insbesondere die Entwicklung der exogenen Variablen betreffend –, sind auch in der Alternativlösung enthalten. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass Interpretationen der Wirkungen von Politikmaßnahmen stets auf identischen Rahmenvorgaben basieren. Ferner ist unterstellt, dass die Wirkung der Politikvariablen auf die endogenen Variablen unabhängig von der Entwicklung der exogenen Variablen ist. Sind diese Annahmen erfüllt, dann ist die Wahl der Referenz zweitrangig, da die Annahmen bezüglich der Entwicklung exogener Größen somit keine systematischen Verzerrungen induzieren können. Sind sie verletzt, dann ist bei der Beantwortung der Frage, ob die Analyse die Wirkung der Politikmaßnahme zutreffend erfasst, es außerordentlich wichtig zu wissen, ob die vorgegebene Entwicklung der exogenen Variablen die Zukunft richtig beschreibt.

Dass diese Unabhängigkeitsannahmen in unserem Fall sehr wahrscheinlich verletzt sind, macht folgende Überlegung beispielhaft deutlich: In umweltökonomischen Analysen sind die Preise der Ressourcen i. d. R. exogene Variablen. Ihre Entwicklung hat mit hoher Wahrscheinlichkeit Einfluss auf die Wirkung umweltpolitischer Instrumente, insbesondere der ökonomischen Instrumente. Bei hohen Preisen verhalten sich die Akteure anders als bei niedrigen Preisen. Es kommt also darauf an, die Preisentwicklung der Ressourcen möglichst zutreffend vorzugeben. Je länger der Analysezeitraum, umso fraglicher wird dies. Im Fall des PolRess Projektes mit dem Analysezeitraum bis 2050 ist dies also ein relevantes Problem.

Die Treffsicherheit der Vorgabe der exogenen Variablen ist noch aus einem, weiteren Grund notwendig: Die business-as-usual Lösung des Modells ist von hohem Erkenntniswert, da sie die Entwicklung des Systems bei der Abwesenheit eines konkreten Politikeinsatzes zeigt. Sie ist als Information für den umweltpolitischen Handlungsbedarf von zentraler Bedeutung.

In den Projekten PetrE (Ekins und Speck 2011) und MACMOD (Meyer 2011) hat man deshalb mehrere baselines gerechnet, die sich in der Wahl der Entwicklung des Ölpreises unterscheiden. Im HGF Projekt (Grunwald et al. 2001) ist man noch einen Schritt weiter gegangen und hat drei gesellschaftliche Rahmenszenarien entworfen, die sich im Hinblick auf die ökonomische, soziale und politische Entwicklung so weit unterscheiden, dass man von verschiedenen Zukünften reden kann: Im Szenario „Dominanter Markt“ wird eine weitere Liberalisierung und Deregulierung der nationalen Märkte verbunden mit einer Verstärkung des internationalen Wettbewerbs und der internationalen Arbeitsteilung, Abbau des Sozialstaates, Abbau von verbindlichen internationalen Umweltstandards unterstellt. Im Szenario „Moderate Modernisierung“ geht man zwar auch von fortschreitender Globalisierung aus, unterstellt aber gleichzeitig, dass gewisse Sozial- und Umweltstandards international eingehalten werden. Im dritten Szenario „Gemeinwohl und Partizipation in einer globalisierten Welt“ wird ein Wertewandel in Richtung auf Gemeinwohlorientierung sowie persönliche Initiative und Verantwortung im sozialen und im ökologischen Bereich unterstellt, der der nationalen Politik größere Gestaltungsspielräume gibt. Im Rahmen des Projektes wurden die verschiedenen

Politikmaßnahmen für jedes der drei gesellschaftlichen Rahmenszenarien analysiert und in ihren Wirkungen verglichen.

Im Rahmen des PolRes Projekt wird ebenfalls dem Gedanken der Unsicherheit der Referenzentwicklung ein breiter Raum gegeben. Hier sollen quantitative Szenarien durch Unterstützung mit Methoden der qualitativen Szenarienbildung entwickelt werden. Bei der qualitativen Szenarienanalyse wird eine Gruppe von Experten über ihre Einschätzung künftiger Entwicklungen befragt, und die Antworten werden mit einem vorgegebenen Analyseraster verdichtet.

