

DOKUMENTATIONEN

04/2017

# Sicherung der Konsistenz und Harmonisierung von Annahmen bei der kombinierten Modellierung von Ressourceninanspruchnahme und Treibhausgasemissionen

Reader zum Erfahrungsaustausch im Rahmen des  
SimRess-Modellierer-Workshops am 7./8. April 2016 in  
Berlin – Simulation Ressourceninanspruchnahme und  
Ressourceneffizienzpolitik

DOKUMENTATIONEN 04/2017

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 93 102

## **Sicherung der Konsistenz und Harmonisierung von Annahmen bei der kombinierten Modellierung von Ressourceninanspruchnahme und Treibhausgasemissionen**

Reader zum Erfahrungsaustausch im Rahmen des SimRess-Modellierer-  
Workshops am 7./8. April 2016 in Berlin – Simulation  
Ressourceninanspruchnahme und Ressourceneffizienzpolitik

von

von (in alphabetischer Reihenfolge der Nachnamen)

Kirsten Biemann  
Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg

Martin Distelkamp  
Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), Osnabrück

Monika Dittrich  
Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg

Frank Dünnebeil  
Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg

Benjamin Greiner  
Öko-Institut e.V., Berlin

Martin Hirschnitz-Garbers  
Ecologic Institut, Berlin

Deniz Koca  
Lund Universität, Lund

Hannah Kosow  
Dialogik, Stuttgart

Ullrich Lorenz  
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Peter Mellwig  
Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg

Kai Neumann  
Consideo, Lübeck

Mark Meyer  
Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), Osnabrück

Karl Schoer  
unabhängiger wissenschaftlicher Gutachter

Harald Sverdrup  
Iceland University, Reykjavik

Amany von Oehsen  
Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg


Wolfgang Weimer-Jehle  
ZIRIUS, Universität Stuttgart, Stuttgart

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

**Herausgeber:**

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

**Editierendes Institut:**

Ecologic Institut  
Pfalzburger Straße 43 – 44  
10717 Berlin

**Abschlussdatum:**

Oktober 2016

**Redaktion:**

I 1.1 Nachhaltigkeitsstrategien, Ressourcenschonung und Instrumente  
Ullrich Lorenz

Publikationen als pdf:

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

ISSN 2199-6571

Dessau-Roßlau, Januar 2017

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	8
1 Einleitung .....	10
2 Bedingungen und Möglichkeiten der Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen unterschiedlicher Modellierungsansätze .....	13
2.1 Darf es alles ein bisschen einfacher sein? .....	13
2.2 Wer sagt denn, dass alles so bleiben muss wie es heute ist?.....	13
2.3 Die Struktur der Zukunft oder die Zukunft der Struktur?.....	14
2.4 Wollen wir sie rein lassen? .....	15
2.5 „Ein Modell sie zu treiben“ – das Mastermodell .....	16
2.6 “Die Welt erklären“ – Narrative zur Ermöglichung der Vergleichbarkeit.....	17
2.7 Einer für Alle – Alle für Einen? .....	19
2.8 Ist das auch politisch korrekt? .....	20
2.9 Literatur .....	21
3 Konsistenz von gesellschaftlichen Rahmenannahmen – Erfahrungen mit CIB .....	22
3.1 Ausgangspunkt und Diagnose.....	22
3.2 Konzeptuelle Schärfung: Szenario-Konsistenz.....	23
3.3 Empirische Erfahrungen mit CIB zur Konsistenzanalyse und -sicherung.....	24
3.4 Fazit: Was kann CIB, können CIB gestützte Narrative für Modellierung und Simulation leisten? .....	26
3.5 Literatur .....	28
4 Qualitative und quantitative Ursache-Wirkungs-Modelle: Stärken und Limitation der Ansätze.....	29
4.1 Kurzbeschreibung der für das Umweltbundesamt verwendeten Modell-Logiken .....	29
4.2 Darlegung ausgewählter qualitativer und quantitativer Ansätze, Parameter und ausgewählter verwendeter Rahmendaten.....	30
4.3 Stärken und Limitationen der Ansätze .....	34
4.4 Ausblick: Kohärenz und Konsistenz .....	35
4.5 Literatur .....	36
5 Kausalschleifendiagramme als narrative Visualisierungs-Tools für Kommunikation und Analyse komplexer dynamischer Systeme: Konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse von komplexen Mensch-/Natur-Systeminteraktionen in einer Welt mit begrenzten Ressourcen als Beispiel.....	37
5.1 Einführung .....	37
5.2 Hintergrund komplexer Mensch-/Natur-Systeminteraktionen.....	37
5.3 Konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse von Komplexen Mensch-/Natur-Systeminteraktionen in einer Welt mit begrenzten Ressourcen.....	39
5.3.1 End-of-Pipe-Lösungen .....	40

5.3.2	Umweltfreundliche Produktionsprozesse.....	40
5.3.3	Nachhaltiger Konsum .....	40
5.3.4	Nachhaltige Bevölkerungspolitik.....	41
5.4	Phase der konzeptuellen Modellierung und Systemanalyse des Gruppenmodellierungsprozesses .....	41
5.4.1	Phase 1: Konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse .....	42
5.4.1.1	Stufe 1. Definition .....	43
5.4.1.2	Stufe 2 Klarstellung .....	43
5.4.1.3	Stufe 3 Bestätigung .....	43
5.5	Schlussfolgerungen.....	44
5.6	Literatur .....	44
6	Das SimRes-Projekt: Ansatz und nächste Schritte .....	46
6.1	Der SimRes-Ansatz .....	46
6.2	Nächste Schritte.....	48
7	Der Einsatz des WORLD-Modells im SimRes-Projekt: Systemgrenzen, Modell-Interaktion, Indikatoren und grundsätzliche Ergebnisse.....	49
7.1	Modelllogik und Systemgrenzen .....	49
7.2	Kausalitäten und Flüsse definieren Systeminteraktionen .....	52
7.3	Kalibrierung und Parametrisierung.....	58
7.3.1	Spezifikation ausgewählter exogener und endogener Parameter .....	58
7.3.2	Schätzung der tatsächlichen Größe der Ressourcen und Reserven.....	60
7.4	Simulation von Politikszenerarien im WORLD-Modell.....	62
7.5	Interaktion des Modells mit GINFORS .....	67
7.6	Ausblick: Konsistenzbedarf .....	68
7.7	Literatur .....	70
8	Simulation von Ressourcenschonungspolitik mit GINFORS im SimRes-Projekt: Systemgrenzen, Modellinteraktion, Indikatoren und Baseline-Ergebnisse .....	72
8.1	Kurzbeschreibung des Modells.....	72
8.1.1	Datengrundlagen.....	72
8.1.2	Modellstruktur und Berichtsumfang.....	72
8.1.3	Parametrisierung.....	75
8.2	Darlegung ausgewählter exogener und endogener Parameter und ausgewählter verwendeter Rahmendaten.....	75
8.2.1	Exogene Modellvariable.....	75
8.2.2	Politikbestimmte Szenarioparameter .....	77
8.3	Bedarf an Konsistenzchecks.....	79

8.4	Abschließende Anmerkungen zu Modellauswahl, Interaktionen und Konsistenzen in der Politikberatung .....	79
8.5	Literatur .....	81
9	Konsistenz im Modellverbund im Projekt RTD .....	83
9.1	Vorstellung des Projekts RTD und Überblick über die Modelle und den Modellverbund .....	83
9.1.1	TREMOD .....	84
9.1.2	GEMOD.....	85
9.1.3	Energiesystemmodell SCOPE .....	87
9.1.4	URMOD .....	88
9.1.5	iMODELER.....	89
9.2	Ausgewählte exogene und endogene Parameter .....	91
9.3	Bedarf an Konsistenzchecks im Projektrahmen .....	93
9.4	Ausblick in Sachen Konsistenz: besondere inhaltliche Herausforderungen.....	95
9.5	Literatur .....	95
10	Konsistenz im Projekt DeteRes, Anforderungen durch das umweltökonomische Rohstoffmodell .....	97
10.1	Einleitung .....	97
10.2	Das umweltökonomische Input-Output Modell.....	97
10.3	Umweltökonomische Rohstoffszenarien.....	99
10.4	Konsistenz zwischen IOT Modell und externen Quellen .....	101
10.5	Ausgewählte exogene Informationen .....	102
10.6	Konsistenzchecks zwischen Sektorstudien .....	103
10.7	Ausblick.....	104
10.8	Literatur .....	105
11	Modellierungen im Kontext des Projektionsberichts Treibhausgasemissionen für die Bundesregierung: Systemgrenzen, Modellinteraktion und Konsistenz .....	106
11.1	Kurzbeschreibung des Modells.....	106
11.2	Parameter und Rahmendaten .....	107
11.3	Kontext der Modellierung.....	108
11.4	Sicherung und Grenzen der Konsistenz .....	109
12	Zur Stärkung von Konsistenz in Simulationsmodellen –Kernbotschaften und Empfehlungen aus den Diskussionen.....	110
12.1	Kernbotschaften aus den Diskussionen.....	110
12.1.1	Endogen und exogen – Ausprägungen und Implikationen der „Daten“herkunft.....	111
12.1.2	Rahmenannahmen – Erklärung von Unterschieden und Relevanz von Narrative.....	112
12.1.3	Methoden zur Förderung konsistenter Rahmenannahmen und Narrative.....	113

12.1.4	Politische Beratung und Kommunikation von Unsicherheiten .....	113
12.2	Empfehlungen zur Verbesserung der Konsistenz in der Modellentwicklung und Anwendung der Modellergebnisse.....	114



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für Konsistenzprüfungen .....	17
Abbildung 2: Beispiel der Deutung des Kontextes .....	19
Abbildung 3: Konsistente und harmonisierte Rahmenannahmen in Modellen und Modellinstrumentarien .....	22
Abbildung 4: Verlauf einer CIB zur Bestimmung von Kontextszenarien am Beispiel einer Energimodellierung. ....	25
Abbildung 5: Typen der Kombination qualitativer (CIB) und modellbasierter Szenarien (vgl. Kosow, im Erscheinen) .....	26
Abbildung 6: Beispiel für eine qualitative Gewichtung eingehender Faktoren im IAM....	31
Abbildung 7: Ausschnitt aus dem D3 Modell aus der Perspektive des Faktors „Mehr Ausleihen von M5“ .....	32
Abbildung 8: Ausschnitt aus dem D3 EE Prozess-Modell .....	33
Abbildung 9: Die durch ein Fördersystem vernetzten komplexen Mensch- /biophysikalische Systeme. (Entwickelt auf der Grundlage von Bossel, 1999; BMU, 2012).....	38
Abbildung 10: Kausalschleifendiagramm, in dem die Hauptgründe für Umweltschädigung und Ressourcenknappheit sowie die möglichen alternativen Lösungen für diese Probleme dargestellt werden.....	39
Abbildung 11: Zwei Phasen und sechs Stufen des Gruppenmodellierungsprozesses .....	42
Abbildung 12: Übersicht der Funktionen im WORLD 6-Modell. ....	49
Abbildung 13: Zentrale Themen im WORLD 6-Modell als vereinfachtes Kausalschleifendiagramm.....	52
Abbildung 14: Kausalschleifendiagramm der Bergbau- und Marktdynamik von Metallen in WORLD.....	53
Abbildung 15: Kausalschleifendiagramm für den Preismechanismus wie im Modell umgesetzt .....	54
Abbildung 16: Allgemeines Flussdiagramm für ein Metall im WORLD-Modell.....	55
Abbildung 17: Flussdiagramm wie im BRONZE-Untermodule innerhalb von WORLD 6 umgesetzt. ....	57
Abbildung 18: Beispiele für Marktpreiskurven für (a) zusammengeführte Daten aller Metalle/Materialien; (b) Kupfer .....	59
Abbildung 19: (a) Extrahierbare Kupfermengen; (b) Entwicklung des Erzgehalts bei Kupfer .....	60
Abbildung 20: Erläuterung der Kostenpreiskurve für die Kupferextraktion .....	61
Abbildung 21: (a) Energiekosten; (b) Extraktionsgewinn; (c) URR als Funktion des Erzgehalts.....	62
Abbildung 22: Verschiedene Sätze von Parametrisierungen für das WORLD-Modell für verschiedene Entwicklungspfade; „Weiter wie bisher“ oder Politiksznarien 1-3 .....	63

Abbildung 23: Feedbackschleife zwischen dem WORLD- und dem GINFORS-Modell .....	67
Abbildung 24: Übersicht der Modellergebnisse für Extraktion (a) Angebot, Recycling von Sand (b) Kies (c) und Gestein für den Bau (d) unter Nutzung der Nachfrage aus dem GINFORS-Modell als Eingabe.....	68
Abbildung 25: Integration des USGS-estimate mit dem WORLD 6-Modell.....	69
Abbildung 26: Schematische Darstellung zentraler Strukturen des integrierten Simulationsmodells GINFORS3 .....	73
Abbildung 27: Exogene Bevölkerungsprojektionen der SimRess-Szenarien .....	76
Abbildung 28: Endogene Bestimmung der Weltmarktpreise im Simulationsverbund des SimRess-Projekts.....	77
Abbildung 29: Beispiele alternativer Umfeldparametrisierungen in GINFORS <sub>3</sub> .....	78
Abbildung 30: Modellverbund im Projekt RTD.....	83
Abbildung 31: Übersicht über das Gebäudemodell GEMOD .....	86
Abbildung 32: Schematische Darstellung der Simulationsumgebung "SCOPE" .....	88
Abbildung 33: Integration der Treibhausgase in das Modell URMOD .....	89
Abbildung 34: Qualitatives Ursache-Wirkungsmodell zur Reflexion der Zusammenhänge zwischen Ressourceninanspruchnahme und Energieverbrauch und –erzeugung .....	90
Abbildung 35: Erste Skizze zum möglichen Umfang einer Szenarette zur Simulation von Szenarien zur Frage der Gewinnung von Plastik aus erneuerbaren Energien .....	91
Abbildung 36: Grundschema des Szenario-Modells.....	100
Abbildung 37: Zusammenspiel der Sektormodelle im Integrationsmodell-Verbund .....	106
Abbildung 38: Beispielhafte Ein- und Ausgabegrößen des Verkehrsmodells .....	108

## 1 Einleitung

Das Umweltbundesamt hat ein besonderes Interesse an der Entwicklung einer kohärenten und effektiven Ressourceneffizienz- und Klimaschutzpolitik. Zunehmend rückt dabei die wechselseitige Beeinflussung der beiden Politikfelder Treibhausgasemissionsminderung und Ressourcenschonung in das Zentrum der Aufmerksamkeit.

Als ein Instrument der Politikberatung spielen Simulationsmodelle eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, die potentielle Wirksamkeit von Maßnahmen und Instrumenten im Vorhinein zu bewerten. Im Bereich der Energie- und Klimapolitik haben die Simulationsmodelle bereits eine längere Tradition und werden sowohl für die Politikberatung als auch die Emissionsberichterstattung genutzt (z.B. Politikszenerarien oder Klimaschutzplan). Dabei haben die Energiemodelle und die Stoffstrommodelle einen hohen Überschneidungsgrad: allein der Verbrauch von fossilen Rohstoffen spielt natürlich in beiden Politikfelder eine große Rolle, aber viele Rohstoff intensive Industrieprozesse sind Energie intensiv und daher auch für die Energie- und Emissionsmodelle wichtig. So überrascht es nicht, dass in einem integrierten Modellierungsprojekt wie „SimRes“<sup>1</sup> der verwendete Modellierungsrahmen gemeinsam so entwickelt wird, dass sowohl die Stoffströme als auch CO<sub>2</sub>-Emissionen „ausgelesen“ werden können. Auf der anderen Seite gehen Rohstoffverbräuche auch in die Modelle der Emissionsberichterstattung ein. Es liegt daher nahe zu fordern, dass unterschiedliche Modelle bei Berechnung gleicher Variablen wenigstens in der gleichen Größenordnung Ergebnisse ergeben sollten.

Es gibt eine ganze Reihe von Modellierungsprojekten in denen Ansätze und Bausteine, die eine solche **integrierte** Betrachtung und Bewertung von Ressourceneffizienzpolitik und gleichzeitig auch von Treibhausgasemissionen leisten könnten. Allerdings liegt für die integrierte Betrachtung von Ressourcenschonung und Klimaschutz noch kein umfassendes spezielles Modellinstrument vor. Eine wichtige Frage ist hier welche Ansätze für eine integrierte Modellierung möglich sind. Dazu wären die folgenden Fragestellungen zu klären:

Kann man auf bestehenden Modellen aufbauen? Müssten neue Modelle entwickelt werden? Macht es Sinn einen Modellverbund zu bilden? Wenn ja, aus welchen Teilmodellen und wie können die Modelle harmonisiert und gekoppelt werden?

Dieser Reader dokumentiert die Vorträge und Diskussionen des Zweitägigen Expertenworkshops am „7./8. April 2016 in Berlin – Simulation Ressourceninanspruchnahme / Ressourceneffizienzpolitik“. Der Workshop hatte zum Ziel, zu diskutieren ob und unter welchen Bedingungen unterschiedliche Modelle ähnliche Ergebnisse hervor bringen bzw. zu ergründen, wodurch sich abweichende Ergebnisse erklären lassen. Dazu wurden im Workshop die folgenden Diskussionspunkte aufgegriffen:

Wie passen die unterschiedlichen Modelle und die Ergebnisse zusammen? Wie lassen sich die aktuelle Modelle und Ergebnisse in einer möglichst konsistenten und widerspruchsfreien Logik nutzen? Was sind (Rahmen)Annahmen der unterschiedlichen verwendeten Modelle? Wie können Ergebnisse der einen Modelle in andere Modelle einfließen? Unterscheiden sich die verschiedenen Modelle in gleichen/ähnlichen Ausgabegrößen? Wenn ja, wieso?

Eine allgemeine Einführung in die Thematik, Herausforderung und Zielstellung aus Sicht des Umweltbundesamtes wird in dem ersten Reader-Beitrag von Ullrich Lorenz (UBA) gegeben. Anhand eines Überblick über unterschiedlicher Kontexte, in denen Simulationen Verwendung finden, führt er

---

<sup>1</sup> Das Projekt „Modelle, Potenziale und Langfristszenarien für Ressourceneffizienz (SimRes)“ wird im Rahmen des UF-PLANs durch das BMUB/UBA gefördert (FKZ 3712 93 102).

die Begriffe Konsistenz, Kohärenz und Stringenz ein, schlägt Narrative und qualitative Kausalmodelle als Klammer für umfangreichere Modellierungen vor und bereitet die folgenden Vorträge und Diskussionen mit Leitfragen vor.

Hannah Kosow (Dialogic) und Wolfgang Weimer-Jehle (Zirius Uni Stuttgart) stellen in ihrem Beitrag auf die Frage ab, wie Qualitative Szenarien und Modellierung zusammen gedacht und gebracht werden können. Die Methode der Cross-Impact-Bilanzanalyse spielt eine wesentliche Rolle zu Bildung der qualitativen Szenarien. Anhand von Beispielprojekten stellen die AutorInnen erfolgreiche Beispiele dar, wie die CIB-gestützten Narrative mit Modellierungen verknüpft werden können.

Die Beiträge von Kai Neumann (Consideo GmbH) und Deniz Koca (Lund University) zeigen dann Wege auf, wie gedankliche Modelle und Heuristiken unter Partizipation vielfältiger Expertise visualisiert werden können, um auf diese Weise eine konsistente und plausible Szenarionarrative zu erarbeiten. Kai Neumann nutzt im Rahmen des quantitativen Modells Nachhaltiges Deutschland („D3-Modell“) einen fließenden Übergang von qualitativer Modellierung hin zu voll quantifizierten Systemdynamischen Modellierung. Auch wenn das D3-Modell eine andere Zielstellung hat, als Rohstoffinanspruchnahme und Treibhausgasemissionen abzubilden, gehört es zu den Integrierten Bewertungsmodellen und beschreibt ein Deutschland 2050. Kai Neumann fokussiert dabei in seinem Beitrag auf Stärken und Schwächen der qualitativen und quantitativen Modellierung.

Deniz Koca stellt dann die qualitative Modellierung mit Hilfe von Causal-Loop-Diagrammen (CLD) als weitere Variante der Qualitativen Modellierung vor. Die qualitative Modellierung mit Hilfe von CLDs stellte einen wichtigen Bestandteil im SimRess-Projekt dar. Die CLDs haben geholfen Interventionslogiken abzuleiten und die Kopplung der beiden im SimRess-Projekt verwendeten Modelle (siehe hierzu die Beiträge von Harald Sverdrup und Mark Meyer/Martin Distelkamp) voranzutreiben. Der Beitrag beschreibt wie die CLD-Modelle in einer Top-Down-Logik als „Master-Modell“ nutzbar gemacht werden können.

Der Ansatz des SimRess-Projektes wird im Beitrag von Martin Hirschnitz-Garbers (Ecologic Institut) beschrieben. Das SimRess-Projekt hat zum Ziel, die nationale Ressourceneffizienzpolitik „messbar“ zu machen. Hierzu ist das multiregionale ökonomische input-output-Modell mit globalen systemdynamischen Modell WORLD 6 gekoppelt. Dieser Modellverbund ist in der Lage, Rohstoffinanspruchnahme und THG-Emissionen in Abhängigkeit von ausgewählten Ressourcen- und Klimaschutzmaßnahmen zu simulieren.

Die folgenden Beiträge stellen dann das systemdynamische WORLD 6-Modell (Harald Sverdrup, Iceland University) und schließlich das ökonomische GINFORS-Modell (Martin Distelkamp/Mark Meyer, GWS mbH) vor. Beide Modelle werden in einem über einen soft-link integrierten Modellierungsverbund in SimRess verwendet.

Zwei weitere Beiträge (Dittrich et al. und Schör et al.) beschreiben die beiden verwandten Projekte „Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess)“ und das Projekt „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – RTD“. Beide Projekte stützen sich ebenfalls auf ein ökonomisches input-output-Modell eingebettet in weitere Modellverbünde. Beide Beiträge fokussieren hierbei auch auf die Sicherung der Konsistenz der Modellverbünde.

Benjamin Greiner (Öko-Institut) führt in seinem Beitrag den Modellverbund ein, der in den Vorhaben „Politiksznarien“ (UBA) und „Klimaschutzsznarien“ (BMUB) eingesetzt. Beide Projekte haben zum Ziel, die Entwicklung des Energiebedarfs und damit verbundener Emissionen in Deutschland in der Zukunft einzuschätzen. Auch dieser Artikel widmet sich neben der allgemeinen Beschreibung des Modellverbunds um die Sicherung der Konsistenz im Verbund.

Im letzten Abschnitt werden die Diskussionen im Rahmen des Workshops im Rahmen eines Resümée zusammengefasst sowie einige Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen gegeben.

Dieser Reader markiert den Beginn eines Prozesses, der den „Nexus“ zwischen Ressourcenschonungs- und Klimaschutzpolitik durch Modellierungen beschreibbar macht. Wenn schon eines der beiden Politikfelder eine hohe Komplexität aufweist, so sind der Zusammenhang und das Wechselspiel der beiden Dimensionen gleichsam höher. Daher ist es umso wichtiger, die Diskussionsprozesse auf wissenschaftlicher Ebene dazu starten, wie es gelingen kann, mit der hohen Komplexität umzugehen und gleichzeitig wissenschaftlich fundierte, in konsistenten Szenario-Modellierungs-Prozessen erarbeitete Empfehlungen abzuleiten. Wir wünschen eine angeregte Lektüre und viele Erkenntnisse!

Ullrich Lorenz (UBA),

Martin Hirschnitz-Garbers (Ecologic Institut)

## 2 Bedingungen und Möglichkeiten der Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen unterschiedlicher Modellierungsansätze

Ulrich Lorenz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Umweltbundesamt, Dessau

### 2.1 Darf es alles ein bisschen einfacher sein?

Ein allgemeine Definition des Wortes Modell besagt, dass Modelle ein „vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit“ sind (vgl. z.B. Wikipedia)<sup>2</sup>. Modelle werden in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen genutzt – im Kontext des vorliegenden Readers beziehen wir uns auf Simulationsmodelle, die im weitesten Sinne aus dem sozio-ökologischen Umfeld kommen. Das „soziale System“ schließt in diesem Fall auch technische und/oder ökonomische Aspekte ein<sup>3</sup>. Derartige Simulationsmodelle, die sich an der Schnittstelle zwischen sozialer, technischer, ökonomischer und ökologischer Dimension bewegen, werden zumeist Integrated Assessment Models (IA-Modell) genannt. Wesentliche Grundidee ist, die Komplexität der vielfältigen Wechselwirkungen durch Aggregieren, Fokussieren, Vereinfachung und Festlegung von Systemgrenzen erfassbar zu machen und mögliche Wirkungen auf die Umwelt zu erfassen. Bei der notwendigen Vereinfachung der Komplexität, tritt allerdings ein erstes Dilemma auf, welches frei nach Albert Einstein besagt: „Man muss die Dinge einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher“. Wie viel Vereinfachung von hoch komplexen Systemen ist möglich, um noch belastbare Aussagen zu erhalten? Und was heißt „belastbare Aussagen“? Gerade in der Politikberatung in der dann verschiedene Interessen und Sichtweisen durch Modell „versachlicht“ werden sollten, müssen die Ergebnisse plausibel und nachvollziehbar sein – auch wenn sie unerwartet oder gar unerwünscht sein sollten.

Einerseits geht es grundsätzlich darum zu verstehen, wie ein bestimmtes System als solches funktioniert. Dies folgt der Idee, dass wenn ich das „Verhalten eines Systems“ mit zentralen Faktoren replizieren kann, dann ein besseres Verständnis der Funktionsweisen habe. Dies ist eher aus epistemologischen Gründen in der Grundlagenforschung und Theoriebildung von Interesse. Eine solche Systemkenntnis ermöglicht aber auch testen zu können, was passiert, wenn bestimmte Parameter im Modell geändert werden. Und dies ist der zweite Zweck, nämlich mögliche Interventionen zu testen, bevor sie in der Realität umgesetzt werden. Derartige deskriptive Modelle zeichnen so gut und so einfach wie möglich mit den wesentlichen Faktoren das Abbild einer grundsätzlich bekannten Realität ab. Mit diesem Abbild ist es dann möglich, Parameter zu variieren und damit das (geänderte) Verhalten des Modells<sup>4</sup> zu testen, bzw. Prognosen, d.h. mögliche Entwicklungen in die Zukunft extrapolieren. Damit spielen Systemanalyse und Simulationsmodelle auch eine wichtige Rolle in der Zukunftsforschung.

### 2.2 Wer sagt denn, dass alles so bleiben muss wie es heute ist?

Gerade an der Schnittstelle zur Zukunftsforschung könnte aber ein weiteres Dilemma zu Tage treten: Wie kann ich wissen, wie ein künftiges System in der Zukunft aussieht? Sind es wirklich „nur“ Parameter, die sich ändern oder ändert sich die Struktur des gesamten Systems? Ändert sich das Umfeld

---

<sup>2</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Modell#Modellbildung> (besucht im Juli 2016).

<sup>3</sup> Damit ist gemeint, dass sowohl die Infrastrukturen, Techniken oder die ökonomische Ordnung Teile des sozialen Systems sind. Dies kann analog zur „starken Nachhaltigkeit“ verstanden werden. Siehe z.B. [https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/schwache\\_vs\\_starke\\_nachhaltigkeit\\_1687.htm](https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/schwache_vs_starke_nachhaltigkeit_1687.htm) (besucht im Juli 2016)

<sup>4</sup> Das schließt eine Zeitabhängig des Modells ein (dynamisches Modell).

des Modells? Insbesondere politische Interventionen, um die es ja gerade bei umweltpolitisch motivierten IA-Modellen geht, haben das Potential die **Struktur der Systeme** zu verändert. Dieses Problem wird zudem umso deutlicher, desto langfristiger die Extrapolation sein soll. Folgt man der Hypothese, dass sie die Struktur des Systems verändert, muss aus analytischer Sicht auch gefragt werden: **weshalb** (und wie) ändert sich ein Parameter und **wodurch** (und wie) ändert sich die Struktur des Systems?

Wenn also verschiedene Simulationsmodelle einen ähnlichen Sachverhalt beschreiben, wie können sie vergleichbar gemacht werden? Sie stellen unterschiedliche Repräsentationen und Vereinfachungen des gleichen Systems dar und sollten doch somit in der Lage sein, ein System „gleich“ erklärbar zu machen. Liegen die Unterschiede – falls sie auftreten – in der Modellstruktur oder in dem Umfeld der Modelle und den Annahmen (d.h. Parametern)? In den folgenden Absätzen wird es daher detaillierter um die Definition und Diskussion der Systemgrenzen gehen, als eine Bedingung zur Vergleichbarkeit der Modellergebnisse: was passiert innerhalb (endogen) eines Modells, was außerhalb (exogen)? Und wenn außerhalb (exogen) des eigentlichen Modells „etwas“ passiert, ist die Frage was und wie das passiert? Und wie gehe ich damit um, wenn die Änderung nicht mehr „nur“ Parameter, sondern die Struktur des Systems betreffen: wie kann ich also etwas abbilden, wovon ich noch gar nicht genau weiß, wie das System genau aussieht?

### 2.3 Die Struktur der Zukunft oder die Zukunft der Struktur?

Insbesondere in den Ingenieurwissenschaften werden Simulationsmodelle noch zu einem anderen Zweck entworfen, als ein bekanntes System möglichst einfach zu reproduzieren. Bestimmte Werkteile oder Schaltkreise werden rein virtuell geschaffen und getestet, bevor sie überhaupt gebaut werden, um deren Funktionsfähigkeit im Vorfeld zu testen. Oder denken wir an Simulationsmodelle, die im KFZ-Bereich eingesetzt werden, um Unfälle zu simulieren. Auch hier wird das technische System auf sein Verhalten in einem wie auch immer gearteten Umfeld getestet (z.B. Verformungsenergie, die sich im Werkteil fortpflanzt, wenn es mit einer bestimmten Geschwindigkeit mit einer Wand kollidiert). Eine Analogie des genannten Beispiels der Unfallsimulation von KFZ besteht durchaus mit der Umweltpolitik: bevor bestimmte Maßnahmen umgesetzt werden, ist es von großem Interesse vorher zu testen, welche möglichen Wirkungen eine solche Intervention haben könnte. Schließlich geht es immer um Menschen oder Ökosysteme und hier sollte kein Schaden entstehen. Dabei ist allerdings gleich die Frage hinterher zu schieben: welche Wirkungen sind intendiert und welche unbeabsichtigten Nebeneffekte können auftreten? Man kann sich leicht vorstellen, dass bestimmte Modelle für Nebeneffekte einfach blind sind, weil diese Variablen oder Parameter in dem Modell gar nicht abgebildet sind (auch wegen dem Anspruch der Vereinfachung). Jedes Simulationsmodell ist eine Repräsentation eines mentalen Modells mit all seinen Vorannahmen und Paradigmen. In der Umweltpolitik geht es in der heutigen Zeit zumeist um verhinderte Umweltwirkungen und sobald um Maßnahmen und Interventionen untersucht werden, um ökonomische Folgen in Form von Kosten (Investitionen/Schäden). Selten geht es z.B. um direkte soziale Folgen (was auch schwieriger abzubilden wäre). Gleichzeitig macht es aber auch keinen Sinn, eine komplette Volkswirtschaft mit abzubilden, wenn es beispielsweise darum geht die Ausbreitung von Luftschadstoffen zu simulieren. Eigentlich trivial damit die Feststellung, dass jede Fragestellung/jedes Problem (eigentlich) ein eigenes Modell bräuchte, mit der klaren Definition was innerhalb des Modells erklärt werden soll und was von außen dazu kommt.

Dieser kleine Ausflug auch in andere Wissenschaftsdisziplinen zeigt, dass es neben den weiter oben beschriebenen **deskriptiven** Modellen auch **normative / virtuelle (oder Design) Modelle** geben kann. Insbesondere die „normativen“ Modelle könnten – sobald sie neue Systeme erschaffen – in der Zukunftsforschung interessant sein. In der qualitativen Modellierung (siehe den Beitrag von Kai Neumann in Abschnitt 4) werden die Begriffe hinsichtlich deskriptiv und explorativ unterschieden. Ein deskriptives Modell folgt der weiter oben im Text gegebenen Definition. Ein **exploratives** Modell

hingegen wird „Schicht für Schicht“ aufgebaut und so werden zu einer zunächst unbekanntem Fragestellung nach und nach erklärenden Strukturen hinzugefügt. Ein exploratives Modell lässt sich sogar im Sinne von „ideales Design“ normativ gestalten. So können – ausgehend von heutigen Kenntnissen – potentielle neue Systemstrukturen gestaltet/entworfen und analysiert werden.

Sverdrup argumentiert in seinem Beitrag (siehe Abschnitt 7.4), dass politische Maßnahmen je nach Eingriffstiefe auch die Struktur des Systems verändern. Ein offenkundiges Beispiel ist die Energiewende, die perspektivisch zu einer vollständig veränderten, auf erneuerbaren Energien basierten Stromerzeugung führt. Das heißt, die Energieversorgungsstruktur definiert durch Atom- oder Kohlekraftwerke existiert dann nicht mehr. In Bezug auf die Gestaltung des Systems gibt es nun unterschiedlichste Möglichkeiten bzw. Optionen. In Systemdynamischen Modellen kann ich nun „neue“ Systembausteine schon heute anlegen und erst in der Zukunft „aktivieren“ während andere Bausteine sich ausblenden. Auf diese Art kann im mittleren Zeithorizont durchaus ein Systemwandel dargestellt werden. Diese Art von Zukunftsanalyse – nicht Vorhersagen zu treffen, sondern zu analysieren, welche Entwicklungen denkbar sind – wird auch in **qualitativen Szenarien umgesetzt**. Qualitative Szenarien werden zumeist als Narrative aufbereitet und veranschaulichen so, welche denkbaren Entwicklungen es in der Zukunft geben kann. Es ist also durchaus ein naheliegender Schluss, solche Narrative zur Unterstützung von quantitativen Simulationsstudien zu nutzen, vor allen Dingen dann, wenn damit zu rechnen ist, dass die Systeme stark verändert werden. Streng genommen könnte jedes qualitative Szenario ein eigenes Modell benötigen. Die Kombination von qualitativen Szenarien und quantitativen Simulationsmodellen wird intensiv im Beitrag von Weimer-Jehle und Kosow (siehe Abschnitt 3) diskutiert.

## 2.4 Wollen wir sie rein lassen?

Weiter oben haben wir schon festgehalten, dass jedes Modell eine innere Welt (endogen) hat und um das Modell herum ein Außen (exogen) existiert. Ob und wie das Innen mit dem Außen gekoppelt ist, sollte möglichst genau festgelegt werden, wenn es darum geht, eine integrierte Betrachtung durchzuführen. Wird das Simulationsmodell von wenigen Zeitreihen (z.B. Entwicklung der Bevölkerungszahl, Bruttoinlandprodukt, etc.) aus dem Außen getrieben wird, scheint diese Art der Analyse vergleichsweise einfach, wenn durch die Architektur des Modells ausgeschlossen ist, dass Entwicklungen innerhalb des Modells zurück wirken auf die externen Treiber. Warum aber sollte das, was von außen kommt immer ganz „trivial einfach“ sein? Wahrscheinlicher ist doch, dass auch das, was außerhalb des eigentlichen Modells passiert ein eigenes komplexes System ist, mit eigenen Dynamiken, Emergenzen und Tipping points. Vielleicht erscheint das Ergebnis als Resultat einer komplexen Dynamik „einfach“. Ein klassisches Beispiel ist die demographische Entwicklung. Die Modelle des Statistischen Bundesamt sind hochkomplex und dennoch werden zumeist „einfache“ Zeitreihen der Bevölkerungsprognosen genutzt ohne alle Variablen mit zu betrachten, geschweige denn mögliche Rückkopplungen mit zu denken. Eine Sichtweise auf die Zeitreihen, die auch die Komplexität hinter der Zeitreihe mit in das Denken einschließt, könnte ein neues Licht auf das Verhältnis von endogen und exogen werfen, denn etwas was für das eine Modell exogen ist, ist der Modellgegenstand des anderen Modells. Und nicht immer muss das „andere“ Modell ein Rechenmodell sein; manchmal sind es „nur“ die mentalen Modelle. Ist die Schnittstelle zwischen zwei gekoppelten Modellen eindeutig definiert und gibt es keine komplizierten (oder versteckten) Rückwirkungen zwischen den Teilmodellen, ist die Verknüpfung relativ einfach – was in der Regel aber doch nicht der Fall ist (v.a. bei wenig expliziten mentalen Modellen). Ähnlich kompliziert ist es, wenn mehrere Zeitreihen (aus unterschiedlichen Quellen) als Treiber für die Berechnung der endogenen Entwicklungen in einem Modell dienen, wie beispielsweise die demographische Entwicklung und das BIP. Diese beiden Zeitreihen sind ganz sicher gekoppelt ohne vollständig kausal oder direkt proportional abhängig zu sein. Mit weiteren Zeitreihen, erhöht sich die potentielle gegenseitige Beeinflussung der Zeitreihen und



des/der Modelle. Damit kommen neue Herausforderungen auf den Modellentwickler und Modellnutzer zu: wie sind die Zeitreihen gekoppelt – proportional / antiproportional? ist die Kopplung direkt kausal? Ist es nur Koinzidenz statt Kausalität? Gibt es innerhalb der Modelle Variablen die auf die Treiber zurück wirken? Gibt es Schwellwerte, Co-Evolution oder Emergenzen?

Die Betrachtung des Außen und des Innen der Modelle erfordert in der Folge der obigen Argumentation vielleicht mehr Aufmerksamkeit, als vielleicht häufiger angenommen. Zwei mögliche Verfahren haben sich bereits bewährt, mit dieser Herausforderung umzugehen:

- ▶ Die Erarbeitung oder das Vorhandenseins eines „Mastermodells“, das den Zusammenhang von Treibern bzw. den verschiedenen Modell in seinen Erklärungsstrukturen erfassbar macht.
- ▶ Die Einbettung des Außen in Narrative, die den Zeitreihen und dem Modell einen gemeinsamen Kontext liefern;

## 2.5 „Ein Modell sie zu treiben“ – das Mastermodell

Unabhängig von der einzelnen Modellierungsmethode und dem Detailgrad, den Modelle versuchen abzubilden, stellen diese immer einen Ausschnitt eines Systems dar. In Konsequenz gibt es **immer** ein Außen und ein Innen. Dieses gilt es im Kontext der zu bearbeitenden Fragestellung klar zu definieren. Wie bereits im ersten Teil dieses Textes ausgeführt, gilt hierbei auch das Prinzip so einfach wie möglich, aber so komplett wie nötig. Es geht also darum, die **wesentlichen Zusammenhänge** zu erkennen. Hierfür bietet es sich grundsätzlich an, die Verbindungen auch graphisch darzustellen. Kaum ein Modell, das nicht durch ein Blockdiagramm dargestellt wird/werden kann. Bei genauerem Hinsehen, folgen diese „Blockdiagramme“ allerdings nicht unbedingt standardisierten Regeln: geht es um Informations- oder Material- oder Energieflüsse? Oder geht es um erklärende (kausale) Strukturen? Hier hat sich zumindest in den Systemwissenschaften eine Klassifikation etabliert, die hier klare Konventionen anbietet. Ausgehend von einer rein qualitativen Beschreibung eines Sachverhalts, die sogar durch Kollagen, Bilder, Symbole und Zeichnungen unterstützt sein kann, werden erste Kausalmodelle und einfach Massenstrommodelle visuell nach bestimmten Regeln dargestellt. Diese qualitativen Modelle haben je nach Methode und unterstützendem tool schon ein sehr hohes Erklärungspotential. Das Interessante dabei ist, dass Pfeildiagramme, als ein unterstützendes visualisierendes Tool, stark Logik geprägt sind: Pfeildiagramme lassen sich durch einfache Sätze lesen und aussprechen und im Prinzip repräsentieren sie gleichzeitig mathematische Formeln. Sorgfältig qualitativ erstellte Konzeptmodelle können fast unmittelbar in mathematische Simulationsmodelle überführt werden – und umgekehrt. Kausalmodelle zusammen mit Massenstrommodellen<sup>5</sup> bilden die Grundlage für System Dynamics Modelle.

Ein CLD-Modell (Kausalmodell – Causal Loop Diagramm) ist ein sehr gut geeignetes Werkzeug, um ein weiter oben erwähntes „**Master-Modell**“ zu erstellen. Das WORLD- und das D3-Modell nutzen dieses Vorgehen, so dass mit einem relativ einfachen CLD-Modell ein komplexer Zusammenhang grundsätzlich dargestellt wird, der dann noch mehr und mehr detailliert werden kann und muss. Auf diesem Weg wird schnell deutlich, ob und wie bestimmte Zeitreihen wenigstens indirekt kausal zusammen hängen. Das betrifft damit sowohl die Schnittstellen zum „Außen“ als auch mögliche Schnittstellen zwischen mehreren Teilmodellen. Klar sollte geworden sein, dass ein solches Master-Modell, das verschiedenen Teilmodelle oder Zeitreihen in ein geordnetes Verhältnis zueinander bringt, eine deutliche andere Qualität hat bzw. haben muss, als ein „einfaches“ Blockmodell.

<sup>5</sup> „Massen“ können Informationen, Materialien Personen oder andere „zählbare Dinge“ sein.

## 2.6 “Die Welt erklären“ – Narrative zur Ermöglichung der Vergleichbarkeit

Weiter oben im Text haben wir schon festgestellt, dass ein wichtiger Standardtest für sämtliche Modellierungsarbeiten sein sollte, ob die Annahmen/exogenen Parameter für ein Modell unabhängig voneinander sind bzw. anders herum argumentiert, ob bestimmte Zeitreihen zueinander konsistent sind. Das betrifft auch Modellkopplungen. Was bedeutet diese Konsistenz und wovon hängt Konsistenz ab? Am ehesten trifft die Definition „logische Widerspruchsfreiheit; strenger gedanklicher Zusammenhang“<sup>6</sup>, also die Definition aus dem mathematisch-logischen Kontext, auf die **Konsistenz von Rahmenannahmen** zu.

Insbesondere bei der qualitativen Szenariotechnik werden Annahmen über künftige denkbare Entwicklungen von Schlüsselfaktoren mittels **Konsistenzprüfung** zu Szenarien zusammengesetzt. Diese Art der Konsistenzprüfung könnte auch für Annahmen für Modellierungen genutzt werden (vgl. den Beitrag von Weimer-Jehle und Kosow in Abschnitt 3). Bei einer typischen Konsistenzprüfung in der Szenariotechnik wird die Bewertungsfrage gestellt: „Ist es denkbar, dass zwei Entwicklungen gleichzeitig in der Zukunft auftreten?“ Diese „Möglichkeit“, dass die beiden Entwicklungen gleichzeitig in der Zukunft auftreten wird in einem (gruppen)subjektivem Verfahren<sup>7</sup> geprüft, zumeist auf einer Skala von -3 bis +3. Hierbei bedeutet „-3“, dass die beiden Entwicklungen sich gegenseitig ausschließen, eine „0“ bedeutet, dass die beiden Entwicklungen voneinander unabhängig sind und eine „+3“ bedeutet, dass sich beide Entwicklungen quasi gegenseitig unterstützen. Zumeist werden in Szenarioprosessen aber eine ganze Reihe an Argumenten und Bedingungen genannt, unter denen eine Konsistenz möglich ist. Konsistenz ist also immer noch zusätzlich **kontextabhängig** (-> Frage der Kohärenz).

Abbildung 1: Beispiel für Konsistenzprüfungen

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 0 auto; width: 80%;">                 Abnahme der Bevölkerung in Deutschland (mit Überalterung)             </div>	X	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 0 auto; width: 80%;">                 Starkes Wirtschaftswachstum (BIP)             </div>
---	---	---

Diese beiden Entwicklungen können konsistent zueinander sein, wenn beispielsweise die Produktivität erheblich zunimmt, so dass mit weniger Arbeitskraft mehr produziert wird. Gleichzeitig wäre es denkbar, dass der Dienstleistungsbereich (v.a. Finanzwirtschaft) stark zunimmt. Eher denkbar ist doch aber, dass bei einer stärkeren Überalterung und Schrumpfung der Bevölkerung in Deutschland auch das BIP eher moderat wachsen würde. So argumentiert wären die beiden Entwicklungen zwar denkbar, aber nicht wirklich hoch konsistent. Ein solches „Paar“ würde möglicherweise mit einer „+1“ in einer Konsistenzmatrix vermerkt werden.

Eine wesentlich **stringentere** Konsistenzprüfung ergibt sich durch die **Prüfung von Kausalitäten** zwischen zwei Faktoren. Dann würde die Prüffrage etwas anders gestellt werden:

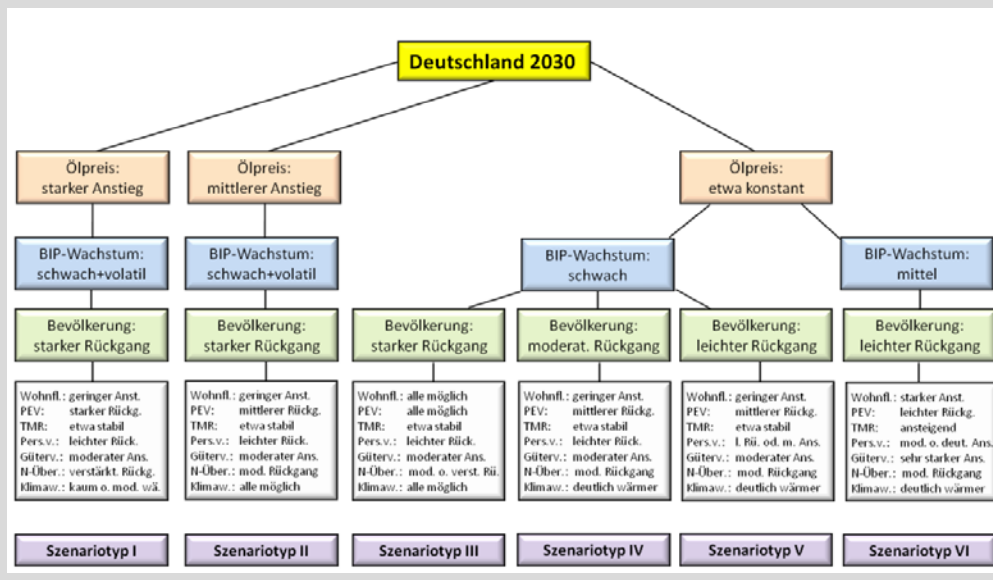
Führt die Abnahme der Bevölkerung in D zu starkem BIP-Wachstum? Nach allgemeinem volkswirtschaftlichem Verständnis ist die Zahl der Arbeitenden Bevölkerung sehr wohl eine Erklärung für wirtschaftliche Entwicklung (nicht die einzige), insofern besteht ein schwacher

<sup>6</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Konsistenz> (besucht im Juli 2016)

<sup>7</sup> Je nach Organisation des Prozesses, kann die „Subjektivität“ durch Gruppendiskussionen stark positiv, im Sinne von strukturierten und erkenntnisfördernden Diskussionen gewandelt werden.

kausaler Zusammenhang. Die Frage wird dann noch umgedreht: Führt ein starkes BIP-Wachstum zu einer Abnahme der Bevölkerung? Hier fällt die Antwort leichter: nein, höchstens zu eine Zunahme der Bevölkerung, da möglicherweise die Zuwanderung stärker wird.

Führt man eine solche kausale Konsistenzprüfung mit mehreren Variablen durch, ist es möglich, wie in der Studie „Konsistente Rahmendaten“ (UBA-Text 20/2011) durchgeführt, konsistente Bündel an Rahmendaten zu bilden. Diese „kausalverknüpften“ Variablen bilden somit ein vereinfachtes „Außenmodell“, von dem Teile oder ganze konsistente Szenarien als Treiber des eigentlichen Modells genutzt werden können.



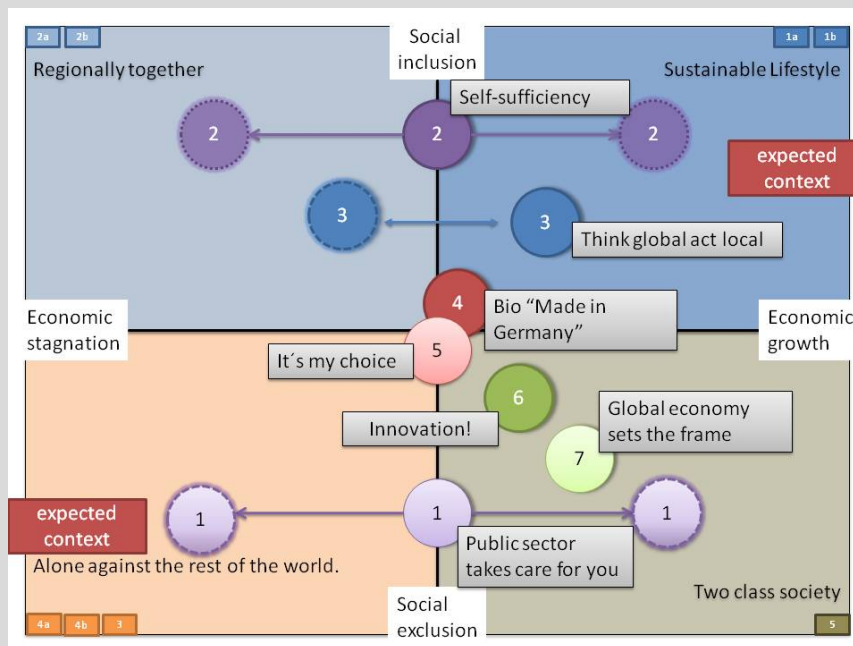
Gerade in qualitativen Szenarien werden aus konsistenten „Annahmenbündeln“ komplexere Geschichten erstellt. Neben der Konsistenz kommt auch der Kohärenz und der Stringenz eine entscheidende Bedeutung zu.

Statt also „nur“ zu fragen, ob die Daten zusammen passen (Konsistenz) ist – wie in der oben stehenden Box implizit dargestellt – entscheidend wichtig, ob es sich um Koinzidenz handelt (also auch mögliches zufälliges gleichzeitiges Auftreten) oder um eine direkte/indirekte Kausalität der Ereignisse handelt. Insbesondere bei Koinzidenzen ist es wichtig zu prüfen ob es nicht gemeinsame bislang unbekannte Treiber oder Faktoren im Hintergrund gibt. Also spielt auch hier die Kenntnis des Systems eine wichtige Rolle. Damit muss also „geprüft“ werden, ob die Argumente in den Szenarien zusammen passen und zielführend sind. Ist das Narrativ schlüssig? Sind alle Informationen enthalten, um die Erzählung für die Nutzung für Modellierungen eindeutig zu machen? Somit gelten auch für die Szenarien als Narrative die Kriterien der guten Argumentation: Konsistenz, Stringenz und Kohärenz<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Vgl.: [https://www.uni-bielefeld.de/philosophie/handwerk/material/handreichung\\_argumentieren.pdf](https://www.uni-bielefeld.de/philosophie/handwerk/material/handreichung_argumentieren.pdf) (besucht Juli 2016)

Abbildung 2: Beispiel der Deutung des Kontextes

Im folgenden Beispiel wurden komplexe Kontext-Szenarien als plausible Zukunftsräume erstellt in die sich „Lösungsszenarien“ für nachhaltige Ernährung einfügen können/müssten. Die Kontext-Szenarien ließen sich vereinfacht in einem Kreuz darstellen in Abhängigkeit von sozialem Zusammenhalt und ökonomischer Entwicklung. Drei Lösungsszenarien lassen sich je nach Kontext anders „erzählen“: Ein Lösungs-Szenario hieß beispielsweise „Selbstversorgung mit Lebensmitteln“. Ein solches Szenario ist sowohl denkbar in einem Umfeld ökonomische Prosperität als auch ökonomischer Krise. Im ersten Fall hätten wir eher eine „Welt“, in der Eigenproduktion einen Status oder ein Lebensgefühl repräsentiert – vergleichbar dem Lebensstil „Health and Sustainability“ (LOHA<sup>9</sup>). Im anderen Fall wird die Selbstversorgung eine Notwendigkeit, wenn es ökonomisch schlecht geht.



Aus: Lorenz U. & Veenhoff S. (2013).

Das Narrative helfen können, Basisannahmen offenzulegen, zu erklären und darüber auch zu vereinheitlichen bzw. zu harmonisieren, zeigen auch die Bemühungen des IPCC, die zu den Emissionspfaden (RCP) so genannte SSPs (Socio-Economic Pathways) definieren, die zu wesentlichen Grundannahmen konsistente bzw. passende qualitative Aussagen machen. Mit Bezug zu den Arbeiten von Weimer-Jehle/Kosow kann es allerdings problematisch werden, wenn das Narrativ nicht in sich schlüssig, logisch und vollständig in Bezug auf das bzw. die Modelle ist, welches es „treiben“ soll.

## 2.7 Einer für Alle – Alle für Einen?

Die weiter oben genannte „triviale“ Feststellung, dass jedes Problem eine eigene Lösung bräuchte, hat eine weitere Konsequenz: Für ein und denselben Sachverhalt gibt es eine Fülle unterschiedlichster Modelle und Modellierungstechniken. Besonders eindrücklich ist dies beispielsweise bei Energiemodellen. Alle diese Modelle haben das Ziel, das gleiche Energiesystem abzubilden. Und doch gibt es eine unüberschaubare Zahl von Modellen, die z.T. mit unterschiedlichen Modellierungstechniken arbeiten. Neben der Modellierungsmethode spielen nun aber gerade die exogenen Parameter bzw. Annahmen eine entscheidende Rolle, welches die Ergebnisse einer Simulation sind. Theoretisch

<sup>9</sup> Vgl.: <https://de.wikipedia.org/wiki/LOHAS> (besucht im Juli 2016)

müsste es aber so sein, dass in Bezug auf die gleichen Indikatoren auch die unterschiedlichen Modelle – sofern sie an „historischen“ Daten kalibriert wurden – zumindest ähnliche Ergebnisse darstellen. Diese Annahme sollte eigentlich für alle Modelle gelten: wenn also das gleiche System beschrieben wird und die gleichen Variablen im Modell enthalten sind, sollte auch die gleiche Größenordnung herauskommen, sofern die Modelle an der Vergangenheit kalibriert sind. Auch diese Annahme ist bzw. war für den hier durchgeführten Workshop eine Grundannahme: Alle Modelle, die beispielsweise die energiebedingten Emissionen von CO<sub>2</sub> im Modell enthalten, sollten doch für den gleichen vergangenen Zeitraum wenigstens in der gleichen Größenordnung Ergebnisse produzieren. In der Prognostik mag dies anders aussehen, denn da stellt sich besonders die Frage nach Exogenität und Endogenität der Parameter oder aber auch danach, ob die Modelle Systemveränderungen schon angelegt haben.