Beim Einsatz von Simulationsmodellen in langfristigen Analysen zur Eignung verschiedener umweltpolitischer Maßnahmen wird man sich in Zukunft nicht auf die heute noch vielfach vorzufindende schlichte Fortschreibung der exogenen Variablen mit mehr oder weniger plausiblen Trends zurückziehen können. Die Modelle der Zukunft müssen dann aber auch so komplex sein, dass Varianten in der Entwicklung der exogenen Variablen unterschiedliche Wirkungen der Politikvariablen hervorrufen können.

Unsicherheit bezüglich kurz- bis mittelfristiger Schocks

Als zweite Quelle für Unsicherheiten bei der Wirkungsanalyse umweltpolitischer Maßnahmen hatten wir die kurz- bis mittelfristigen „Schocks“ identifiziert. Vor dem Hintergrund theoretischer Vorüberlegungen dienen sämtliche Modellgleichungen dazu, ein langfristig stabiles und empirisch tragfähiges Verhalten der Akteure abzubilden. Auf diese Weise werden die langfristig systematisch zu beobachtenden Reaktionen des Kreislaufsystems konsistent erfasst, wobei die durch unsystematische Schocks hervorgerufenen kurz- bis mittelfristigen Abweichungen ausgeblendet werden. Diese Konstruktionsweise (dynamische deterministische Simulation) erlaubt eine eindeutige und rasche Lösung des Systems und erleichtert die Interpretation der Simulationsergebnisse.

Allerdings wird hierbei nicht sichtbar, wie gut das Modell an die Realität angepasst ist, bzw. ob und wie weit das Auftreten zufälliger Schocks im Simulationszeitraum die intendierte Wirkung einer Politikmaßnahme beeinflussen könnte. Diesbezügliche Unsicherheiten lassen sich jedoch grundsätzlich auf Basis dynamischer stochastischer Simulationen abschätzen. Granger und Yongil (2002) haben die Sinnhaftigkeit von stochastischen Simulationen mit Makromodellen diskutiert, eine exemplarische Anwendung findet sich bei Hukkinen und Viren (1999). Die diesbezügliche Vorgehensweise lässt sich im Kern wie folgt beschreiben: Wenn die jeweiligen Gleichungsparameter durch den Einsatz ökonometrisch- statistischer Verfahren aus Zeitreihendaten gewonnen wurden, kann für jede endogene Variable auf Basis des sogenannten Standardfehlers eine Abschätzung von Wahrscheinlichkeit und Umfang zufälliger Störungen vorgenommen werden. Führt man nun nicht mehr wie zuvor eine einzige (deterministische) Simulationsrechnung unter Ausblendung dieses „Schock-Risikos“ sondern stattdessen zahlreiche (stochastische) Simulationsrechnungen unter expliziter Berücksichtigung individueller „Schock-Risiken“ durch, so erhält man für jede endogene Variable einen Ergebniskorridor. Die Breite dieser Intervalle erlaubt dann eine explizite Aussage im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Modellergebnisse.

Voraussetzungen für die Ermittlung von Konfidenzintervallen der Wirkungen umweltpolitischer Maßnahmen sind somit die ökonometrische Schätzung der Modellparameter, die Existenz einer zur Durchführung stochastischer Simulationen geeigneten Softwareumgebung sowie deutlich erhöhte

Speicher- und Rechenkapazitäten. Insbesondere die letztgenannten Punkte dürften dafür ursächlich sein, dass in der aktiven Politikberatung bislang im Regelfall keine umfassenden stochastischen Simulationen berücksichtigt werden, da der hierdurch verursachte technische und zeitliche Aufwand offensichtliche kostenwirksame Konsequenzen impliziert.

8. Schlussfolgerungen

Das Modell muss als dynamisches System ausgelegt sein, das konsekutiv in Jahresschritten vom aktuellen Rand bis zum Jahr 2050 gelöst werden kann. Da Marktfehler im Kontext der Entscheidungen über den Materialeinsatz als zentrales Problem in der Literatur identifiziert worden sind, sollte davon ausgegangen werden, dass die Agenten ihre Entscheidungen unter beschränkter Rationalität auf unvollkommenen Märkten treffen.