## 2.8 Ist das auch politisch korrekt?

Die zentrale Fragestellung in diesem Workshop-Reader dreht sich um die Vergleichbarkeit der Modellstrukturen und Ergebnisse von IA-Modellen – insbesondere an der Schnittstelle zwischen Ressourcennutzung und Treibhausgasemissionen. Unterschiedliche Modelle bearbeiten explizit oder nur implizit diese Fragestellung. Die Vergleichbarkeit der Modelle ist einerseits aus der oben skizzierten epistemologischen Frage relevant: was kann ich über das zugrundeliegende System lernen? Oder mit mehr Bezug zur Zukunftsforschung: wie kann das System der Zukunft aussehen? Als zweite Facette werden die Modelle aber auch genutzt, um politische Entscheidungsprozesse zu fundieren; hier stehen die Simulationsergebnisse stärker im Fokus. Damit allerdings können Modelle und die Ergebnisse mit Deutungsheiten vermengt werden, wenn die Modelle bestimmte Meinungen oder Positionen unterstützen sollen. Denkbar, dass Modelle der Kohleindustrie „beweisen“, dass die Kohle ökonomisch nicht wegzudenken ist und im Gegenzug natürlich Modelle aus der Erneuerbare Energienbranche zu einem gegenteiligen Ergebnis kommen. Dieser scheinbare Widerspruch kann eigentlich nur durch **maximale Transparenz** aufgelöst werden. Wie diese Transparenz (und damit Vergleichbarkeit) der Modelle erreicht werden kann, wurde in diesem Artikel bereits skizziert. Es gilt aber auch festzuhalten, dass neben den Modellanbietern auch der Auftraggeber gefordert ist, klare(re) Vorgaben zu machen: geht es um konkrete Zahlen in spezifischen Einheiten wie beispielsweise Bruttoinlandsprodukt in EUR oder Mengen in Tonnen? Oder geht es alternativ um die Muster einer zeitlichen Entwicklung? Eigentlich ist es notwendig auch den (plausiblen und konsistenten) Kontext immer mit zu kommunizieren (oder im Rahmen der Analyse erarbeiten zu lassen). Geht es darum eine Systemanalyse zu betreiben, das System zu verstehen, mögliche Systemveränderungen zu erkennen? Oder sollen bestehende Systeme unter neuen Bedingungen betrieben werden? Auch hier spielen konkrete Vorgaben zu Zeithorizont, Fragestellung und Methode eine zentrale Rolle für die Vergleichbarkeit. Sind die Bedingungen aber vorhanden, müsste man erwarten können, dass ein wie auch immer geartetes Modell den gleichen Indikator bei Anwendung gleicher Rahmendaten und –annahmen gleich oder zumindest sehr ähnlich repräsentieren muss.

Aus den bisherigen Ausführungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen und damit auch Empfehlungen ziehen:

- ▶ Jedes Modell stellt immer einen (vereinfachten) Ausschnitt eines Systems dar. Die Frage ist immer (wieder) zu prüfen, ob das Modell einfach, aber auch vollständig genug ist, die an es gerichtete Fragestellung zu beantworten. Es ist klar zu kommunizieren, welche Systemgrenzen und Limitationen das Modell, und damit auch die mit seiner Hilfe gewonnenen Erkenntnisse haben.
- ▶ Jedes Teilsystem bzw. jedes Modell ist von einem größeren System umgeben. Die Schnittstelle zwischen innerem (endogen) und äußeren (exogen) System sollten sorgfältig untersucht und dokumentiert werden.

- ▶ Modelle, die gleiche Indikatoren (Variablen) enthalten, sollten auch gleiche Muster und/oder Größenordnungen – wenigstens im historischen Verlauf – bei diesen Variablen zeigen. Wenn nicht, muss geprüft werden, warum das nicht der Fall ist.
- ▶ Qualitative Konzeptmodelle (CLDs) im Sinne eines „Mastermodells“ sind ein mögliches Hilfsmittel, um den Zusammenhang zwischen Teilmodellen bzw. Teilsystemen eines Modells herzustellen. Dabei ist aber auch eine gewisse Detaillierung notwendig, um die Kopplungen von Modellen und Teilsystemen wirklich zu erfassen.
- ▶ Unabhängig von Kausalstrukturen spielt auch der qualitative Kontext (=Narrativ) eine entscheidende Rolle für die Vergleichbarkeit von Modellergebnissen und die Kommunikation der Ergebnisse.
- ▶ Die Narrative müssen aber in Bezug auf zu treibende Modell kohärent, stringent und konsistent sein.

## 2.9 Literatur

Lorenz U. & Veenhoff S. (2013). Integrated scenarios of sustainable food production and consumption in Germany. Sustainability: Science, Practice, & Policy 9(2):92-104. Published online Jul 29, 2013. <https://sspp.proquest.com/integrated-scenarios-of-sustainable-food-production-and-consumption-in-germany-60d84a7381d7#.3m00kx0g>

### 3 Konsistenz von gesellschaftlichen Rahmenannahmen – Erfahrungen mit CIB

Wolfgang Weimer-Jehle<sup>1</sup> und Hannah Kosow<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ZIRIUS Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung, Universität Stuttgart

<sup>2</sup> DIALOGIK gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH, Stuttgart

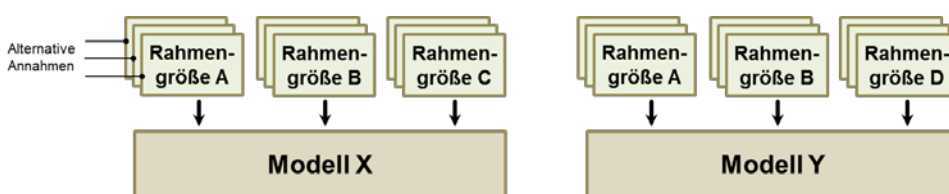
#### 3.1 Ausgangspunkt und Diagnose

Rechenmodelle sind mathematisch-informatische Objekte zur näherungsweise Repräsentation realer Systeme. Mit diesen teilen sie sich daher ein fundamentales Merkmal: sie besitzen eine Systemgrenze, die willkürlich – jedoch nicht beliebig – mitten durch die gedachte Realität gezogen wird, und die das Innere zur Angelegenheit des Modells und das Äußere zu Rahmenbedingungen des Modellgeschehens erklärt. Mit dieser notwendigen Grenzziehung definiert sich der Modellierer als unzuständig für das Geschehen außerhalb der Systemgrenze und ersetzt die eigentlich erforderliche Systemanalyse im modellexternen Teil der Welt durch Rahmenannahmen.

Dieser pragmatischen Verkürzung der systemanalytischen Aufgabe entkommt kein Modell, sie ist daher auch nicht im Geringsten zu beanstanden. Sie hat jedoch Folgen, mit denen besser oder schlechter umgegangen werden kann. Wenn z.B. Modelle dazu verwendet werden prognostische oder szenarienhafte Aussagen über die fernere Zukunft von Systemen zu treffen, die stark mit einem unsicheren Umfeld interagierenden, dann kann eine systematische Befassung mit dem Problem der Kontextunsicherheit und -komplexität (vgl. Weimer-Jehle et al. 2016) entscheidend für die Qualität der Modellanalyse werden. Energie- oder Wirtschaftssysteme und ihre wechselseitige Abhängigkeit mit ihrem gesellschaftlichen Umfeld wären hier ein Beispiel.

Abbildung 3 illustriert die Problematik, die beim Einsatz von zwei Modellen auftritt, die zwei Teilfragen einer übergeordneten Fragestellung behandeln und dafür teils überlappende, teils verschiedene Rahmenannahmen erfordern.

Abbildung 3: Konsistente und harmonisierte Rahmenannahmen in Modellen und Modellinstrumentarien



Nehmen wir an (siehe Abbildung 3), Modell X ist ein Strommarktmodell und Modell Y ein Verkehrsmodell. Beide zusammen können z.B. Licht auf die übergeordnete Frage der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen werfen. Beide Modelle erfordern teilweise gemeinsame Rahmenannahmen (wie z.B. die zukünftigen Ölpreise), aber auch spezifische (wie z.B. die zukünftige Wertschätzung der Bevölkerung für den Eigenbesitz eines Pkw). Man sieht sich nun mit verschiedenen Problemen konfrontiert:

- Die zu treffenden Rahmenannahmen sind für die mittel- bis langfristige Zukunft häufig hochgradig unsicher: Man kann für so manche Rahmengröße, wie z.B. für den Ölpreis im Jahr 2050, mit gleichem Recht bzw. gleicher Plausibilität außerordentlich unterschiedliche Werte wählen – mit oft starkem Einfluss auf die Modellaussagen.

- ▶ Die von den Rahmenannahmen vertretenen Systeme sind häufig interdependent: Der Ölpreis hat Wirkungen auf die Wirtschaftsentwicklung, die Wirtschaftsentwicklung auf die Bevölkerungsentwicklung (um zwei weitere typische Rahmenannahmen zu nennen), diese wiederum auf die Altersstruktur der Bevölkerung und diese dann schließlich auf das Mobilitätsverhalten. Für einen sinnvollen Satz von Rahmenannahmen für ein Modell oder ein Modellinstrumentarium kann man offensichtlich nicht zusammenhangslos für jede Größe eine beliebige Wahl treffen, sondern sinnvolle Modellresultate erfordern eine reflektierte Kombination der Rahmenannahmen: sie erfordern Konsistenz – eine Konsistenz, für die innerhalb des Modells die Algorithmen sorgen, für die aber außerhalb des Modells in einer gesonderten Anstrengung Sorge getragen werden muss.
- ▶ Die Konsistenz der Rahmenannahmen bedeutet mit anderen Worten, dass den Rahmenannahmen im Zusammenhang eine verständliche und kohärente Erzählung oder Narrativ über den gesellschaftlichen Kontext und seine Zukunft zugrunde liegen sollte – das sog. „Kontextszenario“ (vgl. Weimer-Jehle et al. 2016). Kombinationen von Rahmenannahmen, zu denen keine kohärente Erzählung gefunden werden kann, können als inkonsistent gelten und ignoriert werden. Jedoch werden sich fast immer mehrere, alternative Kontextszenarien finden lassen, und es ist diese Vielfalt, die den externen Unsicherheitsraum für die Modellanalyse repräsentiert.

### 3.2 Konzeptuelle Schärfung: Szenario-Konsistenz

Im folgenden Abschnitt wird weiter ausgeführt, wie wir Szenario-Konsistenz definieren (vgl. für das gesamte Unterkapitel auch Kosow 2015).

Zum einen ist Konsistenz ein konstitutives Element von Szenarien. Von einigen Autoren werden nur solche Bilder möglicher Zukünfte als Szenarien im eigentlichen Sinne verstanden, die konsistent sind (vgl. z. B. EEA 2007).<sup>10</sup> Szenario-Konsistenz verspricht somit einen Schutz vor der drohenden Beliebigkeit von Szenarien, d.h. zu begründen, warum genau dieses Szenario gewählt wurde und nicht ein anderes. Die Konsistenzforderung ersetzt zu einem gewissen Grade somit die empirische Überprüfbarkeit, die bei Annahme über mögliche zukünftige Entwicklungen, d.h. Szenario-Annahmen, weder möglich noch angemessen ist. Zum anderen ist Konsistenz auch eine Heuristik zur Szenario-Konstruktion selbst. Sie ist ein Prinzip, das diejenigen, die Szenarien konstruieren, dabei unterstützt zu reflektieren, wie sich verschiedene Annahmen über mögliche zukünftige (gesellschaftliche) Entwicklungen zueinander verhalten (vgl. auch Tourki, Keisler, Linkov 2013). Gerade die Konsistenz von qualitativen Szenarien oder Storylines wird als Herausforderung angesehen und deshalb ist eine Reihe von Konsistenz-Skalen und -Methoden, wie z.B. die Konsistenzanalyse (siehe z.B. Gausemeier, Fink, Schlake 1996) und auch die Cross-Impact Bilanzanalyse CIB (Weimer-Jehle 2006) entwickelt worden. Diese beruhen zum Teil auf unterschiedlichen Konsistenzverständnissen.

Allgemein - und sozusagen transdisziplinär - verstanden hat ein konsistentes Szenario Sinn, ist stimmig und enthält keine Widersprüche (vgl. auch im folgenden Kosow 2015). Genauer ausgedrückt geht es bei der Frage nach Konsistenz immer um die Beziehung von (mindestens zwei) Elementen sowie um das Kriterium, das als Maßstab für Konsistenz angelegt wird: (A) und (B) sind (in-) konsistent unter Kriterium (x). Konsistenz ist somit eine relationale Kategorie, die eine Aussage über das Verhältnis von A und B trifft, wobei A und B Szenarien bzw. Szenario-Elemente, bzw. die dahinter liegenden mentalen, konzeptuellen oder numerischen Modelle sein können. Es können verschiedene Konsistenzkriterien angelegt werden, z.B. intuitive oder systematisch-analytische. Bei intuitiven Kriterien wird die Konsistenz eines Szenarios durch das subjektive Bauchgefühl bzw. ein heuristisches Gesamturteil bewertet. Systematische Kriterien folgen formalen Regeln, die es erlauben, ein Szenario systematisch zu

<sup>10</sup> EEA 2007 definiert ein Szenario als „[...] a consistent and plausible picture of a possible future reality that informs the main issues of a policy debate.“



zerlegen und wieder zusammensetzen; Beispiele für solche Kriterien sind Koinzidenz und Kausalität (vgl. auch Weimer-Jehle 2009).

Weiterhin schlagen wir vor, vier Ebenen von Szenario-Konsistenz zu unterscheiden (vgl. Kosow 2015):

1. *Innere Konsistenz* bezieht sich auf die Frage, ob ein Szenario, bzw. ein Rahmendatensatz in sich konsistent ist. Relational ausgedrückt drückt sich das in der Frage aus: ist die angenommene Entwicklung jedes einzelnen Szenario-Elements konsistent mit den angenommenen zukünftigen Entwicklungen aller anderen Szenario-Elemente?
2. *Konsistenz innerhalb eines Szenario-Samples* bzw. verschiedener alternativer Sets von Rahmendaten, bezieht sich auf die Frage, ob alle Szenarien eines Samples miteinander konsistent sind.<sup>11</sup>
3. *Konsistenz zwischen verschiedenen* (qualitativen und quantitativen) Formen eines Szenarios bezieht sich auf die Übersetzung von Szenarien, wie sie bei der Kombination von qualitativen und modellbasierten Szenarien notwendig sein kann. Auf dieser Ebene stellt sich die Frage, ob modellbasierte Szenarien konsistent zu den entsprechenden Narrativen sind. Diese Frage bezieht sich auf zwei Schritte:
  - a) Ist die ‚erste Hälfte‘ numerischer Szenarien, d.h. quantitative Inputdatensets konsistent mit den entsprechenden qualitativen Narrativen oder Storylines?
  - b) Falls ja, ist auch die ‚zweite Hälfte‘ numerischer Szenarien, d.h. die vom Modell berechneten Indikatoren und Outputs, konsistent mit den jeweils entsprechenden qualitativen Storylines?
4. *Konsistenz dahinterliegender Modelle* bezieht sich auf die mentalen, konzeptuellen oder mathematischen Systemabbildungen, die hinter (verschiedenen) Szenarien liegen. Diese beziehen sich auf Annahmen und Setzung von Systemgrenzen, sowie die Definition von Systemelementen und von inneren und äußeren Beziehungen. Die Frage ist, ob die (z.B. qualitative) Systemabbildung, die hinter einem (narrativen) Szenario liegt, konsistent mit der (numerischen) Systemabbildung ist, die hinter dem entsprechenden (numerischen und modellbasierten) Szenario liegt.

Konsistenz auf verschiedenen Ebenen kann, aber muss nicht zusammenhängen. Auf jeder Konsistenzebene können eigene Konsistenzkriterien angesetzt werden. Auch können diejenigen, die Szenarien konstruieren, gute Gründe haben, nicht nach (vollständiger) Konsistenz zu streben, sondern explizit entweder (leichte) Inkonsistenzen in Kauf oder sogar in den Fokus zu nehmen.

### **3.3 Empirische Erfahrungen mit CIB zur Konsistenzanalyse und -sicherung**

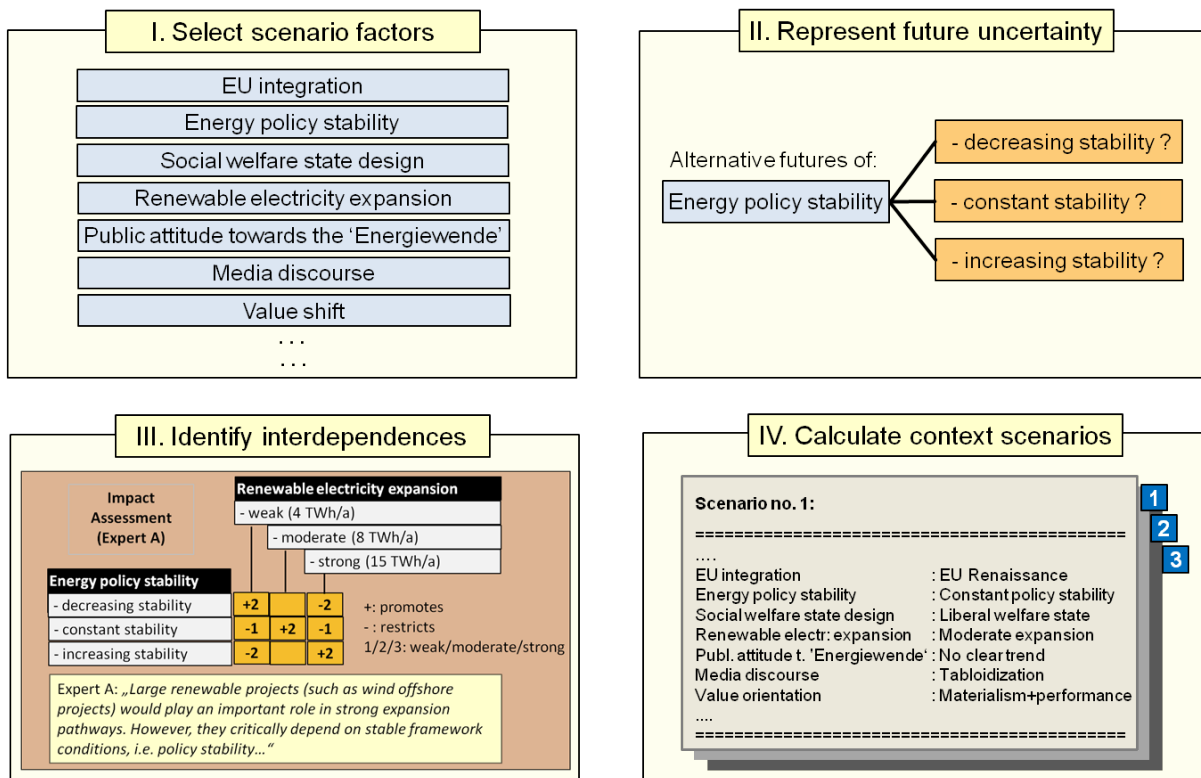
Am ZIRIUS wurde in den vergangenen Jahren ein Konzept entwickelt, die Cross-Impact Bilanzanalyse (CIB) (Weimer-Jehle 2006), eine Methode der qualitativen Systemanalyse. Das Konzept wird zur Sicherung der Konsistenz von Modell-Rahmenannahmen eingesetzt. Dabei werden für jede relevante Rahmengröße und ggf. auch für intermediär wirkende gesellschaftliche Faktoren eine Anzahl alternativer Zukünfte definiert. Anschließend werden die Interdependenzen zwischen den möglichen Entwicklungen der verschiedenen Rahmengrößen durch Expertenurteile auf einer 7-teiligen Ordinalskala als hemmend oder fördernd klassifiziert. Schließlich werden mit Hilfe eines Bilanzalgorithmus

---

<sup>11</sup> Diese Ebene bezieht sich auf zwei Aspekte, erstens auf die Frage, ob verschiedene Szenarien eines Samples den gleichen Scope und den gleichen Grad an Granularität aufweisen; zweitens, ob Annahmen über Einflussbeziehungen zwischen Szenario-Elementen zueinander stimmig sind, d.h. ob z.B. verschiedene Rahmendatensätze den gleichen Zusammenhang zwischen GDP und CO<sub>2</sub> Emissionen annehmen.

mus alle Kombinationen von Teilzukünften bestimmt, die ein selbstverstärkendes System von Entwicklungen bilden<sup>12</sup>, die sog. Kontextszenarien. Dabei ergeben sich i.A. mehrere Kontextszenarien, die die Diversität möglicher Zukünfte für das Gesamtsystem der Rahmenannahmen thematisieren. Einen Überblick über den Verlauf einer CIB gibt Abbildung 4.

Abbildung 4: Verlauf einer CIB zur Bestimmung von Kontextszenarien am Beispiel einer Energiemodellierung.



Im Folgenden schildern wir die drei bisherigen zentralen empirischen Erfahrungen mit dem Einsatz der CIB zur Analyse von Modell-Rahmenannahmen:

Eine erste *Methodendemonstration* erfolgte 2010 im Projekt „Konsistente Rahmendaten für Modellierungen und Szenariobildung am UBA“. In diesem Projekt wurde CIB eingesetzt, um wichtige Rahmenfaktoren für Umweltmodellrechnungen und typische Annahmen für ihre Zukunftsentwicklung zu identifizieren, das Beziehungsgeflecht zwischen den Faktoren in Form einer Cross-Impact Matrix aufzuarbeiten und konsistente Rahmenszenarien für Deutschland im Jahr 2030 zu identifizieren. Weiter Informationen finden sich bei Weimer-Jehle, Wassermann, Kosow (2011).

Eine *Pionieranwendung* fand von 2008-2013 im Rahmen des Projektes LiWa „Nachhaltiges Management von Wasser und Abwasser in urbanen Wachstumszentren unter Bewältigung des Klimawandels – Konzepte für Lima Metropolitana (Perú)“ statt. In diesem Projekt hat eine lokale Stakeholdergruppe mit Hilfe von CIB qualitative Szenarien der Wasserkünfte der Stadt Lima konstruiert. Diese wurden mit einem Stoffstrommodell, dem sog. LiWatool, gekoppelt, um integrierte qualitativ-quantitative Szenarien der zukünftigen Wasserversorgung der Hauptstadt Perus bis zum Jahr 2040 zu erstellen. Weitere Informationen finden sich in Kosow, Leon, Schütze (2013, auf Spanisch), in Kosow (im Erscheinen) und unter [www.lima-water.de](http://www.lima-water.de).

<sup>12</sup> Eine nähere Beschreibung und eine freie Software zur Durchführung einer CIB findet sich auf [www.cross-impact.de](http://www.cross-impact.de).

Schließlich kommt CIB seit 2011 in mehreren Projekten der Helmholtz-Allianz „Energie Trans – Zukünftige Infrastrukturen der Energieversorgung – Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit und Sozialverträglichkeit“ zum Einsatz. In diesem Forschungsverbund unterstützt CIB Wissenschaftler verschiedenster Disziplinen in der konzertierten Erstellung sozio-technischer Szenarien der deutschen Energiewende aus der Perspektive verschiedener Projekte und Ebenen (lokal, national, europäisch und global). Für weitere Informationen siehe <http://www.energy-trans.de/> und <http://www.zirius.eu/projects/allianz-foresight.htm>. Eine Konzeptdemonstration zum Einsatz von CIB-Kontextszenarien bei der Erstellung von sozio-technischen Energieszenarien findet sich in Weimer-Jehle et al. (2016.), weitere Publikationen sind in Vorbereitung.

### 3.4 Fazit: Was kann CIB, können CIB gestützte Narrative für Modellierung und Simulation leisten?

Insgesamt kann CIB, können CIB gestützte Narrative für Modellierung und Simulation verschiedene Funktionen übernehmen (vgl. Kosow, im Erscheinen). Diese unterscheiden sich je nach der Position der CIB im Verhältnis zu den Modellen sowie in Bezug auf den Grad der Integration zwischen beiden Komponenten. Die Position der CIB im Verhältnis zum Modell bzw. den Modellen bezieht sich auf das Timing, den Einfluss auf Szenario-Inhalt und -Strukturen, sowie die Frage, welche Komponente als Benchmark für wechselseitige Anpassungen herangezogen wird. Idealtypisch kann man solche Ansätze unterscheiden, in denen die Modellierung zuerst steht bzw. solche, in denen die CIB im Vordergrund steht. Der Grad der Integration zwischen CIB und Modell bezieht sich auf die Überschneidung der Abbildungsbereiche, die Kopplung und Iteration zwischen CIB und numerischer Modellierung sowie den Grad der Inklusion der beteiligten Akteure, d.h. die Frage, ob Modellierer auch an der CIB bzw. CIB-Experten auch an der Modellierung beteiligt sind, oder ob beide Akteursgruppen weitestgehend getrennt voneinander arbeiten. Idealtypisch können Ansätze mit eher niedrigem oder eher hohem Grad an Integration unterschieden werden. Abbildung 5 fasst vier idealtypische Funktionen von CIB für Modellierung und Simulation zusammen:

Abbildung 5: Typen der Kombination qualitativer (CIB) und modellbasierter Szenarien (vgl. Kosow, im Erscheinen)

		Grad der Integration (Überschneidungen, Kopplung, Iteration, Inklusion)	
		Niedrig	Hoch
Position (Timing, Einfluss auf Szenario-Inhalt und -Struktur, Benchmark für Anpassungen)	Modelle zuerst	<b>Typ 1</b> CIB schlägt einem Model (oder einer Modelgruppe) allgemeine <u>Kontext</u> szenarien vor - als unverbindlichen, zusätzlichen Service.	<b>Typ 2</b> Ein Modell/ eine Modellgruppe nutzt CIB zur integrierten Analyse und Bereitstellung maßgeschneiderter Rahmenannahmen.
	CIB zuerst	<b>Typ 3</b> CIB steuert einen qualitativen Szenarioprozesses, num. Modelle liefern zusätzliche numerische Informationen.	<b>Typ 4</b> CIB wird von einer Szenariogruppe und einem Modellierungsteam gemeinsam als geteiltes konzeptuelles Model genutzt, dass die Basis für integrierte <u>System</u> szenarien bildet.

Eine empirische Analyse von Konsistenzwirkungen in den ersten beiden oben genannten Projekteinsätzen zeigt folgende Ergebnisse (vgl. Kosow 2015 und im Erscheinen): Die Verwendung von CIB:

- ▶ macht implizite Annahmen explizit: Dies ist eine Voraussetzung zur Beurteilung von (In)Konsistenz und kann Modellannahmen auch Nicht-Modellierern (z.B. Kunden von Szenario-Studien) zugänglicher machen.
- ▶ Stellt die innere Konsistenz einzelner Szenarien sowie innerhalb eines Szenario Samples sicher.
- ▶ Unterstützt die Konsistenz zwischen qualitativen und quantitativen Formen von Szenarien, z.B. die Passung von qualitativen Kontextszenarien und den darauf basierenden numerischen Sets von Rahmenannahmen (d.h. dem Modelinput bzw. der ersten Hälfte der numerischen Szenarien).

Vollständige Konsistenz auf Modellebene scheint dagegen sehr voraussetzungsvoll: stattdessen wird augenscheinliche Konsistenz der qualitativen und numerischen Szenarien erreicht. Schließlich steigen Konsistenzeffekte durch CIB mit dem Grad der Integration – und sind (eher) unabhängig von der Position von CIB und Modell(en).

Insgesamt zeigen die bisherigen Praxiseinsätze von CIB zur Erstellung von Kontextszenarien und der daraus abgeleiteter Narrative Potenziale aber auch Herausforderungen auf:

- ▶ Der Ansatz geht auf die Einsicht ein, dass bei zukunftsorientierten Modellierungen „hinter jeder Zahl im Modell eine Story steht“ (S. Vögele) und bietet einen Weg, harmonisierende Hintergrundbilder für Modelle und Modellverbünde bereitzustellen. Die Perspektive der Modellierer über den Zusammenhang zwischen gesellschaftlichen und technischen Prozessen sowie die Einsichten über die Kontextbedingtheit der Modellergebnisse wurden effektiv ausgeweitet.
- ▶ Dies erfordert jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Ressourceneinsatz im Projekt – die Kontextanalyse muss als eigenständiger Analyseteil mit eigenen Ansprüchen an Zeit und Personalaufwand innerhalb des Gesamtprojektes verstanden werden. Je nach im Modellierungsteam (nicht) vorhandener Expertise, kann die Zusammenarbeit mit externen Fach- sowie Szenario-Experten notwendig sein.
- ▶ Die (halb)formalisierte Erstellung der Narrative, wie sie in CIB erfolgt, kann Vollständigkeit, Transparenz und Nachvollziehbarkeit, Konsistenz und Revidierbarkeit von Narrativen unterstützen (Kosow 2015, Schweizer/Kriegler 2012) und damit die Wissenschaftlichkeit von Story And Simulation (SAS) Prozessen (Alcamo 2008) verbessern (Lloyd/Schweizer 2014). Dieses Potenzial realisiert CIB jedoch nur, wenn bestimmte Prozessanforderungen erfüllt sind, z.B. was die Offenheit, Kooperationsbereitschaft und den Willen zum ‚Interessensausgleich‘ der CIB- und Modellexperten betrifft. Auch ein wirkliches technisches Verständnis der CIB-Logik bei allen Prozessbeteiligten, über eine nur grobe Vorstellung hinaus, ist der Prozessqualität förderlich. Ein tiefes Verständnis ist aber, trotz der grundsätzlichen Einfachheit der Vorgehensweise, nicht beiläufig zu erreichen.
- ▶ Kontextszenarien und die daraus hervorgehenden Narrative sollten i.A. ein Gemisch aus Kontext- und direkt modellrelevanten Größen sein. Sowohl die Beschränkung auf reine gesellschaftliche Erzählungen ohne explizite Schnittstellen zu den Modellen als auch nur auf Modell-Input-Größen beschränkte Kontextszenarien vergeben Potenzial. Die Interdependenzen zwischen den Input-Größen kann oft nur verstanden werden, wenn man die vermittelnde Rolle gesellschaftlicher Größen mit in den Blick nimmt. Dies bedeutet aber andererseits, dass Wissensbestände von außerordentlich interdisziplinärem Zuschnitt in die Analyse einzubringen sind, was entsprechende Anforderungen an die interdisziplinäre Breite der beitragenden Experten erfordert.
- ▶ Bei der systematischen Erörterung der Interdependenzen der in den Kontextszenarien erfassten Größen stößt man häufig auf Zusammenhänge, die offensichtlich relevant, aber wissenschaftlich noch wenig erforscht sind. In diesen Fällen kommt den beteiligten Experten nicht nur die Aufgabe zu, aus gesichertem Wissen zu ‚zitieren‘, sondern sie müssen ihr Wissen ‚extrapolieren‘. Die CIB reduziert also durch ihr formalisiertes, stark dokumentierendes Vorgehen die Subjektivität im Vergleich zu den gängigen intuitiven Verfahren der Narrativerstellung, sie eliminiert Subjektivität aber aus dem genannten und anderen Gründen nicht vollständig, sondern legt sie offen.

- ▶ Ebenso wie in allen anderen Story And Simulation (SAS) Ansätzen (vgl. Alcamo 2008) ist der Prozess der quantitativen Interpretation der qualitativen Szenariobestandteile ein erhebliches Problem, für das viele Ansätze, aber kaum befriedigende Lösungen existieren. Dadurch wird die eindeutige Zuordnung zwischen Narrativ und Modellinput geschwächt (Trutnevyte et al. 2014), stattdessen sind immer Interpretationen erforderlich.
- ▶ Grundsätzlich sollten alle Annahmen und Daten im Modell auf Verträglichkeit mit dem zugrunde gelegten Narrativ geprüft werden, und bei Verwendung mehrerer alternativer Narrative beim Wechsel des Narratives ggf. mit variiert werden. Praktisch ist dieses Ideal jedoch kaum erfüllbar, da viele Modelle zig Tausende von Daten beinhalten, die bei genauer Betrachtung sozusagen ‘Narrativ-sensitiv’ sein könnten. In der Praxis wird man sich darauf beschränken müssen, die mutmaßlich ergebnisrelevantesten und am eindeutigsten Narrativ-sensitivsten Daten zu variieren: Der Eindringtiefe der Narrative in das Modell sind somit praktische Grenzen gesetzt.

### 3.5 Literatur

- Alcamo, J. (2008): Chapter Six. The SAS Approach: Combining Qualitative and Quantitative Knowledge in Environmental Scenarios. In: Alcamo, J. (Ed.): *Developments in Integrated Environmental Assessment: Environmental Futures: The Practice of Environmental Scenario Analysis*, Amsterdam: Elsevier, 123–150
- Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O. (1996): *Szenario-Management: Planen und Führen nach Szenarien*. 2., neu bearbeitete Auflage, München, Wien: Hanser Verlag
- Kosow, H.; Leon, C.; Schütze, M. (Eds.) (2013): *Escenarios para el futuro – Lima y Callao 2040. Escenarios CIB, storylines & simulación LiWatool* <http://www.lima-water.de/documents/scenariobrochure.pdf>
- Kosow, H. (im Erscheinen): *The best of both worlds? An exploratory study on forms and effects of new qualitative-quantitative scenario methodologies*; Dissertation Universität Stuttgart
- Kosow, H (2015): *New outlooks in traceability and consistency of integrated scenarios*. In: *European Journal of Futures Research* 3/1, 1-12, DOI 10.1007/s40309-015-0077-6
- Lloyd, EA; Schweizer VJ (2014): *Objectivity and a comparison of methodological scenario approaches for climate change research*. In: *Synthese*, Vol. 191(10), 2049-2088
- Schweizer, V.; Kriegler, E. (2012): *Improving environmental change research with systematic techniques for qualitative scenarios*. In: *Environmental Research Letters* 7/ 4, DOI:10.1088/1748-9326/7/4/044011
- Tourki, Y.; Keisler, J.; Linkov, I. (2013): *Scenario analysis: a review of methods and applications for engineering and environmental systems*, In: *Environment Systems and Decisions* 33/1, 3-20
- Trutnevyte, E; Barton, J; O'Grady, A; Ogunkunle, D; Pudjianto, D; Robertson, E (2014): *Linking a storyline with multiple models - A cross-scale study of the UK power system transition*. In: *Technological Forecasting & Social Change* 89, 26-42. DOI: 10.1016/j.techfore.2014.08.018.
- Weimer-Jehle, W.; Buchgeister, J.; Hauser, W.; Kosow, H.; Naegler, T.; Pregger, T.; Pogonietz, W.; Prehofer, S.; Recklinghausen, A. von; Schippl, J.; Vögele, S. (2016): *Context scenarios and their usage for the construction of socio-technical energy scenarios*. In: *Energy*, DOI: 10.1016/j.energy.2016.05.073
- Weimer-Jehle, W.; Wassermann, S.; Kosow, H. (2011): *Konsistente Rahmendaten für Modellierungen und Szenariobildung im Umweltbundesamt*. UBA Texte 20/2011, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Weimer-Jehle, W. (2006): *Cross-Impact Balances: A System-Theoretical Approach to Cross-Impact Analysis*, In: *Technological Forecasting and Social Change*, 73/4, 334-361
- Weimer-Jehle, W. (2009): *Szenarienentwicklung mit der Cross-Impact-Bilanzanalyse*. In: Gausemeier J. (Ed.): *Vorausschau und Technologieplanung*. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe Vol. 265, 435-454

## 4 Qualitative und quantitative Ursache-Wirkungs-Modelle: Stärken und Limitation der Ansätze

Kai Neumann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Consideo GmbH, Lübeck

### 4.1 Kurzbeschreibung der für das Umweltbundesamt verwendeten Modell-Logiken

Die kognitive Fähigkeit von Menschen ist darauf beschränkt, im besten Fall das Zusammenspiel von bis zu vier Variablen ohne Hilfsmittel betrachten zu können. Modelle im Allgemeinen und qualitative Ursache-Wirkungsmodelle im Besonderen stellen geeignete Instrumente dar, um komplexe Fragestellungen aus allen möglichen Bereichen verständlich aufzubereiten. Bei dieser Form der qualitativen Modellierung werden die zu betrachtenden bzw. analysierenden Systeme als wirkungsbezogenen Verknüpfungen von Variablen aufbereitet. Dieses Vorgehen findet sich ähnlich bei den Causal-Loop-Diagrammen (siehe System Dynamics) oder den Fuzzy Cognitive Maps. Die Software iMODELER ist speziell zur qualitativen und quantitativen Ursache-Wirkungsmodellierung entwickelt worden. Die Software bietet eine Reihe von Merkmalen, die im Kontext dieses Readers relevant sind, etwa die nahtlose Quantifizierung qualitativer Modelle, Erkenntnis-Matrizen zur Analyse qualitativer Modelle, Tausende Faktoren auch kollaborativ über das Internet in Beziehung setzen zu können, eine Planspielfunktionalität, oder spezifische Faktoren zur Prozess-Modellierung. Relevant ist auch der Übergang von qualitativer zu quantitativer Modellierung, da so vorweg die Annahmen hinter häufig abstrakteren System Dynamics Modellen transparent gemacht werden können. Erkenntnis-Matrizen erlauben über die reine Visualisierung hinaus gewichtete Wirkungsbeziehungen zu analysieren und so gerade auch in größeren Modellen aus der Vielzahl von Annahmen Schlüsse abzuleiten. Damit Modelle nicht zur abstrakten Blackbox werden, da anderenfalls die Anzahl der Faktoren nicht mehr zu überschauen wäre, bietet der iMODELER intelligente Möglichkeiten von Perspektivwechseln, Ein- und Ausblenden von Ebenen, sowie Filter- und Clustermöglichkeiten.

Planspiele bieten die Möglichkeit, Annahmen zum Verhalten von Akteuren nicht von außen vorgeben und dazu auch begründen zu müssen, sondern durch stellvertretende Akteuren direkt zu simulieren. Mit Prozess-Faktoren schließlich wird die Herausforderung von System Dynamics Modellen, die in der Berechnung der Konkurrenz um limitierende Ressourcen liegt, deutlich vereinfacht. Tatsächlich geht es in vielen Umweltfragen vom Ausbau der Erneuerbaren Energien über die Landwirtschaft, Mobilität bis zur Kreislaufwirtschaft etc. immer wieder um solche Prozessmodellierungen. In diesem Beitrag werden die Möglichkeiten und Grenzen dieser Ansätze anhand von vier ausgewählten Modellen für das Umweltbundesamt beschrieben:

- ▶ ein *exploratives (partizipatorisches) qualitatives Ursache-Wirkungsmodell* als Integrated Assessment Model für ein besseres Verständnis zur Kluft zwischen Wissen und Handeln in Bezug auf Nachhaltigkeit in Deutschland
- ▶ ein *quantitatives* Planspiel zu den Zusammenhängen des IAM Projekts
- ▶ ein sehr umfangreiches, quantitatives Ursache-Wirkungsmodell (Simulation erfolgt auf Basis von System Dynamics) zur Frage, mit welchen Auswirkungen auf Wirtschaft und Umwelt (Umwelt, Klima, Ressourcen) sich Verhaltensänderungen durch die gesellschaftlichen Milieus verbreiten können
- ▶ ein quantitatives Prozess-Modell zum Ausbau der Erneuerbaren Energien und dem damit verbundenen Ressourcen-Einsatz.

Hoch aggregiert haben wir im qualitativen Integrated Assessment Modell (Grimm et al 2014 und direkt hier: [https://www.know-why.net/model/AT8roKO\\_fQCHRRrtwhp\\_1-w](https://www.know-why.net/model/AT8roKO_fQCHRRrtwhp_1-w)) Wirkungsbeziehungen zwischen den Akteuren Konsumenten, Politik, Unternehmen, NGOs und Medien sowie u.a. der Wirtschaft, dem Staatshaushalt und der Umwelt aufgestellt. Ergebnis ist vor allem, dass zwischen den Akteuren durch selbstverstärkende Wirkungsschleifen beschrieben ein so genannter Lock-In-Effekt besteht, hernach jeder Akteur für sein nachhaltiges Handeln auf die Unterstützung durch andere Akteure angewiesen ist. Diese selbstverstärkenden Wirkungsschleifen können die Konsumenten/Wähler/Nachbarn am effektivsten von einem Teufelskreis zu einem Engelskreis machen. Die partizipative Modellierung mit Stakeholdern hat dabei ergeben, dass das Hauptmotiv nicht etwa die Vernunft, sondern das gute Gefühl ist, was sich mit Erkenntnissen der Biopsychologie (Neumann, 2013 und als Modell hier: <https://www.know-why.net/model/AdZFBSw0R6XkpO2oeVelEgA>) deckt. Es ginge also darum, das gute Gefühl durch nicht-nachhaltiges Handeln durch ein gutes Gefühl durch nachhaltiges Handeln zu ersetzen.

Um die Abhängigkeiten der Akteure voneinander und das Streben der Akteure jeweils nach Glücksgefühlen, nach Gewinn und Wählern didaktisch geschickt zu vermitteln, haben wir ein kleines Planspiel entwickelt mit den Möglichkeiten des iMODELERS Eingabemasken zu definieren und durch einen Spieleleiter schrittweise die Handlungen einzelner Spieler abzufragen, die über das Internet am gleichen Modell spielen.

Sowohl das qualitative IAM als auch das Planspiel sind hoch aggregiert und treffen Annahmen, wie sich etwas in der Bevölkerung verbreitet und auf die Umwelt und die Ressourcen als Ganzes auswirkt. Um diese Annahmen genauer zu betrachten entwickeln wir derzeit zusammen mit Ecologic Institut, adelphi, FEST und socio dimensions das sehr umfangreiche (mehr als 4.000 Faktoren) D3 Modell. Hier schauen wir, wie sich Verhaltensänderungen der Gesellschaft aufgeteilt in so genannte Milieus auf die Umwelt und auf die Wirtschaft und darüber wieder zurück auf Arbeitsplätze auswirken. Zudem werden die gesamtwirtschaftlichen Effekte vergleichbar zum Nationalen Wohlfahrtsindex (NWI) betrachtet und auch die Zufriedenheit der Menschen in den Milieus ist quantifiziert worden. Tatsächlich lassen sich hierüber Effekte wie ein Crossing the Chasm (Moore, 2002) durch progressivere Milieus und einer Transition über einen Tipping Point (Gladwell, 1995 oder auch hier: [https://www.know-why.net/model/Ca6qbooR5M29TQWuP\\_sIZ7g](https://www.know-why.net/model/Ca6qbooR5M29TQWuP_sIZ7g)) über die anderen Milieus simulieren. Allerdings deutet das Modell auch schon an, dass genauso, wie kleine Änderungen eine große Wirkung pro Nachhaltigkeit entfalten können, genauso kleine Gegenmaßnahmen auch rückläufige Wirkungen entfalten können.

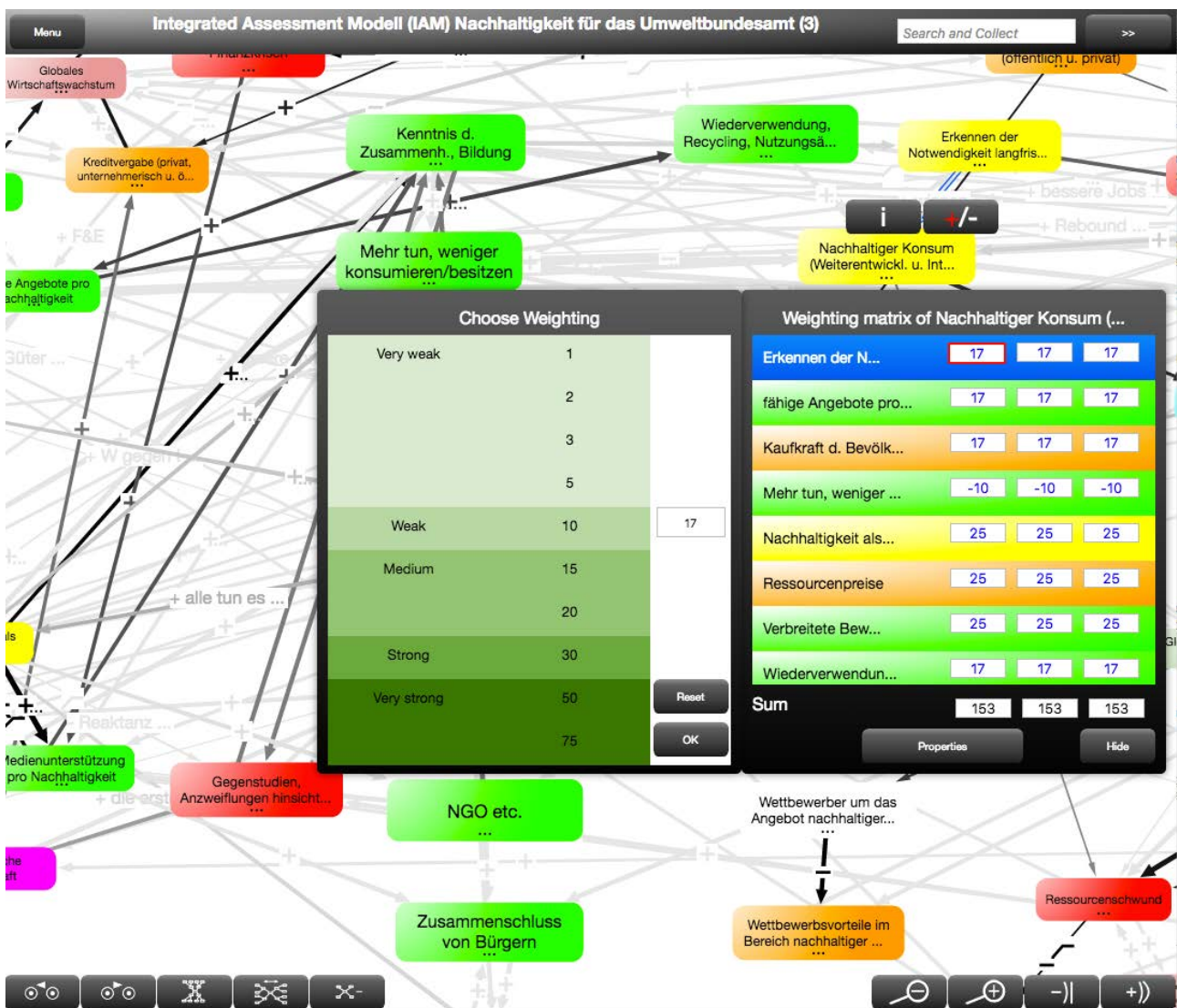
Das D3 Modell blickt nur sehr grob auf eine Zunahme erneuerbare Energien und deren Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch. Daher haben als so genannte Szenarette das D3 EE Modell erstellt, in dem wir mit Prozess- und Ressourcen-Faktoren quantitativ den Ausbau von Wind (On- und Offshore) und Photovoltaik, jeweils Tag und Nacht aufgeteilt in Nord und Süd unter Berücksichtigung auch des Netzausbaus und des Ausbaus von Power-to-Liquid/Gas, mit der damit verbunden Ressourceninanspruchnahme (Technologiemetalle, Buntmetalle, Mineralische Stoffe, eisenartige Stoffe), deren Recycling beim späteren Rückbau, und dem Verbrauch fossiler Rohstoffe (Gas, Öl und Kohle). Erkenntnisse aus diesem Modell unter anderem, dass zur Einsparung von Ressourcen der Ausbau so früh und massiv wie möglich zu erfolgen hat, und dass bei den jetzigen Ausbauszenarien wir selbst bis 2050 nicht über ein Gleichgewicht zwischen Rückbau und Zubau über 35 Prozent Anteil erneuerbarer Energien hinauskämen.

## **4.2 Darlegung ausgewählter qualitativer und quantitativer Ansätze, Parameter und ausgewählter verwendeter Rahmendaten**

In diesem Abschnitt werden zuerst Aspekte des Qualitativen IAMs und dann des D3 und des D3 EE Modells betrachtet.

Bei den qualitativen Modellen werden Wirkungen auf einen Faktor mit anderen Wirkungen auf diesen Faktor verglichen. Abbildung 6 zeigt, inwieweit die 8 Einflüsse auf den Konsum nachhaltiger Güter vergleichsweise schwach, mittel oder stark wirken, und ob sich dieses zwischen kurz-, mittel- und langfristig ändert.

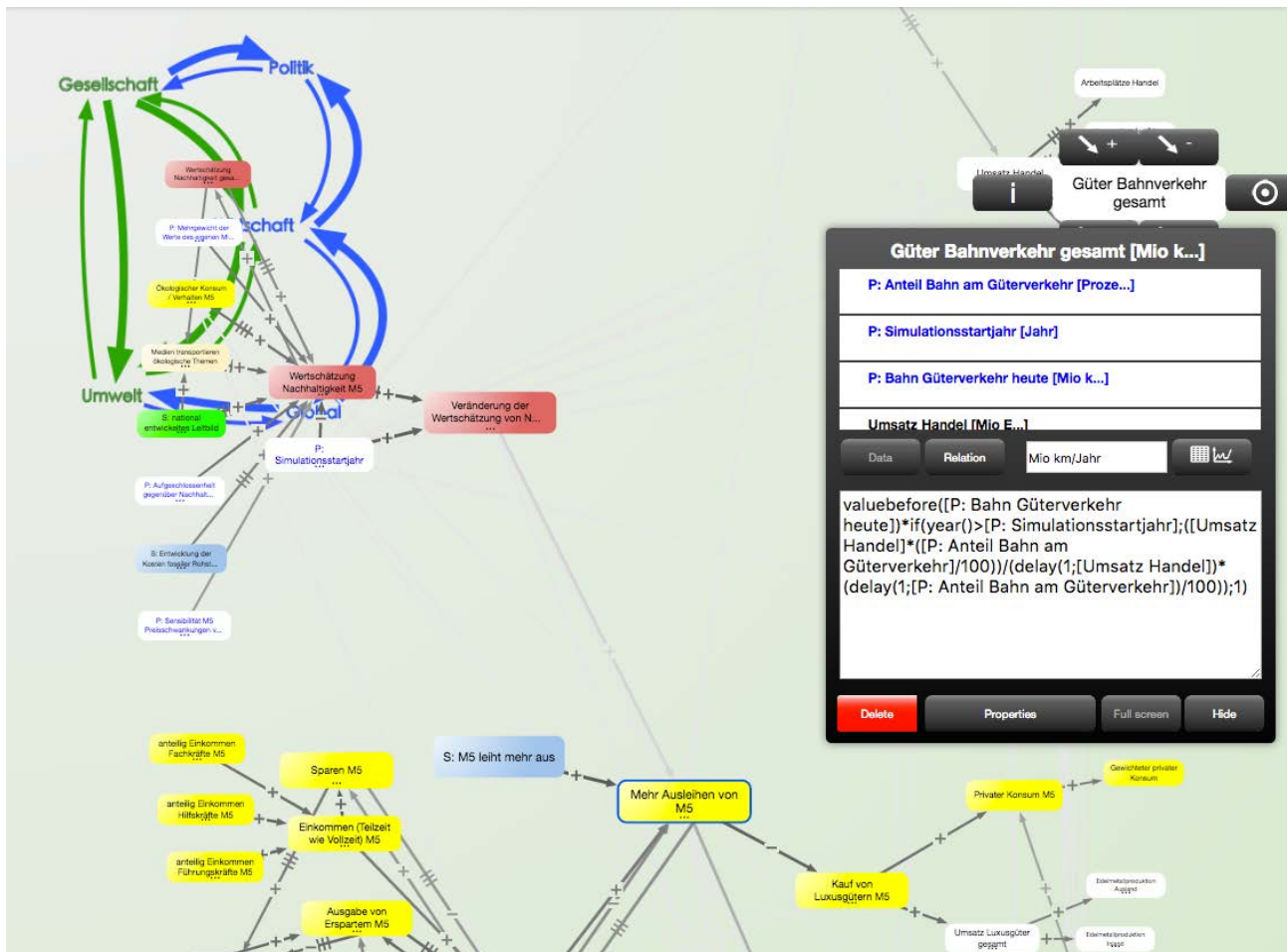
Abbildung 6: Beispiel für eine qualitative Gewichtung eingehender Faktoren im IAM



Die Summe dieser Wirkungen entlang der Wirkungswege und über ausgleichende und selbstverstärkende Wirkungsschleifen hinweg kann dann am Ende der Gewichtung des gesamten Modells in sogenannten Erkenntnis-Matrizen für jeden Faktor zeigen, wie dieser durch die anderen Faktoren beeinflusst wird, was also die größten Risiken und effektivsten Maßnahmen kurz-, mittel- und langfristig sind (Neumann, 2015).



Abbildung 7: Ausschnitt aus dem D3 Modell aus der Perspektive des Faktors „Mehr Ausleihen von M5“



Das quantitative D3 Modell basierend auf System Dynamics (Sterman, 2000) fragt ausgehend vom Wohnen, der Mobilität, der Ernährung, dem Konsum, der Kleidung usw. der Milieus, wie dieses sich auf Wirtschaft und Umwelt auswirkt. Die Formeln in diesem Modell geraten dabei recht umfangreich, aber sehr einfach. Zumeist wird der Zustand heute, z.B. der Umsatz einer Branche, anteilig proportional mit den Veränderungen des Konsums der Milieus verändert. Das Modell nutzt explizite Faktoren für die Parameter, die aktuelle (meist je Verfügbarkeit aus 2012, 2013) Zahlen zu Umsatz, Beschäftigte, Tonnen Rohstoffeinsatz, Tonnen Emissionen usw. je Branche, je Produktgruppe usw. darstellen. Diese Faktoren werden dann in den Formeln verwendet, so dass jederzeit die Parameter über Faktoren variiert werden können, aber nicht direkt in den Formeln geändert werden müssen.

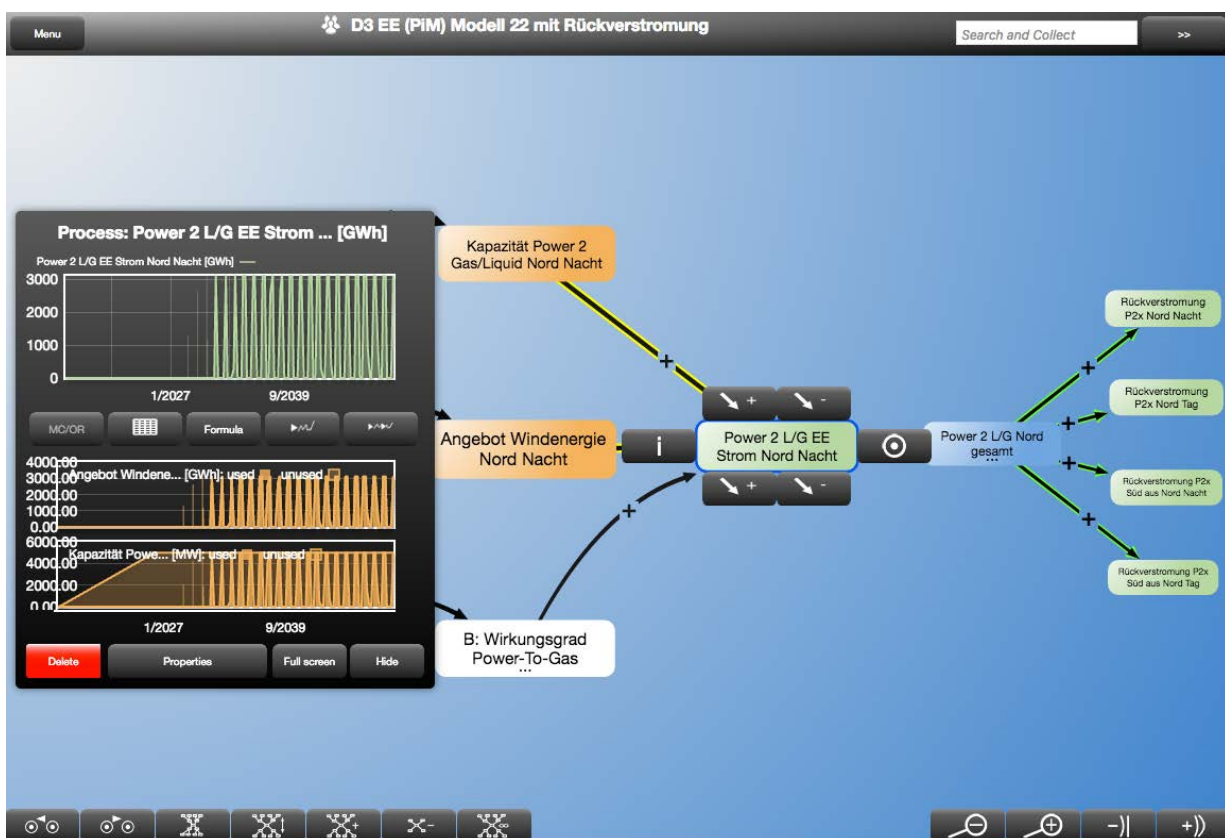
Durch die nur proportionalen Änderungen der Werte trifft das Modell keine Aussagen, wie sich z.B. die Umsätze einer Branche ändern werden – dazu müssten auch Annahmen zu den internationalen Märkten getroffen werden - sondern nur, wie sich grob und ceteris paribus Verhaltensänderungen der Milieus aus dem Modell auf die Umsätze auswirken werden. Die Formeln an sich müssen daher gar nicht durch Daten validiert werden, nur die Parameter müssen grob stimmen. Die Abbildung 7 zeigt die Formeln für den Güter-Bahnverkehr. Die Millionen Kilometer pro Jahr von 2013 werden proportional mit der Veränderung des Handelsvolumens bezogen auf den Anteil, den die Bahn hat, verändert. So genau der simulierte Wert dann scheint, so ungenau bzw. nur grob ist er im Einklang mit der Projektanforderung. Es wird nicht genau geschaut, welchen Anteil Exporte und der Durchgangsverkehr am Bahnverkehr haben und es wird nicht geschaut, welcher Anteil des Güterbahnverkehrs gar nicht auf den Handel entfällt. Das Projekt zielt ausdrücklich nicht auf exakte Prognosen, sondern

Größenordnungen ab. Am Ende zeigen die Zielfaktoren dieses Modells dann auch nur Indizes zur Entwicklung von Wirtschaft, Umweltbelastung, Klimagase, Zufriedenheit in der Bevölkerung usw.

Ein Vorteil des webbasierten Modells ist aber sicherlich die Möglichkeit, es im Zeitverlauf immer weiter zu aktualisieren und zu erweitern, um mehr und mehr differenziertere Betrachtungen durch weitere Faktoren anzustellen. Bereits zu Anfang wurden grundsätzliche Verhaltensoptionen, Branchen, Rohstoffe und Umweltbelastungen festgelegt und dann später miteinander verbunden. Es wirkt somit in vielen Bereichen zwar immer noch aggregiert aber annähernd vollständig.

Das Modell bietet eine Vielzahl von exogenen Faktoren, die etwa durch Planspieler oder eben den Modell-Bediener Veränderungen in das Modell einzubringen erlauben, wie z.B. in der Abbildung 8 der Faktor „S: M5 leiht mehr aus“. Wenn diese nicht genutzt werden, rechnet das Modell endogen die Entwicklungen. Verhaltensänderungen werden dabei selbstverstärkend über das Angebot, etwa von Car-Sharing, Urban Gardening Flächen oder Infrastruktur für E-Mobilität, und ebenfalls selbstverstärkend die Wertschätzung von Nachhaltigkeit des eigenen Milieus und die der Bevölkerung insgesamt bestimmt.

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem D3 EE Prozess-Modell



Das D3 EE Modell zur Simulation des Ausbaus der erneuerbaren Energien und der Ressourceninanspruchnahme bzw. des –verbrauchs verwendet so genannte Prozess- und Ressourcenfaktoren. Diese erlauben innerhalb von System Dynamics Modellen ohne aufwändige Formeln abzubilden, wie ein Prozess in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Ressourcen, die andere Prozesse vor ihm übrig gelassen haben, laufen kann. Ganz automatisch zeigt dabei die Simulation an, welche Ressourcen jeweils Flaschenhals im Sinne der so genannten Theory of Constraints (Goldratt, 1997) sind, bzw. inwieweit Ressourcen unausgelastet sind. Abbildung 8 zeigt für den Prozess der Umwandlung von Erneuerbaren Energien in Power-to-Liquid/Gas, wie von dem Angebot anfangs nicht übrig ist (weil es verbraucht wurde) während Kapazitäten für Power-to-Liquid ungenutzt blieben, bis dann ab einem

bestimmten Zeitpunkt die Kapazitäten zumindest in einigen Monaten bei entsprechendem Überangebot genutzt werden.

Auch das D3 EE Modell hat alle Parameter durch explizite Faktoren berücksichtigt. Viele dieser Parameter, etwa der Stahlbedarf je kWp Windenergie, erlauben einen technischen Fortschritt im Zeitverlauf anzunehmen. Zurzeit ist jeweils nur ein aktueller Anlagentyp als Durchschnitt über den gesamten Zeitraum angenommen worden.

Über diese Prozess-Faktoren kann in Szenarien geschaut werden, welche Kapazitäten in Nord und Süd jeweils Nachts und Tags ausgelastet sind, was dann von Nord nach Süd oder umgekehrt geleitet werden kann, was ggf. aus Power-to-Liquid/Gas rückverstromt wird, usw.. Wind und Sonne sind dabei entweder als Durchschnittswerte oder über eine Monte-Carlo Simulation in ihrer Bandbreite abzubilden. Über die so genannte `range()` Funktion (Neumann, 2015) können durch den iMODELER z.B. Ressourcen-minimale Ausbaupfade berechnet werden.

### 4.3 Stärken und Limitationen der Ansätze

Auch in diesem Abschnitt werden zuerst Aspekte des Qualitativen IAMs und dann des D3 und des D3 EE Modells betrachtet, nicht aber die des Planspiels.

In einem qualitativen Modell gilt: ob etwas verglichen mit anderen Einflüssen grob mehr oder weniger wirkt, kann bei den meisten Fragestellungen sehr unstrittig von einzelnen Personen oder Gruppen von Personen festgelegt werden (Maxwell, 2012). Die Konsequenz dieser Annahmen wird dann im Sinne abduktiver Logik logisch gültig (Bendassolli, 2013) in den Erkenntnis-Matrizen dargestellt. Ob das Modell dann aber nützlich und die Schlussfolgerungen richtig sind, hängt zudem von der Berücksichtigung der entscheidenden Faktoren ab. Hier liegt ein großer Mehrwert des IAM, da nicht nur einzelne detaillierte Aspekte aus Expertensicht zumeist deskriptiv modelliert wurden, sondern explorativ ein Modell über viele Bereiche hinweg durch Experten und Stakeholder. Als Fragetechnik wurde bei jedem Faktor über die so genannte KNOW-WHY-Methode (Neumann, 2013) gefragt, was alles zu mehr, was zu weniger, was möglicherweise in Zukunft zu mehr und was in Zukunft möglicherweise zu weniger führen kann. Die Wirkungsaussagen, die dabei getroffen werden, haben in Teilen der Wissenschaftsgemeinschaft einen schweren Stand. Häufig sind die Zusammenhänge zwar unbestritten, aber empirisch nicht belegt oder belegbar. Gerade auch Aussagen, dass etwa A auf B wirkt, und B auf C, und folglich A über B auch auf C, scheinen einigen Wissenschaftlern ohne empirische Untersuchungen sehr gewagt (Atteslander, 2003). Hierzu gibt es mit langer Tradition z.B. den Positivismus-Streit (Adorno, 1972).

Die Auswertung in der Erkenntnis-Matrix sagt nicht aus, wie sich etwas genau im Zeitverlauf entwickeln wird, sondern nur, wie die anderen Faktoren auf einen ausgewählten Faktor vergleichsweise wirken, wo Synergien, wo Ambivalenzen sind. Gerade weiche Faktoren, zu denen es keine Daten gibt, oder Entwicklungen in der Zukunft können wissenschaftlich betrachtet durch qualitative Modelle sogar besser bearbeitet werden, als durch quantitative Modelle (Maxwell, 2012, Neumann 2015). Dennoch ist in großen Teilen der Wissensgemeinschaft die Anerkennung solcher Modelle sehr gering. Die typische Reaktion: entweder es kann nicht richtig sein oder es bestätigt, was vorher auch ohne Modell schon gewusst wurde.

Das D3 geht wie bereits beschrieben den Spagat zwischen hoch aggregierten Faktoren mit nur der Veränderung von Indizes einerseits und andererseits sehr konkreten Parametern und deren proportionaler Veränderung. Einige Parameter sind vor dem Hintergrund des ungeplant detaillierten Modells nur grob recherchiert. Auf der anderen Seite ist der Grundzusammenhang zwischen den vielen Dimensionen und vor allem die Betrachtung gesellschaftlicher Veränderungen detaillierter und belastbarer als in anderen Modellen, etwa denen des World Models oder denen aus Bossels Systemzoo (Bossel, 2007).

Veränderungen sind derzeit nur proportional zu den Änderungen eines Teils ihrer Einflüsse abgebildet. Etliche Details verdient es aber, im eigenen Modell oder aber im Rahmen des großen Modells noch detaillierter abgebildet zu werden, etwa die Umsätze der Automobilindustrie, die Elastizitäten bei der Anzahl der Mitarbeiter, die derzeit sich proportional mit den Umsatzänderungen ändern, die Attraktivität von Angeboten in Abhängigkeit von der Nachfrage, oder die Auswirkungen von Digitalisierung und Industrie 4.0.

Beim D3 EE Modell sind die Stärken bereits genannt. Schwächen sind neben ein paar fehlenden Daten zu den Ressourcen-Bedarfen der Technologien und des zu erwartenden Fortschritts vor allem die zeitliche Auflösung Monat, die zu gemäßigten Wetterbandbreiten führen, und die fehlende Berücksichtigung der Kostendimension. Alles drei gilt es nachzuholen. Sinnvoll wäre es sicherlich auch, das Modell mit ähnlichem Aggregationsniveau um die Bereiche Verkehr und Wohnen zu erweitern.

#### 4.4 Ausblick: Kohärenz und Konsistenz

Die Konsistenz und Kohärenz der hier vorgestellten Modelle lässt sich weniger aus der Richtigkeit der Daten ableiten oder durch eine Validierung mit Vergangenheitsdaten, denn aus einer Reflexion durch Experten, ob denn entscheidende Faktoren berücksichtigt wurden. Hier liegt wie eingangs beschrieben eine Stärke der qualitativen Modellierung, über die sehr einfach und nachvollziehbar die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichsten Faktoren betrachtet werden können. Die Aussage, dass A mit B auf E erhöhend wirkt, wird gerade in quantitativen Modellen schnell und vereinfachend getroffen. Dass und wie aber A und B miteinander in Wechselbeziehung stehen und inwieweit die Wirkungen auf E nicht genau genommen differenziert über C und D erfolgen, wird erst durch explorative, detailliertere und - weil schneller und einfacher zu definieren - qualitative Modellierung deutlich. Eine Inkonsistenz etwa über ambivalente Wechselbeziehungen wie auch die Kohärenz über synergetische Wechselbeziehungen ist somit direkt abzulesen und nicht allein Expertenurteilen und Deutungshoheiten in so genannten „Black Boxes“ überlassen.

Interessanterweise hat das wie oben geschildert am meisten in Frage gestellte qualitative Modell keine konkrete Kritik hinsichtlich der Konsistenz noch Kohärenz erfahren, sondern nur hinsichtlich der abgeleiteten Schlüsse, die aber letztlich logisch sind. In diesem IAM sind die Faktoren endogenisiert und erklären sich gegenseitig. Dass die Schlüsse aus diesem Modell häufig angezweifelt werden, ist tatsächlich Teil des andauernden Wissenschaftsstreits.

Beim D3 Modell lassen sich einige fehlende Aspekte mit Blick auf Kohärenz und Konsistenz wie oben beschrieben nennen, die bisher mit der avisierten Flughöhe des Modells vertretbar sind. Spannend ist hier die quantitative Endogenisierung. Lassen sich qualitativ noch die Wechselwirkungen der Verhaltensweisen gut beschreiben, sind deren Quantifizierung und die sich daraus ergebenden exponentiellen Entwicklungen ungleich schwerer festzulegen. Wenn alle Milieus sich in ihren Verhaltensweisen bedingen, können kleine Änderungen in der Beeinflussung große Unterschiede bedeuten. Hier helfen dann Monte-Carlo-Simulationen. Möglichkeiten, dass zu viele bzw. schnelle Änderungen zu ganz ungeahnten Entwicklungen führen, etwa einer Renaissance konservativer Werte, lassen sich dann kaum noch endogenisieren.

Beim D3 EE Modell hingegen gibt es wie oben schon beschrieben aus den Modellvorstellungen konkrete Hinweise zur Verbesserung des Modells, die nicht zuletzt aufgrund der aktuellen politischen Relevanz dieses Modells möglichst bald erfolgen sollten. Das D3 EE Modell kann in der Folge mit umfangreicheren Modellen und den Zahlen vieler Studien zu diesem Thema abgeglichen werden. Bisher decken sich die Ergebnisse sehr gut – mit dem Vorteil, dass das D3 EE Modell dem Umweltbundesamt erlaubt, selbst Szenarien zu variieren. Insbesondere an der Systemgrenze – dem Bedarf an elektrischer Energie der Bereiche Wohnen, Industrie, Mobilität, oder der Frage der Integration der Systeme mit dem Ausland – ist das Modell mit Blick auf Kohärenz zu interpretieren oder zu erweitern.

Interessant ist hierzu die Möglichkeit der Entwicklung weiterer kleiner Modelle oder Szenaretten wie dem D3 EE Modell, etwa im Rahmen des RTD Projekts (siehe Kapitel 9, Abbildung 35) beschrieben.

Abschließend gilt: ob ein Modell richtig im Sinne von Kohärenz und Konsistenz bzw. nützlich ist, hängt von der Berücksichtigung der entscheidenden Faktoren ab, nicht allein von einer Betrachtung der Korrelation von Daten oder einer Bewertung durch Experten losgelöst vom Wirkungszusammenhang. Die Zusammenhänge explorativ zu erfragen und abzubilden und dann auch hinsichtlich Ambivalenzen und Synergien analysieren zu können, ist somit für die Modellentwicklung zentral.

## 4.5 Literatur

Adorno, Theodor W. (1972) „Der Positivismusstreit in der deutschen Soziologie“

Atteslander, P. (2003) „Methoden der empirischen Sozialforschung“

Bendassolli, P. F. (2013) „Theory Building in Qualitative Research: Reconsidering the Problem of Induction“ in FQS, Volume 14, No. 1, Art. 25, January 2013

Bossel, H. (2007) „Systems and Models: Complexity, Dynamics, Evolution, Sustainability“

Gladwell, M. (1995) „The Tipping Point“

Goldratt, E. M. (1997) „Critical Chain“

Grimm, F.; Heinrichs, H., Neumann, K. (2014) „Entwicklung eines Integrated Assessment Modells: Nachhaltige Entwicklung in Deutschland“ in Umweltbundesamt, Texte/74/2014

Maxwell, Joseph A. (2012) „A Realist Approach for Qualitative Research“

Moore, G. A. (2002) „Crossing the Chasm“

Neumann, K. (2013) „Know-Why Thinking as a new approach to systems Thinking“ in E:CO Issue Vol. 15 No. 3 2013

Neumann, K. (2015) „Qualitative und quantitative Ursache-Wirkungsmodellierung: Komplexitätsmanagement mit dem iMODELER und der systemischen KNOW-WHY-Methode“

Sterman, John D. (2000) „Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World“

## 5 Kausalschleifendiagramme als narrative Visualisierungstools für Kommunikation und Analyse komplexer dynamischer Systeme: Konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse von komplexen Mensch-/Natur-Systeminteraktionen in einer Welt mit begrenzten Ressourcen als Beispiel

Deniz Koca<sup>1</sup>, Harald Sverdrup<sup>2</sup> und Vala Ragnarsdottir<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Zentrum für Umwelt- und Klimaforschung (CEC), Universität Lund, Sölvegatan 37, SE-22362, Lund, Schweden

<sup>2</sup> Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen, Universität Island, VR-II, Hjardahagi 2-6, IS-107, Reykjavik, Island

<sup>3</sup> Institute für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Island, IS-101 Reykjavik, Island

### 5.1 Einführung

Ein gutes Verständnis der Schlüsselaspekte von komplexen dynamischen Systemen/Problemen erfordert im Allgemeinen inter-/transdisziplinäre Studien mit Beteiligung von Stakeholdern aus verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Hintergründen. Der Einsatz von Kausalschleifendiagrammen (Causal Loop Diagrams, CLDs) in diesen Studien hat zwei Vorteile. Erstens vermitteln diese Diagramme ein besseres Verständnis der wichtigsten zusammenhängenden Muster, der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und Feedbacks zwischen den wesentlichen Bestandteilen dieser komplexen Systeme. Zweitens dient die Kausalschleifendiagramm-Methode als gemeinsame Sprache der Stakeholder und gewährleistet effektive Kommunikation für ein gemeinsames und einheitliches Verständnis.

In Bezug auf die oben genannten Vorteile der Verwendung von CLDs soll dieses Kapitel:

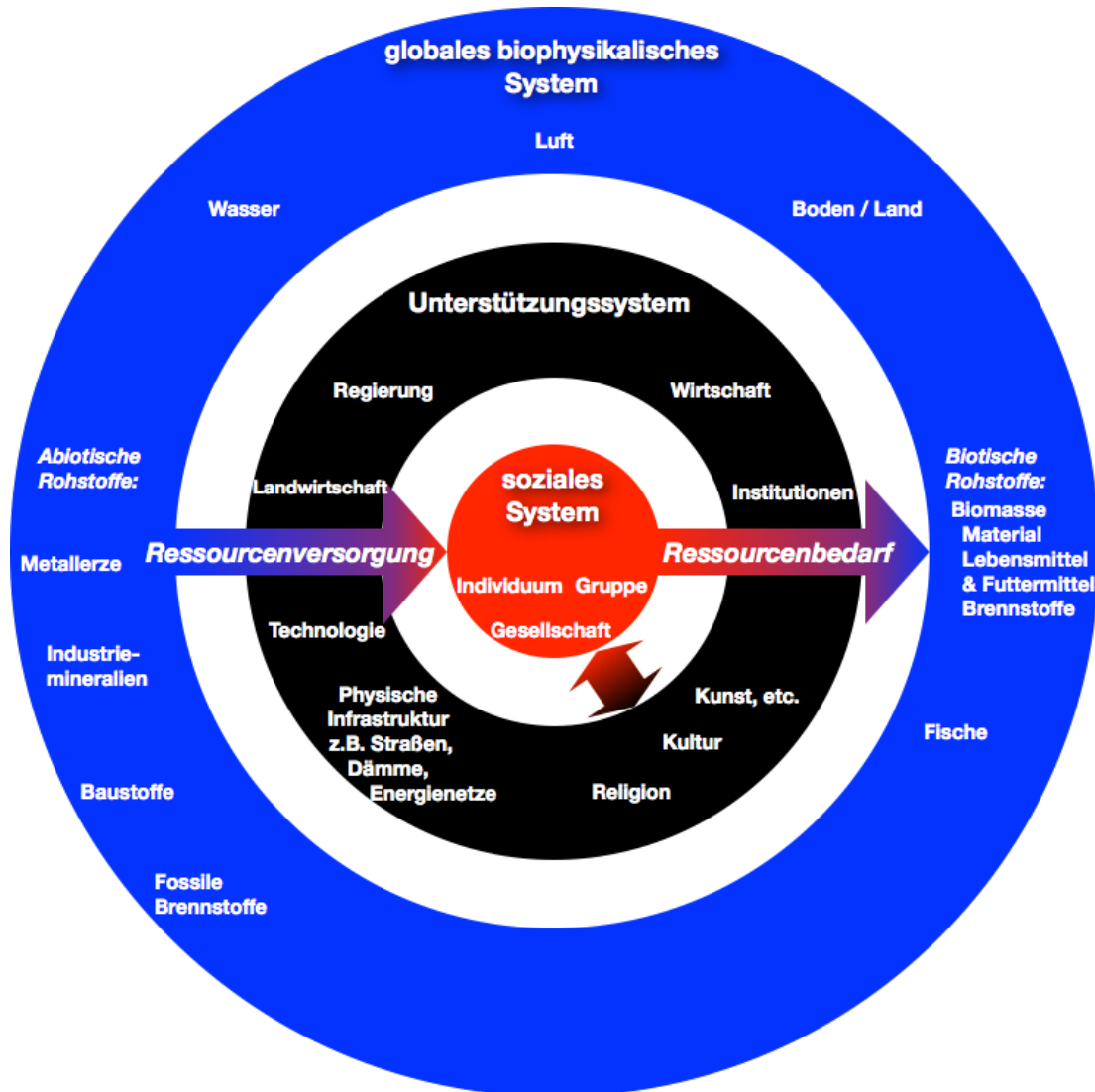
5. dem Leser einen Einblick bieten, wie ein Kausalschleifendiagramm als ein narratives Visualisierungstool für die Kommunikation und Analyse der komplexen Mensch-/Natur-Systeminteraktionen in einer Welt mit begrenzten Ressourcen mit einem Systemansatz dienen kann (Abschnitte 10.2 und 10.3), und
6. eine sehr allgemeine und kurze Beschreibung der ersten Phase des Gruppenmodellierungsprozesses mit Teilnahme der Stakeholder bieten, wo unter Anwendung der Kausalschleifendiagramm-Methode konzeptuelle Modelle entwickelt werden (Abschnitt 10.4).

### 5.2 Hintergrund komplexer Mensch-/Natur-Systeminteraktionen

Das *menschliche System* mit immer höherem Bedarf an Ressourcen ist ein wesentlicher Einflussfaktor auf das *globale biophysikalische System*, welches sämtliche Ressourcen bereitstellt, von denen das menschliche System abhängig ist, d. h. Wasser, Luft, Land und Boden sowie abiotische (Metallerze, Industrie- und Baumineralien, fossile Brennstoffe) und biotische (Biomasse für Lebens- und Futtermittel, Brennstoff und Fischerei) Rohstoffe (Abbildung 9). Die Versorgung mit diesen Ressourcen wird durch ein von Menschen geschaffenes Betriebssystem gewährleistet, welches aus mehreren, sämtliche physischen, normativen und institutionellen Infrastrukturen (d. h. Wirtschaft, Landwirtschaft, Regierung usw.) umfassenden Untersystemen besteht. Einige dieser Untersysteme wurden hauptsächlich entwickelt, um die anhaltende Versorgung mit diesen Ressourcen sicherzustellen (d. h. die Landwirtschaft für Lebensmittel oder die Bergbauindustrie für die Gewinnung von Mineralen und Metallen), wohingegen andere geschaffen wurden, um die soziale Nachhaltigkeit des menschlichen Systems zu gewährleisten (d. h. Religion, Kunst, Kultur usw.). Der überwiegende Teil

der Untersysteme im Betriebssystem dient jedoch mehr als einem der genannten Zwecke (d. h. Wirtschaft, Regierung, Institutionen usw.).

Abbildung 9: Die durch ein Fördersystem vernetzten komplexen Mensch-/biophysikalische Systeme. (Entwickelt auf der Grundlage von Bossel, 1999; BMU, 2012)

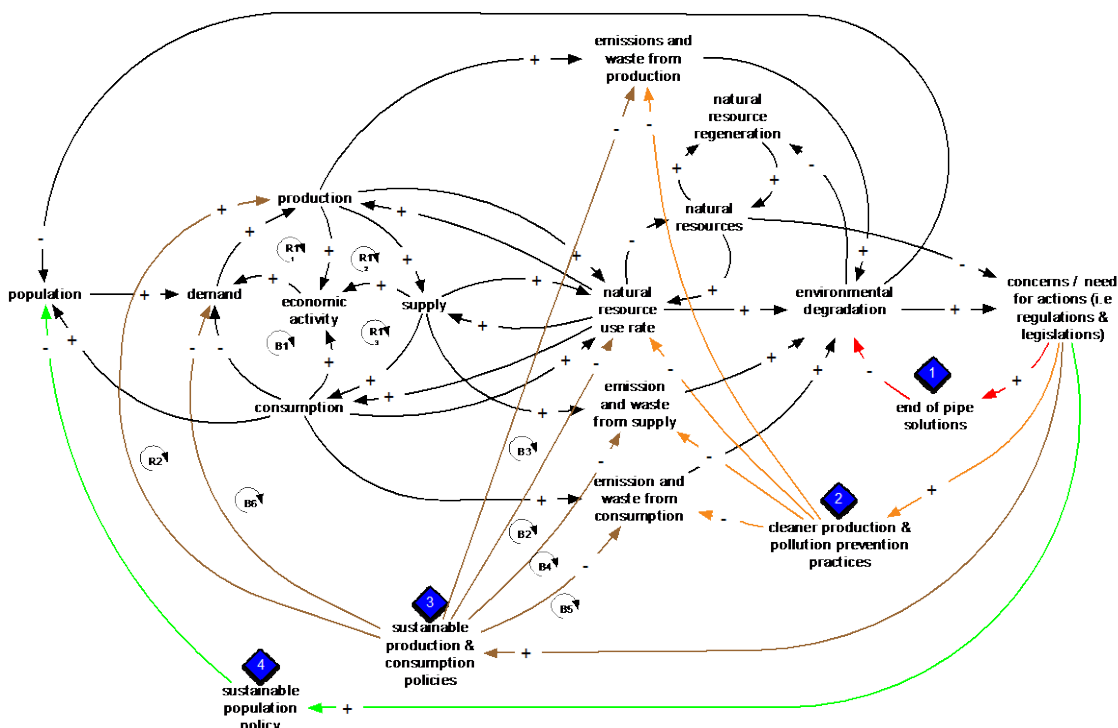


Die Nachfrage nach natürlichen Ressourcen, insbesondere nach abiotischen und biotischen Rohstoffen, ist im Verlauf des letzten Jahrhunderts erheblich gestiegen. Die weltweit pro Jahr geförderte und genutzte Menge von Ressourcen hat sich um 50 % erhöht und in den letzten 30 Jahren einen Wert von ca. 60 Milliarden Tonnen/Jahr erreicht (Behrens et al., 2007). Geringere Erzmetallgehalte, steigende Förderkosten, erhöhte Marktpreise und „weiche“ Verknappung (Definition siehe Kapitel 7) einiger Schlüsselmetalle und anderer Ressourcen wurden in den letzten beiden Jahrzehnten beobachtet (Heinberg 2011). Bei all diesen diagnostischen Zeichen wird deutlich, dass sich das biophysikalische Weltssystem langsam zu einer übermäßigen Nutzung von Metallreserven, fossilen Energieressourcen und anderen Schlüsselressourcen hinbewegt. Wissenschaftliche Prognosen (Meadows et al., 1972, 1992, 2005; Ragnarsdottir et al., 2011a, b; Sverdrup et al., 2012a, b; Sverdrup et al., 2014a, b; Kifle et al., 2013) legen nahe, dass die Situation in den nächsten zwei Jahrzehnten noch ernster werden wird, in denen die „harte“ Verknappung einige Schlüsselressourcen offensichtlich wird. Daher haben die Sorgen in Bezug auf die Versorgungssicherheit und Ressourcenknappheit in der politischen Agenda zugenommen (z. B. Mancini et al., 2013).

### 5.3 Konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse von Komplexen Mensch-/Natur-Systeminteraktionen in einer Welt mit begrenzten Ressourcen

Mit Hilfe eines Systemansatzes und unter Anwendung der Kausalschleifendiagramm-Methode wird ein konzeptuelles Modell entwickelt, um wichtige komplexe Vernetzungen zwischen Mensch-/Natur- und Fördersystem besser zu verstehen und zu vermitteln. Das konzeptuelle Modell bietet eine ganzheitliche Betrachtung, in dem folgendes identifiziert und bewertet wird: i) die Hauptgründe für Probleme rund um Umweltschädigung und Ressourcenknappheit und ii) damit verbundene bestehende und mögliche zukünftige alternative Lösungen für diese Probleme (Abbildung 10).

Abbildung 10: Kausalschleifendiagramm, in dem die Hauptgründe für Umweltschädigung und Ressourcenknappheit sowie die möglichen alternativen Lösungen für diese Probleme dargestellt werden



In einem Kausalschleifendiagramm (CLD) wie dem in der obigen Abbildung 10 zeigen die Pfeile, die jede Variable verbinden, wo ein Kausalzusammenhang besteht. Das Plus- oder Minus-Zeichen oben an jedem Pfeil zeigt die Richtung der Kausalität zwischen den Variablen an, wenn alle anderen Variablen konzeptuell konstant bleiben. Genauer gesagt verursacht die Variable am Ausgangspunkt jedes Pfeils eine Änderung der Variable am empfangenden Ende des Pfeils in dieselbe Richtung (im Fall eines Plus-Zeichens) oder in die entgegengesetzte Richtung (im Fall eines Minus-Zeichens). Die allgemeine Polarität einer Feedbackschleife – ob also die Schleife selbst positiv oder negativ ist – wird in einem Kausalschleifendiagramm durch ein Symbol in seiner Mitte angegeben. Ein „R“ bezeichnet eine Verstärkungsschleife (auch positive Feedbackschleife genannt), und ein „B“ bezeichnet eine Gleichgewichtsschleife (auch negative Feedbackschleife genannt). Bei einer Verstärkungsschleife besteht die Handlung der Schleife darin, den Parameter in dieselbe Richtung zu treiben, in die er sich bereits bewegt, wohingegen eine Gleichgewichtsschleife den Parameter zu seinem Ausgangswert zurückbringen will.

Wie in Abbildung 10 veranschaulicht erhöht sich die Nachfrage für alle Arten von Waren und Dienstleistungen bei einer wachsenden Bevölkerung. Diese Nachfrage erhöht wiederum die Produktion und Lieferung dieser Produkte und Dienstleistungen. Wenn sich der Verbrauch erhöht, ist die Nachfrage



befriedigt und geht schließlich zurück (B1). Andererseits führen erhöhte Produktion, Lieferung sowie erhöhter Verbrauch zu zunehmender wirtschaftlicher Aktivität, die wiederum die Nachfrage erhöht (R1). Gleichzeitig führt erhöhte Produktion, Lieferung und mehr Verbrauch zu höheren Emissionen und mehr Abfallerzeugung sowie vermehrter Ressourcennutzung, was sämtlich zu Umweltschäden führt. Eine erhöhte Nutzung natürlicher Ressourcen führt zum Abbau von Beständen verfügbarer natürlicher Ressourcen. Schwindende Bestände natürlicher Ressourcen und vermehrte Umweltbelastung beeinträchtigen die Regeneration dieser Ressourcen. Daher sind die erhöhte Nutzung natürlicher Ressourcen und die verminderte Regeneration natürlicher Ressourcen die beiden Hauptgründe für die Ressourcenverknappung.

Umweltschädigung und Abbau natürlicher Ressourcen führen zu erhöhter öffentlicher Aufmerksamkeit und Besorgnis, was letztendlich Einfluss auf politische Handlungen nimmt. Dies führt zu der Entwicklung von vier verschiedenen politischen Optionen, nämlich technische Umweltschutzlösungen am Ende der Prozesskette (End-of-Pipe-Lösungen), umweltfreundliche Produktionsprozesse, nachhaltiger Konsum und nachhaltige Bevölkerungspolitik, die allesamt Ressourceneffizienz durch Technologie/ICT, Innovationen, Vorschriften, Gesetzgebung, Steuern usw. zum Ziel haben.

### **5.3.1 End-of-Pipe-Lösungen**

Es ist anerkannt, dass menschliches Handeln zur Schädigung der Umwelt und zum Verlust natürlicher Ressourcen im Verlauf des letzten Jahrhunderts beigetragen hat. Als erste Reaktion auf die erhöhte öffentliche Aufmerksamkeit und Besorgnis über Umweltschädigung haben Regierungen politische Maßnahmen ergriffen, welche End-of-Pipe-Lösungen favorisieren (Abbildung 10, Raute Nr. 1). Diese Lösungen beziehen sich auf zusätzliche technische Anlagen für die umwelttechnische Emissionskontrolle (UN, 1997). Einige Beispiele umfassen den Bau von Abwasseraufbereitungsanlagen vor der Ableitung von Abwasser aus industriellen Prozessen oder die Installation von Katalysatoren in Fahrzeugen zur Senkung der Emission von Schadstoffen in die Atmosphäre. End-of-Pipe-Lösungen reduzieren oder verhindern zwar die Ausbreitung von Umweltverschmutzung und Umweltschäden, haben jedoch keinen Einfluss auf den Produktionsprozess und können daher die Ressourceneffizienz nicht verbessern.

### **5.3.2 Umweltfreundliche Produktionsprozesse**

Nachdem der wirtschaftliche Wert von Rohmaterialien erkannt wurde fand während der 1990er Jahre ein Paradigmenwechsel von End-of-Pipe-Lösungen hin zu Verschmutzungspräventionsstrategien und saubereren Produktionspraktiken statt. Im Gegensatz zu End-of-Pipe-Lösungen können Verschmutzungspräventionsstrategien und sauberere Produktionspraktiken Emissionen und Abfall nicht nur reduzieren oder eliminieren, sondern auch die Effizienz von Produktionsprozessen erhöhen (OECD, 2007) (Abbildung 10, Raute Nr. 2). Sauberere Produktion wird insbesondere im Produktionsprozess in der verarbeitenden Industrie angewendet. Verschmutzungsprävention ist dagegen ein allgemeiner Ansatz und kann in allen Branchen eingesetzt werden, also nicht nur in der Produktion, sondern auch in den Liefer- und Verbrauchsstadien. Dementsprechend senken Verschmutzungspräventionspraktiken die Emissionen und die Abfallerzeugung auch in den Liefer- und Verbrauchsstadien.

### **5.3.3 Nachhaltiger Konsum**

Mit dem Auftreten des Problems des Rückgangs und der Knappheit natürlicher Ressourcen, hat die Umsetzung von Richtlinien für nachhaltigen Verbrauch und nachhaltige Produktion in den letzten zehn Jahren zunehmende Beachtung gefunden. Das Hauptziel dieser Richtlinien ist das Loslösen wirtschaftlichen Wachstums von der Umweltzerstörung (UNEP, 2011). Das bedeutet, dass mit erhöhter Ressourceneffizienz mehr Waren und Dienstleistungen geliefert und weniger Ressourcen eingesetzt werden (B2 in Abbildung 10) und dass Emissionen und Abfallstoffe reduziert werden (B3, B4, B5 in Abbildung 10). Dies führt zu einer Verminderung der Umweltschädigung. Jedoch wird der Nutzen der

erhöhten Ressourceneffizienz häufig durch den Rebound-Effekt aufgehoben, nämlich die erhöhte Produktion, Lieferung und den erhöhten Verbrauch dieser Produkte aufgrund der gesenkten Produktkosten, die mit der verbesserten Ressourceneffizienz einhergehen (R2 in Abbildung 10). Aufgrund vermehrter Aktivität im bestehenden Wirtschaftssystem erhöht sich die Nachfrage für diese oder andere Produkte (R1 in Abbildung 10). Daher gibt es für das Loslösen des Wirtschaftswachstums von der Umweltschädigung einen Bedarf nach unterstützenden Richtlinien für nachhaltigen Verbrauch mit Tools zu Verhaltensweisen, Kommunikation, für die Bereitstellung von Informationen, für Wirtschaft und Regulierung, welche nachhaltigere Konsumgewohnheiten fördern (BIO Intelligence Service, 2012) und letztendlich zur Senkung der Nachfrage (B6 in Abbildung 10) nach (nicht nachhaltigen) Produkten und Dienstleistungen beitragen. Es ist außerdem anzumerken, dass unendliches wirtschaftliches Wachstum theoretisch nur dann möglich ist, wenn es nicht mit dem biophysikalischen Weltsystem verknüpft ist. In der Praxis ist dies aufgrund von zwei Gründen nicht möglich: 1) Sämtliche im Wirtschaftssystem verwendeten natürlichen Ressourcen stammen aus dem biophysikalischen Weltsystem, und die große Mehrheit dieser Ressourcen ist endlich. Zudem verbrauchen die Menschen diese Ressourcen schneller, als sich die Ökosysteme regenerieren können. 2). Sämtliche aufgrund der wachsenden Wirtschaftsaktivität erzeugten Emissionen und Abfälle kehren schneller zu dem biophysikalischen Weltsystem zurück, als die Ökosysteme sie absorbieren können.

#### **5.3.4 Nachhaltige Bevölkerungspolitik**

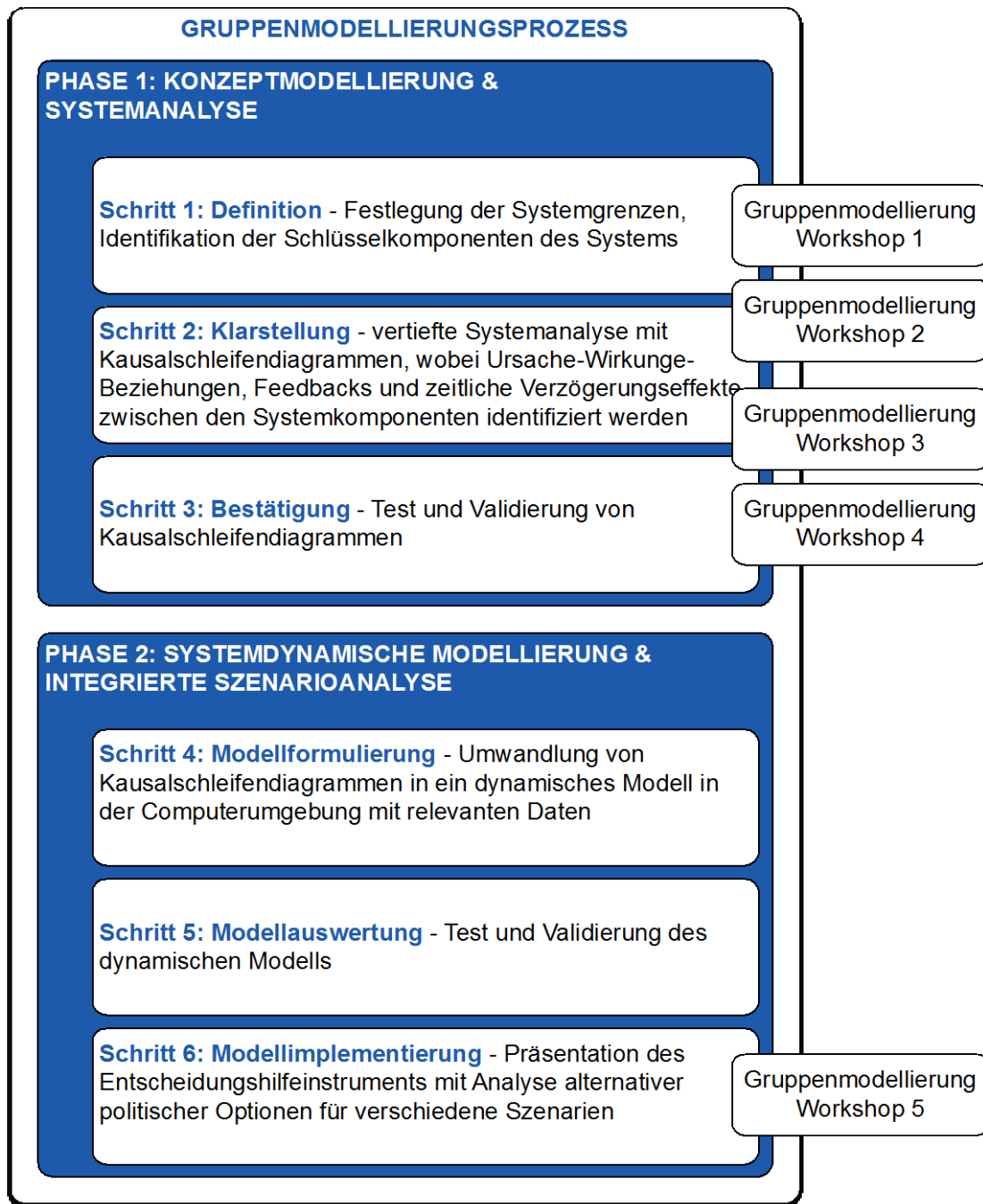
Wie durch das CLD in Abbildung 10 veranschaulicht ist eine der Hauptursachen für die heutige vermehrte Umweltzerstörung und Ressourcenverknappung die wachsende Weltbevölkerung. Zusätzlich zu den anderen oben erläuterten Maßnahmen sollte auch die Einführung einer nachhaltigen Bevölkerungspolitik (Raute Nr. 4 in Abbildung 10), besonders in den Entwicklungsländern, als weitere Option erwogen werden. Es gibt mehrere Beispiele für wirksame Reproduktionsrichtlinien, die rund um die Welt eingeführt wurden, die nicht nur die Geburtenraten senken, sondern auch eine gebildete und wirtschaftlich aktive Gesellschaft fördern. Die größten Herausforderungen bei einer weitreichenden Umsetzung dieser Richtlinien sind religiöser und kultureller Widerstand sowie politische Undurchführbarkeit (Engelman, 2012).

### **5.4 Phase der konzeptuellen Modellierung und Systemanalyse des Gruppenmodellierungsprozesses**

Auf Systemwissenschaften basierte Gruppenmodellierung mit Beteiligung von Stakeholdern ist ein transparenter Lernprozess, bei dem Stakeholder die Möglichkeit haben, ihr Wissen bei der Analyse dynamischer komplexer Systeme innerhalb der inter-/transdisziplinären Studien auszutauschen.

Der Gruppenmodellierungsprozess besteht aus zwei Phasen und sechs Stufen, welche häufig in einer Reihe von 4 Workshops bearbeitet werden können. Der Einsatz von Kausalschleifendiagrammen als narratives Visualisierungs-Tool findet während der ersten Phase (konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse) dieses Modellierungsprozesses statt und wird in vier der genannten fünf Workshops behandelt (Abbildung 11).

Abbildung 11: Zwei Phasen und sechs Stufen des Gruppenmodellierungsprozesses



#### 5.4.1 Phase 1: Konzeptuelle Modellierung und Systemanalyse

In dieser Phase werden während einer Reihe von vier Gruppenmodellierungs-Workshops mit Hilfe von CLDs mentale Modellstrukturen erstellt. In diesen Workshops wird die Kausalschleifendiagramm-Methode als gemeinsames Kommunikations- und Systemanalyse-Tool unter allen Stakeholdern aus verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Hintergründen eingesetzt, um konzeptuelle Modelle zu konstruieren.

In den ersten vier der fünf Workshops werden die Stufen Definition, Klarstellung und Bestätigung des Gruppenmodellierungsprozesses behandelt.

#### **5.4.1.1 Stufe 1. Definition**

Die Stakeholder haben eine gemeinsame Vision und werden gebeten, die Bausteine (Komponenten) der Vision, die Ziele und die Meilensteine zu definieren. Bei einer klaren Vision helfen deren Bausteine, Ziele und Meilensteine, unnötige Diskussionen unter den Stakeholdern zu vermeiden, während gleichzeitig das Problem bzw. die Probleme definiert, das System analysiert und die Schlüsselindikatoren identifiziert werden. Die erste Stufe der häufigsten Problemlösungsmethoden ist die Erkennung des Problems bzw. der Probleme. Unter Berücksichtigung der Perspektiven der Stakeholder erkennen die Workshop-Moderatoren eine Schlüsselfrage zur expliziten Nennung des Zwecks und der Ziele des Modellierungsprozesses. Auf der Grundlage der Vision und Problemdefinition werden die zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen festgelegt. Die Definitionsstufe wird im ersten Workshop behandelt. Gegen Ende des Workshops gewinnen die Stakeholder eine Einsicht in das heutige Erscheinungsbild des Systems.

#### **5.4.1.2 Stufe 2 Klarstellung**

Der Sinn dieser Stufe ist die Sicherstellung, dass alle Stakeholder während des zweiten Workshops Informationen untereinander weitergeben und diskutieren. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis des Systems und seiner Komponenten unter den Stakeholdern. In dieser Stufe werden die Stakeholder mit Systemdenken, Systemanalysen und Kausalschleifendiagrammen vertraut gemacht. Unter Berücksichtigung der Problemdefinition und der Systemgrenzen werden die Stakeholder gebeten, eine Liste aller das System repräsentierenden Komponenten zu erstellen. Die Stakeholder werden dann gebeten, diese Komponenten nach Relevanz aufzulisten, um die wichtigsten erkennen zu können. Die Stakeholder werden in kleinere Themengruppen aufgeteilt, die verschiedene Probleme behandeln. Das oberste Ziel dieser Stufe ist die Erkennung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen, Feedbacks und Zeitverzögerungen zwischen den Systemkomponenten. Kausalschleifendiagramme werden eingesetzt, um als „gemeinsame Sprache“ aller Stakeholder mit unterschiedlichen Hintergründen zu dienen. Stakeholder erstellen CLDs, welche die Verknüpfungen, Ursache-Wirkung-Beziehungen und die Verstärkungs- und Gleichgewichts-Feedbackschleifen zwischen den Schlüsselkomponenten angeben. Zusätzlich können für ein besseres Verständnis des Systems und der Verknüpfungen zwischen seinen Komponenten Bestandsflussdiagramme (Stock Flow Diagrams, SFD) verwendet werden. Am Ende der Workshops 2 und 3, in denen die Klarstellungsstufe behandelt wird, erkennen die Stakeholder ganzheitlich den größeren Zusammenhang und verstehen, wie das heutige System aussieht und wie das gewünschte zukünftige System mit Hilfe der erstellten CLDs aussehen sollte. Mögliche Hindernisse auf dem Weg der Erzielung der Vision werden erkannt und unter den Stakeholdern diskutiert. In dieser Stufe suchen die Stakeholder außerdem nach alternativen Lösungsmöglichkeiten und machen entsprechende Vorschläge.

#### **5.4.1.3 Stufe 3 Bestätigung**

Die Bestätigungsstufe beginnt mit Workshop 3 und wird mit Workshop 4 fortgesetzt. Sämtliche während der Workshops 2 und 3 erstellten Kausalschleifendiagramme, Bestandsflussdiagramme und anderen Skizzen stellen den Ausgangspunkt für Workshop 4. da. Es ist wichtig, dass sämtliche Stakeholder der Endversion der Kausalschleifen- und Bestandsflussdiagramme zustimmen. Die Erstellung von Kausalschleifendiagrammen ist ein iterativer Prozess und es gibt mehrere Durchläufe, bevor eine Einigung über die Endversion eines Kausalschleifendiagramms erzielt werden kann. Bevor ein allgemeiner Konsens über die Endversion des CLD erzielt wird, welches das konzeptuelle Modell des Systems darstellt, können sich die anfängliche Problemdefinition und die Systemgrenzen mit der Systemanalyse von verschiedenen Versionen des CLD ändern.

Die zweite Phase im Gruppenmodellierungsprozess ist die „Systemdynamikmodellierung und integrierte Szenarioanalyse“, in der auf der Grundlage der Endversion des nach dem 4. Workshop gemeinschaftlich entwickelten CLD und der erhobenen relevanten Daten ein numerisches Systemdynamik-

Modell erstellt wird. Nach den Modellerstellungs- und Auswertungsschritten wird das numerische Modell zu einer Entscheidungshilfe für die Umsetzung und Prüfung alternativer Richtlinien-Optionen in verschiedenen Szenarien.

## 5.5 Schlussfolgerungen

Der Einsatz von Kausalschleifendiagrammen als narratives Visualisierungs-Tool ist eine effektive Methode zur Erkennung, Bewertung und Mitteilung der Hauptursachen für Probleme im Zusammenhang mit Umweltschädigung und Ressourcenknappheit sowie der alternativen Lösungen dieser Probleme wie oben dargestellt. Der Einsatz dieser Diagramme bietet eine ganzheitliche Sicht und sorgt für Verständigung und wirksame Kommunikation. Die wachsende Weltbevölkerung und die damit zusammenhängende Nachfrage nach sämtlichen Waren und Dienstleistungen sind die beiden Hauptgründe für Ressourcenknappheit und Umweltschädigung. In einem biophysikalischen Weltsystem mit endlichen Ressourcen können die Menschen diese Ressourcen nicht weiterhin schneller nutzen, als die Ökosysteme sich regenerieren können. Falls keine politischen Maßnahmen (von Praktiken für sauberere Technologie und Verhinderung von Umweltverschmutzung, Richtlinien für nachhaltigen Verbrauch und nachhaltige Produktion bis zur Loslösung des Wirtschaftswachstums von Umweltschädigung, die sämtlich Ressourceneffizienz mittels Technologie/ICT, Innovation, Vorschriften, Gesetzgebung, Steuern usw. zum Ziel haben) ergriffen werden, um diese beiden Hauptgründe zu mildern, ist der Zusammenbruch des biophysikalischen Weltsystems auf globaler Ebene langfristig unvermeidlich.

Der Einsatz von CLDs als gemeinsame Sprache in Gruppenmodellierungs-Workshops mit Beteiligung von Stakeholdern gewährleistet eine effiziente und effektive Kommunikation und verbessert Brainstorming, die Entwicklung neuer Ideen sowie die Visualisierung und das Verständnis komplexer Systeme/Probleme. Er hilft außerdem bei der Verbesserung der Qualität strategischen Denkens und Planens und bei der Klärung von Entscheidungszyklen, was wiederum die Teamproduktivität und damit die Qualität der Workshop-Ergebnisse erhöht. Die größte Einschränkung der breiten Nutzung von Kausalschleifendiagrammen bei der Gruppenmodellierung liegt darin, dass der Prozess einen sachverständigen Moderator mit entsprechenden Fähigkeiten und entsprechender Ausbildung erfordert, da es keine einfache Richtlinie zur Moderation der Workshops gibt. Jeder Workshop kann abhängig von vielen Faktoren wie beispielsweise der Vielfalt und Kultur der Stakeholder, Schwerpunktbereichen usw. unterschiedlich formuliert werden. Der Prozess erfordert außerdem ein hohes Engagement der Stakeholder, d. h. die Stakeholder müssen dem gesamten Gruppenmodellierungsprozess ausreichend Zeit, Arbeit und Ressourcen widmen.

## 5.6 Literatur

Behrens, A., Giljum, S., Kovanda, J., Niza, S. 2007. The material basis of the global economy. World-wide patterns in natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies. *Ecological Economics* 64, 444-453.

Bossel, H., 1999. Indicators for sustainable development: Theory, methods, applications. A report to the Balatan Group. International institute for sustainable development

BIO Intelligence Service (2012), Policies to encourage sustainable consumption, Final report prepared for. European Commission (DG ENV)

BMU, 2012, German Resource Efficiency Programme (ProgRes). Programme for the sustainable use and conservation of natural resources. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). Berlin, Germany

Engelman, R., Nine Population Strategies to Stop Short of 9 Billion, Chapter 9. In; Worldwatch Institute's State of the World 2012: Moving Toward Sustainable Prosperity.

Heinberg, R., 2011, The end of growth. Adapting to our new economic reality. New Society Publishers, Gabriola Island, Canada

- Kifle, D., Sverdrup, H., Koca, D. and Wibetoe, G.: 2013, A simple Assessment of the Global Long term Supply of the Rare Earth Elements by Using a System Dynamic Model. *Environment and Natural Resources Research*. Vol. 3, No. 1.
- Mancini, L., De Camillis, C., Pennington, D. (eds.) 2013 Security of supply and scarcity of raw materials. Towards a methodological framework for sustainability assessment. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Publications Office of the European Union, Luxemburg
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W., 1972. *Limits to growth*. Universe Books, New York
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., 1992. *Beyond the limits: confronting global collapse, envisioning a sustainable future*. Chelsea Green Publishing Company:
- Meadows, D. H., Randers, J., Meadows, D., 2005. *Limits to growth. The 30 year update* Universe Press, New York
- OECD, 2007, *Business and the Environment: Policy Incentives and Corporate Responses*, OECD, Paris.
- Ragnarsdottir K. V., Sverdrup H.U., Koca D., 2011a. Assessing long term sustainability of global supply of natural resources and materials, Chapter Number 5, 83-116. In: *Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment* (Ed): Ghenai, C., Publisher: [www.intechweb.org](http://www.intechweb.org)
- Ragnarsdottir, K.V., Sverdrup, H.U. and Koca, D.: 2011b, Challenging the planetary boundaries I: Basic principles of an integrated model for phosphorous supply dynamics and global population size. *Applied Geochemistry* 26 (2011) S303–S306
- Sverdrup, H., Koca, D., and Ragnarsdottir, K.V.: 2012a, The WORLD model: Peak metals, minerals, energy, wealth, food and population. International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland, July 22-26, 2012
- Sverdrup, H., Koca, D., and Granath, C.: 2012b, Modelling the gold market, explaining the past and assessing the physical and economical sustainability of future scenarios. International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland, July 22-26, 2012
- Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V. and Koca, D.: 2014a, On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resources, Conservation and Recycling* 87 (2014) 158–174
- Sverdrup, H., Koca, D., and Ragnarsdottir, K.V.: 2014b, Investigating the sustainability of the global silver supply, reserves, stocks in society and market price using different approaches. *Resources, Conservation and Recycling* 83 (2014) 121–140
- UN, 1997, *Glossary of Environment Statistics*, Studies in Methods, Series F, No. 67, United Nations, New York.
- UNEP, 2012, *Global Outlook on SCP Policies: taking action together*.