Sektoral tief disaggregierte Makromodelle bieten ein verlässliches Fundament, um sektorale Entwicklungen in der monetären und der physischen Dimension des Materialverbrauchs konsistent mit gesamtwirtschaftlichen Entwicklungen zu verknüpfen. Insbesondere die Erfahrungen bei der Abbildung von Politikmaßnahmen im Rahmen des MaRes Projekt und des MACMOD Projektes haben gezeigt, dass die von der Fragestellung gebotene Komplexität und Differenziertheit der ökonomischen Modellierung eher jenseits der von den ökonomischen Datensätzen gegebenen Differenziertheit liegt. Dies bedeutet, zum einen, dass die Modellierung der ökonomischen Branchenentwicklung alle Möglichkeiten der Differenzierung der vorhandenen ökonomischen Datensätze nutzen muss. Zum anderen ist gefordert, dass die Schnittstelle zwischen der ökonomischen und der physischen Dimension des Materialverbrauchs wiederum an die volle Information der Vorleistungsverflechtung der Branchen anknüpfen muss. Ein besonderes Problem stellt sich bei der Modellierung des Recycling, weil hier die Datenbasis des physischen Materialflusses fehlt.

Die Differenzierungsmöglichkeiten der Makromodelle hinsichtlich der Materialmodellierung sind durch die Disaggregationstiefe der Input- Output Daten begrenzt. Sind darüber hinaus gehende detaillierte Modellierungen notwendig, dann sollten Partialmodelle eingesetzt werden, die auf der Basis von Spezialdaten eine Modellierung auch sehr detaillierter Materialeinsätze (z. B. „seltene Erden“) ermöglichen. Um sektorale und gesamtwirtschaftliche Wirkungen herleiten zu können, müssten diese Partialmodelle mit Makromodellen gekoppelt werden.

Auch wenn im Rahmen des ProgRes Programms die Materialproduktivität im Zentrum der Analyse steht, so sind doch auch die Wirkungen von Maßnahmen zur Steigerung der Materialproduktivität auf andere Ressourceninputs von Interesse. Das Modell sollte deshalb zumindest auch ein explizites Energiemodul und ein Modul zur Abbildung der Landnutzung enthalten.

Die den Simulationsergebnissen von Modellen anhaftenden Unsicherheiten werden i. d. R. nicht thematisiert. Dies ist natürlich besonders bei langfristigen Analysen bis zum Jahr 2050 nicht akzeptabel. Die Unsicherheiten bestehen durch die Fragwürdigkeit der Vorgaben für die exogenen Variablen und durch die Nicht-Berücksichtigung weiterer kurzfristiger Störungen des Kreislaufsystems. Es wird zu prüfen sein, ob durch Kombination der quantitativen Modellierung mit Methoden der qualitativen Szenarien Analyse eine bessere Vorgabe der exogenen Variablen gelingt. Die Auswirkungen kurz- bis mittelfristiger Schocks auf die Simulationsergebnisse können in Monte –

Carlo Simulationen ermittelt werden. Dies setzt aber voraus, dass die Parameter der Gleichungen ökonometrisch geschätzt worden sind und die Software zur Lösung des Modells an diese Technik der Monte Carlo Simulation angepasst ist.

Ein Modell, das alle genannten Anforderungen erfüllt, gibt es derzeit nicht, und die Anforderungen sind in unterschiedlichem Maße in den verschiedenen Modellen realisiert. In wieweit durch Ergänzungen bestehender Modelle oder durch die Koppelung verschiedener Modelle die Ziele erreicht werden können, wird im Einzelnen zu prüfen sein.