## 6 Das SimRes-Projekt: Ansatz und nächste Schritte

Martin Hirschnitz-Garbers<sup>1</sup> und Susanne Langsdorf<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ecologic Institut, Berlin

### 6.1 Der SimRes-Ansatz

Das Projekt SimRes simuliert die potentielle Wirksamkeit zweier Ressourcenpolitik-Mixe in Deutschland bis zum Jahre 2050. Dazu werden das ökonometrische, multi-regionale Input-Output Model GINFORS und das systemdynamische Model WORLD über einen soft-link miteinander verbunden. Einer der beiden Politik-Mixe lehnt sich an ausgewählte Handlungsansätze aus dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm ProgRes II an, welches im März 2016 beschlossen wurde. Der andere Politik-Mix stellt Transformation und Systemwandel in den Vordergrund mit dem Ziel bis 2050 eine signifikante absolute Reduktion der Ressourcennutzung zu bewirken.

Basierend auf einer Analyse von Trends und Entwicklungen, die die Ressourcennutzung sowohl global als auch in Deutschland beeinflussen könnten (veröffentlicht im Trendbericht für eine vorausschauende Ressourcenpolitik) wurden Referenzszenarien entwickelt und verwendet, um die potentiellen Wirkungen der beiden Politik-Mixe bewerten zu können. Ein erstes Referenzszenario entstand im Rahmen des Projektes Ressourcenpolitik (PolRes) und repräsentiert ein „business as usual“ Szenario mit dem Titel „Industrieland Deutschland“. In einem zweiten Referenzszenario wurden zusätzlich noch Annahmen für ein Klima-aktives „Industrieland Deutschland“-Szenario erarbeitet, in dem die CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands bis 2050 um 80% gegenüber 1990 reduziert wurden. Angesichts der Ergebnisse des Pariser Klimagipfels vom Dezember 2015 werden weitere Entwicklungsschritte für ein Referenzszenario durchgeführt, das nicht nur klima-aktive Pfadentwicklungen aufweist, sondern gleichzeitig auch zu einem ressourcenschonenden und nachhaltigen Deutschland beiträgt.

Die beiden verwendeten Modelle ergänzen sich optimal: GINFORS weist eine sehr detaillierte Abbildung des Deutschen und des globalen ökonomischen Systems auf (GINFORS deckt 59 Güter- und Dienstleistungsgruppen und 35 Sektoren in 38 Ländern und in einer Region „restliche Welt“ ab). GINFORS stellt vertiefte Simulationen der Auswirkungen der Referenzszenarien und von politischen Maßnahmen auf das Wirtschaftssystem und den damit zusammenhängenden Ressourcenbedarf zur Verfügung. Das WORLD Model bringt detaillierte Simulationen über die globale Verfügbarkeit verschiedener Rohstoffe, wie Metalle (z.B. Eisen, Kupfer, Aluminium, Technometalle), Mineralien (z.B. Phosphor, Naturstein, Sand, Kies) und fossile Energieträger (Öl, Kohle, Gas) ein.

Ein soft link zwischen den beiden Model hilft, einige der benötigten Rahmendaten zu endogenisieren: das WORLD Modell speist Weltmarktpreise für verschiedene Rohstoffe sowie Verfügbarkeiten wesentlicher Metalle und Materialien (z.B. Eisen, Kupfer, Aluminium) als aggregierten Input in GINFORS ein. Dadurch benötigt GINFORS keine exogenen Annahmen bezüglich Verfügbarkeiten und Weltmarktpreisen mehr. GINFORS stellt die Nachfrage nach bestimmten Ressourcenkategorien (als Zwischen- oder Endnachfrage) WORLD zur Verfügung, wodurch dort keine exogenen Annahmen und Daten über Ressourcenbedarf getroffen werden müssen. Dieses über einen soft link verbundene System hat das Potential, zukünftig noch weiter ausgebaut zu werden im Hinblick auf weitere Rohstoffe, Produkte und neue Modell-Outputs.

Im Rahmen des SimRes-Projektes konnten bereits umfangreiche Modellverbesserungen für GINFORS und WORLD umgesetzt werden, die es nun erlauben konsistente und dynamische Simulationen von Ressourcennutzung und potentiellen Wirkungen von Ressourcenpolitik durchzuführen. Dabei sind über die folgenden Schlüsselindikatoren Modellaussagen möglich zu:

A. GINFORS (für Deutschland, 38 andere Länder und eine Region „restliche Welt“):

1. **wirtschaftliche Entwicklungen:** BIP / Beschäftigung / verfügbares Haushaltseinkommen / Staatsverschuldung / Zwischen- und Endnachfrage sowie bilaterale Handelsverflechtungen für 59 Produkt- und Dienstleistungsgruppen / Bruttoerzeugung, Arbeitsaufwand und Lohnentwicklungen für 35 Sektoren / Preisentwicklungen für AnbieterInnen und KundInnen
2. **Ressourcennutzung:** RMI, RMC und davon ableitbare Indikatoren [RMC pro Kopf, Gesamtrohstoffproduktivität] / verwendete und nicht-verwertete inländische Entnahme für abiotische Materialien und Biomasse bzw. Forstwirtschaft / Rohstoffäquivalente [Raw Material Equivalents, RME] bilateraler Handelsverflechtungen für 59 Produkt- und Dienstleistungsgruppen / Nachfrage, Angebot, Handel und Landnutzung für 13 Feldfrucht-Gruppen
3. **Energienutzung und CO2-Emissionen:** Primärenergieverbrauch / CO2-Emissionen / Bruttoenergieverbrauch für 35 Wirtschaftssektoren und Haushalte, differenziert für 27 Energieträger

#### B. WORLD:

4. **Globale Ressourcenverfügbarkeit und Weltmarktpreise:** Die Weltmarktpreise stellen einen Schlüsselindikator mit Blick auf die globale Verfügbarkeit verschiedener Ressourcen dar. Knappheiten haben vielfältige Ausprägungen und Auswirkungen – im Wesentlichen machen sie sich jedoch über steigende Preise bemerkbar, die dann die Nachfrage reduzieren. Zwar können die Märkte diese Auswirkungen auf die Nachfrage i.d.R. abpuffern, jedoch stellen steigende Preise einen wichtigen Anzeiger für zunehmende Knappheiten und damit auch für den Bedarf an gesteigerter Ressourceneffizienz dar. Über den soft link mit GINFORS macht das WORLD Model Weltmarktpreisentwicklungen für eine Reihe wichtige Ressourcen verfügbar: beispielsweise für Öl, Kohl, Stahl, Kupfer, Zink, Silber, Nickel, Lithium, Phosphor, Platingruppenmetalle, Steine und Erden.
5. **Recycling:** Das WORLD Modell macht auch Aussagen zu Metall- und Material-Recycling auf globaler Ebene. Damit erlaubt es, Effizienzsteigerungen und die Langfristigkeit bzw. Nachhaltigkeit von Ressourcenverfügbarkeiten abzubilden. Eine weitere Vertiefung des integrativen Modellverbundes aus GINFORS und WORLD ermöglicht, zusätzliche Indikatoren zu berechnen und die Präzision der Modellaussagen zu steigern.

Im Laufe des SimRess-Projektes fanden vielfältige ExpertInnen-Treffen statt, die über die Erstellung von Kausaldiagrammen (causal loop diagramming) das Verständnis von Systemgrenzen erweitert und die Systemabbildungen in den Modellen verbessert haben. Der Prozess der Modellentwicklung sowie Rahmenannahmen und wesentliche Rahmendaten werden dabei transparent dokumentiert.

Aufgrund des Detaillierungsgrades der nationalen Wirtschaft- und globalen Wirtschaftssysteme wird das GINFORS Modell eingesetzt, um potentielle Wirkungen ressourcenpolitischer Maßnahmen auf das Deutsche und das globale Wirtschaftssystem abzuschätzen. Die Simulationen gehen dabei von internationalen Nachahmungseffekten aus, d.h. es wird angenommen, dass deutsche Erfahrungen mit Ressourcenpolitik in gewissem Umfang und mit zeitlicher Verzögerung von anderen Ländern in ihrem jeweiligen Kontext aufgegriffen werden – zunächst auf Ebene der EU-Mitgliedstaaten, später im Kontext von G7 und G20. Das WORLD Modell wird zusätzlich herangezogen, um plausible Annahmen bezüglich der durch Recycling und politische Maßnahmen zur Verbesserung des Recyclings auf globaler Ebene realisierbaren Verfügbarkeiten von Sekundärmaterialien für unterschiedliche Rohstoffe zu berechnen.

Die Kombination und Interaktion zwischen den beiden Modellen ermöglicht nun, systemische Wechsel- und Rückwirkungen sowie langfristige Systemveränderungen abzubilden – das war mit früheren Typen an Simulationsmodellen in dieser Form nicht möglich.



Der Vergleich der potentiellen Wirkungen der Politik-Mixe mit den Referenzszenarien im Hinblick auf die o.g. Schlüsselindikatoren erlaubt es uns, Schlussfolgerungen hinsichtlich des notwendigen Ambitionsniveaus von Ressourcenpolitik abzuleiten, um eine signifikante Verringerung der Ressourcennutzung zu bewirken. Die Simulationsergebnisse aus den beiden Modellen werden zusammenführend ausgewertet und als Input (i) in die Konferenz „Decarbonisation and Resource Efficiency – 100% Renewable Energy and more“ (8. November 2016, Berlin – <https://www.umweltbundesamt.de/en/conference-decarbonisation-ressource-efficiency>) sowie (ii) in einen gemeinsamen Abschlussworkshop mit dem Projekt DeteRes (“Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz“, FKZ 3712 93 321) (7./8. Dezember 2016, Berlin) eingebracht.

Über den Austausch mit dem Projekt DeteRes wird angestrebt, die Konsistenz der in beiden Projekten verwendeten Rahmenannahmen und Rahmendaten zu steigern, sodass das Umweltbundesamt die Simulationsergebnisse beider Projekte einfacher vergleichen kann.

## 6.2 Nächste Schritte

Während die Simulationsergebnisse für eine kleine Auswahl an politischen Maßnahmen, die an ProRes II Handlungsansätze angelehnt sind, zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Stand: Juni 2016) in Erarbeitung sind, befindet sich der zweite Politik-Mix zu Transformation und Systemwandel noch in der Konzeption.

Basierend auf Vorarbeiten aus anderen Projekten und Studien des Umweltbundesamt stehen für diesen Politik-Mix folgenden Ziele im Fokus:<sup>13</sup>

- ▶ Reduktion des RMCabiotisch im Zeitraum 2010 bis 2050 um 2 bis 2,5% pro Jahr (absoluter Zielwert liegt bei 6-7 Tonnen pro Kopf);
- ▶ Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität (Gesamtrohstoffproduktivität (BIP+Importe)/RMIabiotisch) um mindestens 2,3% pro Jahr (auf einen Indexwert von 248 im Vergleich zu 100 für das Jahr 2010).

Über Modell-experimentelle Arbeiten in den beiden Modellen GINFORS und WORLD soll dann ermittelt werden, welchen Beitrag zur Erreichung dieser Ziele die in den Referenzszenarien getroffenen Annahmen bereits leisten und entsprechend die Lücke identifiziert werden, die es durch politische Maßnahmen zu schließen gilt. Anhand der Größenordnung der Lücken sollen dann über weitere Modell-experimentelle Arbeiten verschiedene Parameter für Ressourcennutzungs-relevante Wirtschaftssektoren und Gütergruppen so variiert werden, dass die Lücke weitestmöglich geschlossen werden kann. Diese Parametervariationen geben dann Aufschluss über die Mechanismen, die über politische Maßnahmen im sozio-ökonomischen System in Deutschland geändert werden müssten. Dadurch können dann relevante Stellschrauben für politische Maßnahmen identifiziert und entsprechend relevante Maßnahmenarten ermittelt werden.

Abschließend sollen dann für beide Politik-Mixe sowohl die Modell-technischen Annahmen und Parametrisierungen als auch die Simulationsergebnisse detailliert dargestellt sowie dann in einer zusammenführenden Broschüre für die Decarbonisation-Konferenz aufbereitet werden.

---

<sup>13</sup> Siehe hierzu insbesondere Günther, J. und Golde, M. (2015). Gesamtwirtschaftliche Ziele und Indikatoren zur Rostoffanspruchnahme. UBA-Hintergrund, Oktober 2015, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau.

## 7 Der Einsatz des WORLD-Modells im SimRes-Projekt: Systemgrenzen, Modell-Interaktion, Indikatoren und grundsätzliche Ergebnisse

Harald U. Sverdrup<sup>1</sup> and Deniz Koca<sup>2</sup>

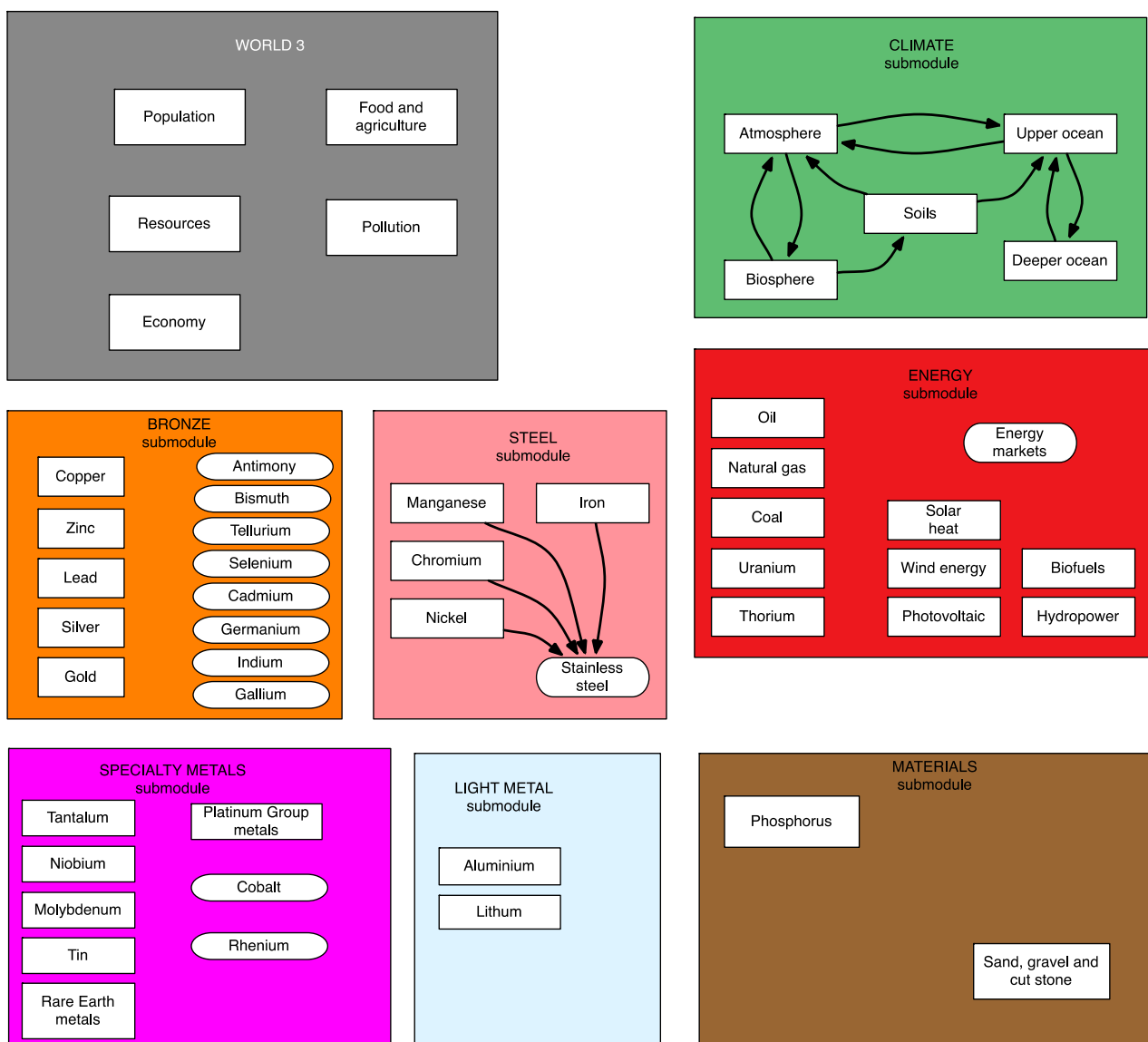
<sup>1</sup> Industrieller Ingenieurwissenschaft, Universität Island, Island

<sup>2</sup> Universität Lund, Schweden

### 7.1 Modellogik und Systemgrenzen

Das WORLD 6-Modell veranschaulicht als globales Modell das Verhältnis zwischen Ressourcen, der Wirtschaft, der Bevölkerung und einigen sozialen Aspekten auf weltweiter Ebene (Abbildung 12). Das Modell hat gegenwärtig keine nationalen Sub-Modelle.

Abbildung 12: Übersicht der Funktionen im WORLD 6-Modell.



Das schwarze Kästchen ist das World 3-Modell von Meadows et al. (1972). Die anderen Module wurden dem WORLD 6-Modell neu hinzugefügt und behandeln Metalle, Phosphor, Energie,

## **Materialien und Klimawandel. Gestrichelte Kästchen veranschaulichen geplante oder in Arbeit befindliche Modulerweiterungen.**

Das Modell hat gegenwärtig mehrere Untermodule:

1. Das ursprüngliche World 3-Modell (Meadows et al., 1972, 1993, 2005), welches sich in den aktualisierten Versionen von 1992 und 2002 in vielen Aspekten nicht von dem ursprünglichen Modell von 1972 unterscheidet, einschließlich eines Ressourcenmoduls,
  - a) ein **Lebensmittel-** und **Land-** Modul,
  - b) ein **Bevölkerungs-**Modul,
  - c) ein einfaches wirtschaftliches Modul mit Unterscheidung zwischen **Industriekapital-** und **Servicekapital**,
  - d) ein **Umweltverschmutzungs-**Modul und ein einfaches Ressourcen-Modul.
  
2. Ein Materialien- und Metalle-Modul einschließlich
  - a) **Materialien**
    - i. Phosphor
    - ii. Sand-Kies-Stein
  - b) **Metalle-**Modul einschließlich der großen Metalle:
    - i. Eisen, Aluminium, Kupfer, Zink, Blei,
    - ii. Der Technologie-Metalle Silber, Gold, Antimon, Bismut, Gallium, Germanium, Indium, Cadmium, Tellurium, Selen, Platin, Palladium, Rhodium, Rhenium, Tantal, Zinn, Metalle der Seltenen Erden
    - iii. Der legierten Metalle für Stähle, Chrom, Mangan, Nickel, Kobalt, Molybdän, Niobium
  
3. Energie: Ein Energiemodell einschließlich
  - a) **Fossile Brennstoffe**
    - i. Kohlenwasserstoffe: Öl, Gas, Kohle,
    - ii. Uran-Kernbrennstoff,
    - iii. Thorium-Brüter-Technologie
  
  - b) **Technologische Energieerträge** unter Nutzung fossiler Metalle (Windenergie, Photovoltaikleistung, Geothermie)
  - c) Unter Vorbehalt **erneuerbarer Strom** (Bioenergie, Wasserkraft)
  
4. **Klimawandel:** ein vereinfachtes Klimawandel-Modul, das CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Atmosphäre in CO<sub>2</sub> umwandelt, mit Erhöhung der Temperatur und Anstieg des Meeresspiegels.

Für jede Material-, Energie- oder Metallressource, die im WORLD 6-Modell zu berücksichtigen ist, kann die langfristige Nachhaltigkeit der Versorgung und die „weiche“ oder „harte“ Verknappung bewertet werden. Wir bewerten Ressourcenknappheit nach der folgenden Definition:

- ▶ „Weiche“ Verknappung

- **Nachfragerückgang:** Die Nachfrage verringert sich aufgrund höherer Preise, wenn die anfängliche Nachfrage höher als das anfängliche Angebot ist. Der Preis erhöht sich, was die Nachfrage senkt und, soweit möglich, das Angebot erhöht.
  - Das Ergebnis ist reduzierter Konsum
  - Der Indikator ist Nachfragetrennung, die gewünschte Nachfrage ist höher als die befriedigte Nachfrage. Ein weiterer Indikator ist die Erhöhung von Ressourcenpreisen

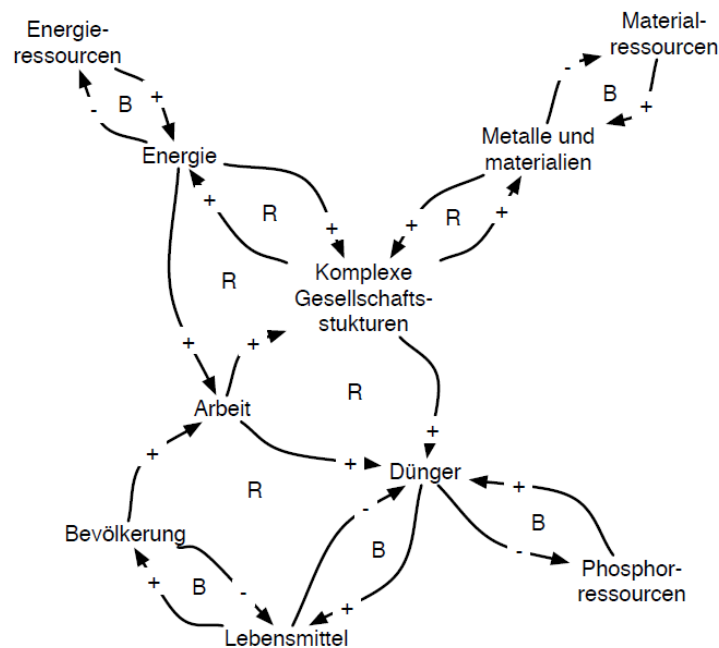
► „Harte“ Verknappung

- **Ökonomisch:** Der Preis erhöht sich aufgrund von Angebotsverknappung so stark, dass der Gesellschaft das verfügbare Geld ausgeht, um die nachgefragte Menge aufrecht zu erhalten
  - Es kann zu einem von zwei Ereignissen oder zu beiden Ereignissen kommen:
    - Ausfall der Bereitstellung aufgrund von Geldknappheit
    - Das Ergebnis kann eine Wirtschaftskrise sein
  - Es gibt mehrere Indikatoren:
    - Konsistente wirtschaftliche Defizite und Unfähigkeit, Unternehmensgewinne zu erzeugen, konjunkturelle Rezessionsperioden,
    - Ausfall oder Reduzierung der Bereitstellung von Waren und Dienstleistungen
    - Verschlechterung des Lebensstandards.
- **Physisch:** Das Material ist ungeachtet des Preises physisch nicht verfügbar
  - Das Ergebnis ist der Ausfall der Bereitstellung.
  - Die Indikatoren sind
    - dass das Material nicht in ausreichenden Mengen beschafft werden kann
    - mögliche verringerte wirtschaftliche Entwicklung oder erhöhte Transaktionsverluste
    - Austausch findet statt

Weiche Verknappung tritt häufig bei vielen Wirtschaftsgütern auf und kann von der Gesellschaft ohne große Störungen bewältigt werden. Geldknappheit wird nur schlecht durch das politische System bewältigt und führt häufig zu schlechter Regierungsführung, Korruption und Armut. Harte Verknappung wird weder vom Markt (Greer 2008, Heinberg 2011) noch von der Gesellschaft gut bewältigt und führt normalerweise zu größeren Störungen.

Es ist von zentraler Bedeutung für das WORLD 6-Modell (siehe Abbildung 13), dass Phosphor (Menschen), Materialien (Infrastrukturen und Wirtschaftsgüter) und Energiesysteme (Strom für die tägliche Arbeit) sämtlich eng verbunden sind. Der Einsatz von Metallen und Materialien stellt Ansprüche an die Energieversorgung. Die Energieversorgung stellt Ansprüche an den Einsatz von Metallen und Materialien. Lebensmittel stellen Ansprüche an Phosphor, Energie, Materialien und Metalle. Die Menschen treiben den Konsum mit der Nachfrage nach Materialien, Metallen, Energie und Lebensmitteln an.

Abbildung 13: Zentrale Themen im WORLD 6-Modell als vereinfachtes Kausalschleifendiagramm



Das Modell wurde in einer Systemdynamiksoftware entwickelt und umgesetzt. Die Grundprinzipien wurden jedoch zunächst streng als Kausalschleifendiagramme und Postenflussdiagramme (siehe nächster Abschnitt) entwickelt, um die Prinzipien des Modells vor einer Programmierung genau festzulegen. Daher ist die Systemanalyse von der für die Simulationen eingesetzten Softwareplattform unabhängig. Das Modell kann zu einem späteren Zeitpunkt durchaus in eine andere Programmiersprache wie zum Beispiel FORTRAN oder C übertragen werden, um eine bessere Simulationsschwindigkeit zu erzielen. WORLD 6 ist ein Systemdynamikmodell. Das Modell basiert auf Kausalzusammenhängen, die in einer Modellstruktur arrangiert und durch viele Feedbackschleifen charakterisiert sind.

## 7.2 Kausalitäten und Flüsse definieren Systeminteraktionen

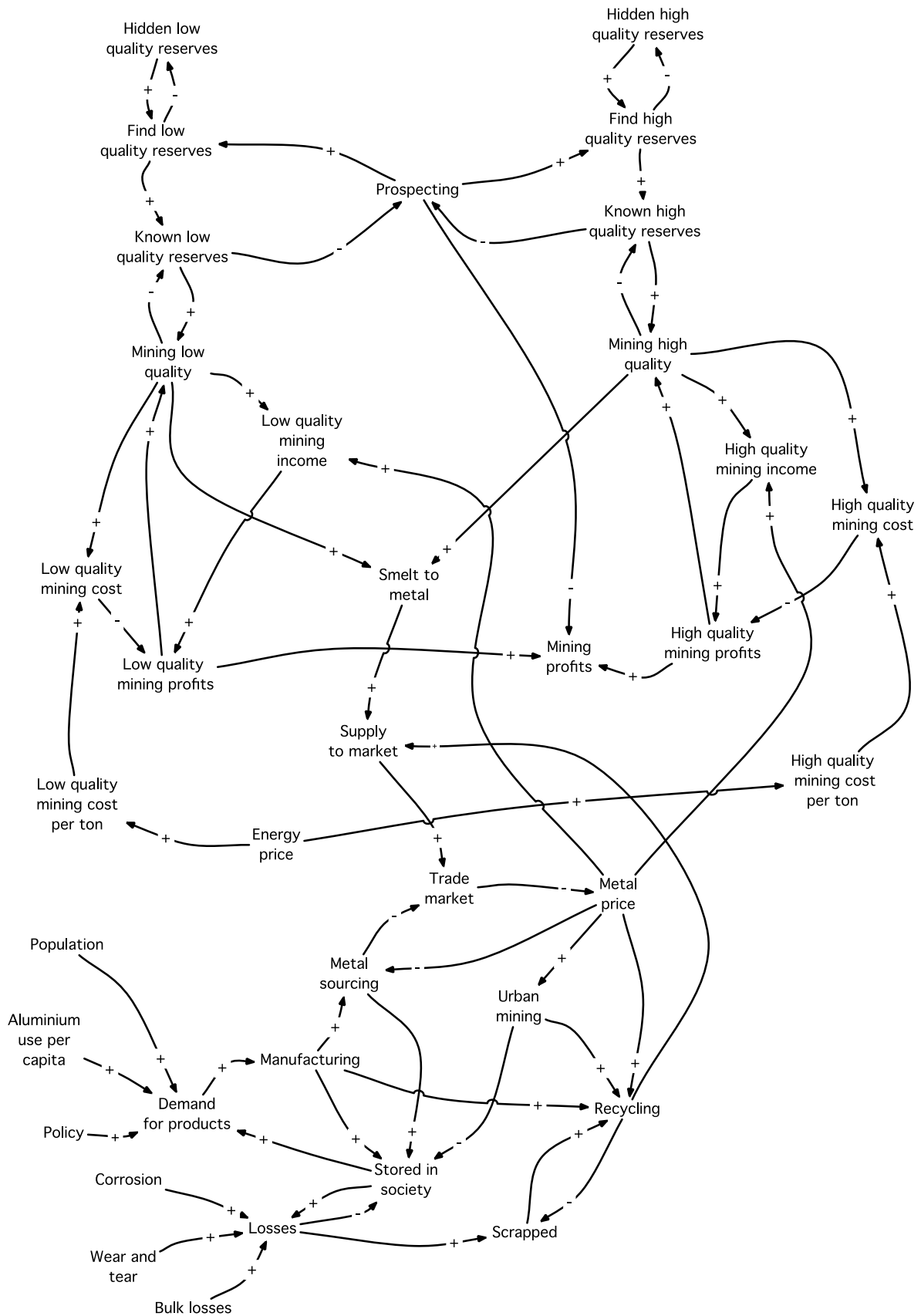
Die Kausalschleifendiagramme (Causal loop diagrams, CLDs)<sup>14</sup> definieren gemeinsam mit den Materialflussdiagrammen auf einzigartige Weise die Repräsentation eines Systems im Modell. Diese Diagramme sind die grafische Darstellung der zugrundeliegenden Differentialgleichungen, die aus den Massenbilanzen abgeleitet werden (Materialflussdiagramme).

Abbildung 14 gibt ein Beispiel dafür, wie die verschiedenen Ressourcenfaktoren im Modell im Fall von Aluminium miteinander in Beziehung stehen. Der Hauptantriebsmechanismus für den Bergbau stammt aus Profiten und Verfügbarkeit einer förderbaren Reserve, die im Modell verwendet wird; er wird jedoch durch die Förderkosten und deren Änderung aufgrund von Kapitalkosten, Ölpreisen und Erzgehalten beeinflusst. Ein geringerer Erzgehalt bedeutet, dass zur Förderung des Aluminiums mehr Gestein bewegt werden muss. Daraus folgt, dass ein höherer Aluminiumpreis erforderlich ist, um die Aluminiumproduktion fortsetzen zu können. Der Preis muss über den Produktionskosten bleiben und wird durch die Menge am Handelsmarkt festgelegt. Die Menge am Handelsmarkt hängt vom Gleichgewicht zwischen den Lieferungen an den Markt aus der Produktion und dem Versand aus dem Markt in Erwidierung auf die weltweite Marktnachfrage ab. Eine Praxis bestand darin, Rohstoffpreise als Eingabezeitreihen in wirtschaftliche Simulationsmodelle einzugeben. Dies wird durch das

<sup>14</sup> Siehe Kapitel 10 für genauere Informationen zu CLDs.

WORLD-Modell geändert. Der Preis ist eines der wichtigsten Modellergebnisse, welches aus Marktgegebenheiten generiert wird und ungeprüfte Annahmen zu Preisentwicklungen unnötig macht.

Abbildung 14: Kausalschleifendiagramm der Bergbau- und Marktdynamik von Metallen in WORLD



Der in der folgenden Abbildung 15 dargestellte Preismechanismus ist im obigen Diagramm (Abbildung 14) enthalten. Diese beiden Kausalschleifendiagramme verdeutlichen, wie der Extraktionsbetrieb durch Profit angetrieben wird. Dieser Profit wird durch den Aluminiumpreis und die extrahierte Aluminiummenge angetrieben, jedoch durch die Betriebskosten ausgeglichen. Die Betriebskosten werden neben den Investitionskosten hauptsächlich durch zwei wichtige Faktoren bestimmt: dem Energiepreis und dem Erzgehalt (zu Erzgehalten siehe folgende Abbildung 15 und das Flussschema in Abbildung 16).

Abbildung 15: Kausalschleifendiagramm für den Preismechanismus wie im Modell umgesetzt

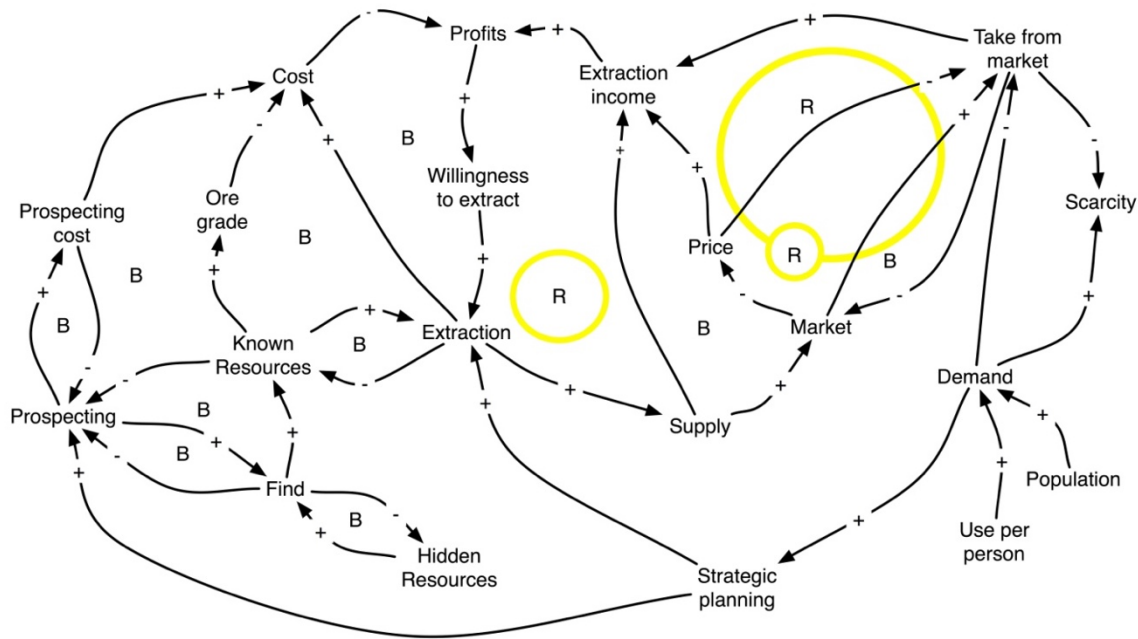
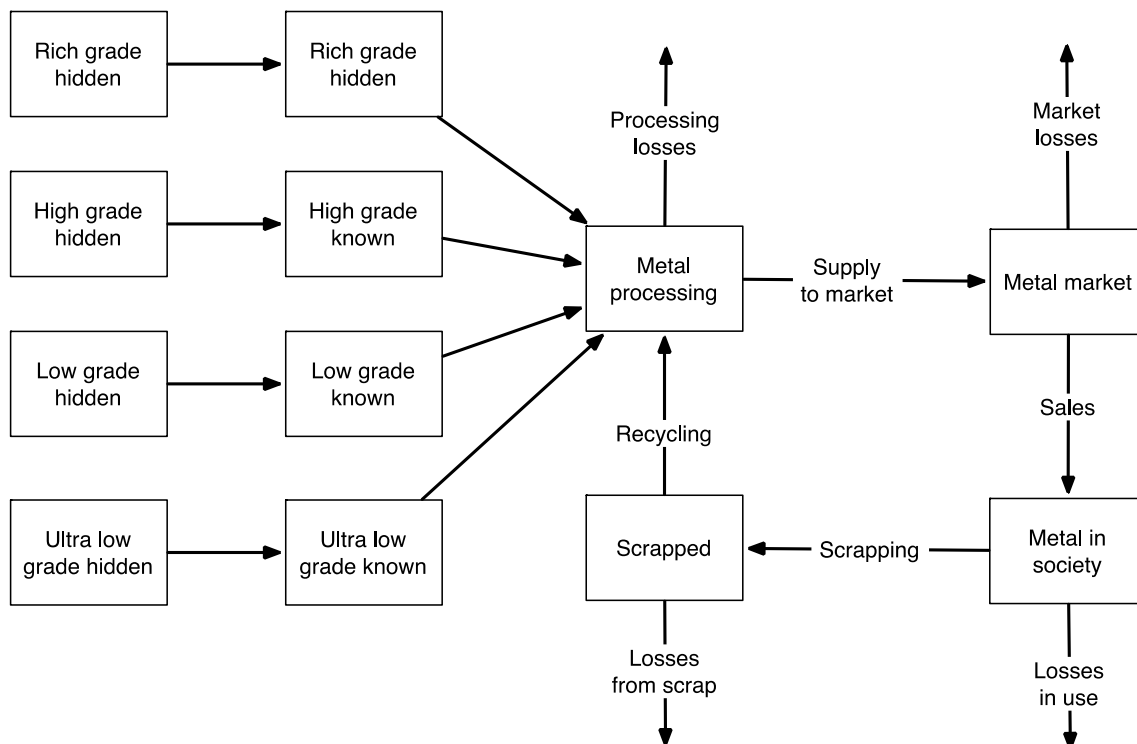


Abbildung 16: Allgemeines Flussdiagramm für ein Metall im WORLD-Modell<sup>15</sup>



Je niedriger der Erzgehalt, desto höher die Betriebskosten, da, um aus den Fördertätigkeiten so viel Erz zu gewinnen, wie in Vorkommen mit höherem Erzgehalt enthalten ist, viel mehr Gestein bewegt werden muss und daher ein höherer Einsatz von Maschinen, Energie und Arbeitskräften erforderlich ist. Unkonventionelle Quellen werden normalerweise in „low grade“ oder „ultra low grade“-Ressourcen eingeteilt. Es geht eher nicht darum, ob wir sie „knapp“, „schwer“ oder „unkonventionell“ nennen, sondern wie teuer deren Gewinnung ist.

Bei den Metallen unterscheiden wir zwischen Metallen, die in ihrer Gewinnung völlig unabhängig sind (sogenannte Muttermetalle) und einer Reihe von Metallen, die teilweise oder vollständig von der Gewinnung eines anderen Metalls abhängen. Dies führt zu komplizierten Zusammenhängen wie in Abbildung 17 für die Metalle des BRONZE-Untermoduls in WORLD 6 dargestellt. Die Struktur ist analog zu den anderen Metallmodulen in WORLD 6. Die Behälter sind Metallreserven, die ovalen Kästchen veranschaulichen die Produktion. Wenige Metallvorkommen produzieren eine große Menge der Metalle. Hauptgewinnungsminen für Kupfer, Blei und Zink sind die Quelle der vielen sekundären Metalle. Gallium stammt teilweise auch aus Aluminiumraffination. Die Hälfte des Palladiums und erhebliche Mengen Platin werden aus Nickel-Anodenschlamm gewonnen. In mancher Hinsicht kann Edelstahl als synthetisches Metall von sich selbst betrachtet werden, welches für seine Produktion von Eisen, Nickel, Chrom und Mangan abhängig ist.

Darüber hinaus gilt, dass der Preis oberhalb der Produktionskosten bleiben muss, damit der Betrieb profitabel sein kann. Die Menge am Markt hängt wiederum von dem Gleichgewicht zwischen Lieferungen an den Markt aus der Produktion und dem Angebot aus dem Markt als Erwiderung auf die weltweite Marktnachfrage ab. Der Preis treibt die Notwendigkeit für das Recyceln von Metallbeständen in der Gesellschaft an. Das „R“ im Kausalschleifendiagramm in Abbildung 16 veranschaulicht

<sup>15</sup> Diese Art von Flussdiagramm wird für jedes Metall und Material verwendet. Bei einigen Metallen mit vielen Abhängigkeiten wird es komplizierter ausfallen (siehe zum Beispiel Sverdrup et al. 2015, 2014).



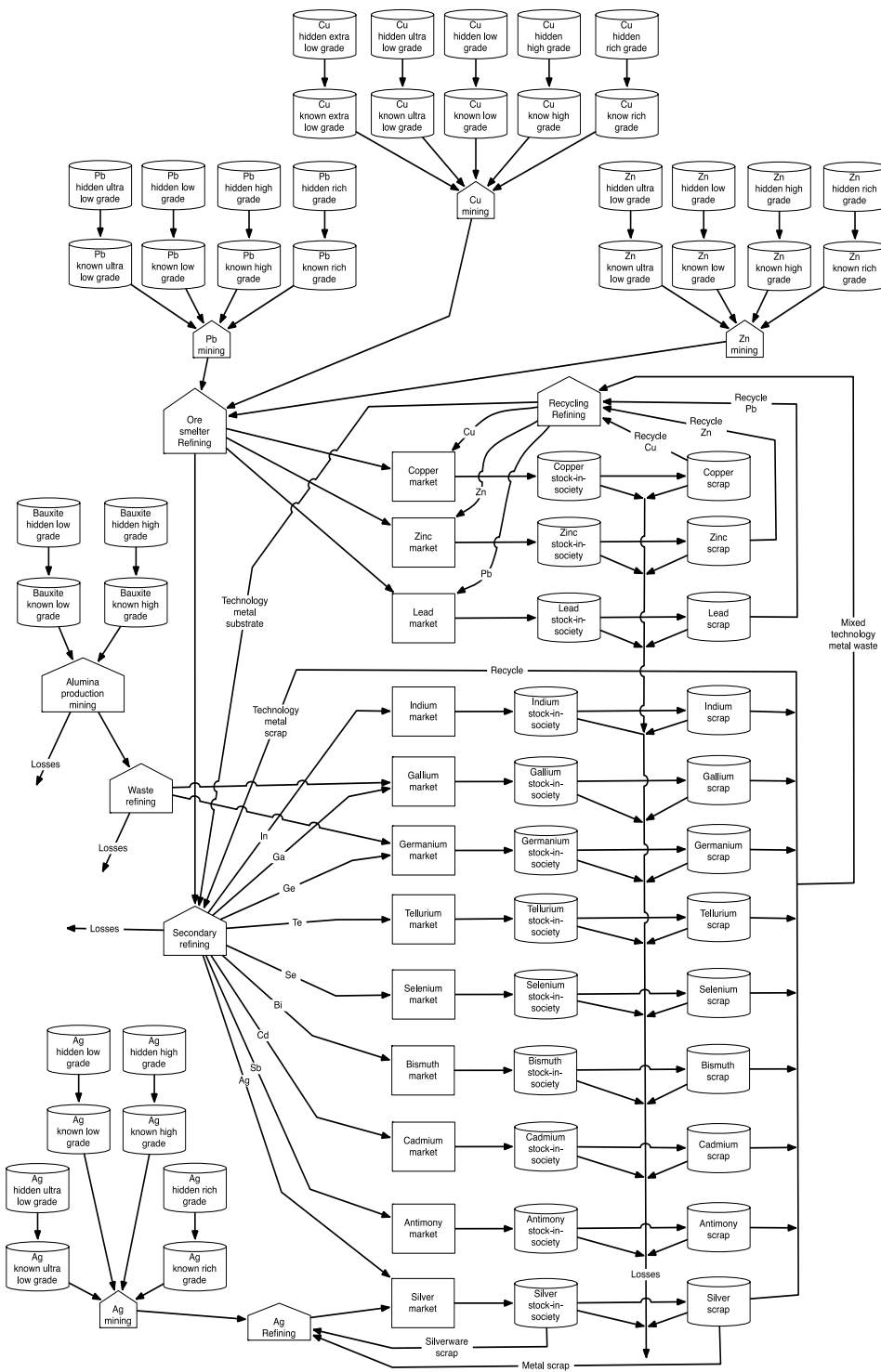
Verstärkungsschleifen (R für reinforcing, sich verstärkend), welche die Bergbautätigkeit und das Angebot für den Markt antreiben.

Der Preis der Materialien im Modell wird durch die Menge am Markt und die Tatsache festgelegt, dass er oberhalb der Produktionskosten bleiben muss. Er hängt von dem Gleichgewicht zwischen Lieferungen an den Markt aus der Produktion und dem Versand aus dem Markt in Erwiderung auf die weltweite Marktnachfrage ab. Der Preis treibt außerdem die Notwendigkeit für das Recyceln von Metallbeständen in der Gesellschaft an. Ein höherer Preis fungiert als Nachfragebremse. Der Metallhandel soll wie folgt funktionieren: Die Händler erscheinen mit zu verkaufenden oder zu erwerbenden Mengen im Handelsraum und passen ihre Verkaufs- oder Kaufmengen je nach Anstieg oder Fall des Preises an. Falls die Nachfrage höher als die Produktion ausfällt, steigt der Preis an; im umgekehrten Fall fällt der Preis.

Es handelt sich dabei um einen Selbstanpassungsmechanismus, der den Handel ausgleicht, indem er die Preise anpasst, bis die Nachfrage zum Kauf einer Menge zu einem Preis den Angeboten zum Verkauf einer Menge zu einem Preis entspricht. Die Käufer bieten an, mehr zu einem geringeren Preis oder weniger zu einem höheren Preis zu kaufen, und die Verkäufer bieten an, weniger zu einem geringen Preis oder mehr zu einem höheren Preis zu verkaufen. Wenn der Preis und die Menge übereinstimmen ist der Preis festgelegt. Am Markt finden mehrere Arten von Transaktionen statt:

1. Das Metall wird am Markt an einen Käufer verkauft und sofort versendet und physisch geliefert. Die Lieferung an den Markt entspricht dem Abgang aus dem Markt.
2. Terminverkauf; Das Metall wird sofort verkauft und die Zahlung wird erhalten, das Metall wird jedoch zu einem späteren Zeitpunkt physisch geliefert. Das Eigentum geht sofort über, das Geld jedoch später. Dies wird von vielen Minen zur Verbesserung liquider Mittel so gehandhabt.
3. Das Metall wird sofort versendet, aber die Zahlung wird zu einem späteren Zeitpunkt erhalten. Das Eigentum geht sofort über, aber das Geld zirkuliert später.

Abbildung 17: Flussdiagramm wie im BRONZE-Untermodul innerhalb von WORLD 6 umgesetzt.



Die Kausalität bei Profiten geht zu Einnahmen aus Lieferung, wenn die Menge sofort an das Metallwarenlager geliefert und bezahlt wird. Dasselbe gilt bei einem Terminverkauf, wenn das Metall im Voraus bezahlt, jedoch später physisch geliefert wird. Falls nicht, kann alles oder ein Teil bezahlt werden, wenn die gelieferte Menge aus dem physischen Warenlager entnommen wurde. Diese Beschreibung basiert auf persönlicher Beobachtung des Autors in den Handelsräumen der Metallmärkte von New York und London.

## 7.3 Kalibrierung und Parametrisierung

Das Modell ist nicht auf große Mengen von Zeitreihen wie bei traditionellen ökonomischen Modellen kalibriert. Stattdessen führen die zugrundeliegenden Kausalitäten zu charakteristischen Gleichungen, welche auf unabhängigen Daten parametrisiert sind. Bei den Gleichungen handelt es sich normalerweise um Massenbilanzdifferentialgleichungen als Ergebnis der zugrundeliegenden Kausalitäten. Die Kalibrierung auf eine bestimmte Zeitreihe wird auf das absolute Minimum begrenzt. Dies ist schwieriger, ermöglicht bei ausreichend erfolgreicher Validierung jedoch stärker Allgemeingültigkeit. Die einzelnen Kausalzusammenhänge basieren normalerweise auf der empirischen Quantifizierung des Zusammenhangs. Dies ist ein Bestandteil des Prüfverfahrens, welches während der Entwicklung der verschiedenen Untermodule stattfindet. Dies hat große Auswirkungen auf das Modell. Es impliziert, dass es, sobald es parametrisiert und validiert ist, für alle Fälle ohne Kalibrierung zwischen den Simulationsläufen gelten wird.

Die Parametrisierung besteht aus mehreren Teilen:

1. Den Kausalstrukturen wie mit den Kausalschleifendiagrammen und den Flussdiagrammen beschrieben. Die Dynamik entsteht hauptsächlich aus der Struktur und den von ihr implizierten Feedbackstrukturen, weniger aus den Parametereinstellungen.
2. Der Parametrisierung von Ratenkoeffizienten in den Ratengleichungen sowie Verteilungskoeffizienten aus der Übertragung von einem Parameter in einen anderen (Förderungsraten, Schürfraten, Bevölkerungswachstumsraten).
3. Der Größe von anfänglichen Beständen von Energieträgern (Öl, Gas, Kohle, Kohlenstoffschiefer, Wasserkraftpotential, geothermisches Potential, Biokraftstoffpotentiale), Materialien (extrahierbare Bestände, zu Beginn der Simulation, normalerweise 1850 oder 1900, in bekannt und versteckt eingeteilt).
4. Kostenangaben für verschiedene Ressourcenqualitäten (reich, hoch, gering, sehr gering, äußerst gering und Spuren).

### 7.3.1 Spezifikation ausgewählter exogener und endogener Parameter

Einige Eingaben sind exogen zum Modell; in gewisser Hinsicht stellen diese Eingaben erzwingende Funktionen dar:

1. Nachfrage nach verschiedenen Materialien und Metallen in kg pro Person und Jahr. Es hat sich gezeigt, dass dies im Laufe der Zeit einem bestimmten Muster folgt, wobei es für alle Länder dieselbe Form aufweist. Dies wird mit der Bevölkerung aus den internen Simulationen in WORLD 6 multipliziert. Das Ergebnis ist die Standardnachfrage in WORLD 6, wenn das Modell nicht mit GINFORS verknüpft ist.
2. Die weltweiten Gesamtressourcen für jedes modellierte Metall und Material werden auf der Grundlage der Förderkosten in Klassen eingeteilt. Die mit den niedrigsten Kosten verbundene Ressource wird konsistent als erstes gefördert. Dies wird als Opportunitätskostenmethode bezeichnet und scheint das für die Förderung und Lieferung von Ressourcen am besten geeignete Modell zu sein.
3. Preisfeedbackkurven für Marktpreise, Kurven für Wechsel zwischen Ressourcenkostenklassen und Preisfeedbacks zwischen Marktpreis und Recycling. Diese werden soweit möglich mit tatsächlichen Datenbeobachtungen dieser Feedbacks in der Gesellschaft verknüpft.

Wir haben im Laufe der Jahre viele Daten aus den Metallhandelsarenen gesammelt, die genutzt wurden, um die Beziehungen zwischen der Menge handelbaren Metalls in der Marktarena und dem Marktpreis herzustellen. Davon ist einiges einfach aus den Metallhandelsbörsen in London, New

York und Shanghai erhältlich. Darüber hinaus haben wir im Laufe der Jahre gesammelte private Handelsarchive herangezogen. Aus diesen Daten wurden Preiskurven erstellt.

Wir modellierten den Preis als einen rationalen Prozess unter der Annahme, dass der Preis durch Einigungen zwischen Marktpartnern festgelegt wird. Zufallseffekte und Irrationalität haben wir nicht berücksichtigt. Dieser Profit wird durch Metallpreis und Fördermenge angetrieben, jedoch durch die Betriebskosten ausgeglichen.

Preisdaten für Eisen und Aluminium wurden zusammengeführt und ergeben eine gleichbleibende Kurve für beide Metalle, was ein allgemeines Prinzip des Metallhandels nahelegt. Wir haben die Warenlagerbestände an der Londoner Metallbörse als Indikator für Marktbestände handelbaren Metalls herangezogen. Es handelt sich dabei nicht um das gesamte handelbare Metall der Welt, jedoch um einen erheblichen Teil davon, und dient als Metall-Liquiditätsreserve für den Markt. Wenn wir den verfügbaren und handelbaren Marktbestand mit dem beobachteten Marktpreis korrelieren, erhalten wir ein Verhältnis, das den zuvor erhaltenen entspricht, und mit einer guten Korrelation (Abbildung 18).

Abbildung 18: Beispiele für Marktpreiskurven für (a) zusammengeführte Daten aller Metalle/Materialien; (b) Kupfer

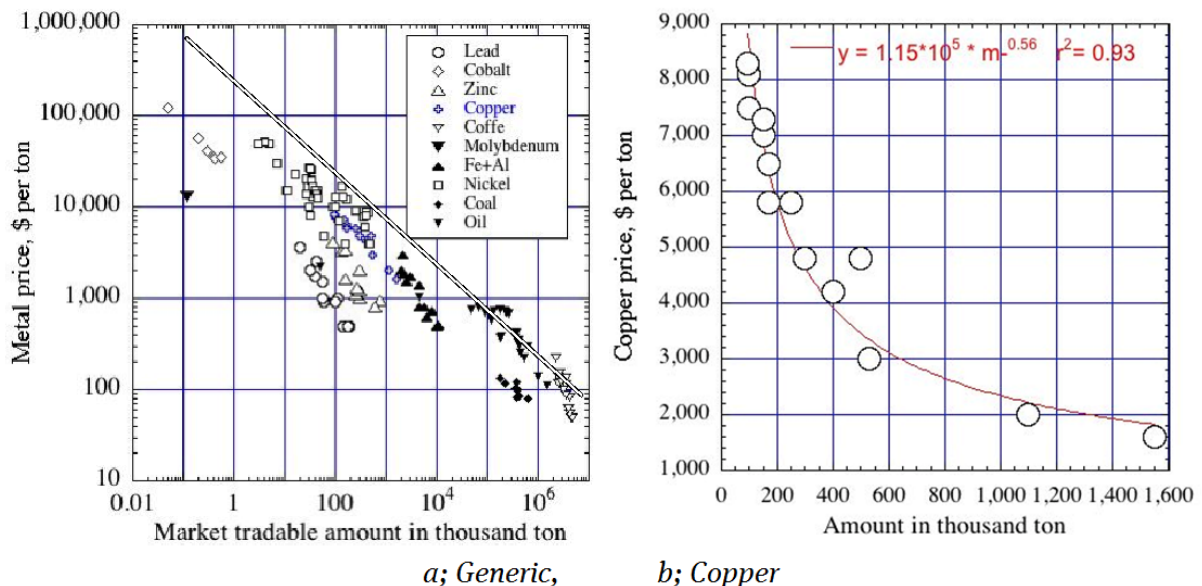


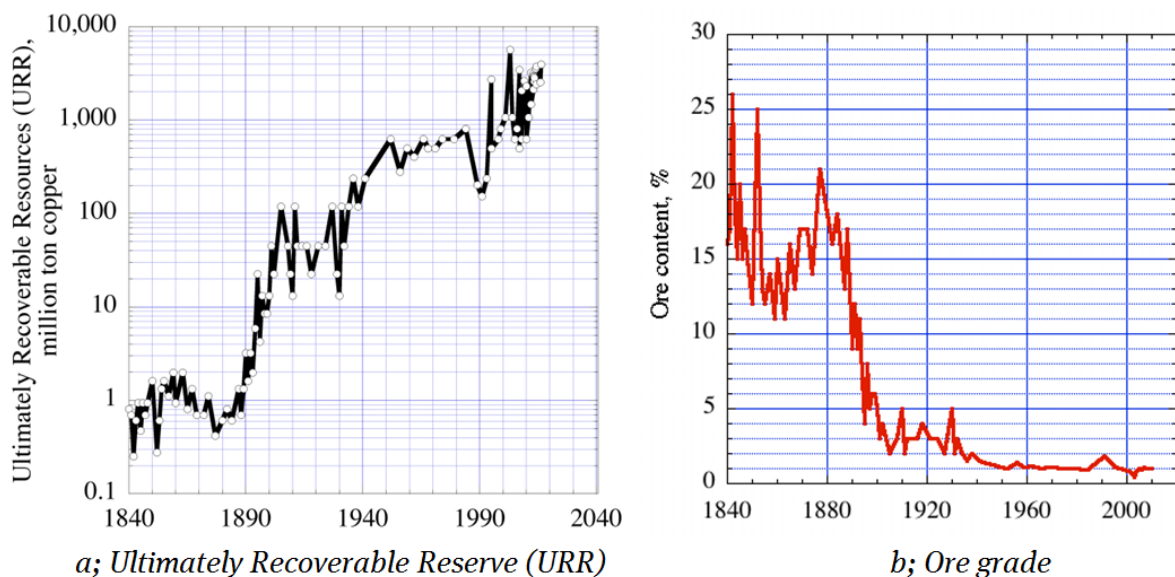
Diagramm (a) zeigt die generische Marktpreiskurve für alle untersuchten Metalle und Materialien und stellt damit das Verhältnis zwischen dem Bestand am Markt und dem Marktpreis dar. Diagramm (b) zeigt die Marktmechanismus-Preiskurve für Kupfer.

Der Grund, dass die Punkte nicht alle auf eine Linie fallen, besteht unserer Meinung nach darin, dass die Bestände an der Londoner Metallbörse (London Metal Exchange LME) nicht die gesamte Marktverfügbarkeit darstellen und daher einen Ausgleich einführen. Die wirkliche Linie ist wahrscheinlich eine Linie, die leicht rechts der Linie verläuft, welche durch die Kohle-Kupfer-Nickel-Eisen-Aluminium-Linie umrissen wird. Aus dem Handel mit Edelmetallen (Silber, Gold, Platin) wissen wir, dass die LME-Bestände etwa eine oder zwei Größenordnungen geringer als die am Markt handelbaren tatsächlichen Marktbestände sind. Öl- und Kohlepreiskurven fallen fast auf dieselbe Linie im Diagramm, wenn wir den Energiegehalt in Kohle korrigieren. Dadurch wird nahegelegt, dass es legitim ist, generische Preiskurven für Materialien heranzuziehen, wenn nicht ausreichend Daten zur empirischen Festlegung der Preiskurve verfügbar sind.

### 7.3.2 Schätzung der tatsächlichen Größe der Ressourcen und Reserven

Die Schätzung der tatsächlichen Größe der Reserven und Ressourcen für Metalle und fossile Brennstoffe ist einer der wichtigsten Aspekte des WORLD 6-Modellsystems. Daher wurde diesem Aspekt der Parametrisierung des Modells besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Die Schätzungen variieren etwas zwischen Erzarten und den zu bewertenden Ressourcen. Abbildung 19a veranschaulicht die Größe der extrahierbaren Kupfermenge als von den Autoren erarbeitete Zeitfunktion (Sverdrup et al. 2014). Eine ähnliche Entwicklung kann bei Zink, Silber, Gold, Nickel, Uran und verschiedenen anderen Metallen beobachtet werden. Es ist zu sehen, wie die bekannten und erwarteten Kupferreserven auf einer Grenze zusammenzulaufen scheinen. Dies beginnt mit der Art und Weise, wie Ressourcen und Reserven durch den Geologischen Dienst der USA (United States Geological Survey USGS) definiert werden, endet jedoch mit dem für das BRONZE-Modell erforderlichen Format. Das Diagramm zeigt uns, dass wir das meiste des auffindbaren Kupfers gefunden haben und die Hoffnung auf doppelte Mengen oder vielfache Erhöhungen des verfügbaren Kupfers vergeblich wäre. Abbildung 19b zeigt, wie der Erzgehalt von Kupfer im Laufe der Jahre zurückgegangen ist. Dies ist ein langfristiges Muster bei vielen Metallen wie zum Beispiel Gold, Silber, Nickel, Uran, Zink, Blei, Platin, Palladium oder Uran für abnehmende Erzgehalte.

Abbildung 19: (a) Extrahierbare Kupfermengen; (b) Entwicklung des Erzgehalts bei Kupfer

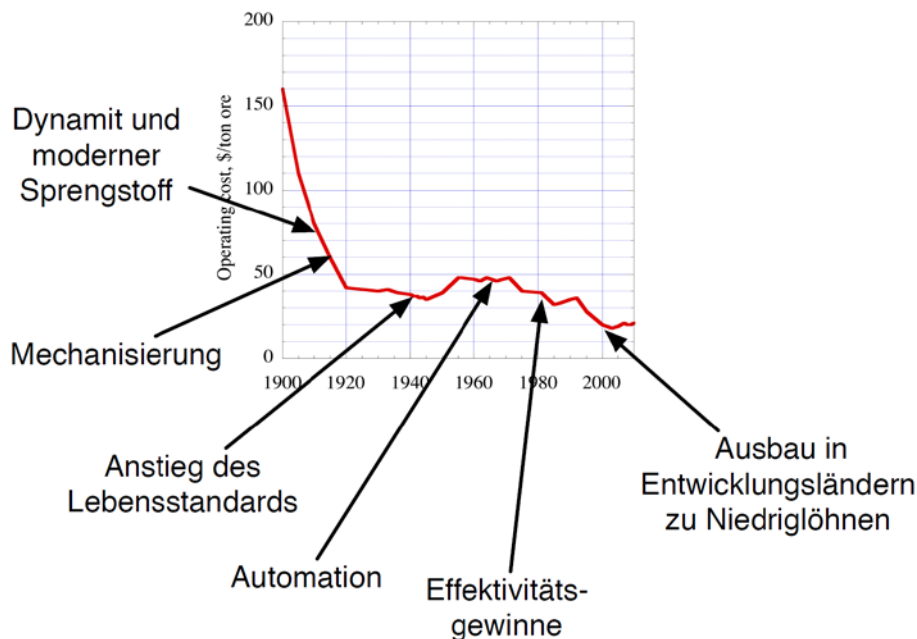


Weitere Beispiele dieser Diagramme wurden von Mudd (2007, 2009, 2012) und Mudd und Weng (2012) für Nationen und global definierte Regionen zusammengetragen. Das Diagramm und sein Komparativ für andere Metalle zeigt, dass die Mehrheit der besten Lagerstätten ausgeschöpft worden ist und hauptsächlich Erzlagerstätten geringerer Qualität verblieben sind.

Abbildung 20 veranschaulicht, wie die Extraktionskosten aufgrund von besserem und tieferem Schürfen, verbesserten Arbeitsverfahren, höherer Mechanisierung, effizienterer technischer Extraktionsmethoden und verbesserten Extraktionstechnologien zurückgegangen sind. In den Jahren nach 1990 wurden die Kosten durch den Wegzug in Niedriglohnländer, in denen die Externalitäten nicht bezahlt werden, noch weiter reduziert. Dieser Abwärts-Wettlauf hat die Auswirkungen der geringeren Erzgehalte viele Jahre ausgeglichen. Von 1930 bis 1980 lagen die Aufbereitungskosten für Erz bei ca. 40 USD/Tonne; der Wegzug in Niedrigkostenländer zusammen mit verbesserten Methoden hat diese jedoch auf ca. 25 USD/Tonne gesenkt. In letzter Zeit scheint es, als ob dieser Trend zu Ende gehen würde, da es keine neuen Standorte gibt, wo es möglich sein könnte, Arbeitern noch weniger für noch mehr Arbeit zu zahlen. Wichtige technische Innovationen waren verbesserter Transport, Abbau

in großem Maßstab (Bulk Mining), verbesserte Gewinnung und Raffination und die zwischen 1900 und 1920 entwickelte Schaumflotation. Die großen Porphyry-Lagerstätten wurden zwischen 1920 und 1930 entdeckt. Geophysikalische Erkundungen aus der Luft gab es ab 1945-1955, bessere geologische Modelle liegen seit den 1960-1970er Jahren vor, die Rationalisierung der Produktionsprozesse begann 1980-1990. Bis zu dem Zeitpunkt, an dem das Schwinden der Erzqualität nicht mit Effizienz- und Technologiegewinnen und weiteren Lohnsenkungen ausgeglichen werden kann, wird sich die förderbare Gesamtmenge (Ultimately Recoverable Reserve, URR) im Laufe der Zeit erhöhen (Crowson 2011), sich jedoch anschließend einem Grenzwert annähern. Es scheint, dass sich die Ressourcenschätzungen für Kupfer auf 3,5 bis 4 Milliarden Tonnen einpendeln.

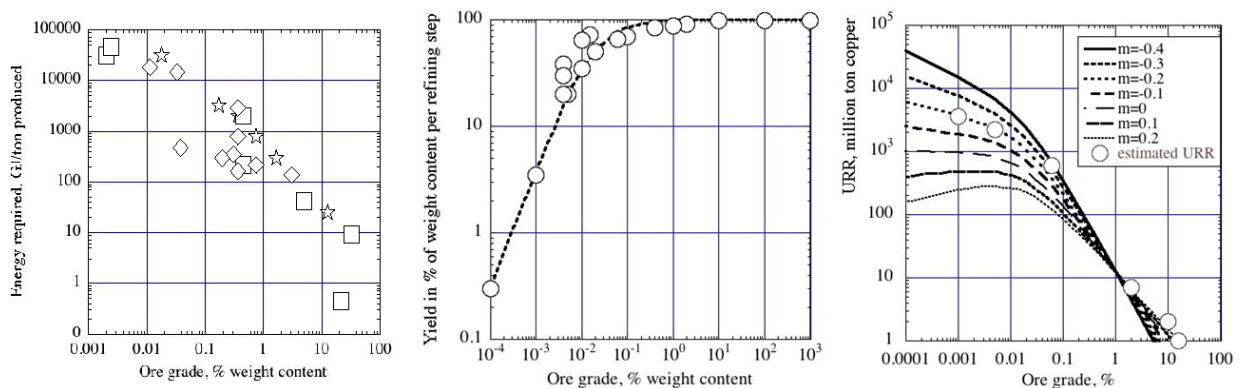
Abbildung 20: Erläuterung der Kostenpreiskurve für die Kupferextraktion



Es scheint, dass sich die Ressourcenschätzungen für Kupfer auf 3,5 bis 4 Milliarden Tonnen einpendeln. Der Kupfererzgehalt hat sich von einem Bereich zwischen 27-15 % vor hundert Jahren auf einen Bereich zwischen 0,8-3 % heutigen (2014) Kupfergehalts verringert, was teilweise im Weltmarkt-Kupferpreis durch höhere Produktionspreise reflektiert wird. Die Energiekosten steigen bei fallendem Erzgehalt. Die Quadrate, Kreise und Sterne repräsentieren Daten zu Kupfer, Nickel und Gold aus der Literatur. Der Extraktionsgewinn (Y) kann heruntergehen, wenn wir auf sehr kupferarme Erze treffen (Abbildung 21c). Der Ertrag kann mit wiederholter Extraktion erhöht werden. Die Energiekosten der Separationsarbeiten eskalieren schnell, wenn sich die Anzahl der Verarbeitungsschritte erhöht.

Aus der vorherigen Abbildung können wir die Gleichung für Energieverbrauch in GJ pro Tonne produzierten Metalls in Bezug auf den Erzgehalt in % ermitteln, was die folgende Gleichung in GJ pro Tonne extrahierten Metalls ergibt. Die Gleichung wurde in WORLD 6 eingebunden. Die Schätzung der URR berücksichtigt Erzgehalt, Ertrag und die für die Extraktion erforderliche Energiemenge. Die URR für ein Metall kann mit einer Kombination von Gleichungen berechnet werden, um zu der Kombination von Ertrag und Erzgehalt allein zu gelangen. Wenn wir dann noch die Energiebeschränkung aus der Gleichung hinzufügen gelangen wir zu der unten abgeleiteten generischen Formel.

Abbildung 21: (a) Energiekosten; (b) Extraktionsgewinn; (c) URR als Funktion des Erzgehalts



a; Energy cost of extraction b; Yield versus ore grade c; URR as a function of ore grade

Die generische Gleichung für die URR lautet:

$$URR = \frac{k_{URR} * Z^m}{E * (1 + 80 * Z^n)}$$

URR ist die förderbare Gesamtmenge (Ultimately Recoverable Reserve). „Z“ ist der höchste Erzgehalt für die Festlegung der URR. „k<sub>URR</sub>“ ist auf das geförderte Metall bezogen. Diese Gleichung verrät uns, dass die Einbeziehung von großen Lagerstätten sehr niedriger Qualität durch die geringen Erträge gemildert wird, die bei niedrigen Erzgehalten möglich sind, sowie durch die Energiekosten, die sich mit sinkenden Erzgehalten erhöhen. Wenn der Erzgehalt nach unten geht, kann es theoretisch so aussehen, als ob sich die extrahierte Menge schnell erhöht, der fallende Ertrag macht dies jedoch gleichzeitig unerheblich, da wir sie nicht effizient extrahieren können. Die extrahierbaren Mengen von Indium, Germanium, Gallium, Tellur, Selen, Bismut und Antimon wurden als Prozentgehalt dieser extrahierbaren Mengen von Grundmetall angegeben. Die URR entspricht den bis heute gewinnbaren Ressourcen zuzüglich der bis dahin extrahierbaren Menge. Die extrahierbaren Mengen für Kupfer, Zink und Blei wurden zu Beginn der Modellsimulation im Jahr 1800 festgelegt, die in Bezug auf den Erzmetallgehalt geschichtet wurde.

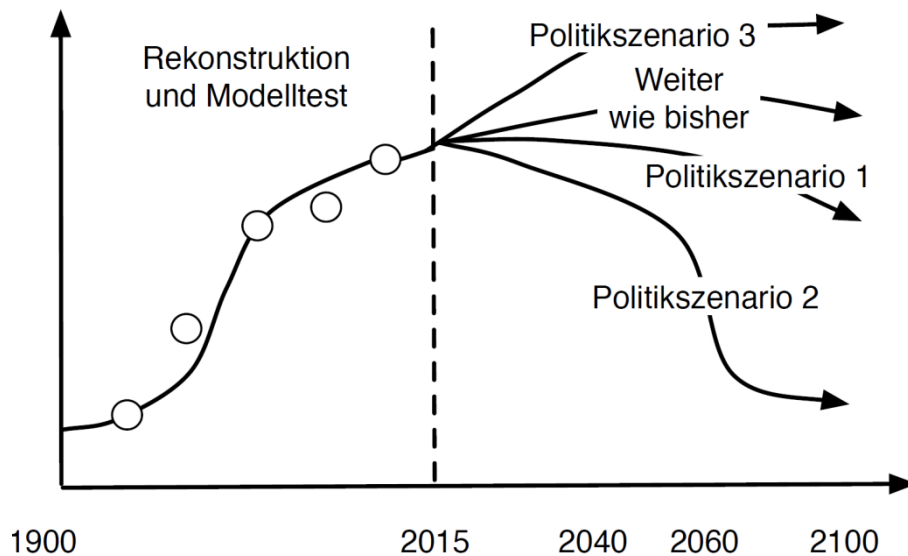
## 7.4 Simulation von Politikszenerarien im WORLD-Modell

Die hier beschriebene Parametrisierung repräsentiert den Basisreferenzfall für das Modell (**Business-as-Usual**-Szenario), wo außer den bestehenden weltweiten Entwicklungen keine zusätzlichen Entwicklungen zu wesentlichen Änderungen führen. Die Welt macht wie sonst mit unveränderten Paradigmen weiter. Die Richtlinie tritt auf zwei Arten in das Modell ein:

- Die Parametrisierung wird geändert, um den untersuchten Richtlinienänderungen zu entsprechen. Dies würde die numerischen Werte für Schlüsselparameter ändern.
- Die Struktur bestimmter Teile des Modells kann sich entsprechend der grundsätzlichen strukturellen Änderungen in der Gesellschaft oder in der Wirtschaft ändern.

Die Modellparametrisierung hat zwei Teile. Der erst Teil legt das Modell mit den historisch korrekten Parametern fest, um die Vorgeschichte für eine Reihe von Parametern zu beschreiben. Normalerweise wird das Modell eine Ausgabe in vielen Parametern bieten. Dieser Zeitraum läuft von 1900 bis zur Gegenwart, 2015. Dieser Teil bleibt nach der anfänglichen Verifizierung unverändert. Die Beibehaltung dieser Parameter stellt den Basisfall des WORLD 6-Modells dar und entspricht Business-as-Usual.

Abbildung 22: Verschiedene Sätze von Parametrisierungen für das WORLD-Modell für verschiedene Entwicklungspfade; „Weiter wie bisher“ oder Politikszenerarien 1-3



Das Modell hat zwei Sätze von Parametrisierungen, einen beginnend mit dem Jahr 1900 bis zur Gegenwart (2015), und den zweiten vom jetzigen Zeitpunkt (2015) bis weit in die Zukunft, mindestens bis 2100 und höchstens bis 2400. Die Grundparametrisierung von 1900 bis heute ist der Grundlauf, der die Rekonstruktion der Vergangenheit ermöglicht. Die Fortsetzung dieser Parametrisierung in die Zukunft ohne (radikale) Änderungen der Richtlinie ist der Basisfall. Nach dem Jahr 2015 werden einige Parameter geändert, um mögliche Richtlinienänderungen zu reflektieren.

Abbildung 22 veranschaulicht das Verhältnis des Grundlaufs, des Basisszenarios und der Politikszenerarien. Die zusätzlichen Läufe für unterschiedliche zu untersuchende Politikszenerarien werden Änderungen der Parametrisierung nach dem Jahr 2015 erfordern. Vor dem Jahr 2015 bleibt in allen Läufen alles unverändert bestehen.

Einige der wichtigsten ressourcenpolitischen Instrumente, deren (zumindest) teilweise Simulation im SimRes-Modellierungsrahmen erwartet wird, sind:

1. **Preisinterventionen.** Finden statt, wenn der Preis eines Wirtschaftsguts geändert wird. Die Intervention ändert den Marktpreis und die Stärke der Feedbacks, die er im System hat. Wenngleich Gesetzgeber häufig Gebrauch von diesen Interventionen machen, so erwarten sie dabei jedoch eine lineare Reaktion. Normalerweise gibt es dynamische Systemwechsel und der System-Output-Effekt ist niemals linear. Es ist ein Modell erforderlich, um die Folgen wesentlicher Änderungen der Politikszenerarien ordnungsgemäß anzusprechen und die Auswirkungen in Bezug auf effiziente Ressourcennutzung, genutzte absolute Mengen und dahingehend zu bewerten, ob diese innerhalb der nachhaltigen Liefergrenzen liegen oder nicht.
  - a) **Preisintervention:** Im Modell würde der Preis durch einen festgelegten Betrag (das beim Kauf aufgeschlagene Pfand) auf den durch die Richtlinie ausgewählten Rohstoff erhöht oder gesenkt. Der Preis kann mit einer Steuer erhöht oder durch einen Zuschuss gesenkt werden. Dies würde passieren, nachdem der Preismechanismus den Marktpreis vor der Intervention festgelegt hat. Pfand auf ein Rohmaterial würde in WORLD 6 stattfinden.
  - b) **Führung:** Auf einen konstanten Wert festgelegt. Auf globaler Ebene könnte dies in WORLD 6 stattfinden, wenn kein funktionierender Markt operieren würde.



2. **Pfandsystem.** Dabei handelt es sich um eine doppelte Preisintervention, die zur Steigerung von Recycling eingesetzt wird. Unter den meisten Umständen funktioniert das sehr gut. Die Doppelwirkung entsteht aus der Tatsache, dass sie den Preis an einer Stelle im System nach oben treibt, das Geld jedoch an einer anderen Stelle zurücklegt. Das Pfand geht häufig ganz oder teilweise an den Mittelsmann, der das Recycling vornimmt.

- a) **Einzug des Pfands:** In dem Modell würde der Preis durch einen festgelegten Betrag (das Pfand) auf den durch die Richtlinie ausgewählten Rohstoff erhöht werden. Dies würde passieren, nachdem der Preismechanismus den Marktpreis vor der Intervention festgelegt hat.
- b) **Ausgabe des Pfands:** Der Einzug des Pfands nach dem Recycling würde als zusätzliche Marge auf den Rohstoffpreis aufgeschlagen werden, wenn das Recycling beendet ist (Wiedereinnahme des Pfands).

### 3. Regulierung.

- a) **Verbot:** Das bedeutet, dass bestimmte Tätigkeiten verboten sind. Daraus folgt, dass eine solche Tätigkeit im Modell gestoppt werden würde, und nur unter „Policy Leakage“ möglich wäre.
  - Im Modell würde dies durch Ordnungsrecht (command and control) erzielt werden, das bestimmte Tätigkeiten entsprechend der Politikvorgaben reglementiert, jedoch einem bestimmten Teil „durchsickern“ lässt. Dies würde den Effekt von Korruption und Ineffizienz der Regierung erklären.
  - **Erzwingende Funktion:** Ein Gesetz kann erlassen werden, welches verlangt, dass eine bestimmte Handlung vorgenommen wird. Wir würden das Durchsickern eines bestimmten Teils gestatten müssen, um die meisten dieser Systeme zu reflektieren. Bei erzwingenden Funktionen ist das Durchsickern normalerweise groß und neigt dazu, die Gestalt von Korruption anzunehmen. Dies würde den Effekt von Korruption und Ineffizienz der Regierung erklären.
- b) **Quoten:** Das bedeutet, dass nur eine bestimmte Höchstmenge pro Jahr extrahiert werden kann, nach dem die Extraktion gestoppt wird oder alternativ, dass die Versorgung des Markts eingeschränkt ist und recyceltes Material bevorzugt wird, bevor es zu weiterer Extraktion kommt, oder dass eine Höchstmenge durch Extraktion entnommen und die Extraktionstätigkeit anschließend eingestellt wird.
  - **Erzwingende Funktion:** Im Modell würde dies durch Führung erzielt werden, jedoch einem bestimmten Teil gestattet werden, durchzusickern. Dies würde den Effekt von Korruption und Ineffizienz der Regierung erklären. Ein typisches Beispiel wären fossile Kohlenstoff-Brennstoffe, bei denen wir, um eine bestimmte Temperaturerhöhung nicht zu überschreiten, bei der kumulativen Extraktion von Kohle, Erdgas und Öl eine Grenze festlegen würden, die nicht überschritten werden dürfte.
- c) **Förderung:** Die Richtlinie würde von Rechts wegen verlangen, dass bestimmte Tätigkeiten stattfinden. Eine davon könnte zum Beispiel verpflichtendes Recycling sein. Etwas Altes kann nicht ersetzt werden, bevor es zum Recycling gegeben worden ist.

- **Wirtschaftliche Anreize in Verbindung mit angepasster Infrastruktur.** Die Regierung kann Recycling verpflichtend machen und auch direkt oder indirekt die Infrastruktur dafür zur Verfügung stellen. Dies kann mit Pfandsystemen, Steuern und Einstellungsänderungen kombiniert werden.
- **Erzwingende Funktion:** Im Modell würde dies durch Führung erzielt werden, jedoch einem bestimmten Teil gestattet werden, durchzusickern. Dies würde den Effekt von Korruption und Ineffizienz der Regierung erklären. Im Modell würde dies durch die Verknüpfung von Recycling mit Vertrieb durch die Führung erfolgen.

4. **Einstellungsinterventionen.** Dabei handelt es sich um ein soziales Instrument, bei dem eine bestimmtes Verhalten von Personen oder Organisationen unterstützt werden soll.

- a) **Erziehung** wirkt bei der Gestaltung der Einstellung junger Menschen innerhalb bestimmter Grenzen, welche durch die Änderungsfähigkeit der inhärenten Kultur, festgelegt werden. Dies wirkt bei Kindern am besten und bei Senioren am wenigsten.
  - Im WORLD-Modell würde dies durch die Änderung des Wertes bestimmter Ratenkoeffizienten wie zum Beispiel für Nachfrage, Recycling oder bestimmte Verzögerungen im System erfolgen. Erziehung ist häufig effizient, hat jedoch eine lange Verzögerungszeit, zuweilen bis zu 20 bis 40 Jahre. Dies könnte im WORLD-Modell generisch erfolgen.
- b) **Informationen während Erziehung und Pflege im Kleinkind- und Jugendalter.** Der Nettoeffekt wäre derselbe wie bei Erziehung, würde jedoch erfordern, dass der Erziehungsschritt 10 bis 15 Jahre früher erfolgt. Gold ist ein gutes Beispiel dafür. Jeder Mensch sieht im Laufe seines Lebens immer wieder, dass es sehr dumm ist, Gold wegzuworfen. Es ist bekannt, dass Gold einen hohen Wert hat. Daher werden die meisten Menschen früher oder später Gold recyceln, statt es in den Müll zu werfen. Dies ist häufig effizient, hat jedoch eine lange Verzögerungszeit, normalerweise 20 bis 40 Jahre.
  - Im WORLD 6-Modell würde dies durch die Änderung des Wertes bestimmter Ratenkoeffizienten wie zum Beispiel für Nachfrage, Recycling oder bestimmte Verzögerungen im System erfolgen
- c) **Informationskampagnen** können zu kleineren kurzfristigen Änderungen führen, scheinen jedoch weniger dauerhafte Auswirkungen im System zu haben. Ein Beispiel dafür ist das Recycling von Aluminiumdosen. Sowohl Informationen als auch ein Pfandsystem wurden eingesetzt. Die Recyclingquote liegt bei 80 % anstatt bei 40 %, was durch die Marktmechanismen allein erfolgen würde. Dies ist häufig effizient, hat jedoch eine lange Verzögerungszeit, normalerweise 20 bis 40 Jahre.
  - Im WORLD-Modell würde dies durch die Änderung des Wertes bestimmter Ratenkoeffizienten wie zum Beispiel für Nachfrage, Recycling oder bestimmte Verzögerungen im System erfolgen

## 5. Marktlösungen

- a) **Substitution:** Technologieentwicklung und Marktänderung können dafür sorgen, dass Materialien oder Wirtschaftsgüter obsolet und durch etwas Anderes ersetzt werden.

- Im WORLD 6-Modell würde dies durch die Änderung der Nachfrage nach einer Art von Rohmaterial und eine entsprechend höhere Nachfrage nach einem anderen Rohmaterial erfolgen.
- b) **Technologische Innovation** könnte die Funktion oder Dienstleistung bei niedrigerer Ressourcennutzung liefern können. Dies kann ohne Interaktion mit der Regierung oder als Anstoß von Forschung und Entwicklung durch die Regierung erfolgen.
- Im WORLD 6-Modell würde dies durch (1) Änderung der Nachfrage nach einer Art von Rohmaterial und entsprechender Erhöhung der Nachfrage nach einem anderen Rohmaterial, (2) Reduzierung oder Erhöhung der Nachfrage nach den gleichen Ressourcen im Vergleich zu früheren Signaländerungen bei der Ressourcennutzungseffizienz erfolgen. Es ist jedoch darauf zu achten, wozu die erhöhte Ressourceneffizienz in einem Sektor im gesamten System führen würde. In vielen Fällen schafft die erhöhte Effizienz Liquidität durch die Senkung der Kosten, und wenn diese zusätzliche Marge für die Erhöhung von Konsum eingesetzt wird, kann dies am Ende zu mehr Ressourcennutzung anstatt weniger führen.
- c) **Unterstützung für Paradigmenwechsel.** Dabei handelt es sich um das radikalste politische Instrument. Das ganze Prinzip, wie etwas in einer Gesellschaft funktioniert, wird geändert. Dies bringt normalerweise eine Strukturänderung des Modells (soziale, organisatorische, jedoch möglicherweise auch physische Strukturänderungen) mit sich und geht über die Änderung der Parametereinstellungen hinaus. Es werden neue Kausalitäten eingebracht, alte Kausalitäten entfernt oder beides. Diese Änderungen können zuweilen geplant und organisiert werden. Ohne sorgfältige Systemanalysen und investigative Simulationen können sie sehr riskant sein und mit großen sozialen und wirtschaftlichen Änderungen einhergehen, von denen einige als unerwünscht gelten könnten:
- Geplante Reform, die zu einem konstruierten Paradigmenwechsel führt
  - Ungeplante Reform oder friedliche Revolutionen, die zu einem geplanten Paradigmenwechsel führen
  - Revolution oder öffentlicher Aufstand. Falls die Bedingungen auf der sozialen Ebene untragbar werden, ist dies absolut möglich und kann nicht ignoriert werden. Viele Länder haben aufgehört, zu existieren, und viele Menschen sind gestorben, weil sie entschieden haben, das Risiko zu ignorieren

Einzelne oder eine Kombination verschiedener politischer Maßnahmen werden ergriffen, um verschiedene mögliche Richtlinien umzusetzen. Wir könnten auch mit unterschiedlichen Einleitungszeiten für unterschiedliche Maßnahmen oder Maßnahmekombinationen arbeiten. Die meisten lokalen oder nur auf Deutschland bezogenen Richtlinien werden zumeist in GINFORS wiedergegeben oder durch Forderungen in WORLD 6 eingebracht. Globale Richtlinienänderungen werden normalerweise sowohl im GINFORS- als auch im WORLD 6-Modell implementiert.

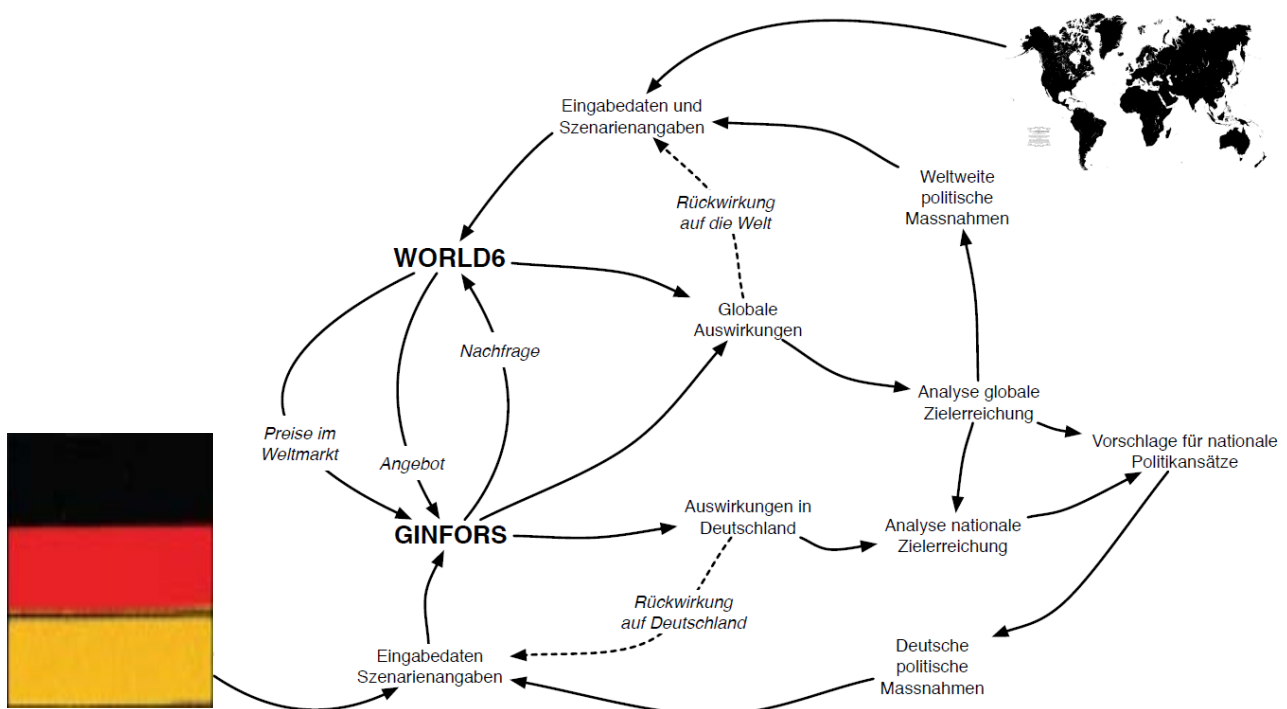
Daher besteht eine erste wichtige Aufgabe darin, zu prüfen, wie gut das WORLD 6-Modell die aufgezeichnete Historie rekonstruieren kann. Die Philosophie ist, dass wenn das auf bekannten Kausalitäten basierte Modell in der Lage ist, die aufgezeichnete Historie ausreichend gut zu beschreiben, wir der Ansicht sind, dass das Modell die wichtigsten Eigenschaften des Systems ausreichend gut erfasst hat.

Sobald dies erreicht ist, wird das Modell eingesetzt, mögliche Zukünfte auf der Grundlage von bestimmten, für die Zukunft gültigen Annahmen zu untersuchen.

## 7.5 Interaktion des Modells mit GINFORS

Das Modell kommuniziert mit dem GINFORS-Modell. Abbildung 23 veranschaulicht, wie das WORLD 6-Modell in einer Feedbackschleife mit dem GINFORS-Modell verläuft. Das GINFORS-Modell bildet globale wirtschaftliche Entwicklungen für 39 Regionen und 59 Wirtschaftsgüter und Dienstleistungen ab. Diese Transaktionen werden außerdem in eine globale Nachfrage nach einer Reihe von Materialressourcen und Energie aggregiert. WORLD 6 benutzt diese Nachfrage als Eingabe und erzeugt die verfügbare Versorgung mit Ressourcen und Energie sowie deren Preis und gibt diese Werte an das GINFORS-Modell weiter. Es gibt die Möglichkeit, die Bevölkerungsentwicklung dem internen Bevölkerungsmodell des WORLD 6-Modells zu entnehmen. Der nächste Schritt ist die iterative gemeinsame Nutzung von GINFORS und WORLD 6. GINFORS ist bedarfsorientiert und geht von einem ausreichenden Angebot aus. WORLD ist angebotsorientiert und macht Annahmen in Bezug auf Nachfragen. Die beiden Modelle scheinen sich gut zu ergänzen. Eine wichtige erste Aufgabe besteht darin, zu prüfen, wie gut das Modell WORLD 6 die aufgezeichnete Historie rekonstruieren kann. Die Philosophie ist, dass wenn das auf bekannten Kausalitäten basierte Modell in der Lage ist, die aufgezeichnete Historie ausreichend gut zu beschreiben, wir der Ansicht sind, dass das Modell die wichtigsten Eigenschaften des Systems ausreichend gut erfasst hat. Das Modell WORLD 6.0 läuft in einer Feedbackschleife (soft link) mit dem GINFORS-Modell. WORLD 6.0 nutzt diese Nachfrage als Eingabe und erzeugt die verfügbare Versorgung mit Ressourcen und Energie sowie deren Preis und gibt diese Werte an das GINFORS-Modell weiter. Sobald dies erreicht ist, wird das Modell eingesetzt, mögliche Zukünfte auf der Grundlage von bestimmten, für die Zukunft gültigen Annahmen zu untersuchen. Der nächste Schritt besteht darin, ein ähnliches Verfahren für weitere, verfügbare Daten für das kombinierte WORLD 6/GINFORS-Modellsystem zu prüfen. Wenn beide Konfigurationen die aufgezeichnete Historie ausreichend gut rekonstruieren können, haben wir ein überzeugendes Argument dafür, zuverlässige Prognosen erstellen zu können. Jedes Modell (GINFORS/WORLD) kann individuell über ergänzende Ergebnisse berichten, welche durch das andere Modell nicht behandelt werden können.

Abbildung 23: Feedbackschleife zwischen dem WORLD- und dem GINFORS-Modell

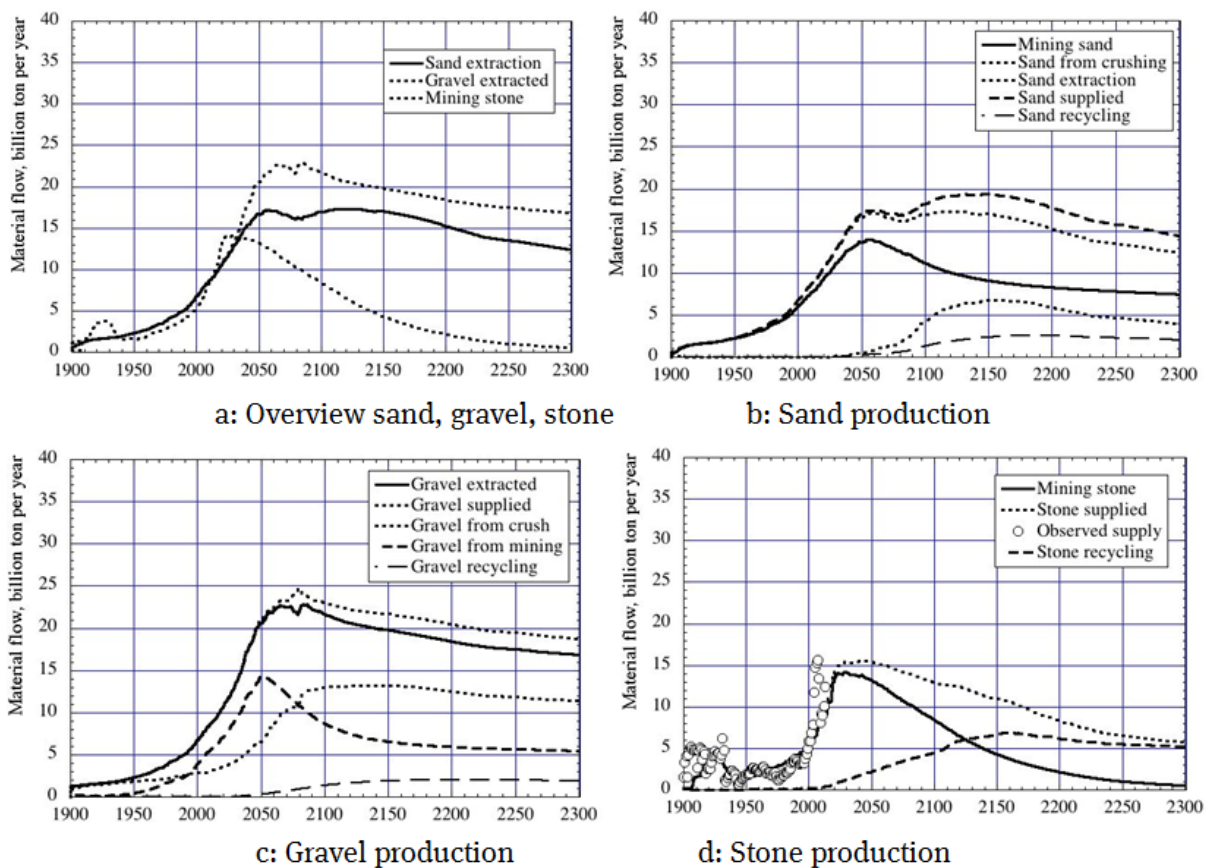


## 7.6 Ausblick: Konsistenzbedarf

Heute werden die beiden Modelle in der Feedbackschleife manuell bedient. Nachfrageergebnisse des GINFORS-Modells werden in das WORLD-Modell übernommen und Simulationsergebnisse werden generiert. Die WORLD-Ergebnisse für das Angebot von Metallen und unterschiedlichen Energiearten und der damit verbundene Marktpreis werden zur Änderung seiner Ergebnisse an GINFORS zurückgegeben. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis er konsistente Ergebnisse liefert. Das USGS-estimat wurde in das WORLD 6-Modell integriert und anhand beobachteter Daten über das Angebot am Markt wie durch die United States Geological Survey Minerals-Datenbank für das Jahr 2015 berichtet verglichen. Die mit dem GINFORS-Modell erstellten Prognosen wurden ebenfalls überprüft (siehe Abbildung 24).

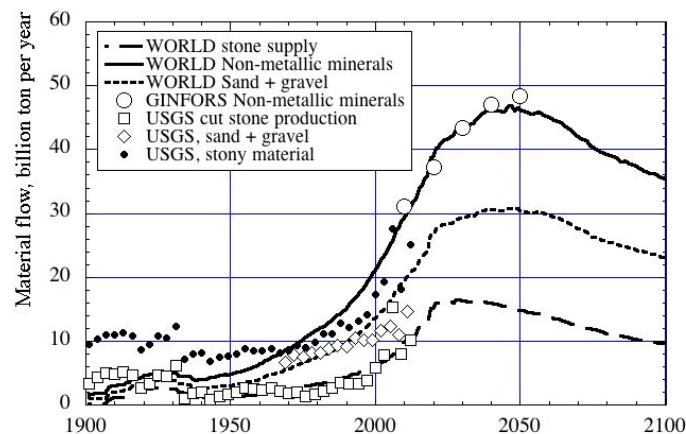
Es wurden ähnliche Konsistenzprüfungen mit kombinierten GINFORS- und WORLD-Modelltests für Öl, Kohle, Erdgas, Stahl und Kupfer durchgeführt.

Abbildung 24: Übersicht der Modellergebnisse für Extraktion (a) Angebot, Recycling von Sand (b) Kies (c) und Gestein für den Bau (d) unter Nutzung der Nachfrage aus dem GINFORS-Modell als Eingabe



Bei den dargestellten Mengen handelt es sich um Milliarden Tonnen Gesteinsmaterial; Flüsse sind in Milliarden Tonnen Material angegeben.

Abbildung 25: Integration des USGS-estimate mit dem WORLD 6-Modell



Auf einer theoretischen Ebene haben Weimer-Jehle und Kosow (Kapitel 2 in diesem Reader) den Konsistenzbedarf bereits angesprochen, welcher aus explizit und implizit eingebundenen Szenarioannahmen in den beiden Modellierungsstudien entsteht. Anscheinend kann ein Vergleich und eine Synthese der kombinierten Modellierungsmethoden große Schwachstellen aufweisen, falls die einzelnen Modellbeiträge keine quantitativen Einsichten für ähnliche qualitative Szenarien unter weitest möglicher Nutzung derselben Rahmendaten (exogene Parameter) bieten. Wir können im Allgemeinen das Engagement aller Modellierer annehmen, diese Angelegenheit in integrierter Modellierungsarbeit zu berücksichtigen, jedoch können abweichende Systemgrenzen sowie unterschiedliche Modellspezifikationen die damit verbundenen Harmonisierungsbemühungen erhöhen, sodass angesichts begrenzter Ressourcen die Möglichkeit der Zuweisung konsistenter ausformulierter Szenarien an sämtliche beteiligte Simulationsstudien reduziert ist. In solchen Fällen könnte die CIB-Methode von Weimer-Jehle und Kosow eine gemeinsame kostengünstige Schnittstelle für die Etablierung eines gemeinsamen qualitativen Szenarioverständnisses in eher unterschiedlichen Modellierungsversuchen bieten.

Ob und in welchem Umfang diese Methode anzuwenden ist, muss jedoch angesichts bereits bestehender Modellschnittstellen diskutiert werden. Die im SimRes-Modellrahmen angewendete Soft-Link-Methode hat gut definierte, jederzeit verfügbare Gateways zur Konsolidierung der Informationsgehalte von GINFORS3 und World in qualitativ, aber auch quantitativ konsistente Szenarioangaben. Da die beiden Modelle in unterschiedlichen Wissenschaftsgemeinden entstanden sind, unterscheiden sie sich in ihren wissenschaftlichen Zielen und ihren konzeptuellen Abbildungsverfahren. In dieser Hinsicht können die beiden Modelle daher als abgeschlossene Bausteine des verbundenen SimRes-Simulationsrahmens verstanden werden. Darüber hinaus haben beide Modelle ein sehr hohes Maß an Endogenität. Daher, im Vergleich zu partiellen Modellierungsmethoden, erfordert der Versuch, die Ergebnisse der beiden Modelle an einem gemeinsamen Szenarioverständnis auszurichten, keine umfangreiche Überwachung komplexer Interrelationen zwischen weit gestreuten exogenen Modelleingaben. Jedoch sind die dem endogenisierten Modellmechanismus unterliegenden Annahmen für eine Interpretation der Simulationsergebnisse (kritisch und) transparent zu reflektieren. Obwohl der Bedarf nach der Erörterung der Annahmen für die exogenen Modelleingaben geringer ausfällt als für partielle Modellierungsmethoden, wird der Vergleich der Simulationsergebnisse ohne die Reflexionen über die der Endogenität unterliegenden Angelegenheiten jedoch begrenzt sein.

Eine offenbar erforderliche Harmonisierungsaufgabe in Bezug auf exogene Modelleingaben erstreckt sich auf die Entwicklungen der Weltbevölkerung. Diese Aufgabe kann jedoch direkt ausgeführt werden, da Bevölkerungszahlen exogene Variablen des GINFORS3-Modells darstellen. Unter Bezug auf fortgesetzte Bemühungen zur Erhöhung der Szenariokonsistenz innerhalb des „soft-linked“ SimRes-

Ansatzes präsentieren Meyer und Distelkamp (Kapital 5 in diesem Reader) einen bereits angewandten Fall: Verschiedene Nachfragekategorien des WORLD-Modells werden für gewöhnlich durch exogene Hochrechnungen der Intensitäten der Bevölkerung pro Kopf angetrieben. Im „soft-link“-Ansatz konnte die exogene Hypothese bezüglich der Metallnachfrage bereits durch endogen bestimmte Nachfrageintensitäten der GINFORS3-Prognosen ersetzt werden. Dies ermöglicht gleichzeitig auch die endogene Abbildung von durch das WORLD-Modell zur Verfügung gestellten globalen Metallpreisen in GINFORS3 (was normalerweise exogen zu GINFORS wäre). Offensichtlich können ähnliche Anpassungen auch für weitere Nachfragekategorien (z. B. fossile Brennstoffe) vorgenommen werden). In Bezug auf die vorherige Interpretation von CIB als Darstellung einer kostengünstigen Schnittstelle für die Festlegung gemeinsamer qualitativer Szenario-Parametrierungen musste sich das SimRess-Projekt daher bisher nicht auf diese Methode stützen. Dies schließt nicht aus, dass CIB-Anwendungen sich auch für zukünftige Entwicklungen von gemeinsamen WORLD-GINFORS-Szenarioanalysen über das laufende SimRess-Projekt hinaus als nützlich erweisen könnten.

## 7.7 Literatur

- Crowson, P.C.F., 2011. Mineral reserves and future minerals availability. *Mineral Economics*. 2011; 24:1-6.
- Greer, J.M. 2008. *The long descent. A User's Guide to the End of the Industrial Age*. New Society Publishers. Gabriola Island, Canada.
- Heinberg, R., 2011, *The end of growth. Adapting to our new economic reality*. New Society Publishers, Gabriola Island, Canada.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L. Randers, J., Behrens, W. 1972. *Limits to growth*. Universe Books, New York.
- Meadows D.H, Meadows D.L., Randers J. 1993. *Beyond the limits: confronting global collapse, envisioning a sustainable future*. Chelsea Green Publishing Company.
- Meadows D.H, Randers, J., Meadows D.L. 2005. *Limits to growth, the 30 year update* Earthscan, Sterling VA.
- Mudd, G.M., 2007. Gold mining in Australia: linking historical trends and environmental and resource sustainability. *Environmental Science & Policy* 10: 629-644.
- Mudd, G.M., 2009. Nickel Sulfide Versus Laterite : The Hard Sustainability Challenge Remains. *Proc. 48th Annual Conference of Metallurgists, Canadian Metallurgical Society, Sudbury, Ontario, Canada*.
- Mudd, G.M. 2012. Sustainability reporting and the platinum group metals: A global mining industry leader? *Platinum Metals Review*, 56:2-19
- Mudd, G.M., and Weng, Z., 2012. Base metals, in Letcher, T., and Scott, J.L., eds., *Materials for a sustainable future: United Kingdom*, Royal Society of Chemistry, p. 11–59.
- Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., Koca, D., 2014. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resources, Conservation and Recycling* 87:158-174
- Sverdrup, H., Koca, D., Ragnarsdottir, K. V. 2014. Investigating the sustainability of the global silver supply, reserves, stocks in society and market price using different approaches. *Resources, Conservation and Recycling: Vol. 83:121-140*,
- Sverdrup, Harald and Ragnarsdottir, Kristin Vala, 2014. *Natural Resources in a planetary perspective. Geochemical Perspectives Vol. 3, number 2, October issue 2014. 2:129-341. European Geochemical Society*.
- Sverdrup, H., Koca, D., Ragnarsdottir, K.V. 2015. Aluminium for the future: Modelling the global production, assessing long term supply to society and extraction of the global bauxite reserves. *Resources, Conservation and Recycling*. 103:139-154
- Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., 2016d. The future of platinum group metal supply; An integrated dynamic modelling for platinum group metal supply, reserves, stocks-in-use, market price and sustainability. *Resources, Conservation and Recycling* 114: 130-152
- Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K.V., 2016e. Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model. *Resources, Conservation and Recycling* 114: 112-129

Sverdrup, H. U., Ragnarsdottir, K. V., Koca, D. 2017. An assessment of global metal supply sustainability: Global recoverable reserves, mining rates, stocks-in-use, recycling rates, reserve sizes and time to production peak leading to subsequent metal scarcity. *Journal of Cleaner Production*, 140; 359-372



## 8 Simulation von Ressourcenschonungspolitik mit GINFORS im SimRes-Projekt: Systemgrenzen, Modellinteraktion, Indikatoren und Baseline-Ergebnisse

Mark Meyer<sup>1</sup> und Martin Distelkamp<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GWS mbh, Osnabrück

### 8.1 Kurzbeschreibung des Modells

#### 8.1.1 Datengrundlagen

GINFORS ist ein globales Multi-Regionen Input-Output (MRIO) Simulationsmodell, welches sich durch eine sehr detaillierte Modellierung des sozioökonomischen Systems von 38 Nationalstaaten sowie einer Region „Rest der Welt“ auszeichnet. Die aktuelle Modellversion GINFORS3 repräsentiert dabei die erste GINFORS-Version, die auf einer Zeitreihe von vollständig harmonisierten, nationalen Aufkommens- und Verwendungstabellen (supply and use tables, SUT) basiert.<sup>16</sup> Der entsprechende Ausgangsdatensatz, der zusätzlich auch mit umwelt- und energiebezogenen Informationen ausgestattet ist, wurde erstmals 2012 im Rahmen des World Input Output Database Projektes (WIOD, siehe auch <http://www.wiod.org/>) veröffentlicht.<sup>17</sup> Dieser Datensatz wurde von den Autoren des vorliegenden Beitrags um Angaben der Statistikabteilung der Vereinten Nationen (UN) zur Bevölkerung und zum Kontensystem der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) sowie um vom Internationalen Währungsfonds (IMF) veröffentlichte Daten zur finanziellen Lage (u.a. Öffentliche Verschuldung) ergänzt. Da sämtliche soeben genannten Datensätze auf Basis international anerkannter Buchungssystematiken erstellt wurden (siehe hierzu bspw. im europäischen Kontext EUROSTAT, 2008), ist die empirische Datenbank des GINFORS3-Modells durch ein hohes Maß an Objektivität, Reliabilität und Validität gekennzeichnet.<sup>18</sup>

#### 8.1.2 Modellstruktur und Berichtsumfang

Da eine vollständige Modellbeschreibung bereits von Meyer (2016) verfasst wurde, sollen in diesem Unterabschnitt lediglich wesentliche Modellstrukturen kurz umrissen werden. Dabei ist zunächst festzuhalten, dass GINFORS3 durch einen sehr hohen Endogenitätsgrad gekennzeichnet ist: Zentrale exogene Variablen sind lediglich die Bevölkerungsentwicklungen in den jeweiligen Modellregionen sowie globale Weltmarktpreise für zentrale Ressourcen. Weitergehende exogene Annahmen können zudem insbesondere für klimapolitische Szenarioelemente vorgegeben werden. Detailliertere Angaben hierzu folgen in Kapitel 8.2.