9. Literatur

- Bleischwitz, R. and Ritsche, D. (2011): Market failures. Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment. Task 2. Wuppertal
- Distelkamp, M. (2011): Integration of resource data into GINFORS. Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment. Task 5.1. GWS, Osnabrück
- Distelkamp, M., Meyer, B., Meyer, M. (2010): Quantitative and qualitative Effects of a forced Resource Efficiency Strategy. Summary Report of Task 5 within the framework of the "Material Efficiency and Resource Conservation" (MaRes) Project.
- Drosdowski, T., Großmann, A., Hohmann, F & Wolter, M.I. (2011): Weiterentwicklung des PANTA RHEI Modells um ein sozioökonomisches Modul. Endbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Osnabrück.
- Ekins, P. and Speck, S. (2011): Environmental Tax Reform (ETR). A Policy for Green Growth. Oxford University Press. New York.
- Fischer, Lichtblau, K., Meyer, B., Scheelhaase, J. (2004): Wachstums- und Beschäftigungsimpulse rentabler Materialeinsparungen. Wirtschaftsdienst 2004, Heft Nr. 4, 247-254.
- Georgescu-Roegen, N. (1990): Production process and economic dynamics. In: Baranzini, M. and Scazzieri, R. (ed.): The economic theory of structure and change. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne. 198-226.
- Giljum, S., Behrens, A., Hinterberger, F., Lutz, C. & Meyer B. (2008): Modelling scenarios towards a sustainable use of natural resources in Europe. Environmental Science and Policy, 11, pp. 204-216.
- Giljum, S., Lutz, C., Jungnitz, A., Bruckner, M. & Hinterberger, F. (2011): European Resource Use and Resource Productivity in a Global Context. In: Ekins, P. & Speck, S. [ed.]: Environmental Tax Reform (ETR) - A Policy for Green Growth, Oxford University Press, New York, pp. 27-45.
- Granger, C. W. J. and Yongil, J. (2001): Interactions Between Large Scale Macro Models and Time Series Analysis. International Journal of Finance and Economics, 8, pp. 1-10.
- Grunwald, A., Coenen, R., Nitsch, J., Sydow, A., Wiedemann, P. (Hrsg.) (2001): Forschungswerkstatt Nachhaltigkeit. Wege zur Diagnose und Therapie von Nachhaltigkeitsdefiziten. Edition sigma, Berlin.
- Hildenbrand, W. (1998): Zur Relevanz mikroökonomischer Verhaltenshypothesen für die Modellierung der zeitlichen Entwicklung von Aggregaten", Thünen-Vorlesung auf der Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik 23.-26.09.1997 in Bern, Schriften des Vereins für Socialpolitik, Bd. 261, Zeitschrift für Wirtschafts- u. Sozialwissenschaften, 195-218, Duncker & Humblot, Berlin, 1998.
- Hukkinen, J. und Viren, M. (1999): Assessing the Forecasting Performance of a Macroeconomic Model. Journal of Policy Modeling 21 (6), pp. 753-768.
- Jochem, Eberhard ; Schade, Wolfgang ; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research – ISI- (Karlsruhe) (Ed.) (2009): ADAM Adaptation and Mitigation Strategies: Supporting European Climate Policy. ADAM 2-Degree Scenario for Europe - Policies and Impacts : Project no. 018476-GOCE. Karlsruhe : Fraunhofer ISI.
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H. and Fischer-Kowalski, M. (2009): Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. Ecological Economics, 68, 2696–2705.

- Meyer, B., Bockermann, A., Ewerhart, G., Lutz, C. (1998): Modellierung der Nachhaltigkeitslücke. Eine umweltökonomische Analyse. Springer Verlag, Heidelberg.
- Meyer, B., Distelkamp, M. & Wolter, M.I. (2007): Material Efficiency and Economic-Environmental Sustainability. Results of Simulations for Germany with the Model PANTA RHEI. *Ecological Economics*, 63(1), 192-200.
- Meyer, B. (2011): Macroeconomic Modelling of Sustainable Development and the Links between the Economy and the Environment. ENV.F.1/ETU/2010/0033. Final Report to the EU Commission
- Meyer, B., Meyer, M., Distelkamp, M. (2011): Modelling Green Growth and Resource Efficiency: New Results. In: *Mineral Economics* (forthcoming).
- Meyer, M., Distelkamp, M., Meyer, B., (2012): Modelling the prospects of resource efficiency. A multi-country simulation study focusing on recycling in metal production. Osnabrück.
- Oakdene Hollins (2011): The further Benefits of Business Resource Efficiency. DEFRA.
- Pirgmaier, E., Kalcik, R., Lugschitz, B., Polzin, C., Giljum, S. (2011): Risks associated with future European resource use. Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment. Task 3.2. SERI, Vienna.
- Pothen, F. (2013): Partial equilibrium modelling of metal markets. Vortrag gehalten auf dem workshop "Data and Models for Resource Policy Assessments", 21. 2. 2013 Freie Universität, Berlin.
- van den Bergh, J.C.J.M., Ferrer-i-Carbonell, A., Munda, G. (2000): Alternative models of individual behaviour and implications for environmental policy. *Ecological Economics* 32 (2000) 43–61.
- Wiebe, K., Bruckner, M., Giljum, S., Lutz, C., and Polzin, C. (2012): Carbon and Materials Embodied in the International Trade of Emerging Economies: A Multi-regional Input-Output Assessment of Trends between 1995 and 2005. *Journal of Industrial Ecology*. In press. 2012.