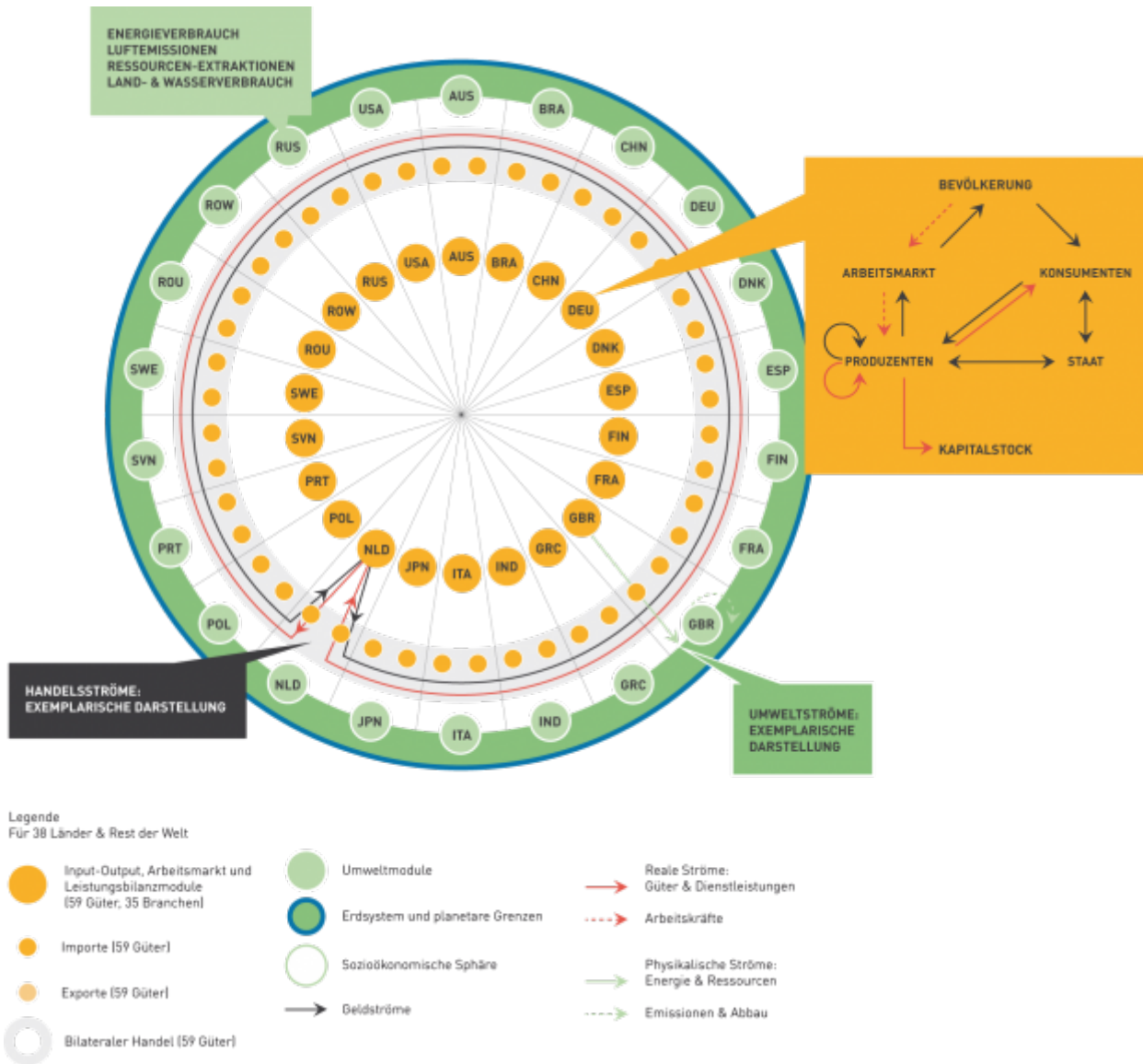
---

<sup>16</sup> Grundlegende Eigenschaften früherer GINFORS-Versionen sowie eine allgemeine Einführung in das akademische Anwendungsgebiet der MRIO-Analyse können bspw. dem Literaturüberblick von Wiedmann et al. (2007) entnommen werden.

<sup>17</sup> Weiterführende Informationen zu diesem Datensatz können (u.a.) Dietzenbacher et al. (2013) entnommen werden.

<sup>18</sup> Weitergehende Anmerkungen zu den oben genannten Gütekriterien empirischer Datensätze finden sich bspw. bei Winker (2006).

Abbildung 26: Schematische Darstellung zentraler Strukturen des integrierten Simulationsmodells GINFORS3



Auf Basis dieser exogenen Vorgaben erfolgt daraufhin für alle 38 Länder eine sehr detaillierte Modellierung des sozioökonomischen Systems.<sup>19</sup> Darüber hinaus werden globale Umweltzusammenhänge über ein Energie-Emissionen-Modul und ein Ressourcen-Modul umfassend abgebildet.<sup>20</sup> Der allgemeine Modellierungsansatz folgt dabei der generellen INFORUM-Philosophie (Almon, 1991), wonach

<sup>19</sup> Aufgrund statistischer Datenlücken weist die Modellierung der Region „Rest der Welt“ einen etwas geringeren Detailgrad auf.

<sup>20</sup> Interessierte Leser seien darauf hingewiesen, dass von den Autoren dieses Beitrags derzeit auch eine eigenständige Dokumentation des in GINFORS<sub>3</sub> implementierten Berechnungsalgorithmus zum Ausweis nationaler Primärrohstoffansprüchen in Rohstoffäquivalenten erarbeitet wird. Neben der historischen Analyse der in globalen Güterströmen über sämtliche Produktionsstufen gebundenen Materialmengen (siehe bspw. Bruckner et al., 2012, für eine entsprechende historische Analyse), ermöglicht dieser Algorithmus auch die modellendogene Projektion zukünftiger Primärrohstoffansprüchen. Diese Dokumentation sollte spätestens zum Jahresende 2016 vorliegen und ist dann selbstverständlich auf Anfrage bei den Autoren verfügbar.

Konsumenten, Produzenten und Investoren unter Bedingungen beschränkter Rationalität auf unvollkommenen Märkten den Strukturwandel in den einzelnen Ländern und den Wandel der internationalen Handelsstrukturen gestalten.

Produktions-, Handels- und Verwendungsverflechtungen werden dabei auf der Ebene von 59 Gütergruppen in einem Input-Output-System abgebildet und um Wirkungen auf die Beschäftigungen konsistent ergänzt. Im Zentrum des Modells steht dabei das bilaterale Handelsmodul, welches die Exporte und Importe von 59 Waren und Dienstleistungen zwischen 38 Ländern (EU27-Länder, Russland, Türkei, Brasilien, Kanada, Mexiko, Vereinigte Staaten von Amerika, China, Indien, Japan, Korea und Australien) und einer Region „Rest der Welt“ erfasst. Von jedem Land erhält das Handelsmodell die Importe und die Exportpreise nach Gütergruppen (siehe Abbildung 26). Umgekehrt liefert es die Exporte und die Importpreise an alle anderen Länder. Dabei ist der Anteil der Exporte eines Landes an den Importen einer Gütergruppe des importierenden Landes von der Preisrelation zwischen dem betreffenden Exportpreis und dem der konkurrierenden Länder abhängig.

Außerdem werden die Entwicklungen der nationalen Kontensysteme der VGR für die vier institutionellen Transaktoren „Private Haushalte“ und private Organisationen ohne Erwerbszweck“, „Unternehmen“, „Staat“ und „Ausland“ projiziert.<sup>21</sup> Neben vielen Details der Umverteilung zwischen Staat, Unternehmen und Privaten Haushalten durch das Steuersystem und die Sozialversicherung kann hierdurch für jeden Transaktor die Entwicklung des verfügbaren Einkommens sowie des Finanzierungssaldos betrachtet werden. Da das verfügbare Einkommen (im Zusammenspiel mit im Zeitablauf variablen Relativpreisrelationen) eine wesentliche Bestimmungsgröße unterschiedlichster Nachfragekomponenten repräsentiert, können in sämtlichen Simulationsrechnungen makroökonomische Rebound Effekte (siehe hierzu bspw. Sorrell und Dimitropoulos, 2008; Sorrell et al., 2009) stets konsistent abgebildet werden. Ferner erlaubt die endogene Bestimmung des Finanzierungssaldos des Staates die Berechnung des Schuldenstandes und damit die Berücksichtigung von Maßnahmen zur Schuldenbegrenzung. Auf diese Weise kann ausgeschlossen werden, dass die Simulationen eine internationale Finanzkrise implizieren.

Im GINFORS3-Modell bilden die amtlichen Input-Output-Rechnungen einen integralen Bestandteil zur produktionsseitigen Abbildung von Vorleistungsverflechtungen und internationalen Wertschöpfungsketten. Im Vergleich zu offenen und komparativ-statischen Input-Output Analysen sind GINFORS3-Modellrechnungen aber durch einen wesentlich höheren Konsistenzgrad gekennzeichnet: In GINFORS3 wird ein dynamischer Modellierungsansatz verfolgt, welcher Vorleistungs- und Endnachfrageentwicklungen im Zeitablauf in Abhängigkeit von empirisch geschätzten Preis- und Einkommenselastizitäten endogen projiziert und dabei auch die makroökonomischen Einkommenskreisläufe geschlossen abbildet sowie die Wirkungen des internationalen Wettbewerbs berücksichtigt. Damit weist GINFORS3 zentrale Eigenschaften eines vollständig integrierten Simulationsmodells auf: Die Auswirkungen nationaler (umwelt-)politischer Maßnahmen können in alternativen globalen Umfeldszenarien umfassend analysiert werden, wobei auch indirekt induzierte internationale spill-over Effekte stets automatisch mit abgebildet werden (vgl. hierzu auch Abbildung 26).

---

<sup>21</sup> Aus Platzgründen wird für diesen Beitrag auf eine detaillierte Darstellung der in der Modellierung umgesetzten Buchungssystematik zur endogenen Abbildung der Entstehungs-, Verteilungs- und Verwendungsrechnungen des Bruttoinlandsprodukts sowie des Bruttonationaleinkommens verzichtet. Grundlegende Informationen sowie weiterführende Details zur generellen Konzeption des hier angesprochenen Systems Volkswirtschaftlicher Gesamtrechnungen können aber bspw. bei Brümmerhoff und Grömling (2015) nachgelesen werden.

### 8.1.3 Parametrisierung

Verglichen mit komparativ statischen Analysen (siehe hierzu bspw. die entsprechenden Darstellungen im Kapitel 10) sind für eine dynamische Modellierung sozioökonomischer System-zusammenhänge deutlich umfangreichere Parametrisierungsarbeiten notwendig. In einem ökonometrisch spezifizierten Modell wie GINFORS3 werden die notwendigen Modellparameter mithilfe (panel-)ökonometrischer Methoden der Zeitreihenanalyse empirisch geschätzt. Im Gegensatz zu den in diesem Sammelband repräsentierten systemdynamischen Beiträgen (siehe hierzu die Kapitel 7 und 4), erfolgt die Modellierung der ökonomischen Kausalzusammenhänge dabei grundsätzlich theoriegeleitet. Dies bedeutet, dass bei Spezifikation der jeweiligen Reaktionsfunktionen stets alternative ökonomische Erklärungsansätze auf Basis der beobachteten Daten überprüft werden. Die Schätzung der jeweiligen Reaktionsparameter (bspw. Nachfrage- oder Angebotselastizitäten) ist somit stets mit einem Test alternativer theoretischer Kausalstrukturen verbunden.

Diese Vorgehensweise steht in enger Tradition zu dem im Umfeld der sogenannten Cowles Commission (siehe hierzu bspw. Christ, 1994) in den 30er bis 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts etablierten ökonometrischen Wissenschaftsverständnis. Siehe bspw. Fair (1992) für eine kritische Würdigung dieses Wissenschaftsverständnisses, welches aus wissenschafts-theoretischer Perspektive eng verbunden ist mit Poppers positivem Wissenschaftsbegriff (Popper, 1994). Bei der Parametrisierung der jeweiligen Reaktionsfunktionen in GINFORS3 wurde dabei, neben der statistischen Signifikanz der geschätzten Modellparameter, insbesondere folgenden Anforderungen hohe Aufmerksamkeit geschenkt:

- ▶ Wahl einer validen funktionalen Form: Die ökonomischen Kausalstrukturen des Modells orientieren sich an neoklassischen theoretischen Ansätzen. Unter Anwendung einer „sticky prices“ Hypothese werden dabei Ungleichgewichte an den Arbeits- und Kapitalmärkten explizit modelliert. Die wird (u.a.) dadurch erreicht, dass (im Unterschied zum neoklassischen Konkurrenzmarktgleichgewicht) die Unternehmen nicht als Mengenanpasser sondern als Preissetzer agieren. Hierzu wird eine Fehlerkorrektur-Modellierung (zu methodischen Details siehe bspw. Banerjee et al 1993) der Preisdynamik in Abhängigkeit von den Stückkosten vorgenommen.
- ▶ Konsistenz der geschätzten Modellparameter: Für sämtliche zu schätzende Reaktionsparameter kann auf Basis ökonomischer Theorien in der Regel bereits im Vorfeld ein sinnvoll interpretierbarer Wertebereich definiert werden. Sofern keine Schätzergebnisse innerhalb dieses Wertebereichs realisiert werden, ist die getestete Spezifikation zu verwerfen.

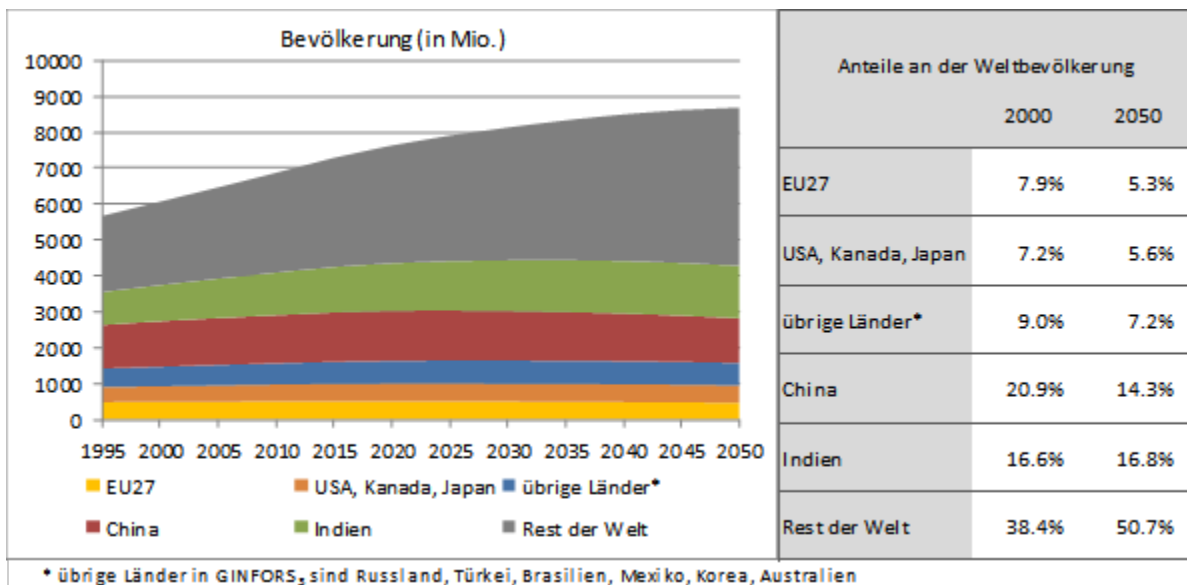
## 8.2 Darlegung ausgewählter exogener und endogener Parameter und ausgewählter verwendeter Rahmendaten

### 8.2.1 Exogene Modellvariable

Die folgende exemplarische Vorstellung zentraler Szenarioannahmen für alternative GINFORS3-Projektionen orientiert sich an laufenden Modellierarbeiten im Kontext des SimRess-Projekts (siehe hierzu auch Kapitel 6). Weiterführende Details können der projektbegleitenden Berichterstattung entnommen werden (siehe hierzu <http://simress.de/>). Als ergänzende Referenz zu aktuellen Modelanwendungen im Auftrag des Umweltbundesamtes sei zudem auf das Projekt PolRess hingewiesen (Jacob et al., 2015).

Die „klassischen“ exogenen Szenariovorgaben beschränken sich in GINFORS3 auf nationale Bevölkerungsentwicklungen sowie die Weltmarktpreise für Kohle, Öl, Gas und Erze. Hierbei handelt es sich um Variablen, für die im Projektionszeitraum explizite (und szenariokonsistente) Werte vorgegeben werden müssen.

Abbildung 27: Exogene Bevölkerungsprojektionen der SimRes-Szenarien



Beispielhaft gruppiert Abbildung 27 die in den SimRes-Szenarien für die 38 modellierten Nationen sowie die verbleibende Region Rest der Welt unterstellten Bevölkerungsentwicklungen nach Weltregionen. Basis für diese exogenen Vorgaben sind dabei zwei Quellen. Für Deutschland die am 28. April 2015 veröffentlichten Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung (Statistisches Bundesamt 2015) sowie für alle anderen Länder und die Region „Rest of World“ die low variant der 2015 Revision der World population prospects der Vereinten Nationen (United Nations 2015).

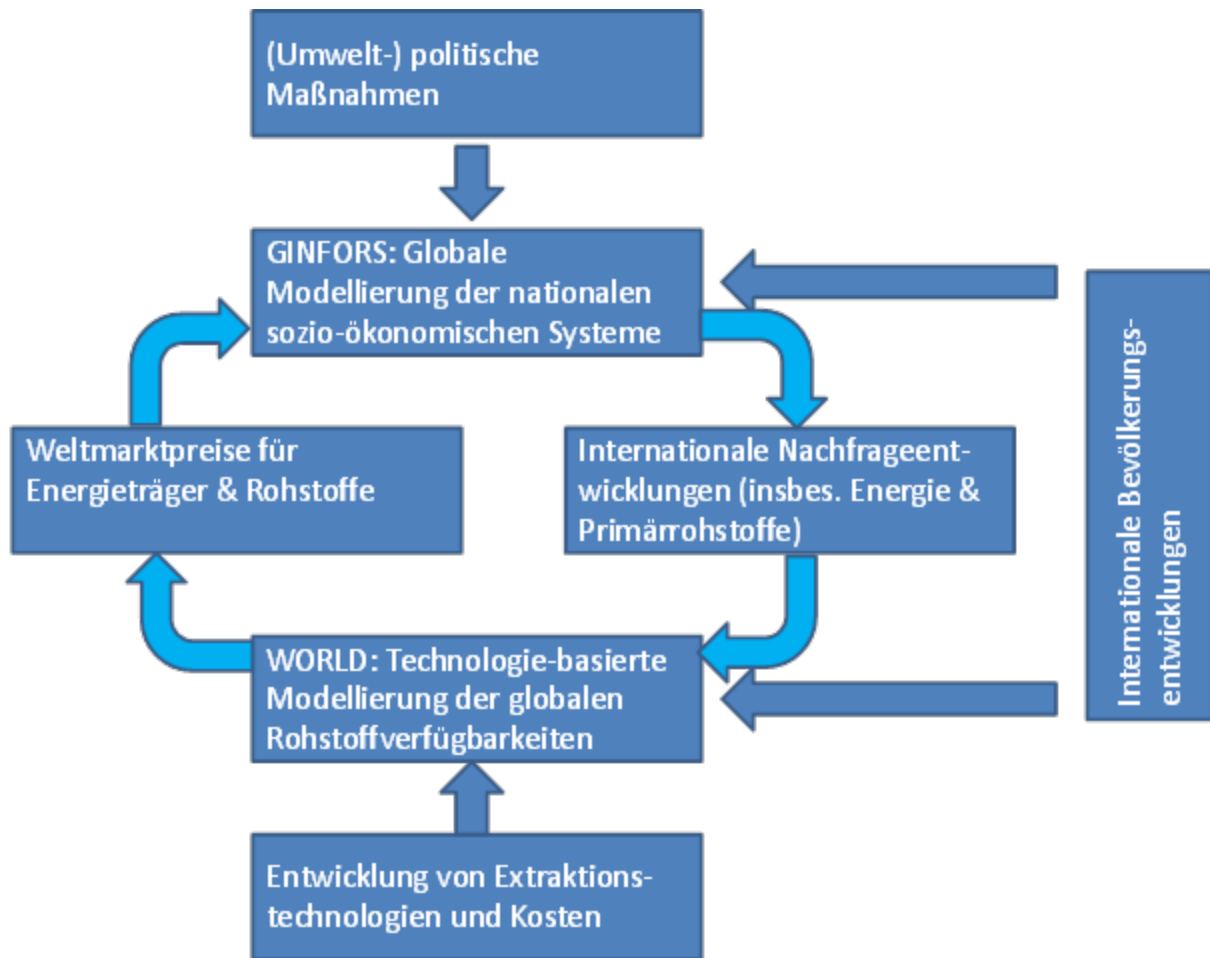
Die Exogenität der Weltmarktpreise für Erze konnte im SimRes-Projekt über einen soft-link zwischen den Modellen GINFORS<sub>3</sub> und WORLD (siehe hierzu Kapitel 7) überwunden werden.<sup>22</sup> Eine schematische Darstellung der hierbei verfolgten Vorgehensweise kann Abbildung 28 entnommen werden.

Wie zu erkennen ist, basieren die Projektionen beider Modelle jeweils auf exogen vorgegebenen globalen Bevölkerungsprojektionen, die aufeinander abgestimmt sind. Auf Basis dieser Vorgaben sowie a priori Annahmen zur Entwicklung der Weltmarktpreise zentraler Rohstoffaggregate, ist GINFORS<sub>3</sub> in der Lage, dynamische Projektionen der globalen ökonomischen Aktivität unter endogener Berücksichtigung internationaler Handelsverflechtungen zu simulieren. Dabei werden u.a. auch die zukünftigen Entwicklungspfade der globalen Energienachfrage, resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen (basierend auf physische Koeffizienten beim Verbrennen fossiler Energieträger) und globale Rohstoffextraktionen projiziert.

Im Rahmen des in SimRes etablierten soft-links werden daraufhin die dynamischen Projektionen des GINFORS<sub>3</sub>-Modells zur globalen preisbereinigten Nachfrage nach Metallen in US-\$ pro Kopf an WORLD übergeben. Auf Basis dieser Vorgaben ist WORLD daraufhin in der Lage, angebotsseitige Entwicklungen und resultierende Preiseffekte für die betrachteten Rohstoffkategorien sowie Implikationen auf die Substitution von Primärrohstoffen durch Recyclingprodukte endogen herzuleiten.

<sup>22</sup> Für die fossilen Rohstoffe Kohle, Rohöl und Gas wird eine entsprechende Endogenisierung der Weltmarktpreise ebenfalls angestrebt. Zum derzeitigen Berichtsstand wird hierzu allerdings noch auf (szenariokonsistente) Projektionsergebnisse der IEA zurückgegriffen.

Abbildung 28: Endogene Bestimmung der Weltmarktpreise im Simulationsverbund des SimRes-Projekts



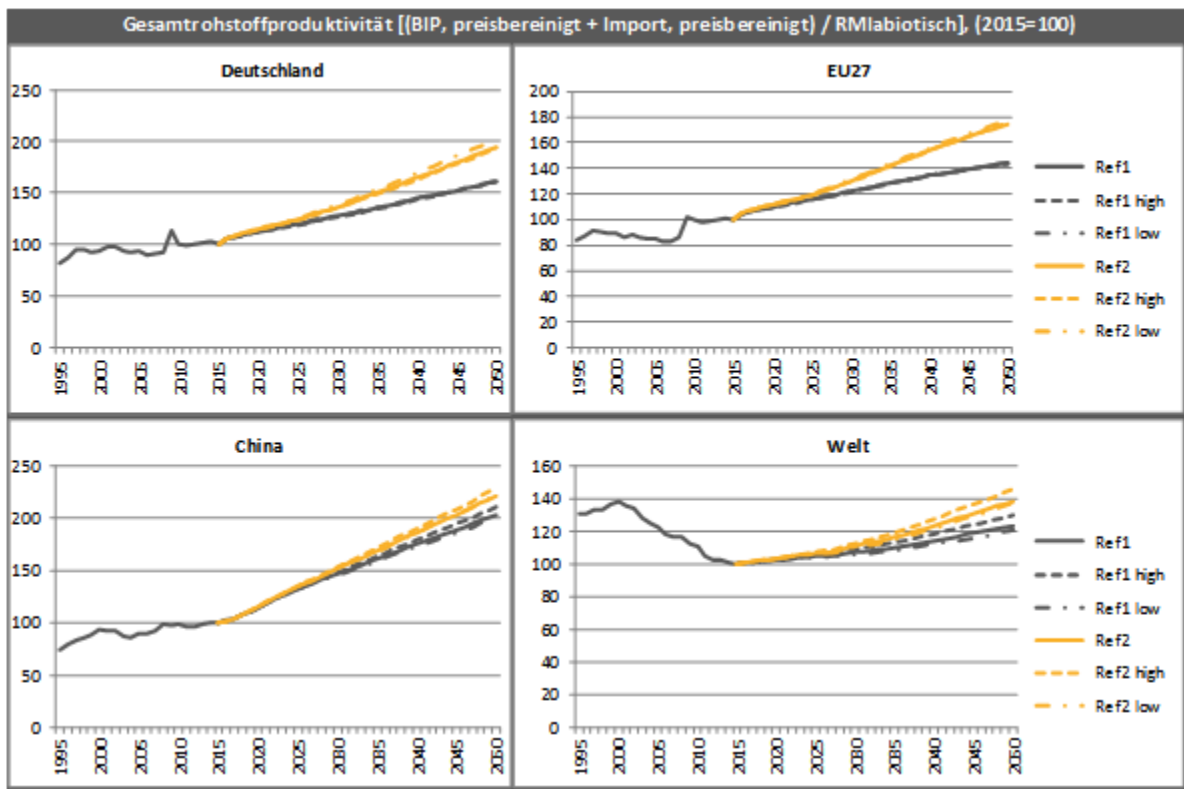
Die resultierenden Weltmarktpreise können daraufhin vom WORLD-Modell wiederum an GINFORS3 übergeben werden, um die ursprünglichen a priori Annahmen zur Entwicklung der Weltmarktpreise zu aktualisieren. Auf Basis dieser aktualisierten Weltmarktpreise kann daraufhin eine neue GINFORS-Simulation erstellt werden, auf deren Basis dann wiederum ein aktualisierter Input für das WORLD-Modell zur Verfügung steht.

Am Ende dieses iterativen Prozesses resultiert ein harmonisierter Datensatz, welcher sich aus GINFORS3-Perspektive durch eine Endogenisierung der Weltmarktpreise zentraler Rohstoffe auszeichnet und aus WORLD-Perspektive durch die ergänzende Berücksichtigung von ökonomischen Feedback-Effekten der globalen Nachfrage charakterisiert ist.

### 8.2.2 Politikbestimmte Szenarioparameter

Erweitert man den Begriff der Exogenen um all diejenigen Modellvariablen, die nicht modellendogen erklärt werden, aber als explizite Modellvariable einen Einfluss auf andere Modellzusammenhänge entfalten, so enthält das Modell weitere vorherbestimmte Größen. Es handelt sich einerseits um unmittelbare Politikparameter wie Steuersätze. In diese Kategorie fallen in GINFORS3 z.B. Steuern auf die Verwendung von Gütern, Einkommen- und Vermögensteuern.

Abbildung 29: Beispiele alternativer Umfeldparametrisierungen in GINFORS<sub>3</sub>



Zu dieser Kategorie zählen aber auch klimapolitische Szenario-Annahmen beispielsweise zur Entwicklung des ETS oder des Anteils der Atomenergie sowie der erneuerbaren Energien an der Elektrizitätsentwicklung als Ergebnis von Regulierungen. Auch der Anteil der Elektromobilität an der gesamten Verkehrsnachfrage kann einen explizit vorgebbaren Szenarioparameter repräsentieren, der die Wirkungen eines komplexeren politischen Handelns verschiedener Instrumente zusammenfasst. Ferner sind Verhaltensänderungen als das Ergebnis einer intrinsischen Motivation der Zivilgesellschaft vorgebar wie z. B. eine bestimmte Reduktion von Mobilität oder die Reduktion des Fleischkonsums.

Abbildung 29 verdeutlicht dies beispielhaft für den in der deutschen Ressourcenschonungspolitik betrachteten Indikator Gesamtrohstoffproduktivität. Abgebildet sind vorläufige GINFORS<sub>3</sub>-Projektionen des SimRes-Projekts, welche die Entwicklung dieses Indikators für ausgewählte Weltregionen (Deutschland, Europäische Union, China sowie global) unter alternativen Szenarioannahmen bis zum Jahr 2050 betrachten.

In den grauen Kurvenverläufen der „business as usual“-Varianten wird von einer Energie- und Klimapolitik in Deutschland, der EU und weltweit ausgegangen, die sich zwar dynamisch weiterentwickelt, letztlich aber nicht ambitioniert genug ist um die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits deutlich vor dem Jahr 2050 auf einen Reduktionspfad zu bringen. In den gelb dargestellten Kurvenverläufen der „klimaaktiv“-Varianten wurden hingegen Politikinterventionen implementiert, die in den entsprechenden Simulationsläufen eine Reduktion der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 80% bis zum Jahr 2050 aufweisen. Da angenommen wird, dass sowohl in der EU als auch weltweit ebenfalls eine im Vergleich zu „business as usual“-Varianten ambitioniertere Klimapolitik realisiert wird, projiziert GINFORS in diesen Varianten einen globalen Peak der CO<sub>2</sub>-Emissionen um das Jahr 2030 herum.

Beide Umfeldszenarien wurden jeweils unter Berücksichtigung alternativer ökonomischer Wachstumsannahmen für die Region Rest der Welt simuliert (a) normale Projektion ohne weitere Eingriffe

in der Region Rest der Welt, b) Projektion unter Annahme eines [im Vergleich zur vorherigen Simulation] stärkeren Wachstums des privaten Konsums in der Region Rest der Welt, c) Projektion unter Annahme eines [im Vergleich zur ursprünglichen Simulation] schwächeren Wachstums des privaten Konsums in der Region Rest der Welt). In den obigen Abbildungen können daher jeweils sechs verschiedene Zeitreihen identifiziert werden.

### 8.3 Bedarf an Konsistenzchecks

Im vorherigen Unterabschnitt wurde bereits dargestellt, dass GINFORS3 umfassende Möglichkeiten zur Implementierung globaler Umfeldszenarien bietet. Die bisherige Darstellung ergänzend sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Möglichkeiten zur Berücksichtigung exogener Rahmenannahmen nicht nur auf die bislang angesprochenen explizit vordefinierten „Stellschrauben“ (im Sinne exogener oder Szenario-spezifisch festgelegter Modellgrößen) beschränkt sind: Da das Modell GINFORS3 von den Autoren dieses Beitrags persönlich programmiert wurde, können aus technischer Perspektive letztlich sämtliche Parameter und Systemzusammenhänge des Modells zur Berücksichtigung externer Szenarioinformationen modifiziert werden. Die im Beitrag von Weimer-Jehle und Kosow (siehe Kapitel 3) unterschiedenen vier Ebenen von Szenario-Konsistenz können daher grundsätzlich allesamt angestrebt werden. Die Konsistenz der jeweils umgesetzten Szenarioparametrisierungen wird dabei lediglich durch das Vorhandensein hinreichend valider und in sich konsistenter externer Expertise restringiert. Zwei alternative Ansatzpunkte können diesbezüglich verfolgt werden:

1. Wenn beispielsweise der (im Kapitel „Konsistenz im Modellverbund im Projekt RTD“ angesprochene) verstärkte Einsatz von Oberleitungs-LKWs im Verkehrsbereich betrachtet wird, erscheint ein Vorgehen zielführend, bei dem zentrale Transformationssektoren (in diesem Beispiel insbesondere Verkehr und Fahrzeugbau sowie die Energiewirtschaft) in eigenen Partialmodellen abgebildet werden, um Modell-konsistente Inputdaten für GINFORS3 bereitzustellen. Die Konsistenz des gesamten Simulationsrahmens kann dabei dadurch gesichert werden, dass (in Analogie zum zuvor beschriebenen soft-link GINFORS3 -WORLD) einheitliche Rahmendaten verwendet werden.
2. Alternativ wurde bspw. im Projekt POLFREE (siehe Ressourcenkommission am Umweltbundesamt 2016 für eine umfassende Kommentierung der Simulationsergebnisse oder Meyer et al. 2016 für eine Kurzzusammenfassung) ein Vorgehen gewählt, in welchem zwei eigenständige Arbeitspakete dazu dienen, umfassende Szenarioannahmen sowie hierzu korrespondierende Politikansätze auf Basis von Literaturrecherchen und externer Expertise zu erarbeiten.

Beide Vorgehensweisen können selbstverständlich auch parallel verfolgt werden, wobei Instrumente wie die in Kapitel 3 vorgestellte Cross-Impact Bilanzanalyse sicherlich jeweils hilfreiche Beiträge liefern können. Letztlich wird dabei stets eine pragmatische Abwägung zwischen der Komplexität der zu analysierenden Fragestellung sowie den hierzu verfügbaren Ressourcen notwendig sein.

Offensichtlich ist aber, dass dem Aspekt der Konsistenz in der angewandten Politikberatung stets umfassende Aufmerksamkeit zukommen sollte: Ob zentrale Systemzusammenhänge eines zu analysierenden Szenarios hinreichend parametrisiert sind, kann nicht allein anhand technischer Modelleigenschaften festgestellt werden. Vielmehr ist darauf zu achten, dass den jeweiligen Modellierern hinreichend valide und in sich konsistente externe Expertise zur Verfügung gestellt wird.

### 8.4 Abschließende Anmerkungen zu Modellauswahl, Interaktionen und Konsistenzen in der Politikberatung

Während dieser Beitrag bislang auf eine übersichtliche Zusammenfassung eigener Expertise in Entwicklung und Anwendung dynamischer Simulationsmodelle mit umfassender Abbildung inter-in-



dustrieller Wertschöpfungsketten sowie der hierbei angewandten ökonomischen Parametrisierungs- und Evaluationsmethoden beschränkt war, seien abschließend einige weiterführende Anmerkungen notiert. Diese Anmerkungen reflektieren in erster Linie eigene Erkenntnisse aus dem zuvor bereits erwähnten SimRes-Projekt, sind aber durchaus dazu intendiert, eine Einordnung der bei vollständiger Lektüre des Readers sichtbar werdenden Methodenvielfalt zu erleichtern und dabei einige regelmäßig wiederkehrende zentrale Diskussionspunkte im Bereich der angewandten Politikberatung zusammenzustellen.

Dabei sei zunächst auf die Tatsache hingewiesen, dass sozialwissenschaftliche Modellierungen im Vergleich zu bspw. ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen mit wesentlich umfassenderen Herausforderungen konfrontiert werden. So basieren die bereits im ersten Kapitel dieses Readers erwähnten Unfallsimulationen im Kern auf experimentell beobachtbaren und umfassend messbaren Naturgesetzen, deren kausales Zusammenspiel induktiv eindeutig beschrieben und modelliert werden kann. Mit anderen Worten: Da das mentale Modell des zu modellierenden Systems unstrittig ist, erscheint es relativ einfach, das Zusammenspiel der zugrundeliegenden universellen Naturgesetze in alternativen Systemzusammenhängen zu reproduzieren.

Im Gegensatz zu naturwissenschaftlichen Simulationsstudien erscheinen in den Sozialwissenschaften allerdings üblicherweise alternative mentale Modelle in der Lage, das historisch beobachtbare Verhalten des zu analysierenden Systems (zumindest im Kern) abzubilden. In der empirischen Wirtschaftsforschung ist dieses Phänomen als sogenanntes Identifikationsproblem bekannt. Zur Lösung des Identifikationsproblems, also zur Auswahl einer Modellstruktur, welche die historischen Beobachtungen konsistent abbildet, kann auf umfassende ökonomische Methoden zurückgegriffen werden. Die dabei angewandten Falsifikationstests dienen dazu, strukturelle Kausalitäten von einfachen Korrelationen zu unterscheiden.

Die Akzeptanz des Identifikationsproblems sowie die hieraus resultierende Einsicht in die Notwendigkeit zur Anwendung ökonomischer Falsifikationstests zur Etablierung eines hinreichenden Verständnisses des Systemverhaltens unterscheiden somit unseren Modellieransatz grundlegend von der in Abschnitt 7 vorgestellten systemdynamischen Vorgehensweise. Dort wird das Identifikationsproblem ignoriert und stattdessen für eine (mehr oder weniger ad hoc) unterstellte Kausalstruktur die implizierten Systemzusammenhänge explorativ analysiert. Diese Vorgehensweise lässt sich sicherlich dadurch begründen, dass es in der Zukunftsforschung zunächst interessant erscheinen mag, ausgewählte alternative Einflussgrößen bezüglich ihrer zentralen Feedback-Effekte zu analysieren. Sofern aus der empfundenen Plausibilität der Ergebnisse nicht der Anspruch abgeleitet wird, ein für weitergehende Politikberatungen „validiertes“ und somit universell einsetzbares Modell zur Verfügung zu haben, ist hiergegen nichts einzuwenden.

Als Ökonomen weisen wir ansonsten gerne darauf hin, dass unsere Wissenschaftsdisziplin bereits auf eine längere Tradition der kritischen Reflektion zu Geschichte, Rolle und Philosophie von empirischen Modellierungen und deren Anwendung im Bereich der Politikberatung verweisen kann. Vor diesem Hintergrund orientieren wir uns persönlich an einem Wissenschaftsverständnis, welches von Butter und Morgan bereits 1998 wie folgt zusammengefasst wurde: „... *the notion of empirical models as a bridge between the positive and normative domains of economics holds in two particular ways. One way is as a knowledge device which spans the two domains. The empirical model embodies the positive scientific object upon which the normative analysis of policy options are based, either directly or via forecasting and simulation outputs. The empirical model therefore plays this dual role of constituting the expertise gained through positive science and enabling normative knowledge to be developed. The other way in which empirical models constitute a bridge is that they provide a clear focus for the people involved – modellers and policy makers – to interact and to share the expertise that each group has. There are, of course, interactions of scientific economics and policy makers without the intermediary of models, but the presence of empirical models allows a specific kind of interaction which involves making*

*explicit and integrating the tacit knowledge of both groups of participants: modellers and policy makers.*” (den Butter und Morgan 1998, S. 472)

Wie sämtliche Vorgängerversionen ist GINFORS3 ein positives Modell, welches Entscheidungsträgern zunächst als empirisch evaluiertes Integrated Assessment Model („knowledge device“) zur Verfügung steht. Die identifizierten Systemstrukturen werden in GINFORS3 unter Berücksichtigung umfassender Feedback-Effekte dynamisch fortgeschrieben. Der dynamische Charakter des Modells unterscheidet GINFORS3 von einer Vielzahl von Input-Output-Modellen, so auch von dem in Kapitel 9 beschriebenen. Grundlage für die umfassende, endogene Dynamik des Systems ist insbesondere, dass historische Daten nicht nur für einen Zeitpunkt sondern als komplette Zeitreihen vorliegen. Die komplexen Strukturen der ökonomischen Systeme (z. B. Konsumstrukturen, technischer Wandel, globale Handelsverflechtungen, Lohnstrukturen) waren in der Vergangenheit nicht konstant und werden es auch in Zukunft nicht sein. Und nicht nur das. Diese Dynamiken sind untereinander hochgradig interdependent.

Zunächst wird üblicherweise wie in Abschnitt 7.2 dargelegt eine oder mehrere Baseline-Entwicklungen simuliert, welche keine weitergehenden normativen Vorgaben implementiert. In anschließenden Politiksimulationen können dann normative Modelleingriffe im Vergleich zu diesen Baselineprojektionen verglichen werden.

Wertvoller ist aber vielleicht der zweite im obigen Zitat angesprochene Aspekt, der durch die Modellstrukturen vorgegebene klare Fokus. Dieser strukturiert den Austausch zwischen Modellierer und Entscheidungsträger und erlaubt somit im Bereich der quantitativen Szenarioanalyse eine Konsistenzprüfung, wie sie für qualitative Szenarien bspw. lediglich unter Verwendung zusätzlicher Tools (wie bspw. der Cross-Impact Bilanzanalysen, vgl. Abschnitt 2) durchgeführt werden kann. Unserer Einschätzung nach werden allerdings die entsprechenden Potenziale in der tatsächlichen Praxis der Politikberatung bislang nur selten realisiert: Umfassende Systemtransformationen, wie bspw. eine (weitestgehende) Dekarbonisierung der Energieerzeugung,<sup>23</sup> können selbstverständlich mit GINFORS3 modelliert werden. Wenn die hierfür zwangsläufig notwendigen normativen Vorgaben allerdings lediglich autonom von den Modellierern gesetzt werden, bleibt der resultierende Erkenntnisgewinn für den Auftraggeber relativ begrenzt. Wünschenswert wäre hier ein weitergehender Dialog über Szenario-spezifische exogene Vorgaben und deren Auswirkungen. Im kontinuierlichen Austausch über die dabei beobachtbaren Modellimplikationen ließe sich sicherlich ein wesentlich umfassenderes gemeinsames Verständnis der Systemkomplexität sowie der dabei sichtbar werdenden Entwicklungsmuster etablieren.

Da ein solcher Dialog zeitaufwendig ist, kann dieser in der Praxis häufig nicht im wünschenswerten Ausmaß geführt werden. Das ist im Einzelfall bedauerlich. Tragisch wäre es allerdings, wenn im Vergleich zu GINFORS3 weniger komplexe, dafür aber nicht empirisch falsifizierbare Modellierungsansätze als zur Abbildung zukünftiger Transformationsprozesse grundsätzlich besser geeignet wahrgenommen würden. Wenn das Erkenntnisinteresse darauf abzielt, Systemkomplexität möglichst umfassend abzubilden erscheint es zumindest fragwürdig, gerade auf jene Instrumente zurückzugreifen, welche (aufgrund mangelnder Modellierung des ökonomischen Systems) in der Implementierung alternativer quantitativer Szenarien leichter handhabbar sind.

## 8.5 Literatur

Almon, C. (1991): The INFORUM Approach to Interindustry Modeling. *Economic Systems Research*, 3(1), 1–7.

---

<sup>23</sup> Siehe hierzu bspw. die Simulationsstudien des Projekts CECILIA2050, welche im Policy Brief N.3 (Development of Climate Policy Scenarios to 2030 and 2050, <http://cecilia2050.eu/publications/247>) zusammengefasst wurden.

- Banerjee, A.; Dolado, J.; Galbraith, J.; Hendry, D. (1993): Co-integration, Error Correction, and the Econometric Analysis of Non-Stationary Data, Oxford University Press
- Bruckner, M.; Giljum, S.; Lutz, C.; Wiebe, K. (2012): Materials embodied in international trade - Global material extraction and consumption between 1995 and 2005. *Global Environmental Change*, 22(3), S. 568–576.
- Brümmerhoff, D.; Grömling, M. (2015): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Walter de Gruyter GmbH & Co KG., Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 10. Auflage.
- Christ, C. (1994): The Cowles Commission's contributions to econometrics at Chicago, 1939-1955. *Journal of Economic Literature*, 32(1), 30–59.
- den Butter, F.; Morgan, M. (1998): What makes the models–policy interaction successful? *Economic Modelling*, 15(3), 443–475.
- Dietzenbacher, E.; Los, B.; Stehrer, R.; Timmer, M.; de Vries, G. (2013): The Construction of World Input-Output Tables in the WIOD Project. *Economic Systems Research*, 25, 71–98.
- Eurostat (2008): Eurostat Manual of Supply, Use and Input-Output Tables. Luxembourg: European Commission.
- Fair, R. (1992): The Cowles Commission Approach, Real Business Cycle Theories, and New Keynesian Economics. National Bureau of Economic Research, Working Paper 3990.
- Jacob, K.; Werland, S.; Graaf, L.; Hirschnitz-Garbers, M.; Langsdorf, S.; Hinzmann, M.; Bergmann, D.; Lehr, T.; Meyer, M.; Scholl, G.; Schulze, F.; Hermann, A.; Keimeyer, F.; Bringezu, S.; Bahn-Walkowiak, B.; Wilts, H. (2015): Innovationsorientierte Ressourcenpolitik in planetaren Grenzen. Endbericht des Projekts Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRes). [www.ressourcenpolitik.de](http://www.ressourcenpolitik.de)
- Meyer, B.; Drummond, P.; Ekins, P.; Distelkamp, M. (2016): Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe – Lessons from the Modelling; Policy Brief 6 des Projekts POLFREE (Policy Options for a Resource Efficient Economy). <http://polfree.seri.at/policy-briefs/>
- Meyer, B. (2016): Die Modellierung der Großen Transformation; in: Held, M., Kubon-Gilke, G., Stum, R. (Hg.): *Jahrbuch normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik*, Band 15: Politische Ökonomik großer Transformationen, Marburg: Metropolis-Verlag, 165–190.
- Popper, K. (1994): *Logik der Forschung*. Tübingen: Mohr & Siebeck, 10. Auflage.
- Ressourcenkommission am Umweltbundesamt, KRU (2016): Ein ressourceneffizientes Europa – Ein Programm für Klima, Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung; Stellungnahme der Ressourcen-kommission des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ein-ressourceneffizientes-europa-ein-programm-fuer>
- Sorrell, S.; Dimitropoulos, J. (2008): The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics*, 65, 636–649.
- Sorrell, S.; Dimitropoulos, J.; Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy*, 37, 1356–1371.
- Statistisches Bundesamt (2015): *Bevölkerung Deutschlands bis 2060*. 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- United Nations (2015): *World Population Prospects: The 2015 Revision*, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Data Booklet. ST/ESA/SER.A/377.
- Wiedmann, T.; Lenzen, M.; Turner, K.; Barrett, J. (2007): Examining the global environmental impact of regional consumption activities – Part 2: Review of input–output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade. *Ecological Economics*, 61(1) 15 February 2007, 15–26.
- Winker, P. (2006): *Empirische Wirtschaftsforschung und Ökonometrie*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2. Auflage.

## 9 Konsistenz im Modellverbund im Projekt RTD

Monika Dittrich<sup>1</sup>, Frank Dünnebeil<sup>1</sup>, Kirsten Biemann<sup>1</sup>, Amany von Oehsen<sup>1</sup>, Peter Mellwig<sup>1</sup>, Kai Neumann<sup>2</sup>, Norman Gerhardt<sup>1</sup>, Karl Schoer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg

<sup>2</sup> Consideo GmbH, Lübeck

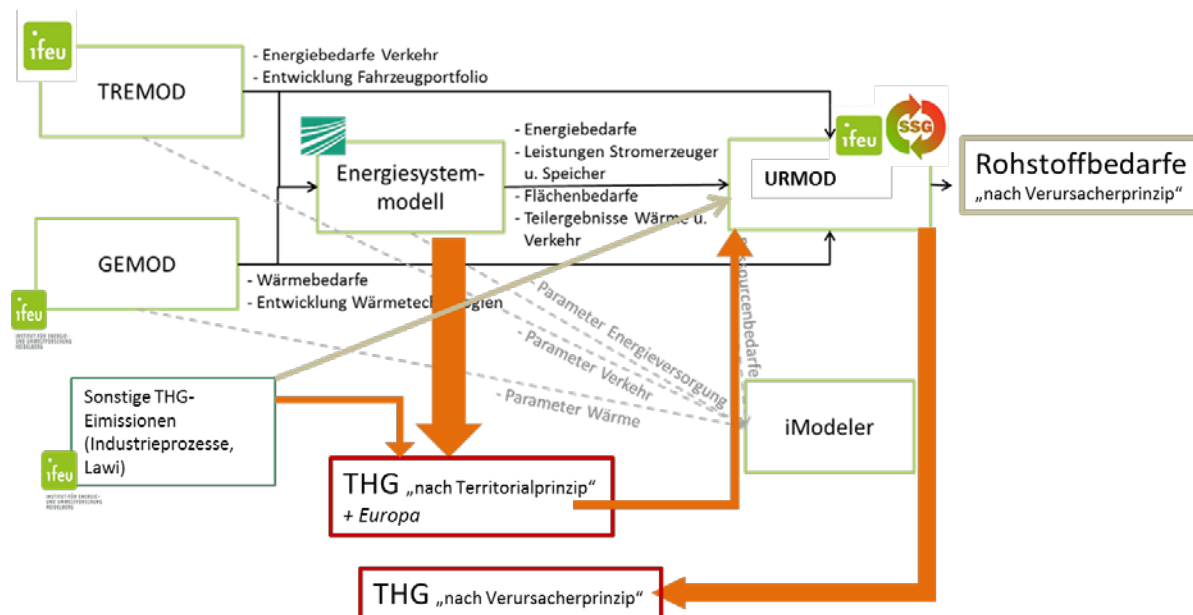
<sup>3</sup> Karl Schoer, unabhängiger wissenschaftlicher Gutachter

### 9.1 Vorstellung des Projekts RTD und Überblick über die Modelle und den Modellverbund

Im Rahmen des Projekts „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – RTD“ sollen technisch ambitionierte Wege zur Erreichung eines treibhausgasneutralen Deutschlands bis und in 2050 aufgezeigt und die benötigten Rohstoffe konsistent, vollständig und richtungssicher abgeschätzt werden. Das Projekt stützt sich wesentlich auf die Studie Treibhausgasneutrales Deutschland, die vom UBA 2014 vorgelegt wurde, wobei verschiedene Teilbereiche auf der Basis neuerer Forschungserkenntnisse aktualisiert werden.

Die Aufgabe bearbeiten wir mit Hilfe eines Modellverbundes, das sich aus insgesamt fünf Modellen und zusätzlichen sektorbezogenen Einzelrechnungen zusammensetzt (Abbildung 30). Da im Wesentlichen die Umstellung von einer fossilen auf eine regenerativ basierte Wirtschaftsweise untersucht wird, werden die Sektoren, die die größten Umstellungsleistungen erbringen müssen, in eigenen Modellen abgebildet und durchgerechnet: der Verkehrsbereich in TREMOD, der Wärme- und Kälteverbrauch in Gebäuden in GEMOD und die Energiewirtschaft im Energiesystemmodell SCOPE, wobei hierzu TREMOD und GEMOD Inputdaten liefern. Zusammen mit den Ergebnissen aus sektorspezifischen Berechnungen liegen im Resultat die THG-Emissionen nach dem Territorialprinzip vor. Die rohstoffliche Abschätzung aller Wirtschaftssektoren sowie die Abschätzung der Emissionen der Im- und Exporte finden im umweltökonomischen Rohstoff- und THG-Modell (URMOD) statt. Darüber hinaus werden spezifische Einzelfragestellungen mit dem iMODELER im Rahmen von Szenaretten untersucht. Der iMODELER wird ferner eingesetzt, um den untersuchten Gesamtzusammenhang vereinfacht zu veranschaulichen.

Abbildung 30: Modellverbund im Projekt RTD



Die Modelle unseres Modellverbundes werden im Folgenden zunächst separat kurz vorgestellt. Danach werden exemplarisch Parameter genannt, die als Ergebnisse eines Modells zu Inputparametern eines anderen Modells werden (Kap. 7.2). Das Projekt steht noch am Anfang; der Bedarf an Konsistenzchecks kann daher nur auf der Basis der gegenwärtigen Arbeitsperspektive skizziert werden (Kap. 7.3).

### 9.1.1 TREMOD

Das Transport-Emissions-Modell (TREMODO) ist ein vom ifeu im Auftrag des BMU/UBA bzw. BMVBS/Bast in Kooperation mit VDA/Bahn/Lufthansa entwickeltes Expertenmodell zur detaillierten Ermittlung des Energieverbrauches und der Emissionen aller motorisierten Verkehrsmittel in Deutschland. In TREMOD werden sowohl die direkten Emissionen der Kraftstoffverbrennung, als auch die Emissionen zur Bereitstellung aller im Verkehr genutzten fossilen und erneuerbaren Energieträger ermittelt. Die Erfassung der Verkehrsträger in TREMOD ist hochdifferenziert und erfolgt nach Größe, Alter, genutztem Energieträger, Abgasnorm und weiteren Fahrzeugmerkmalen.

Grundlagen der Verbrauchs- und Emissionsberechnungen für alle Verkehrsträger sind umfangreiche nationale und internationale Datenquellen zu den Aktivitätsdaten und einzelfahrzeugspezifischen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren. Die wichtigsten Inputdaten im Straßenverkehr sind Auswertungen aller wichtigen Fahrleistungsuntersuchungen und Verkehrszählungen in Deutschland, eine jährliche Sonderauswertung beim Kraftfahrtbundesamt zu Kfz-Neuzulassungen und Beständen (nach Antriebskonzept, Größe, Alter und Emissionsstandard) sowie fahrzeugschicht- und verkehrssituationspezifische Emissionsfaktoren aus dem Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA). Datenquellen für die Bahn, die Binnenschiffe und den Flugverkehr sind das statistische Bundesamt sowie die DB AG, der VDV und die EEA. Das Modell wird fortlaufend aktualisiert und an aktuelle Entwicklungen im Verkehr angepasst.

TREMODO berechnet zum einen Inventarergebnisse von 1960 bis 2014 und ist offizielle Grundlage vieler Berichtspflichten der Bundesregierung für den Sektor Verkehr (z.B. Kyoto, NEC). Zum anderen dient TREMOD der Berechnung von Zukunftsszenarien bis 2050. Wichtigste Datenquellen für zukünftige Verkehrsentwicklungen sind die Fahr- und Verkehrsleistungen der Verkehrsprognose 2030. Für zukünftige Flottenentwicklungen beinhaltet TREMOD eine umfassende Technologiedatenbank mit zahlreichen neuen Fahrzeugkonzepten (z.B. PHEV, Batteriefahrzeuge, Brennstoffzelle). Spezifische Verbrauchs- und Emissionsentwicklungen orientieren sich an der geltenden europäischen Fahrzeuggesetzgebung (z.B. CO<sub>2</sub>-Grenzwerte, Emissionsstandards, inkl. Unterschiede Norm- vs. Realemissionen) sowie an wissenschaftlichen Studien über zukünftige Effizienz- und Emissionsminderungspotenziale.

Eine detaillierte Beschreibung von TREMOD findet sich im aktuellen TREMOD Endbericht (ifeu, 2016).

**TREMODO materials** ist ein ebenfalls vom ifeu entwickeltes Modell. Es dient zur Ermittlung des Materialeinsatzes für die Herstellung einzelner Fahrzeuge (Pkw, LNF, Lkw, Bus, Bahn, Binnenschiff, Flugzeug) sowie, zur Hochrechnung von Materialvorleistungen und Umweltwirkungen (Energieverbrauch, Treibhausgase, Luftschadstoffe,...) der Fahrzeugherstellung für ganze Fahrzeugflotten. Hierfür werden die Einzelfahrzeugwerte mit Neuzulassungen und Flottenzusammensetzungen beliebiger Szenarien des TREMOD-Hauptmodells verknüpft. Dabei sind sowohl Fahrzeuge nach heutigem Stand der Technik (z.B. Dieselfahrzeuge) als auch mögliche zukünftige Fahrzeugtechnologien abgedeckt (z.B. batterieelektrische Fahrzeuge, Leichtbau).

Grundlage für die Modellierungen mit TREMOD materials bildet das vom ifeu entwickelte Ökobilanzmodell für generische Einzelfahrzeuge eLCAr, das alle Kfz-Kategorien sowie die übrigen motorisierten Verkehrsträger (Schiene, Wasser, Luft) umfasst und im Rahmen der Lebenszyklusanalyse auch für die Fahrzeugherstellung Umweltwirkungen (z.B. Treibhausgase, Versauerung, Eutrophierung...)

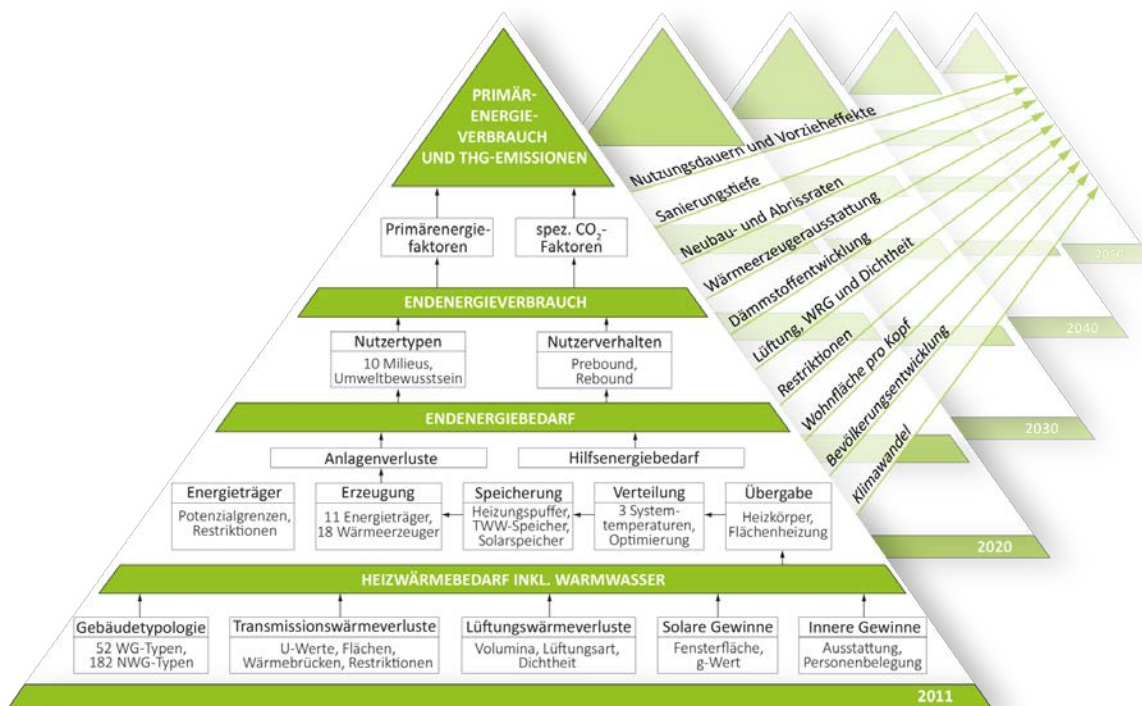
und Ressourcenbedarf umfasst. Wichtige Inputgrößen sind die unterschiedlichen materialrelevanten Fahrzeugtechnologien (Antriebstechnologie und Größenklasse), das Bezugsjahr/ -land sowie materialrelevante Detailtechnologien (z.B. Leichtbau). Dabei wird mit Daten aus der anerkannten Ökobilanzdatenbank ecoinvent, Herstellerdaten sowie weiteren Literaturdaten und Expertenschätzungen gearbeitet.

### 9.1.2 GEMOD

Über das Gebäude-Modell GEMOD wird der Wärme- und Klimatisierungsbedarf des Gebäudebestandes in Abhängigkeit des Dämmniveaus modelliert sowie die Bereitstellung des Bedarfs durch Wärmeerzeuger, Lüftungs- und Klimatisierungsanlagen. Die übliche Zeitschrittweite des Modells sind Jahre. Die Bedarfe werden als Jahresheizwärmebedarf, Jahreswarmwasser-, Kühl- und Lüftungsbedarf in enger Anlehnung an die DIN-Normen der Energieeinsparverordnung berechnet. Der Gebäudebestand wird über eine Gebäudetypologie mit 52 Wohngebäudetypen (angelehnt an die Typologie nach IWU 2013) und 182 Nichtwohngebäudetypen abgebildet. Auf Basis der Gebäudebaualter und typischer Nutzungsdauern zwischen Erneuerungen der Außenbauteile „oberer Gebäudeabschluss“, „unterer Gebäudeabschluss“, Fenster und Außenwände werden die möglichen Sanierungszeitpunkte als „windows of opportunity“ für die Dämmungen der Bauteile berechnet. Bei den Nutzungsdauern wird der Weibull-Nutzungsdauer-Ansatz verwendet, der eine gängige statistische Verteilung der Nutzungsdauern darstellt. Ebenso werden die Austauschzeitpunkte bei Heizungs- und Lüftungsanlagen modelliert. Hier setzt das Modell auf den Heizungsanlagenbestand und seine Altersstruktur im Jahr 2011 auf und berechnet die zukünftigen Austauschzeitpunkte der Heizungsanlagen auf Basis der für Heizungsanlagen üblichen Nutzungsdauern. Die Nutzungsdauern können modellexogen verkürzt werden, um politische Maßnahmen beim Heizungskesseltausch (Ordnungsrechtliche Austauschverpflichtungen oder Fördermaßnahmen) abzubilden. Um den zunehmenden Ersatz des heutigen, weitgehend fossilen Heizungsanlagenbestands durch erneuerbare Wärmeerzeuger abzubilden, sind vom Nutzer die Marktanteile der verschiedenen erneuerbaren und fossilen Heizungstechnologien in den Szenariojahren bis zum Jahr 2050 vorzugeben. Unterschieden werden Solarthermieanlagen, luft- und erdgekoppelte Wärmepumpen, Blockheizkraftwerke, der Anschluss an ein Wärmenetz und die fossilen Heizungstechnologien. Die bei der Wärmeversorgung durch die Anlagen entstehenden Energieverluste werden in enger Anlehnung an DIN V 4701 10 berechnet. Sie gliedern sich nach Wärmeerzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe. Wärmegutschriften aus der Verteilung werden ebenso berücksichtigt wie die jeweils erforderlichen Hilfsenergien. Unter Verwendung der spezifischen Brennstoff- bzw. Strom-Emissionsfaktoren werden so die Treibhausgasemissionen des Gebäudebestandes berechnet. Der Materialbedarf für den Einsatz erneuerbarer Wärmeerzeuger wird auf Basis von Herstellerangaben bzw. Ökobilanzdaten hochgerechnet.

Die bei energetischen Sanierungen erreichten Dämmniveaus werden ebenfalls in Form von „U-Wert-Szenarien“ von außen vorgegeben. Unter Vorgabe der Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Dichte) der im Szenario eingesetzten Dämmstoffe wird so der Dämmstoffmaterialbedarf in den Szenariojahren berechnet.

Abbildung 31: Übersicht über das Gebäudemodell GEMOD



GEMOD berücksichtigt weitere Faktoren. Exemplarisch genannt seien hier Klimadaten und Verbrauchs-Bedarfs-Abgleiche. GEMOD rechnet standardmäßig mit den Klimarandbedingungen gemäß EnEV bzw. DIN V 18599. Darüber hinaus wird von einem Temperaturanstieg um 1 K bis 2050 ausgegangen, der durch den Klimawandel verursacht wird. Es ist ebenso möglich, die Werte der solaren Einstrahlung im Zeitverlauf zu ändern. Dies wird jedoch in den aktuellen Berechnungen nicht getan, da hier kein eindeutiger Trend zu erkennen ist. Verbrauchs-Bedarfs-Abgleiche: Die Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Verbrauch von Wohngebäuden und dem nach DIN V 4108 6 berechneten Wärmebedarf wurden in mehreren empirischen Studien untersucht (IWU, 2013), (ARGE-SH, 2011)). Mit diesen Daten wurde das Verhältnis von Verbrauch zu Bedarf als Funktion des Heizwärmebedarfs ermittelt. Mit Hilfe dieses empirischen Verbrauchsfaktors können auch mittlere Verbrauchswerte für künftige Gebäudezustände vorausberechnet werden. Auf diese Weise können Szenarien für den Heizenergieverbrauch erstellt werden.

Das Modell enthält daher einen Bedarfs-/Verbrauchsabgleich. Die berechneten Nutzwärmebedarfs-werte werden mit einem Verbrauchsfaktor in typische Wärmeverbräuche umgerechnet. Der Verbrauchsfaktor ist abhängig vom berechneten Wärmebedarf und wurde vom IWU empirisch ermittelt (IWU, 2013). Das Verfahren wurde durch eine Reihe anderer Erhebungen bestätigt. Beim Verbrauchs-Bedarfs-Abgleich können verschiedene Bewohner-Milieus berücksichtigt werden. Sie entsprechen den Milieus, die vom Sinus-Institut erstellt und untersucht wurden (Sinus Sociovision GmbH, 2009). Jedem Wohngebäudetyp wurde statistisch ein spezifischer Mix von Milieus zugeordnet. Für jedes Milieu wurden spezifische Verbrauchsfaktoren errechnet. So kann der Einfluss einzelner Nutzergruppen auf den Gesamtverbrauch dargestellt werden. Weiterhin kann die Wirkung von milieuspezifischen Instrumenten modelliert werden.

Eine ausführliche Dokumentation und Anwendungen des Modells finden sich in ifeu/Beuth 2015.

### 9.1.3 Energiesystemmodell SCOPE

Bei dem Modellierungsansatz SCOPE (sektorübergreifende Einsatz und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems) handelt es sich um ein modular aufgebautes Fundamentalmodell zur Erstellung und Analyse von länder- und sektorübergreifenden Energieszenarien. Das Modell bestimmt aus volkswirtschaftlicher Perspektive den grenzkostenminimalen Einsatz der abgebildeten Energieanlagen bei gleichzeitiger Deckung von Nachfrageprofilen aus den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Optional können Investitionsentscheidungen über annuitätische Technologiekosten in der Zielfunktion berücksichtigt werden, um für zukünftige Szenarien einen kostenminimalen Technologiemark zu ermitteln. SCOPE ist in Matlab umgesetzt, wobei zur Lösung der Optimierungsaufgabe der kommerzielle Solver CPLEX integriert ist. Für eine schnelle Berechnung auch komplexer Optimierungsprobleme verfügt das Institut über einen leistungsstarken Rechencluster.

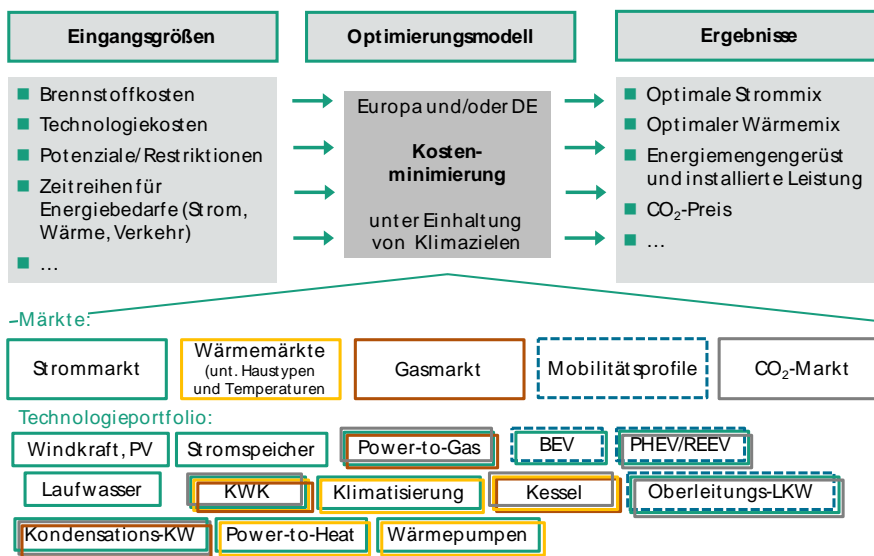
Aufgrund der modularen Umsetzung von SCOPE kann das Modell stets individuell auf die geforderten Fragestellungen und Anforderungen angepasst werden. So werden Detaillierungsgrad und Funktionalität des Modells genau in den relevanten Systembereichen erhöht und die Rechenzeit durch Vereinfachungen in Randbereichen der Fragestellung handhabbar gehalten.

Zwei typische Modellkonfigurationen sind die Anwendung des Modells zur kombinierten Zubau- und Einsatzoptimierung zur Erstellung von sektorenübergreifenden Zielszenarien des zukünftigen Energieversorgungssystems sowie die Anwendung des Modells für eine möglichst realitätsnahe Abbildung der kurz- bis mittelfristigen Entwicklung auf dem Strommarkt zur Bewertung verschiedener Technologien.

Durch eine stundenscharfe Abbildung der Angebots- und Nachfragecharakteristiken eines Szenariojahres können sowohl die erneuerbaren Stromerzeuger als auch konventionelle Kraftwerke sowie der Einsatz von Speichertechnologien und Flexibilitätsoptionen detailliert abgebildet werden. Zur Stromerzeugung stehen verschiedenste konventionelle und erneuerbare Erzeugungstechnologien zur Verfügung. Die notwendige Flexibilität zur Integration der erneuerbaren Stromerzeugung wird über unterschiedliche Speichertechnologien und Lastmanagementoptionen modelliert. In Abhängigkeit von der Fragestellung werden die Sektoren Wärme und Verkehr mit ihren Schnittstellen zum Stromsektor in einem hohen Detaillierungsgrad mit abgebildet. Neben der stündlichen Nachfragedeckung in allen Sektoren können weitere Randbedingungen auf das Zielsystem angewendet werden. Diese beinhalten z. B. die Vorgabe einer Obergrenze der CO<sub>2</sub>-Emissionen, eine Limitierung des Import-Export-Saldos zwischen einzelnen Ländern oder eine Begrenzung des Einsatzes bestimmter Brennstoffe. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in IWES 2016.



Abbildung 32: Schematische Darstellung der Simulationsumgebung "SCOPE"



### 9.1.4 URMOD

Das umweltökonomische Rohstoff- und THG-Modell (URMOD) wird im Rahmen von RTD eingesetzt, um sowohl die Rohstoffaufwände als auch die Treibhausgasemissionen mit den verursachenden wirtschaftlichen Produktions- und Konsumaktivitäten auf einer detaillierten Gütergruppenebene zu verknüpfen. Dadurch wird es möglich, die Güterströme in der Volkswirtschaft in Rohstoff- bzw. Treibhausgasäquivalente zu konvertieren. Die Rohstoff- und Treibhausgasäquivalente beschreiben den kumulierten Rohstoffaufwand bzw. die kumulierten Emissionen, die bei der Herstellung der Güter über die gesamte Produktionskette anfallen. Alle wirtschaftlichen Aktivitäten, Rohstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen in der Volkswirtschaft werden in einem voll integrierten Ansatz dargestellt. U.a. erlaubt es dieses Modell, die mit den Im- und Exporten verbundenen Treibhausgasemissionen zu schätzen.

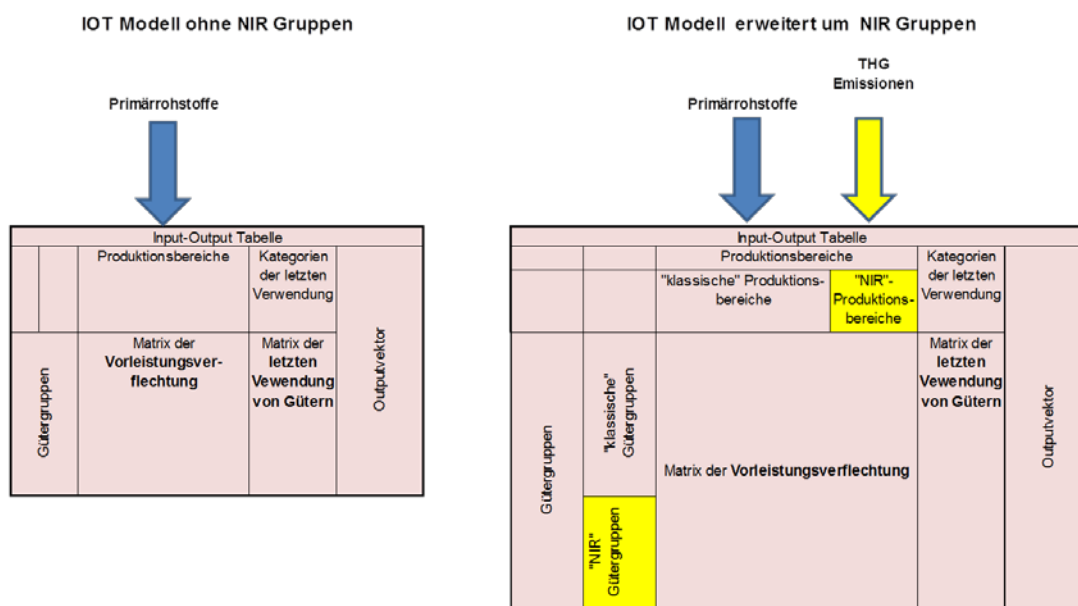
Die Berechnung der Rohstoffäquivalente erfolgt analog zu den Berechnungen im Projekt DeteRes (siehe Beitrag von Schoer/Dittrich im Reader). Um Treibhausgase zusätzlich zu Rohstoffen in das Modell einzubinden, muss das DeteRes Modell vor allem bezüglich der Produktionsbereichs-/Gütergruppen-gliederung weiter ausdifferenziert werden. Die Inputdaten werden grundsätzlich nach dem Verfahren aufbereitet, das bereits im vorigen Beitrag dargelegt wurde. Im Unterschied zum Vorgehen im Projekt DeteRes stammen im Projekt RTD eine Vielzahl von Inputdaten zu den Themen Verkehr, Energie und Gebäudewärme aus den Modellen TREMOD, GEMOD und dem Energiesystemmodell SCOPE und nicht aus Sektor bezogenen Einzelstudien.

Durch die Erweiterung des Modells um Treibhausgase wird es möglich, die Treibhausgasemissionen wie bei den Rohstoffen sowohl aus der Entstehungssicht (weitgehend identisch mit dem Territorialprinzip in der Emissionsberichterstattung) als auch aus der Verwendungssicht bzw. nach dem Verursacherprinzip zu betrachten. Die Verursachersicht beantwortet die Frage, welche Emission über die gesamte Produktionskette hinweg bei der Herstellung der Güter der letzten sowie der letzten inländischen Verwendung angefallen sind. Die anderen Modelle des Projektes berechnen grundsätzlich die Emissionen, die innerhalb von Deutschland entstehen (Territorialprinzip). Dabei sind einerseits die Emissionen, die bei der Produktion der importierten Güter entstehen, nicht enthalten, und andererseits können die Emissionen, die bei der Herstellung der exportierten Güter anfallen, nicht gesondert nachgewiesen werden. Beide Größen werden aber für die Ableitung von Angaben nach dem Verursacherprinzip benötigt.

Basis für das umweltökonomische Rohstoffmodell des DeteRes-Projektes ist eine tief gegliederte Input-Output-Tabelle (274 Gütergruppen/Produktionsbereiche), deren Gliederung sich insbesondere daran orientiert, die direkten und indirekten Rohstoffströme möglichst detailliert abzubilden. Die - Output Tabelle wird in dem Modell mit einer Matrix kombiniert, welche bestimmte Primärinputs in die Ökonomie (Primärrohstoffe, aber auch erneuerbare Energien und Sekundärrohstoffe) in physischen Einheiten abbildet (274 Gütergruppen x Primärinputarten). Die berücksichtigten Primärinputs in die Ökonomie werden lückenlos und überschneidungsfrei den Gütern der letzten Verwendung zugeordnet (kumulierter Primärinputaufwand).

In URMOD wird dieser Modellansatz um die zusätzliche „Primärinputkategorie“ Treibhausgase (siehe Abbildung 33) erweitert. Dazu müssen die beiden Grundelemente des Modells entsprechend angepasst werden. In die Matrix der Primärinputs wie auch in die Input-Output Tabelle werden zusätzliche Kategorien bzw. Gütergruppen für die Abbildung der Treibhausgase („NIR Bereiche“) eingefügt. Darüber hinaus muss die Gütergruppengliederung der Input-Output Tabelle so erweitert werden, dass die indirekten Treibhausgasströme hinreichend detailliert abgebildet werden können. Es muss bei der Erweiterung auch berücksichtigt werden, dass geeignete Schnittstellen zum Andocken an die anderen Modelle des Projektes entstehen.

Abbildung 33: Integration der Treibhausgase in das Modell URMOD



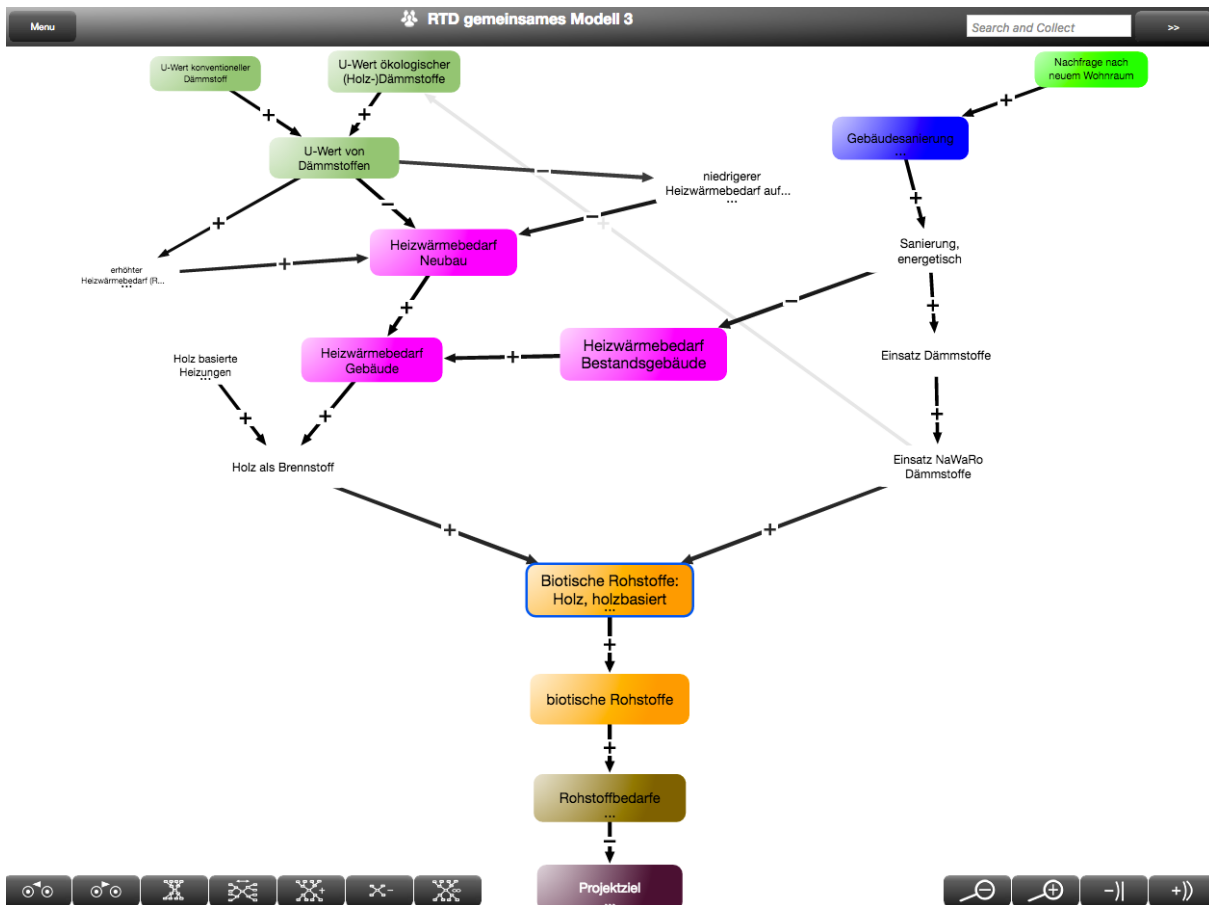
### 9.1.5 iMODELER

Im Rahmen des RTD-Projektes verwenden wir sowohl die qualitative als auch die quantitative Ursache-Wirkungsmodellierung mit dem iMODELER.

Qualitativ bilden wir die Faktoren ab, die wir in dem Projekt jeweils zur Energiegewinnung und zum Energieverbrauch auf der einen Seite, und zur Ressourceninanspruchnahme auf der anderen Seite berücksichtigen, und verdeutlichen durch die Wirkungspfeile die Zusammenhänge, wie wir sie mit den Sensitivitäten rechnen. Abbildung 34 zeigt einen frühen Bearbeitungsstand dieses Modells. Über Kategorien können wir unter anderem die jeweiligen Quellen und Ansprechpartner für die Daten hinterlegen. Denkbar ist auch eine qualitative Gewichtung und Analyse des Modells, die Aufschluss über Wirkungsschleifen und synergetische oder ambivalente Wirkungsketten geben. Zu den Möglichkeiten und Grenzen der qualitativen Modellierung siehe auch Kapitel 7.3. Das Modell hilft im Rahmen

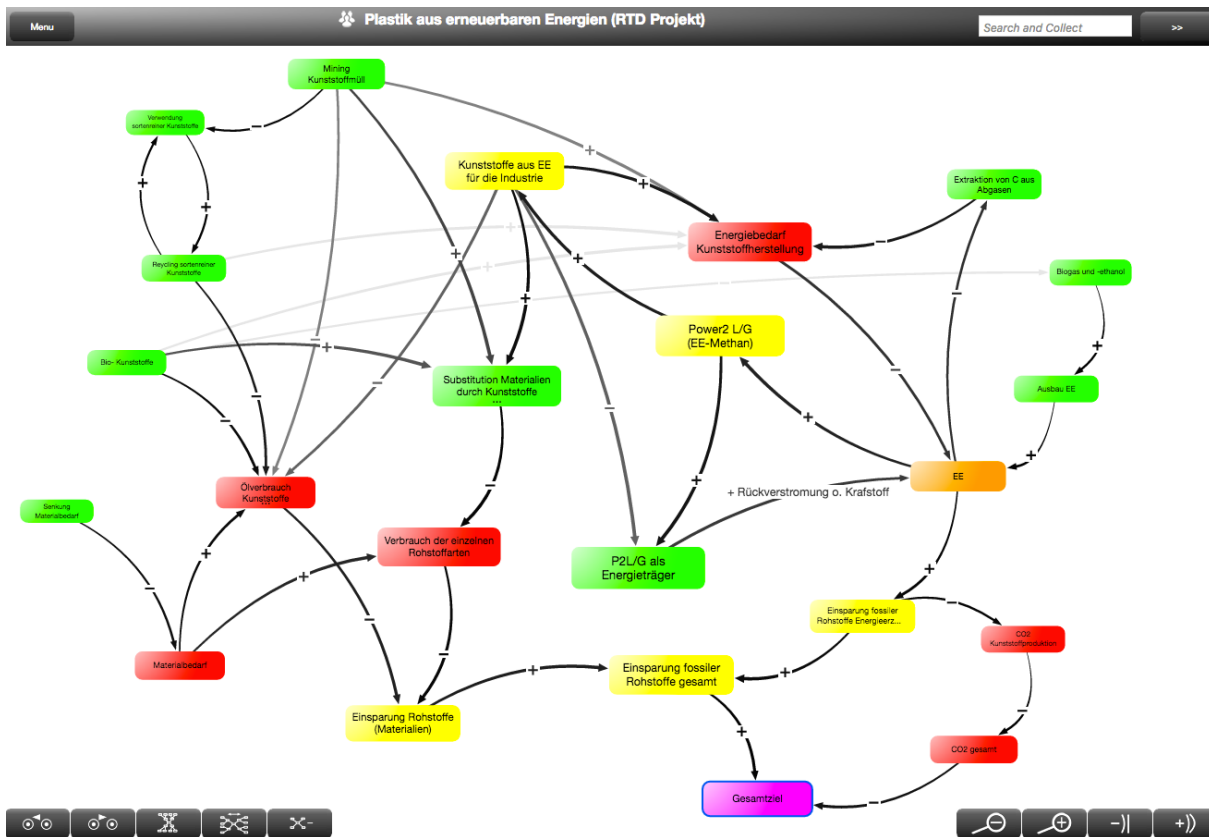
des Projekts RTD bei der Konzeption, bei der Kommunikation und auch bei der Auswahl von Themen für Szenaretten.

Abbildung 34: Qualitatives Ursache-Wirkungsmodell zur Reflexion der Zusammenhänge zwischen Ressourceninanspruchnahme und Energieverbrauch und -erzeugung



Diese so genannten Szenaretten zu noch final mit dem Umweltbundesamt abzustimmenden Themen erlauben die flexible Simulation von Szenarien durch das Projektteam und durch das Umweltbundesamt selbst. Die Themen können entweder aggregiert über viele Aspekte des Projekts laufen, oder auf Details blicken, die in dem Projekt sonst nicht betrachtet würden. Aktuelle Ideen für Themen sind zum Beispiel die Verwendung von Kunststoffen aus erneuerbaren Energien auch mit Blick auf das Substitutionspotenzial anderer Materialien, oder ein aggregiertes Modell, welches grob grundsätzliche Wege zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels mit dem gleichzeitigen Ziel der Minimierung der Ressourceninanspruchnahme zu ermitteln erlaubt. Zu den Möglichkeiten und Grenzen solcher Szenaretten und der quantitativen Modellierung siehe auch Kapitel 7.3. Das hierfür gewählte Aggregationsniveau bzw. die Wahl der Faktoren in den Detailmodellen wird durch die gebündelten Kompetenzen des Konsortiums konsistent.

Abbildung 35: Erste Skizze zum möglichen Umfang einer Szenarrete zur Simulation von Szenarien zur Frage der Gewinnung von Plastik aus erneuerbaren Energien



## 9.2 Ausgewählte exogene und endogene Parameter

Die Arbeit im Modellverbund impliziert, dass Parameter, die in einem Modell als Ergebnis vorliegen, in ein nächstes Modell als Inputparameter eingehen. Diese Parameter verstehen wir als endogene Parameter innerhalb des Modellverbundes. Davon lassen sich exogene Parameter, die von außen vorgegeben werden und gleichermaßen für alle (vom spezifischen Inhalt betroffenen) Modelle des Modellverbundes zugrunde gelegt werden, unterscheiden.

Zu den **exogenen Parametern** gehören beispielsweise Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung, zu Bereitstellungspfaden von Materialien oder zu den Potenzialen der erneuerbaren Energien. Die Werte dieser exogenen Parameter wurden bzw. werden im Normalfall in Absprache mit dem Auftraggeber (UBA) und auf der Basis ausgewählter Studien festgelegt. Die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung basieren auf der aktuellsten 13. koordinierten Bevölkerungsprognose, Variante 1 „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ von Destatis (2015), die unter anderem die gegenwärtig hohen Zuwanderungen berücksichtigt. Die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung sind sehr grundlegend für unsere Modellierungen und finden in nahezu allen Modellen und Berechnungen Eingang, bspw. bei der Aktualisierung der Abschätzung der Wohnfläche (Eingangsparameter in GEMOD), bei der Abschätzung der Verkehrsleistungsentwicklung (Eingangsparameter in TREMOD), bei der Berechnung der landwirtschaftlichen Erzeugnisse als Beispiel einer sektorspezifischen Berechnung und bei der Berücksichtigung der privaten Nachfrage (letzte Verwendung) in URMOD.

Weitere ausgewählte Beispiele für exogene Parameter, die in einzelne oder mehrere Modellen eingehen, sind:

- ▶ in TREMOD beispielsweise die Summe der jährlichen Kfz-Neuzulassungen, Bereitstellungspfade für erneuerbare Energieträger, elektrische Fahrleistungsanteile bei PHEV und bei Oberleitungs-Lkw;

- ▶ im Energiesystemmodell SCOPE beispielsweise die Entwicklung der Endenergie bzw. Effizienz, der Stromverbrauch für herkömmliche Anwendungen, die zusätzliche Stromnachfrage durch Klimatisierung oder neue industrielle Verfahren, die Endenergie der Industrieprozesswärme, der Brennstoffbedarf und die technischen Potenziale wie KWK, sowie Biomassepotenziale und Nutzung;
- ▶ In URMOD ist die Festlegung des Verhältnisses von Importen zu inländischen Extraktionen ein Beispiel für den Wert eines exogenen Parameters, den es im weiteren Verlauf des Projektes festzulegen gilt. Ein anderes Beispiel sind die Annahmen zu Erzkonzentrationen der Metalle in den Stütz- und Zieljahren, die unter Berücksichtigung der bekannten Reserven und der angenommenen Nachfragen anderer Länder exogen vorgegeben werden.

**Endogene** Parameter sind in unserem Modellverbund solche, die im Rahmen eines Modells erzeugt werden, dort als Ergebnis vorliegen und dann in einem weiteren Modell als Eingangsparameter genutzt werden. Folgende Beispiele seien genannt:

- ▶ der Energiebedarf verschiedener Endenergieträger im Verkehr, der sich in TREMOD aus der Modellierung der mittleren Energieeffizienz der zukünftigen Kfz-Flotten (basierend auf Neuzulassungen, Überlebenskurven, spezifischer Energieeffizienz in einzelnen Fahrzeugschichten) und der modellierten Entwicklung der Fahr- und Verkehrsleistungen ergibt;
- ▶ der Energie- und Materialbedarf zur Fahrzeugherstellung aus TREMOD materials, der zur Ermittlung der gesamten Ressourcenbedarfe für die jährliche Fahrzeugherstellung in Deutschland ins IOT-Modell einfließt;
- ▶ Über GEMOD werden die jährlichen Endenergieverbräuche der verschiedenen Heizungstechnologien zu Wärmeversorgung der Gebäude in Abhängigkeit des erreichten Dämmniveaus berechnet. Zur Kopplung mit dem Modell SCOPE werden sie in stündlich aufgelöste Strom- und Fernwärmelastgänge umgerechnet, deren Deckung durch Strom- und netzgebundene Wärmeerzeugungsanlagen durch SCOPE optimiert wird;
- ▶ die GIS-basierten Flächenpotenziale für Windkraft Onshore und Offshore und Photovoltaik-Dachflächen und –Freiflächen, die als technische Obergrenze als Eingangsdaten für die wirtschaftliche Ausbauplanung (SCOPE) dienen.
- ▶ Vom UBA werden Entwicklungen zur Energieeffizienz und zum Endenergieverbrauch in den verschiedenen Bereichen der Anwendungsbilanz (Haushalte, Gewerbe, Industrie – Strom, CH<sub>4</sub> – Wärme, IKT, Kühlen, mechanische Energie, ...) unterstellt. Die Deckung dieser Nachfrage unter der Rahmenbedingung der Versorgungssicherheit wird entsprechend im Rahmen der Ausbauplanung (SCOPE) bestimmt.
- ▶ TREMOD und GEMOD liefern technische Potenziale im Gebäudebereich, die Entwicklung des Verkehrsaufkommens und technische Potenziale im Straßenverkehr als Eingangsdaten für die Ausbauplanung (SCOPE). Dazu zählen auch technologische Entwicklungen (Effizienzen, Kosten) im Gebäude- und Verkehrsbereich.

Ergebnisse sowohl aus TREMOD, GEMOD und SCOPE finden wiederum Eingang in die rohstofflichen Berechnungen im umweltökonomischen Rohstoff- und THG-Modell. So sind beispielsweise die Veränderung der Fahrzeugflotte und der Verkehrsleistung nach Verkehrsträger aus TREMOD, die veränderten Aufwände für Dämmungen und neue Haustechniken (z.B. für Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung) aus GEMOD oder die Mengengerüste für neue Windkraft-, PV- oder Geothermie-Anlagen Eingangparameter in URMOD, auf deren Basis dann die gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarfe und die vorgelagerten Treibhausgasemissionen der Importe berechnet werden. Die Parameter werden dabei von den drei genannten Modellen zur Integration in URMOD quasi „übersetzt“: Da URMOD einen statisch-komparativen Ansatz hat, werden die endogenen Parameter hinsichtlich ihres

Unterschiedes, den sie zwischen dem URMOD-Basisjahr 2010 und dem prognostizierten Zieljahr haben, aufbereitet. Die Unterschiede können dabei hinsichtlich ihrer Marktdurchdringung, Produktionstechnologie und/oder auch Materialintensitäten aufbereitet werden (siehe Beitrag von Schoer und Dittrich zum Einsatz des umweltökonomischen Modells im Projekt DeteRes).

### 9.3 Bedarf an Konsistenzchecks im Projektrahmen

Bei einem solch komplexen Modellverbund stellt sich die Frage, wie die Konsistenz, also die Widerspruchsfreiheit, im Projekt gewährleistet werden kann. Der Bedarf an Konsistenzchecks besteht in zweierlei Hinsicht: einmal müssen die in einem Modell zugrunde liegenden Annahmen und Ergebnisse konsistent mit den Annahmen bzw. Eingangsparametern und Ergebnisse in anderen Modellen sein; zum anderen müssen aber auch die Annahmen und angenommenen Trends in den verschiedenen Sektoren untereinander konsistent sein.

Der erstgenannte Bedarf an Konsistenzchecks ist vor allem über die unter Punkt 2 bereits genannten Parameter, die als Ergebnis eines Modells in ein anderes Modell einfließen, in einem hohen Maße gewährleistet. Dazu bedarf es einer hohen Transparenz der jeweiligen Modellparameter und der Verbindungen zwischen den einzelnen Modellen. Das heißt detaillierte Information und gegenseitiger Austausch gehören zu den wichtigsten Elementen, um Konsistenz zwischen den Modellen und Berechnungen herzustellen. In der Praxis ist der Bedarf an bilateralen Abstimmungen durchaus hoch, und manche abzustimmende Verbindungen zeigen sich auch erst im Verlauf der Arbeit.

RTD baut hierbei auf erfolgreiche Kooperationsprojekte zwischen einzelnen Modellen auf, darunter:

- ▶ Im Projekt „INTERAKTION EE-STROM, WÄRME UND VERKEHR“ (im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)) wurden bereits die Modelle TREMOD und GEMOD in Verbindung mit dem Energiesystemmodell SCOPE eingesetzt. So wurde der in TREMOD ermittelte zukünftige Bedarf von erneuerbarem Strom und strombasierten Kraftstoffen für den Verkehr mit der notwendigen Bereitstellung von erneuerbarem Strom für das gesamte Energiesystem in Deutschland gekoppelt. Die Rahmenannahmen aus TREMOD haben direkten Einfluss auf die im Verkehrssektor benötigten Energiemengen, insb. den steigenden Bedarf an Strom und strombasierten Kraftstoffen und die damit notwendige Kopplung des Verkehrs mit dem Energiesystem.
- ▶ Im Projekt DeteRes wurde die Verknüpfung von TREMOD und URMOD erfolgreich praktiziert. So wurden zum Beispiel die Ergebnisse zur Verkehrsleistung unterschiedlicher Verkehrsträger aus TREMOD in URMOD zur Berechnung der benötigten Rohstoffe und Rohstoffäquivalente übersetzt. Zusätzlich werden in RTD beispielsweise Daten aus TREMOD materials zum Materialbedarf der zukünftigen Fahrzeugflotten zur Überprüfung und Anpassung der Materialstromtabellen und der Rohstoffbedarfe im Input-Output-Modell verwendet.

Der zweitgenannte Bedarf an Konsistenzchecks ist anspruchsvoller: Die verschiedenen Trends und Veränderungen, die in den einzelnen Sektoren angenommen werden, müssen konsistent zueinander sein. Da RTD inhaltlich stark auf THGND aufbaut, und sich THGND auf Emissionen fokussiert, jedoch die rohstoffliche Seite nicht beleuchtet, liegt die wesentliche Herausforderung im Projekt darin, die Verbindungen zwischen Treibhausgasen und Rohstoffbedarfen sowie die Rohstoffbedarfe der verschiedenen Sektoren widerspruchsfrei zu modellieren. Während die erstgenannte Herausforderung durch URMOD gewährleistet wird (siehe oben), ist zweitgenannte Herausforderung im gesamten Modellverbund zu berücksichtigen.

Um das gewährleisten zu können, müssen die jeweiligen inhaltlichen Verbindungen zwischen den einzelnen Sektoren und die Auswirkungen von Veränderungen eines Sektors auf einen anderen den jeweils zuständigen BearbeiterInnen bekannt sein. Unabhängig von allen einsetzbaren Methoden und Instrumenten erfordert dies ganz grundlegend von allen Mitarbeitenden ein hohes Maß an Bereitschaft, ihren eigenen Arbeitsbereich anderen verständlich zu machen, über ihren eigenen Sektor

hinauszuschauen und in andere Sektoren hineinzuschauen. Dies stellt einen eigenen Arbeitsaufwand dar, aber gleichzeitig entsteht darin auch ein hoher Mehrwert für alle Beteiligten und für das Projekt selbst. Viele rohstoffliche Auswirkungen von Veränderungen eines Sektors auf einen oder mehrere andere sind wissenschaftlich bislang nur unzureichend durchdrungen. Die Abstimmungen unter den Mitarbeitenden ermöglichen, Wissenslücken zu thematisieren und ausschnittsweise, z.B. mit Hilfe von Szenarettens, zu vertiefen.

Es ist wichtig, sich an dieser Stelle klarzumachen, dass im Rahmen von RTD ein sehr ambitionierter und tiefgreifender technischer Wandel einer ganzen Volkswirtschaft durchdacht und umfänglich modelliert werden soll. Die in diesem Reader gestellte Frage nach Konsistenzchecks bedarf erst einmal einer Antwort auf die Frage, was in einer Ökonomie konsistent ist und was nicht – und eine Antwort darauf ist sicher nicht in allen Bereichen einfach. Konsistenz ist im naturwissenschaftlichen Sinne eindeutig, weil auf eindeutige naturgegebene Gesetze aufgebaut wird und damit Widerspruchsfreiheit erzeugt werden kann. Im ökonomischen und gesellschaftlichen Sinne ist diese Eindeutigkeit in der Realität jedoch gar nicht so eindeutig gegeben: Es gibt in jeder Ökonomie widersprüchliche Trends, die sich teils überlagern und verstärken, und sich teils auch entgegenstehen können. Ein so tiefgreifender Wandel der ökonomischen Grundlagen, wie er in RTD emissionsseitig und rohstofflich durchgedacht werden soll, ist beispiellos in der Geschichte, und es ist zu hinterfragen, ob bzw. welche (statistischen) Zusammenhänge aus der Vergangenheit im Projekt fortschreibbar sind.

Im Projekt RTD versuchen wir ferner, technische Lösungen ohne Lebensstiländerungen nachzubilden. Wir unterstellen in den meisten Bereichen, dass eine Vielzahl an Technologien Einzug in das Leben der Menschen findet, ohne dass diese Technologien Auswirkungen auf ihre ökonomisch relevanten Handlungen haben (Stichwort Rebound-Effekte). Das ist bereits eine grundlegende Inkonsistenz, die aber nicht bzw. nur in einem sehr kleinen Umfang in diesem Projekt berücksichtigt werden kann und werden soll. So wird beispielsweise im Bereich der Heizwärmebedarfe berücksichtigt, dass in sehr gut gedämmten Wohnungen das empirische Verbrauchsniveau häufig höher ist als der theoretisch berechnete Bedarf; bei schlecht oder nicht gedämmten Wohnungen verhält es sich häufig umgekehrt. Erklärt werden kann dies häufig durch Rebound in Form veränderter Komfortansprüche der Bewohner. Bewohner in schlecht gedämmten Gebäuden heizen dagegen häufig sparsamer als die Berechnungsverfahren der Energieeinsparverordnung dies annehmen. Unberücksichtigt bleiben hingegen nach gegenwärtigem Stand mögliche ökonomisch relevante Verhaltensänderungen aufgrund zunehmender Nutzung von IKT-Technologien, auch wenn die erhöhten Strombedarfe für die Technologien Berücksichtigung finden.

Zusätzlich zu dem oben bereits genannten, sehr wichtigen Element der kontinuierlichen gegenseitigen Information und Kommunikation versuchen wir eine möglichst hohe Konsistenz im Projekt RTD zu gewährleisten, indem wir mit Hilfe des iMODELERS die maßgeblichen Faktoren, die in einem Sektor Auswirkungen auf einen anderen Sektor haben bzw. wesentliche Parameter, die in einem Modell erzeugt und in ein anderes Modell einfließen, transparent machen. Die Auswirkungen von einem Faktor auf einen oder mehrere andere stellen wir dabei qualitativ dar. Das Darstellen impliziert dabei, dass die inhaltlichen Auswirkungen von den zuständigen ProjektmitarbeiterInnen bedacht sind bzw. bei Bedarf durchgesprochen werden. Der Einsatz dieses Modells ist projektbegleitend; das heißt über die Zeit werden weitere Faktoren oder aber auch Differenzierungen von bestehenden Faktoren hinzukommen.

## 9.4 Ausblick in Sachen Konsistenz: besondere inhaltliche Herausforderungen

Wie in den vorigen Ausführungen dargelegt, unterstützen die jeweiligen Modelle einzeln und im Verbund die BearbeiterInnen darin, ein konsistentes und differenziertes Bild eines treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschlands auf der Basis der gegenwärtig bekannten Zusammenhänge zu berechnen.

Aber genau an den Punkten, wo die Vergangenheit nicht oder möglicherweise nur eingeschränkt fortschreibbar ist, liegen viele spannende Fragen, die wir im Projekt in den kommenden Monaten diskutieren werden und für deren Beantwortung wir eine möglichst konsistente Vorstellung für die Zukunft benötigen. Zu diesen Fragen gehören unter anderem die Auswirkung der angenommenen rückläufigen Bevölkerung auf die wirtschaftliche Produktionsleistung auch unter möglicher Berücksichtigung zunehmender Automatisierung. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund relevant, dass aus politischen Gründen Deutschland weiterhin als (erfolgreicher) Industriestandort gedacht und damit bevorzugt ein absolutes Wirtschaftswachstum und nicht ein Rückgang unterstellt werden soll. Eine rückläufige und alternde und reichere Bevölkerung hat Auswirkungen auf die Konsummenge und -struktur. Dies gilt es bei der rohstofflichen Aufteilung des inländischen Konsums und der Exporte differenziert nach Gütergruppen zu berücksichtigen. Gleichzeitig gilt zu bedenken, dass innovative Industriezweige im Allgemeinen international konkurrenzfähiger sind, wenn sie einen großen nationalen Markt bedienen. Da Deutschland aus rohstofflicher Sicht bereits jetzt hochgradig in die internationalen Wirtschaftsverflechtungen eingebunden ist, sind auch verschiedene Annahmen, die für das Ausland getroffen werden, konsistent zu Annahmen für Deutschland zu gestalten. Hinsichtlich mancher Technologien kann Deutschland als Vorreiter im internationalen Kontext gedacht werden; bei anderen Technologien sind gleichzeitige Veränderungen in Deutschland und Europa konsistenter: Wenn in Deutschland beispielsweise der verstärkte Einsatz von Oberleitungs-LKWs im Verkehrsbereich angenommen wird, so kann das nur dann sinnvoll und widerspruchsfrei angenommen werden, wenn auch im europäischen Ausland die entsprechende Infrastruktur mit allen Rohstoffbedarfen und damit auch die Verbreitung der Technologie unterstellt wird.

Diese und weitere Veränderungen, die eine Transformation des deutschen Wirtschaftssystems von einem fossil basierten auf ein regeneratives Energieregime bedingen, gilt es im Rahmen des Projektes RTD weitestgehend durchzuspielen. Der oben dargestellte Modellverbund unterstützt dabei die Zeichnung eines zusammenhängenden und möglichst widerspruchsfreien Bildes einer ambitionierten, aber technisch möglichen Transformation.

## 9.5 Literatur

Destatis (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden.

[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/Bevoelkerung-Deutschland2060Presse5124204159004.pdf;jsessionid=179EDBC76749ADA4FCBE8E124AC6A08D.cae1?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/Bevoelkerung-Deutschland2060Presse5124204159004.pdf;jsessionid=179EDBC76749ADA4FCBE8E124AC6A08D.cae1?__blob=publicationFile)

Ifeu, 2016: Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014).

IWES (2016): Modellbeschreibung Scope. [http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschueren/2015\\_F\\_SCOPE\\_booklet.pdf](http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschueren/2015_F_SCOPE_booklet.pdf)

IWU (2013): Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU.

IWU (2012): TABULA DE Germany - Country Page. abgerufen am 17. 08 2014 von <http://www.episcope.eu/building-typology/country/de/>

Sinus Sociovision, Ecolog (2008): Umweltbewusstsein und Umweltverhalten der sozialen Milieus in Deutschland. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau





## 10 Konsistenz im Projekt DeteRes, Anforderungen durch das umweltökonomische Rohstoffmodell

Karl Schoer<sup>1</sup>, Monika Dittrich<sup>2</sup> und Christian Sartorius

<sup>1</sup> Karl Schoer, unabhängiger wissenschaftlicher Gutachter

<sup>2</sup> IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg

### 10.1 Einleitung

Das hier vorgestellte umweltökonomische Rohstoffmodell wird im UFO-Planprojekt „Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRes)“ eingesetzt. Das Ziel des Projektes liegt darin abzuschätzen, wie sich die zukünftigen deutschen Rohstoffbedarfe (RMI, RMC) und die Rohstoffproduktivität bei verschiedenen technisch möglichen Entwicklungen verändern. Dazu werden drei Szenarien untersucht, die einen Entwicklungskorridor aufzeigen sollen:

1. Das Trendszenario „anzunehmende zukünftige Entwicklung (AZE)“ stellt das Referenzszenario dar und berücksichtigt ausgewählte und bis 2014 beschlossene Ressourceneffizienzpolitiken. Es stellt das voraussichtliche Minimum an Materialeinsparungen dar, die bis zum Jahr 2030 umgesetzt werden.
2. Das Szenario „technischer Wandel (TW30)“ geht zusätzlich von technisch ambitionierteren, jedoch realistischen Maßnahmen und Änderungen aus, die sich bis zum Jahr 2030 in einer Steigerung der Materialeinsparung niederschlagen.
3. Das dritte „Szenario“ (TW30+) ist die Abschätzung einer weitgehenden, noch anspruchsvolleren Umsetzung von Maßnahmen der Materialeinsparung.

Im Projekt liegt der Fokus auf den drei rohstoffintensiven Sektoren Energie, Verkehr und Bau (Hoch- und Tiefbau). Es liegt ein weit gefasstes Verständnis von Rohstoff- und Materialverwendung zugrunde, bei dem auf die gesamte Rohstoffverwendung zu Beginn der Wertschöpfungskette Bezug genommen wird, so dass sich Einsparungen nicht nur durch die effizientere Verwendung (mehr Output pro Input) erzielen lässt, sondern auch durch die Wiederverwendung bzw. das Recycling von Rohstoffen oder durch die Substitution von Rohstoffen mit einem hohen vorgelagerten Rohstoffaufwand durch solche mit niedrigem. Das Basisjahr ist 2010, das Prognosejahr der Szenarien AZE und TW ist 2030.

### 10.2 Das umweltökonomische Input-Output Modell

Die Szenarien werden mit Hilfe des umweltökonomischen Rohstoffmodells modelliert, das auf einem umweltökonomischen Input-Output (IOT) Modell beruht. Mit Hilfe des IOT Modells werden insbesondere rohstoffbezogene Informationen in konsistenter Weise auf detaillierter Ebene mit den wirtschaftlichen Produktions- und Konsumaktivitäten verknüpft. Auf dieser Grundlage können dann z.B. die aggregierten Rohstoffindikatoren RMI und RMC gebildet werden.

Das Modell bildet die Produktionsverflechtungsbeziehungen in einer Volkswirtschaft vollständig ab. D.h. alle Produktionsketten in einer Volkswirtschaft und ihre Querbeziehungen sind einbezogen. Dieses Modell erlaubt es, z.B. den Input eines Rohstoffes über das gesamte Produktionskettengeflecht hinweg bis zu den Endprodukten zu verfolgen.

Das technische Verfahren zur Zuordnung von Primärrohstoffen (und anderen sogenannten Primärinputs) zu Gütern folgt dem sogenannten Leontief-Ansatz. Mit diesem auf einer Abfolge von Matrizenoperationen beruhenden Verfahren werden die Primärinputs in eine Volkswirtschaft den Gütern der letzten Verwendung zugerechnet (Konversion der monetären Güterströme in Rohstoff- bzw. Primärinputäquivalente).

Der Rohstoff- bzw. Primärinputgehalt der Importgüter wird im Modell extern mit Hilfe eines sogenannten 3-Regionen-Modells ermittelt. Es wird dabei nach den Regionen Deutschland, EU (ohne Deutschland) und Nicht-EU unterschieden. Der Primärinputgehalt der Importe aus den EU-Ländern wird mit Hilfe eines nahezu spiegelbildlichen Leontief-Modells für die EU abgeleitet. Die Schätzung des Rohstoffgehalts der Importe aus Nicht-EU-Ländern beruht grundsätzlich auf der Unterstellung, dass die Herstellung dieser Güter auf EU-Technologie beruht. Diese Annahme bezüglich der Nicht-EU-Importe wird aber in wesentlichen Punkten modifiziert durch die Berücksichtigung spezifischer Informationen zu den Herkunftsländern über Metallgehalte der Erze, Metallrecyclingraten und den Energieträgermix bei der Stromerzeugung.

Das eingesetzte Modell basiert auf dem Eurostat-RME-Modell, das seit mehreren Jahren für die Berechnung der Indikatoren RMI und RMC eingesetzt wird (Schoer et al., 2012). Für die Bedarfe des Projekts DeteRes wurde das Modell für Deutschland insbesondere bezüglich des Differenzierungsgrades weiterentwickelt. So unterscheidet das Modell z.B. nach 272 Gütergruppen gegenüber nur 182 Gütergruppen beim Eurostat-RME-Modell. Beide Gliederungstiefen gehen deutlich über die Gliederungstiefe von 72 Gütergruppen der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten IOT hinaus.

Die Disaggregation der DeteRes-IOT gegenüber dieser Standard-IOT bezieht sich insbesondere auf die Bereiche Rohstoffextraktion, primäre Verarbeitung von Rohstoffen (z.B. Metallerzeugung, Baustoffherstellung oder Stromerzeugung) und auf die Darstellung einiger besonders materialrelevanter Produktionsaktivitäten (z.B. Bauproduktion, Verkehr, Stromerzeugung sowie Abfallverarbeitung). Mit der erweiterten Gliederung wird vor allem das Ziel verfolgt, Rohstoffflüsse durch die Ökonomie möglichst differenziert abzubilden. Das Modell unterscheidet weiterhin 41 Kategorien der letzten Verwendung (Untergliederung von Konsum, Ausrüstungsinvestitionen und Bauinvestitionen). Bei den Primärinputs wird nach 52 Primärrohstoffarten, stofflich verwerteten Abfällen (9 Arten), energetisch verwerteten Abfällen (7 Arten), erneuerbaren Energien (6 Arten) und der geleisteten Arbeitszeit unterschieden.

Im Unterschied zum Modell im Projekt DeteRes werden im RME-Modell der UGR des Statistischen Bundesamtes Im- und Exporte von Metallschrott und Sekundärmetallen wie Primärmetalle behandelt. Dies bedeutet, dass sich z.B. ein Anstieg von Sekundärmetallimporten in vollem Umfang in einer Erhöhung der RME der Importe niederschlägt. Dagegen werden im Modell in DeteRes den in den Importen und Exporten enthaltenen Sekundärrohstoffen keine unmittelbaren Rohstoffäquivalente zugeordnet. Diese Vorgehensweise steht im Einklang mit dem Eurostat-RME-Modell und den relevanten methodischen Vorgaben des Produktionskonzepts des SNA (System of National Accounts) und des SEEA (System of Environmental Economic Accounts). Aufgrund dieses methodischen Unterschiedes weist das UGR-Modell deutlich höhere Primärmetallgehalte der Im- und Exporte nach. Ergänzend zu den Primärrohstoffströmen werden im DeteRes-Modell die Sekundärrohstoffgehalte der Güter als Zusatzinformation abgeleitet, um Substitutionsprozesse modellieren zu können.

Hauptdatenquelle für die Disaggregation der DeteRes-IOT sind die nach rund 2600 Gütergruppen untergliederten Aufkommens- und Verwendungstabellen der VGR des Statistischen Bundesamtes. Diese Tabellen sind für interne Abstimmzwecke konzipiert und werden deshalb nicht veröffentlicht. Aus diesen Tabellen wurden zur Projektbearbeitung relevante Auszüge zur Verfügung gestellt. Daneben wurden für die Aufstellung des Modells zahlreiche weitere Quellen, wie z.B. eine tief gegliederte

landwirtschaftliche Input-Output Tabelle (46 Produktionsprozesse)<sup>24</sup> sowie Sektorstudien (z.B. Bauwirtschaft und Verkehr) genutzt.

### 10.3 Umweltökonomische Rohstoffszenarien

Neben den Berechnungen des Basisjahres 2010 werden drei Zukunftsszenarien gerechnet:

- ▶ das Referenzszenario „Absehbare zukünftige Entwicklung“ mit bis zum Jahr 2030 bereits beschlossenen Einsparmaßnahmen (AZE30),
- ▶ das Szenario „Technologischer Wandel“ mit bis zum Jahr 2030 zusätzlich durchführbaren, realistischen Einsparmaßnahmen (TW30) und
- ▶ eine Abschätzung einer möglichst weitgehenden Umsetzung von Maßnahmen der Materialeinsparung (TW30+).

In den mit dem IOT-Modell berechneten Szenarien werden Ergebnisse zu Einzelentwicklungen, die in den anderen Arbeitspaketen des DeteRes-Projectes erarbeitet wurden, zu einem konsistenten Gesamtbild für die Wirtschaftsentwicklung und die damit verbundene Rohstoffnutzung zusammengeführt.

Der Aufstellung der Szenarien liegt ein komparativ-statisches Input-Output-Modell zugrunde. Ausgangspunkt für die Aufstellung von Szenarien ist das IOT-Basismodell 2010. Die Szenarien werden abgeleitet durch Variation bestimmter Parameter des Basismodells.

Schaubild 1 zeigt im oberen Teil den Ablauf des Leontiefverfahrens für das Basismodell 2010. Daran anknüpfend wird im unteren Teil des Schaubildes der Berechnungsablauf des Szenariomodells dargestellt.

---

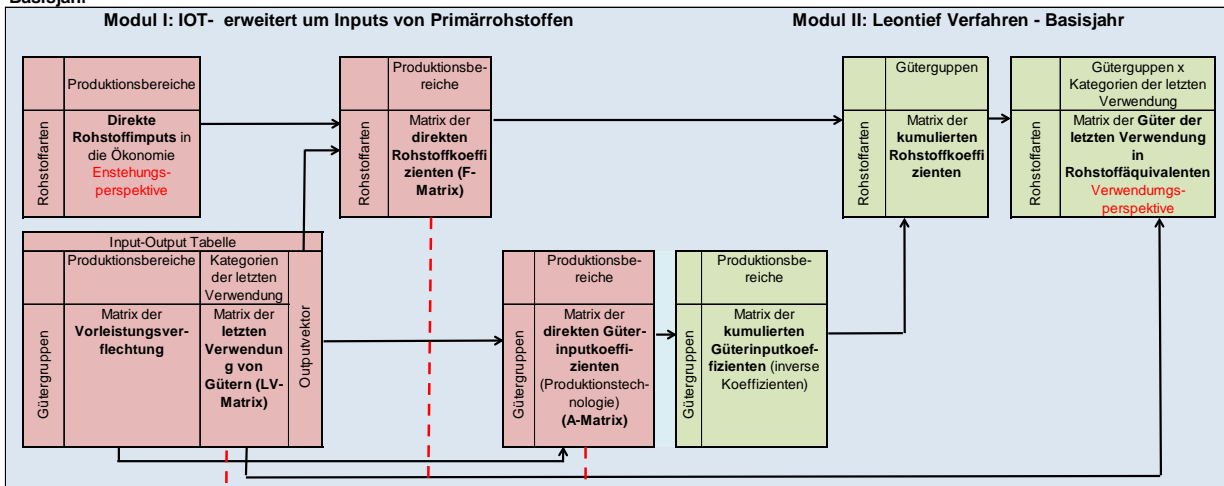
<sup>24</sup> Diese wird regelmäßig vom Thünen-Institut im Auftrag der UGR ermittelt.

Abbildung 36: Grundschemata des Szenario-Modells

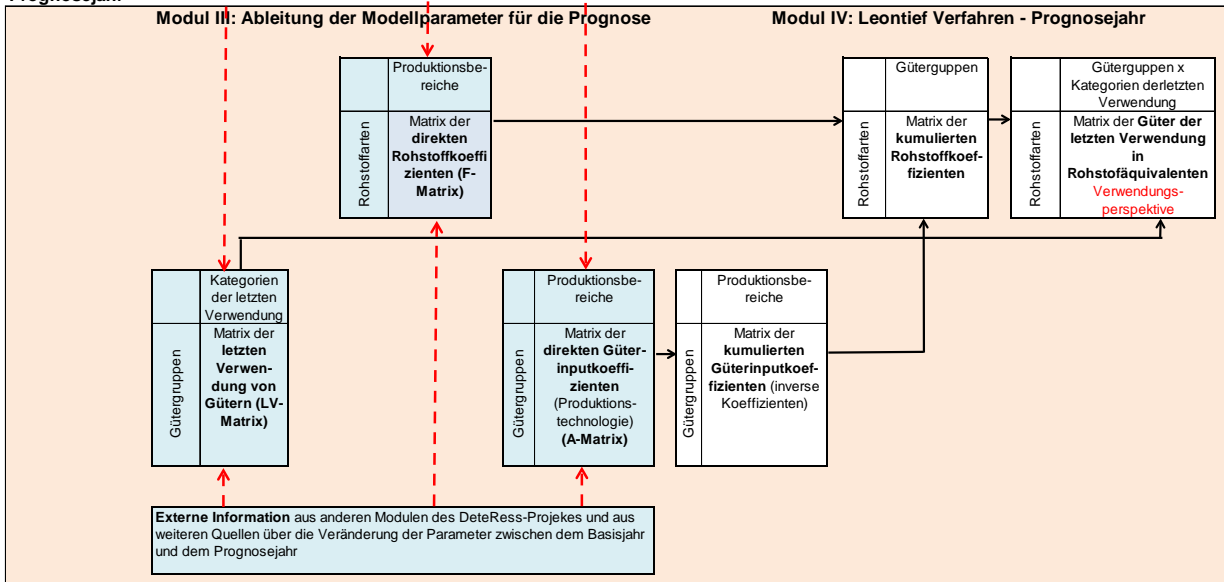
**Grundschemata Szenario Modell**

Umweltökonomisches Input-Output Modell zur Schätzung von Rohstoffäquivalenten (kumulierter Rohstoffaufwand)

Basisjahr



Prognosejahr



Startpunkte für die Berechnungen zum Basismodell sind die Güterverflechtungsmatrix und die Endnachfragematrix (LV-Matrix) der IOT sowie die Matrix der direkten Rohstoffinputs.

Die Matrix der direkten Rohstoffkoeffizienten (F-Matrix) wird rechenstechnisch ermittelt, indem die Matrix der direkten Rohstoffinputs durch den Outputvektor dividiert wird.

Die Matrix der direkten Güterinputkoeffizienten (A-Matrix) wird abgeleitet, indem die Güterverflechtungsmatrix durch den Outputvektor dividiert wird.

Mit Hilfe der Matrizeninversion (Leontiefverfahren) wird die Matrix der kumulierten Güterinputkoeffizienten (L-Matrix) aus der A-Matrix abgeleitet.

Die Multiplikation von F-Matrix und L-Matrix ergibt die Matrix der kumulierten Rohstoffkoeffizienten (FL-Matrix). Die Matrix der Güter der letzten Verwendung in Rohstoffäquivalenten leitet sich ab durch die Multiplikation der FL-Matrix mit den einzelnen Vektoren der LV-Matrix.

Das modelltechnische Grundschemata für die Szenario Berechnung mit Hilfe von Parametervariationen wird in der unteren Hälfte des Schaubildes 1 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Basismodell und das Szenariomodell über folgende Parametertypen miteinander verknüpft sind:

- a) Endnachfragematrix (Konsum, Investitionen und Exporte), LV-Matrix
- b) Matrix der direkten Rohstoffkoeffizienten, F-Matrix
- c) Matrix der direkten Güterinputkoeffizienten, A-Matrix

Diese aus dem Basismodell übernommenen Parametermatrizen werden für die Aufstellung von Szenarien durch Heranziehen von externer Information modifiziert. Der Rechenablauf im Szenariomodell ist, ausgehend von den variierten Parametern, weitgehend analog zum Basismodell. Rechentechnisch erlaubt das Modell die Ableitung von Ergebnissen für einzelne Maßnahmen sowie für Maßnahmenbündel durch Verknüpfung der einbezogenen Parametervariationen.

Das Basismodell liefert für das Bezugsjahr eine vollständige, konsistente und empirisch fundierte Beschreibung der Güter- und Rohstoffströme in der Volkswirtschaft.

**Interne Konsistenz:** Durch Parametervariationen werden neue Systemzustände simuliert. Die logische Kohärenz des Modells bleibt auch nach der Parametervariation voll erhalten. D.h. die abgeleiteten Systemzustände verkörpern jeweils konsistente Systembeschreibungen.

**Endogene und exogene Variablen:** Wie oben dargestellt, werden für die Aufstellung des Szenariomodells einzelne Modellparameter durch Nutzung von externer Information variiert. Damit entsteht im Vergleich zum Basismodell ein neuer Systemzustand. Dies bedeutet umgekehrt, dass ausschließlich die Variation einzelner Modellparameter exogen vorgegeben wird. Alle weiteren Variablen des Modells werden endogen abgeleitet. Zum Beispiel führen eine punktuelle Parameteränderung wie eine Änderung der Produktionstechnik oder mehrere gleichzeitige Parameteränderungen zu einem neuen Systemzustand, der durch das Modell simultan abgeleitet wird.

## 10.4 Konsistenz zwischen IOT Modell und externen Quellen

Externe Informationen für die Parametervariation stammen aus verschiedenen Quellen, wie gesamtwirtschaftlichen ökonomischen Szenarien oder Prognosen, Bevölkerungsvorausberechnungen, verschiedenen sektoralen Studien sowie plausiblen Setzungen.

Aufgrund der gleichzeitigen Nutzung von aus unterschiedlichen Quellen stammenden Informationen für die Aufstellung der Szenarien ergibt sich die methodische Herausforderung eine möglichst weitgehende Konsistenz zwischen dem IOT-Modell und den verschiedenen externen Quellen zu erreichen.

Dabei sind verschiedene Problembereiche zu beachten:

- a) Konzeptunterschiede zwischen dem IOT-Modell und externen Quellen
- b) Unterschiedliche Mengengerüste
- c) Selektive Nutzung der Sektorstudien
- d) Inkonsistenzen zwischen Sektorstudien

Zu a) **Konzeptunterschiede:** Zumeist entsprechen die verfügbaren originären Informationen nicht den Abgrenzungen der zu variierten Parameter des IOT-Modells. D.h. in diesen Fällen können Ergebnisse der Sektorstudien nicht unmittelbar in das Modell eingespeist werden. Als besonders aufwändig erweist sich die Aufstellung von Indikatoren zur Anpassung der A-Matrix, da die Einzelstudien häufig keine unmittelbaren Informationen zur Fortschreibung dieser Technikparameter bereithalten.

Damit die externen Angaben als Indikator für die Parametervariationen nutzbar sind, müssen diese in einem Zwischenschritt für eine möglichst weitgehende Anpassung an die Konzepte der Bezugsparemeter umgeformt werden.

In einigen Fällen ist diese Umformung relativ einfach durchzuführen. So wird zum Beispiel angenommen, dass die Veränderung des Bruttoinlandprodukts die Veränderung der letzten inländischen Verwendung repräsentiert (implizite Annahme: Leistungsbilanzsaldo ist ausgeglichen).

In anderen Fällen sind dagegen mehr oder weniger umfangreiche Schätzmodelle aufzustellen, um geeignete Indikatoren für die Parametervariation abzuleiten. Z.B. wird der Einfluss der aus der Bevölkerungsprognose entnommenen Veränderung der Altersstruktur der Bevölkerung auf die Endnachfrage nach Konsumgütern durch ein Modell geschätzt, das zusätzliche Informationen über das Konsumverhalten nach Altersgruppen einbezieht.

Ein weiteres Beispiel ist die Ableitung der Parameter für Bauleistungen. Die Informationen der Sektorstudie zur Bauproduktion liefern sowohl Informationen zum Verwendungszweck Bauinvestitionen als auch für den Verwendungszweck Vorleistungen (Erhaltungsaufwand). Die externe Information über die Entwicklung von Bauleistungen ist Grundlage für zwei Parametervariationen: a) Bauinvestitionen und b) Inputkoeffizienten für Erhaltungsreparaturen (Vorleistungsinpud je Einheit Output). Die Veränderung des Teils der Bauproduktion, der auf die Investitionen entfällt, kann unmittelbar auf den Parameter Bauinvestition übertragen werden. Die originären Angaben zur Entwicklung des Erhaltungsaufwandes (Vorleistungsinpud in verschiedene Wirtschaftszweige) spiegeln aber neben der Technikänderung auch den Effekt des Wirtschaftswachstums wider. D.h. dieser Wert kann nicht unmittelbar als Indikator für die Variation der Inputkoeffizienten verwendet werden. Er muss vielmehr vorher um den oder die Wachstumseffekte bereinigt werden, welche der Sektorstudie zugrunde liegen.

Inwieweit es gelingt, Konzeptunterschiede mit hinreichender Genauigkeit zu überbrücken, hängt von der Qualität der dazu entwickelten Überleitungsmodelle ab.

Zu b) **Mengengerüst**: Die Mengengerüste können unterschiedlich sein. Das Mengengerüst des IOT-Modells geht im Wesentlichen auf die IOT des Statistischen Bundesamtes und die dahinterstehenden, sehr detaillierten Aufkommens- und Verwendungstabellen sowie die Angaben der UGR über die gesamtwirtschaftliche Rohstoffextraktion zurück, die zu einem lückenlosen und überscheidungsfreien gesamtwirtschaftlichen Modell verbunden sind und darüber hinaus auch in Zeitreihenform verfügbar sind. Innerhalb dieses Rahmens sind das Aufkommen und die Verwendung aller Güter und Rohstoffe in der Volkswirtschaft voll aufeinander abgestimmt.

Sektorstudien stützen sich dagegen häufig auf detaillierte Einzeluntersuchungen. Unterschiede bei den Mengengerüsten können dazu führen, dass sich die absoluten Mengenänderungen unterscheiden, so dass aus den Einzelstudien abgeleitete relative Mengenänderungen an das Mengengerüst des IOT-Modells angepasst werden müssen.

Zu c) **Selektive Nutzung der Sektorstudien**: Das IOT-Modell nutzt Informationen zahlreicher Einzelstudien zumeist nur selektiv. Es werden nur solche Informationen extrahiert, die für bestimmte Parametervariationen (wie z.B. die Änderung der Produktionstechnik) benötigt werden. Dies bedeutet zum Beispiel, dass es Abweichungen bei den Annahmen zu zentralen Rahmenbedingungen wie Wirtschaftswachstum und Produktivitätsentwicklung geben kann.

Zu d) **Inkonsistenzen zwischen Sektorstudien**: Es muss auch beachtet werden, dass Inkonsistenzen zwischen verschiedenen Sektorstudien existieren können. Diese müssen möglichst in einem der Anpassung an das IOT Modell vorgelagerten Arbeitsschritt bereinigt werden (siehe Abschnitt 6).

## 10.5 Ausgewählte exogene Informationen

Im Folgenden werden einige Beispiele für exogene Informationen dargestellt.

Allgemeine Rahmenbedingungen (Auswahl):

- ▶ **Bevölkerung:** Es wurde die 12. koordinierte Bevölkerungsvorausschau, mittlere obere Variante, zu Grunde gelegt (Destatis, 2009).
- ▶ **Wachstum:** Es wurde in Anlehnung an die Wachstumsprognose, die das BMUB für die Energieverbräuche (siehe Energiesektor) angenommen hat, ein Wachstum von 1,2% p.a. unterstellt. Der hier angenommene konstante Wert ist eine Vereinfachung der für einzelne Jahresabschnitte variablen Werte der BMUB-Studie.
- ▶ **Technische Entwicklung:** In allen Sektoren außer den untersuchten Sektoren Energie, Verkehr und Bau wurde unterstellt, dass die Rohstoffintensität bei der inländischen Produktion in Anlehnung an die Vergangenheitsentwicklung um 1% p.a. sinkt. Die Rohstoffintensität der Importe vermindert sich in Anlehnung an die Vergangenheitsentwicklung in der EU um 0,9% p.a.

Spezifische Annahmen zu den untersuchten Sektoren (Auswahl):

- ▶ Z.B. zur Nettostromerzeugung, Änderungen in 2030 gegenüber 2010 (BMUB, 2015):
  - Gesamterzeugung: -4%
  - Anteil Kernenergie: von 22% auf 0% (-100%)
  - Anteil Kohle: Steinkohle von 18% auf 11% (-43%); Braunkohle von 23% auf 21% (-11%)
  - Anteil Erdgas: von 15% auf 7% (-53%)
  - Anteil Erneuerbare Energien: 14% auf 59% (+310%) mit:
    - Onshore Wind von 6% auf 28% (+320%)
    - Offshore Wind von 0% auf 10%
    - Photovoltaik von 2% auf 10% (+380%) (nahe Sättigung)
    - Biomasse von 5% auf 6% (+15%)
  - Exporte: Zunahme von 3% auf 7% (+140%)
- ▶ Z.B. zur Verkehrsleistung (Veränderung 2010 ggü. 2030, Intraplan 2014, IFEU 2014)
  - Personenverkehr Eisenbahn: + 21 %
  - Straßenpersonenverkehr: + 9.9 %
  - Öffentlicher Nahverkehr: + 6 %
  - Flugverkehr: + 64,8 %
  - Güterverkehr Schiene: + 42.9 %
  - Güterverkehr Straße: + 38.9 %
  - Güterverkehr Schiff: + 22.8 %

## 10.6 Konsistenzchecks zwischen Sektorstudien

Die im Projekt übernommenen exogenen Parameter, und zwar sowohl die allgemeinen Rahmenbedingungen als auch die spezifischen sektoralen Annahmen, sollen bereits ein möglichst stimmiges, konsistentes Gesamtbild im Prognosejahr ergeben. Um dies zu gewährleisten, wurden die zentralen Basisstudien (darunter BMUB 2015, Deilmann et al. 2014, VDI-ZRE 2016, Intraplan 2014, IFEU 2014) hinsichtlich der dort gewählten Annahmen und Entwicklungstrends abgeglichen. So wurde festgestellt, dass das allen Studien unterliegende Bild von der Entwicklung in Deutschland im Allgemeinen sehr ähnlich ist: So gehen alle Studien von einer rückläufigen Bevölkerung, einer leicht



wachsenden Wirtschaftsleistung, einer fortschreitenden Einbindung Deutschlands in Europa und einer Vertiefung der internationalen Handelsverflechtungen sowie keinen limitierenden Rohstoffknappheiten bzw. Versorgungsengpässen aus.

Zusätzlich wurden spezifische Trends und Annahmen, die sich in zwei der untersuchten Sektoren widerspiegeln, miteinander verglichen. Drei Beispiele seien genannt:

1. Decken sich die Annahmen zur Wohnraumentwicklung und Sanierungsraten und -tiefen in den Studien zur Energienachfrage und Gebäudeentwicklung und sind somit die Auswirkungen auf die Heizwärmebedarfe aus der Energieprognose und auf die Baumaterialien aus der Prognose zur Entwicklung des Hochbaus konsistent?
2. Deckt sich das prognostizierte Verkehrsaufkommen mit den Annahmen, die der prognostizierten Entwicklung des Straßenbaus zugrunde liegen?
3. Sind die angenommenen Verkehrsleistungen und die daraus folgenden Kraftstoffbedarfe kompatibel mit den im Prognosejahr angenommenen Raffineriekapazitäten?

Bei erheblichen Abweichungen wurden die aus den Studien übernommenen Parameter nachjustiert; kleinere Unterschiede, die unterhalb der Unsicherheitsmargen der Studien waren, wurden vernachlässigt.

Um ein konsistentes Bild im Prognosejahr herzustellen, mussten auch Annahmen aus Studien auf andere Bereiche übertragen werden. Ein Beispiel ist das ausgewählte Szenario zu den Materialaufwänden des zukünftigen Straßenbaus, welches auf der Annahme einer rückläufigen Flächenneuersiegelung basiert. Diese Annahme wurde für die hier beschriebene Modellierung auch auf andere Bereiche des kommunalen Tiefbaus wie die Wasserver- und -entsorgung und die IKT-Infrastruktur übertragen.

In der Mehrheit der Fälle waren die in den ausgewählten Studien angenommenen Trends und Entwicklungen ausreichend widerspruchsfrei. Nur in wenigen Fällen konnten Inkonsistenzen nicht vollständig aufgelöst werden. So ist die Annahme zum rückläufigen Neubau von Nichtwohngebäuden (Deilmann et al. 2014) zwar durchaus konsistent zum angenommenen Trend der Urbanisierung, wenn unter anderem unterstellt wird, dass in den sich entvölkernden ländlichen Gebieten nahezu kein weiterer Neubau von Schulen oder Verwaltungsgebäuden stattfindet. Der rückläufige Neubau steht jedoch im Widerspruch zu der angenommenen Steigerung der Wirtschaftsleistung, denn die zusätzliche Produktion muss ja an einem Ort, sei es eine Fabrik oder ein Bürogebäude, stattfinden. Diese Inkonsistenz wurde im Projekt hingenommen, weil die empirische Basis der übernommenen Prognosen zur Entwicklung des Nichtwohngebäudebestandes bekanntermaßen unzureichend ist und die gegenwärtig bestmögliche Setzung von Experten darstellt.

## 10.7 Ausblick

Die vorläufigen Ergebnisse, die mit Hilfe des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffmodells im Projekt DeteRes gewonnen wurden, zeichnen ein insgesamt stimmiges Bild. Sie zeigen, dass allgemeine Trends wie die Bevölkerungsentwicklung oder technische Fortschritte ebenso wie grundlegende politische Entscheidungen wie der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger oder die Begrenzung der Flächenneuersiegelung erhebliche gesamtwirtschaftliche Auswirkungen auf den deutschen Rohstoffbedarf haben. Ansätze, die auf die Substitution einzelner Rohstoffe zielen, tragen mit kleineren Beiträgen zur Reduktion des Rohstoffbedarfes bei.

Die Erfahrung im Projekt DeteRes zeigt, dass eine grundsätzliche Herausforderung darin besteht, die Sektorstudien bereits im Vorfeld zur Einspeisung der Informationen in das IOT-Modell zu harmonisieren. Diese Herausforderung wächst, je mehr Sektoren im Prognosejahr speziell modelliert werden.

Denn mit jedem zusätzlichen Sektor sind mehr Abgleiche erforderlich, um die Entwicklungen in den verschiedenen Sektoren widerspruchsfrei zu modellieren. Diese Herausforderung stellt sich insbesondere im Projekt RTD. Der Ansatz, wie in diesem Projekt Konsistenz gewährleistet werden soll, wird im folgenden Beitrag beschrieben.

## 10.8 Literatur

BMUB (2015): Projektionsbericht 2015 gemäß Verordnung 525/2013/EU 2015 des BMUB; BMWi veröffentlichte Statistiken zur Stromerzeugung

Deilmann, C. et al. (2014): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau - Endbericht.

Destatis (2009): 12. Koordinierte Bevölkerungsvorausschau. Wiesbaden

Intraplan (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Intraplan Consult GmbH. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). München.

IFEU (2014): Aktualisierung „Daten - und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960- 2030“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung. ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg.

Schoer, K., Giegrich, J., Kovanda, J., Lauwigi, C., Liebich, A., Buyny, S., Matthias, J. 2012: Conversion of European Product Flows into Raw Material Equivalents. Heidelberg. [http://www.ifeu.de/nachhaltigkeit/pdf/RME\\_EU27-Report-20120618.pdf](http://www.ifeu.de/nachhaltigkeit/pdf/RME_EU27-Report-20120618.pdf)

VDI-ZRE, 2015: Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau. Materialaufwendungen und technische Lösungen. Berlin. [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/studien/Studie\\_Ressourceneffizienzpotenziale\\_im\\_Tiefbau.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_Ressourceneffizienzpotenziale_im_Tiefbau.pdf)

## 11 Modellierungen im Kontext des Projektionsberichts Treibhausgasemissionen für die Bundesregierung: Systemgrenzen, Modellinteraktion und Konsistenz

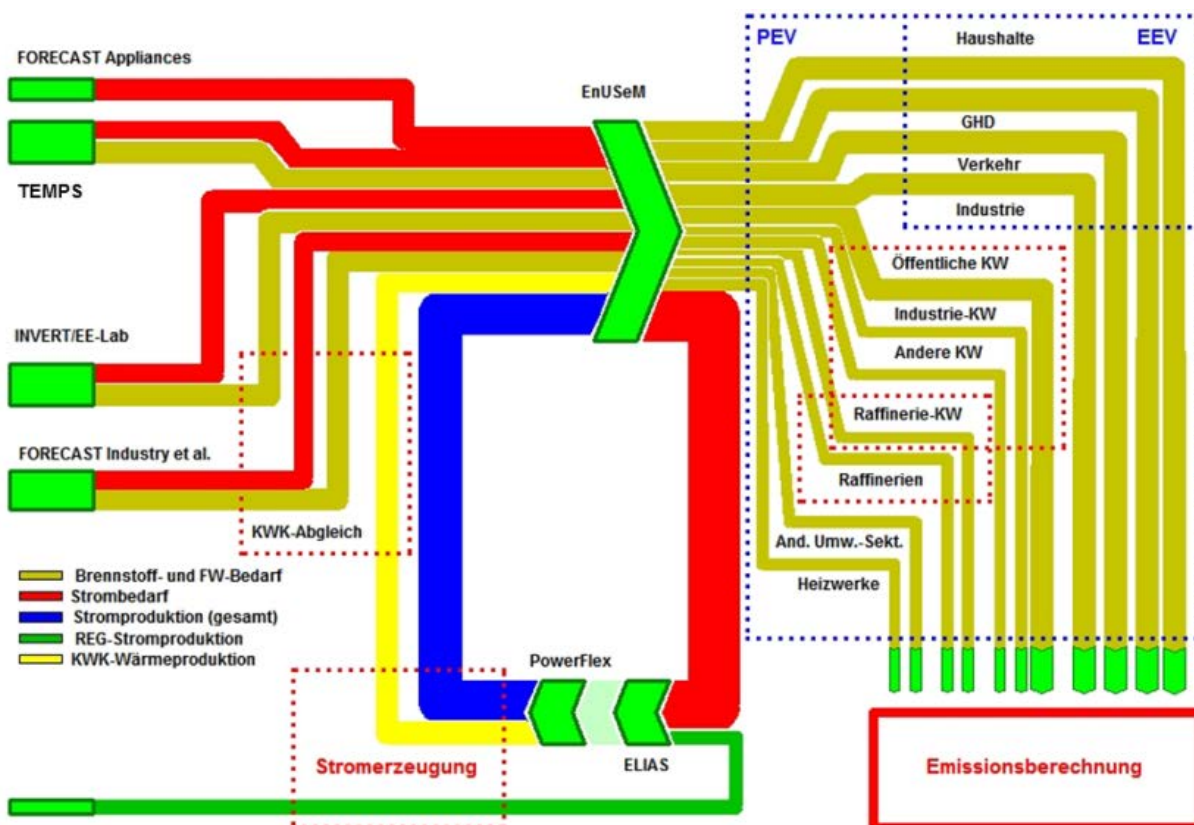
Benjamin Greiner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Öko-Institut e.V., Büro Berlin

### 11.1 Kurzbeschreibung des Modells

Bei den Politik- und Klimaschutzszenarien wird nicht ein einzelnes Großmodell verwendet, sondern spezialisierte Sektormodelle, die in einem Integrationsmodell zu einem Verbund zusammengeschaltet werden. Dabei handelt es sich vorwiegend um deterministische Modelle, aber auch um Optimierungsmodelle wie das Strommarktmodell PowerFlex. Ziel ist die Abschätzung der THG-Emissionen der Gesamtwirtschaft; in zweiter Linie der Primärenergieverbräuche. Ressourcen werden im Modellverbund nicht näher betrachtet, können aber in Sektormodellen eine Rolle spielen.

Abbildung 37: Zusammenspiel der Sektormodelle im Integrationsmodell-Verbund



Der Projektablauf lässt sich in vier Schritte gliedern:

1. Bestimmung von Strom-, Brennstoff- und Fernwärmebedarf in Sektormodellen
2. Ökonomische Optimierung der Strom- und Fernwärmeerzeugung nach Brennstoffen

3. Ermittlung direkter THG-Emissionen aus Industrieprozessen, Landwirtschaft, LULUCF25 und Abfall
4. Integration der Ergebnisse zur Bestimmung von Gesamt-Primärenergiebedarf und THG-Emissionen

Im Projekt werden abgestimmte, grundlegende Rahmendaten (Importpreise für Energieträger, sozio-ökonomische Entwicklung) verwendet. In den Sektormodellen werden daraus weitere im Sektor benötigte Parameter erzeugt. Die methodischen Ansätze der Sektormodelle sind verschieden und werden in den Berichten (z. B. Kapitel 3 der Klimaschutzszenarien) genauer beschrieben.

Die Szenarienentwicklung erfolgt, je nach Aufgabenstellung, vom Anfang oder vom Ende her:

- ▶ Szenarien als politische Maßnahmenpakete (z. B. im Projektionsbericht, „Politiksznarien“)
- ▶ Szenarien mit bestimmten THG-Minderungszielen („Klimaschutzszenarien“)
- ▶ Sensitivitätsanalysen

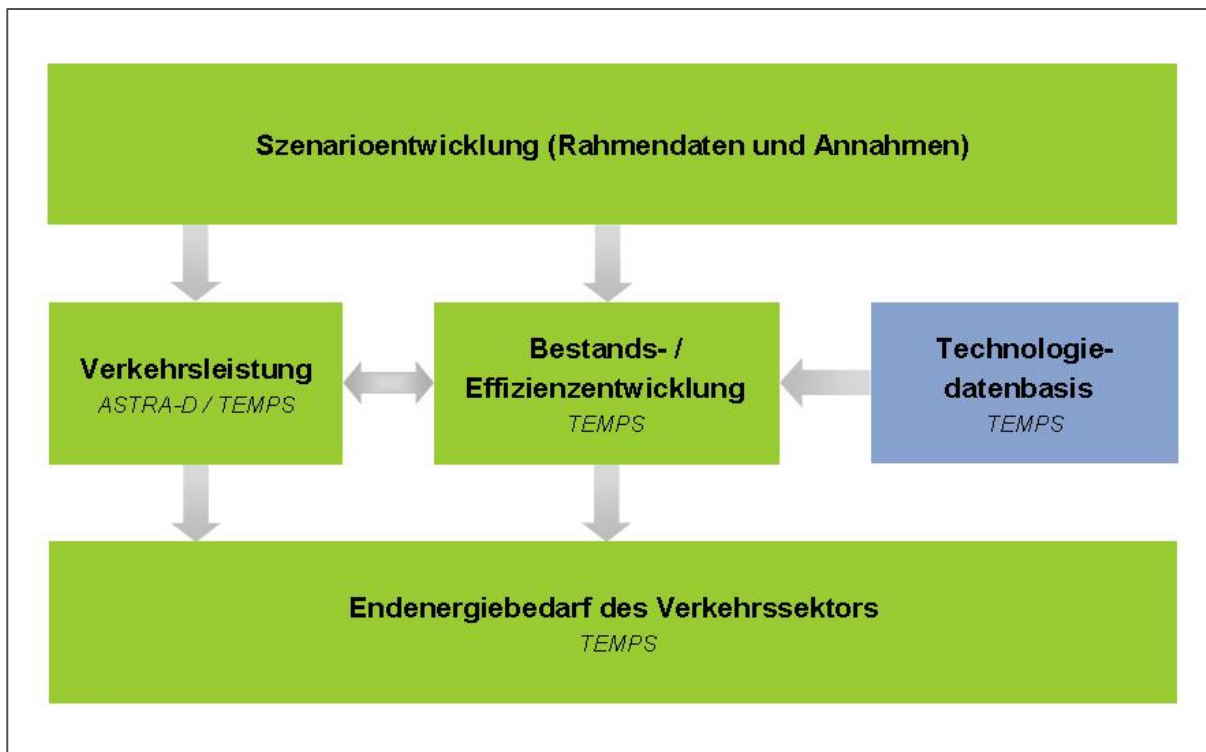
## 11.2 Parameter und Rahmendaten

Ein einheitlicher Satz Rahmendaten für das Projekt wird mit den Auftraggebern abgestimmt. Dies sind:

- ▶ Primärenergiepreise für Importe (Rohöl, Steinkohle, Erdgas) und Braunkohle;
- ▶ Endverbraucherpreise für verschiedene Energieträger (z. B. Diesel, Benzin, Kraftwerkskohle);
- ▶ Preise für Emissionsberechtigungen;
- ▶ Entwicklung von Bevölkerung, Bruttoinlandsprodukt und Bruttowertschöpfung

Die Parameter, die in den Szenarien variiert werden, sind vielfältig: z. B. Produktivitätsänderungen, Änderungen im Investitionsverhalten der Industrie, politische Maßnahmen oder Variationen der Rahmendaten. Da verschiedene Modelle beteiligt sind, ist es von den einzelnen Arbeitsgruppen abhängig, wie die Beschreibung eines Szenarios in quantitative Parameter umgesetzt wird. Es können auch, ausgehend von den Rahmendaten, Parameter endogen erzeugt werden. Im Verkehrsmodell sind dies z. B. Fahrzeugbestand, Effizienzentwicklung, Verkehrsleistung. Im Strommarktmodell der Zubau von Erneuerbaren und die Stilllegung fossiler Kraftwerke variiert. Die folgende Grafik zeigt beispielhaft die Ein- und Ausgabegrößen des Verkehrsmodells. Im methodischen Teil der Berichte wird das Zusammenspiel detailliert erläutert.

Abbildung 38: Beispielhafte Ein- und Ausgabegrößen des Verkehrsmodells



### 11.3 Kontext der Modellierung

Der Modellverbund wird in den Vorhaben „Politiksznarien“ (UBA) und „Klimaschutzsznarien“ (BMUB eingesetzt. Beide Projekte haben zum Ziel, die Entwicklung des Energiebedarfs und damit verbundener Emissionen in Deutschland in der Zukunft einzuschätzen. Dabei schätzen die Politiksznarien eine Referenzentwicklung und münden in den offiziellen THG-Projektionsbericht<sup>26</sup> der Bundesregierung. Die Szenarien beruhen auf existierenden („Mit-Maßnahmen-Szenario“) bzw. geplanten oder diskutierten („Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario“) politischen Maßnahmen, bleiben dabei aber abschätzende Szenariorechnungen, sind also keine Politikevaluation.

Die Klimaschutzsznarien sind dagegen vom Ziel her gedacht, d. h. eine vorgegebene THG-Einsparung wird erreicht, indem in den einzelnen Sektoren während der Szenariojahre immer mehr Klimaschutzmaßnahmen eingeführt werden, die noch nicht auf der politischen Agenda stehen. Damit können Politikempfehlungen ausgesprochen werden.

Die politische Relevanz unterscheidet sich entsprechend. Da der Projektionsbericht offiziellen Charakter hat, sind seine Ergebnisse Leitlinien für den weiteren Bedarf an klimapolitischen Maßnahmen. Seine Rahmendaten und Annahmen werden, um eine konsistente Datengrundlage zu haben, auch für andere Bereiche herangezogen, z. B. in der Evaluierung der nationalen Klimaschutzinitiative. Hin-gegen geben die Klimaschutzsznarien einen Überblick über das Gesamtpotential an THG-Minderung, denkbare Maßnahmen sowie Zeiträumen und Kosten für die Zielerreichung.

<sup>26</sup> Alle Anhang-1-Mitglieder der UNFCCC sind zu einer zweijährlichen Abfassung eines Berichtes über die Entwicklung ihrer THG-Emissionen verpflichtet. In der EU wird die Verpflichtung über die Verordnung Monitoring Mechanism Regulation (MMR; Verordnung 525/2013/EU) umgesetzt.

## 11.4 Sicherung und Grenzen der Konsistenz

Die Konsistenz innerhalb des Vorhabens wird in erster Linie gesichert, indem alle Arbeitsgruppen einheitliche Rahmendaten verwenden und spezielle Parameter daraus ableiten. Für die Festlegung der Rahmendaten werden unterschiedliche, vorzugsweise öffentliche, Prognosen ausgewertet, um eine plausible Bandbreite zu ermitteln. Um Konsistenz zu historischen Daten von Treibhausgasemissionen zu erhalten, werden die Modelle auf Daten des deutschen Treibhausgasinventars kalibriert. Die Berechnung der Treibhausgasemissionen der Szenarien erfolgt in Anlehnung an die Methoden des Nationalen Inventarberichts.

Die Rahmendaten werden zusätzlich mit den Auftraggebern abgestimmt; insbesondere beim Projektionsbericht ist eine ressortübergreifende Abstimmung mit den Ministerien vorgeschrieben. Damit wird auch die Konsistenz zu anderen Abschätzungen, die sich auf den Projektionsbericht beziehen, gesichert.

Bei der Szenariengestaltung der Politiksznarien ist Konsistenz dadurch gegeben, dass nur existierende bzw. zu erwartende politische Maßnahmen Bestandteil der Szenarien sind. Die Situation ist anders bei den Klimaschutzszenarien, wo Vorgaben zur THG-Minderung von den Arbeitsgruppen in sektorspezifische Maßnahmen umgesetzt werden. Hier wird durch ständigen Austausch von Annahmen und Ergebnissen sichergestellt, dass keine widersprüchlichen Elemente in die Teilmodelle Eingang finden.

Damit ist nicht ausgeschlossen, dass bestimmte Details, die sich als Konsequenz ergeben, zueinander in Spannung stehen, aber nicht von der Modellierung abgebildet werden. Generell gilt ein Kompromiss zwischen Rahmen und Detailgrad, so dass ein umfassendes Modellensemble Abstriche bei der Möglichkeit, alle Parameter auch in Zwischenstufen auf Konsistenz zu prüfen, erfordert. Mit der Erfahrung aus mehreren Modellierungsrunden zeigt sich aber immer deutlicher, dass die Unsicherheit so stark durch die Rahmendaten dominiert wird, dass der Genauigkeitsgewinn durch aufwendigere Modellierung gering ist. Sensitivitätsanalysen zur Wirkung veränderter Rahmendaten oder einzelner Annahmen sind aus unserer Sicht das effizientere Mittel, um Aussagen einzuordnen und belastbarer zu machen.

## 12 Zur Stärkung von Konsistenz in Simulationsmodellen – Kernbotschaften und Empfehlungen aus den Diskussionen

Ulrich Lorenz<sup>1</sup> und Martin Hirschnitz-Garbers<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Umweltbundesamt, Dessau

<sup>2</sup>Ecologic Institut, Berlin

Die Umweltpolitik geht schon lange weit über die einfache Bekämpfung von Symptomen (in Form von Umweltverschmutzung) hinaus. Komplexe sozio-technische bzw. je nach Blickwinkel sozio-ökonomische oder sozio-kulturelle Systeme sind eng verwoben mit dem globalen, ökologischen Erdsystem. Einfach lineare Kausalabhängigkeiten sind kaum zu finden und selbst Wirkungsketten – also dass eine Wirkung Ursache einer neuen Wirkung wird – reichen nicht aus, die Symptome, Ursachen und Folgen der Umweltprobleme angemessen zu erfassen. Zumeist sind es rückgekoppelte Systeme, die die Vorhersagbarkeit ohne geeignete Hilfsmittel schwer möglich machen.

Solche Hilfsmittel können Simulationsmodelle sein, mit deren Hilfe mögliche Folgen bestimmter Interventionen getestet werden können. Allerdings geht der Nutzen von Modellbildung aus der „einfachen“ prognostischen Berechnung der Folgen von Interventionen hervor: die Entwicklung und das Testen der Modelle kann einen tiefen Einblick in die Zusammenhänge liefern. Hierbei kann der Fokus auf den Zusammenhängen („Vernetztes Denken“), den Dynamiken oder den Strukturen und Mustern liegen. Je mehr jedoch Modellentwickler und „Ergebnis-Empfänger“ entkoppelt sind, desto schwieriger einerseits und desto wichtiger andererseits wird es, dieses „implizite“ Wissen des Entwicklers „explizit“ für die Interpretation der Ergebnisse zu machen.

Erschwerend kommt dann noch hinzu, dass auch auf politischer Seite nicht nur singuläre Interventionen angelegt werden. Im besten Fall werden Maßnahmenbündel angewandt – das heißt, die Maßnahmen sind aufeinander abgestimmt – oder im schlechteren Fall greifen Maßnahmen aus verschiedenen Politikfeldern ineinander, ohne dass eine systemische Folgenprüfung stattgefunden hätte. Insofern ist es alleine schon aus theoretischer Sicht keine Überraschung, dass manche umweltpolitische Intervention nicht den gewünschten Effekt hatte: entweder weil das System selbst die Maßnahme abpuffert oder weil andere Maßnahmen dem entgegenlaufen.

So gesehen kann es für die Gestaltung der Politik nur nützlich sein, die Transparenz der Modelle zu erhöhen und die Modellanwenders bei der Modellentwicklung soweit möglich einzubeziehen. Die Transparenz bezieht sich dabei auf zwei Bereiche: das Innere oder die Architektur des Systems und das Äußere des Systems, also unter welchen Annahmen eine Simulation durchgeführt wird. Dabei ist letzteres zumeist der zweite Schritt, denn zuerst versuchen Modelle in der Regel beobachtete Phänomene zu reproduzieren, um dann im zweiten Schritt zu extrapolieren. Jetzt wurde in diesem Reader schon mehrfach gezeigt, dass auch das „Außen“ des Modells quasi ein eigenes System ist und somit auch hier die Schlüssigkeit der Annahmen gegeben sein sollte.

In diesem Kontext relevante Fragestellungen wurden im Rahmen des Modellierungsworkshops und der Beiträge zu diesem Reader diskutiert. Die wesentlichen Ergebnisse daraus werden in diesem Beitrag zusammengeführt. Wir verstehen dies als Auftakt zu weiterem Austausch und schlagen hier wesentliche Aspekte vor, wie dieser Austausch vorangetrieben und gestärkt werden könnte.

### 12.1 Kernbotschaften aus den Diskussionen

Die folgenden Leitfragen lagen den Präsentationen und Diskussionen im Workshop sowie den Beiträgen zu diesem Reader zugrunde:

1. Was heißt exogen/endogen? Können Parameter auch „endogen“ sein? Welche Parameter sind in den Modellen exogen? Welche sind endogen?
2. Wie werden konsistente Rahmenannahmen/-daten gebildet? Wie erklären wir die Unterschiede in Modellergebnissen bei Berechnung der gleichen Parameter? Was können Narrative leisten?
3. Wie können Methoden wie CIB oder CLDs die Verbesserung von Konsistenz unterstützen?
4. Wie ist so eine politische Beratung sinnvoll (Unsicherheiten)?

Entsprechend einzelner oder mehrerer dieser Leitfragen werden hier Kernbotschaften zusammengeführt.

### **12.1.1 Endogen und exogen – Ausprägungen und Implikationen der „Daten“herkunft**

Eine wesentliche Diskussion im Workshop kam zu der Frage auf, welche Vorgaben und Annahmen von außen (exogen) in die Modelle einfließen und woher diese Vorgaben kommen bzw. auf welcher Datengrundlage sie begründet werden. Während die beschriebenen Input-Output Modelle wie GIN-FORS oder der IFEU-Modellverbund aus dem Projekt RTD, anhand sehr detaillierter, langjähriger statistischer Zeitreihen kalibriert werden und exogene Parameter wie Bevölkerungsentwicklung und Rohstoffpreise in einem entsprechenden Detaillierungsgrad benötigen, kommen die systemdynamischen Modelle wie WORLD oder D3 mit weniger detaillierten Datengrundlagen als exogene Vorgaben aus, weil hier stärker Tendenzen und Muster – und weniger detaillierte Prognostik – als Ergebnisse im Vordergrund stehen. Gleichzeitig ziehen die Prozesse, die zu Erarbeitung der qualitativen Systemmodelle in den beiden systemdynamischen Modellen genutzt werden, vielfältiges Expertenwissen jenseits der Parametrisierung durch etablierte und detaillierte Zeitreihen heran.

Neben dem Detaillierungsgrad der benötigten Daten werden hier unterschiedliche Anforderungen an bzw. Definitionen von Datenqualität und -robustheit offengelegt. So bietet das D3-Modell die Möglichkeit, dass externe ExpertInnen z.B. über Planspiele Veränderungen als exogene Faktoren in das Modell einbringen. Beim WORLD-Modell werden externe ExpertInnen und deren Wissensbestände insbesondere in die Erarbeitung des qualitativen Konzeptmodells über CLDs eingebunden. Die Konsistenz der Modelle resultiert hier dann nicht nur bzw. weniger aus der Richtigkeit der Daten oder durch eine Validierung mit Vergangenheitsdaten, sondern in erster Linie bzw. auch aus einer Reflexion durch externe ExpertInnen, ob die entscheidenden Faktoren in den relevanten Kausalitäten und Verknüpfungen berücksichtigt wurden.

Die Anerkennung solcher Modelle ist nicht zuletzt aufgrund der als weniger robust und glaubwürdig wahrgenommenen Datenlage in der Wissenschaftsgemeinschaft eher gering. Mit dem Ziel, stärker Muster und Tendenz in weiterer zeitlicher Ferne zu zeigen als für genauere Prognostik eingesetzte Modelle, eignen sich systemdynamische Modelle jedoch besser, um Entwicklungen in der fernerer Zukunft anhand Experteninput-basierter qualitativer Konzeptmodelle zu betrachten und die Systemkomplexität besser abzubilden. Dabei ist es natürlich erforderlich, auch die aus dem ExpertInnen-Input resultierenden Annahmen und Kenntnisse im Hinblick auf die Modellverwendbarkeit zu bewerten und zu überprüfen. Entsprechend ist hier auch zu klären, welche Art von externen ExpertInnen einbezogen werden sollen und in welchem Grad die dadurch gewonnenen Erkenntnisse das Modellsystem treiben sollen.

Gleichzeitig wurde in den Diskussionen auch die Frage aufgeworfen, inwiefern endogen, im Modell „inneren“ berechnete Variablen wirklich endogen sind, da die Gleichungen und Annahmen in der Modelllogik von den Modellierenden quasi von außen vorgegeben werden. Da die Systemeigenschaften und Modellierungsmechanismen durch die Modellierenden festgelegt bzw. implementiert werden, erfordert eine explizite Trennung in exogene und endogene Parameter, die Variable, deren



Datengrundlagen sowie die zur Modellumsetzung herangezogenen Annahmen transparent und verständlich zu dokumentieren und zu kommunizieren. Hierzu können Narrative als Rahmengebende, plausible Einbettungen die Modellogiken nachvollziehbar erklären und kommunizieren helfen. Über Narrative lassen sich auch Konsistenzprüfungen zwischen den Annahmen und Daten unterschiedlicher Modelle erleichtern und kann die Konsistenz verbessert werden.

### 12.1.2 Rahmenannahmen – Erklärung von Unterschieden und Relevanz von Narrative

Im Zusammenspiel mehrerer Modelle und beim Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Simulationsmodelle kommt nicht nur der Modell-internen Plausibilität und Konsistenz (auch im Sinne der benötigten und verwendeten Datengrundlagen) der einzelnen Modelle eine große Bedeutung zu, sondern verstärkt auch den Rahmenannahmen, die in die einzelnen Modelle eingehen.

Als Instrumente zur näherungsweise Repräsentation realer Systeme müssen die Simulationsmodelle an irgendeiner Stelle „aufhören“ und entsprechend eine Grenze ziehen, welcher Teil der Realität nicht mehr abgebildet werden kann. Mit dieser notwendigen Grenzziehung werden jedoch die Mechanismen, die außerhalb der Modellsystemgrenzen stattfinden, nicht für eine Modellrepräsentation analysiert und aufbereitet – entsprechend wird diese Systemanalyse im modellexternen Teil der Realität durch möglichst plausible Rahmenannahmen ersetzt.

Eine unvermeidbare Folge dieser Grenzziehung ist, dass unterschiedliche Modelle oder ähnliche, aber zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzte Simulationsmodelle jeweils eigene Rahmenannahmen nutzen. Gerade im Vergleich verschiedener Modelle, und insbesondere im Fall einer Kopplung verschiedener Modelle in Modellverbänden, offenbaren sich dann Komplikationen und Fehlstellen, wenn die Rahmenannahmen nicht konsistent sind bzw. nicht miteinander (weit möglichst) harmonisiert werden. Hieraus erklären sich dann auch oftmals Unterschiede in den Ergebnissen verschiedener Simulationsmodelle bei Berechnung der gleichen oder ähnlichen Variablen.

Unterschiedliche Rahmenannahmen bzw. unterschiedliche qualitative Beschreibungen von Rahmenannahmen (Narrative) sind nahezu unvermeidbar. Einerseits sind die zu treffenden Rahmenannahmen für mittel- bis langfristige Zukünfte i.d.R. hochgradig unsicher, sodass man für einzelne Rahmengröße mit gleicher Plausibilität bzw. gleichem Kritikpotential außerordentlich unterschiedliche Werte wählen – was natürlich starken Einfluss auf die Modellaussagen mit sich bringt. Andererseits hängen unterschiedlichen Rahmenannahmen über Systeminteraktionen (z.B. Rohstoffpreise, Wirtschaftsentwicklung, Bevölkerungsentwicklung, technologischer Fortschritt) vielfach komplex zusammen. Daher sind die Rahmenannahmen so zu kombinieren, dass sie in ihren Kausalitäten und Wechselwirkungen ein konsistentes Set ergeben.

Um die Konsistenz zu erhöhen und um die Kommunikation dazu zwischen unterschiedlichen Modellierungspartnern bzw. mit Außenstehenden zu erleichtern, sollten die Rahmenannahmen im Zusammenhang eine verständliche und kohärente Erzählung (ein Narrativ) über den gesellschaftlichen Kontext und seine plausible zukünftige Entwicklung bilden. Für Narrative als komplexere Geschichten zu konsistenten „Annahmenbündeln“ spielen neben der Konsistenz auch Kohärenz und Stringenz eine wichtige Rolle. Die Daten bzw. Annahmen müssen nicht nur zusammenpassen (Konsistenz), sondern auch die Wechselwirkungen im Sinne von Koinzidenzen oder Kausalitäten müssen geprüft werden, damit die Argumente in der Narrative zielführend und schlüssig sind und um damit die Erzählung für die Nutzung für Modellierungen eindeutig zu machen.

Wenngleich dieser Prozess der Erarbeitung konsistenter Narrative herausfordernd ist und sowohl zeitliche als auch kognitive Anforderungen an die Beteiligten stellt, so wird gerade bei Schwierigkeiten, getroffene Rahmenannahmen nicht in eine kohärente Narrative passen zu können, deutlich, dass hier weitere Diskussionen und Veränderungen nötig sind, um ein konsistentes Narrativ zu formen.

Der zeitliche und kognitive Aufwand hängt davon ab, wie stark es die am Modellierungsprojekt beteiligten Szenarioentwickler und numerische Modellierer gewöhnt sind, miteinander zu arbeiten und Querbezüge herzustellen. Hier gibt es jedoch Methoden, wie z.B. die CIB oder auch CLDs, um diesen Austauschprozess zu strukturieren und dadurch zu fördern.

### **12.1.3 Methoden zur Förderung konsistenter Rahmenannahmen und Narrative**

Die Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB) kann hier Unterstützung bieten, da sie Schwerpunkte setzt und die Diskussion zu Aspekten fordert und fördert, die außerhalb der gesetzten Modelldaten und damit außerhalb der Modellgrenzen liegen. Damit bietet die CIB eine gute, wenngleich auf zeitlich aufwändige Möglichkeit, Rahmenannahmen zu bilden und in ihrer Konsistenz zu bewerten.

CLDs und CIB haben das Potential, Unterschiede in theoretischen Fundierungen der genutzten numerischen Modelle und so Abstimmungs- und Austauschbedarf in Hinblick auf Konsistenz offenzulegen. Durch die Visualisierung der Zusammenhänge in CLDs oder die Bewertung der Konsistenz verschiedener Kombinationen in Rahmenannahmen werden solche Unterschiede im Sinne von Konzeptmodellen transparent und können diskursiv behoben werden.

Gleichzeitig stellen diese Visualisierungen und Narrative auch eine Art „Master-Modell“ zur Verfügung, an dem sich alle beteiligten numerischen Modelle orientieren können, um dadurch maximal konsistent zu sein und die erhaltenen Ergebnisse transparent kommunizieren zu können. Denn durch das Master-Modell wird dann deutlich, wo ggf. bestimmte Faktoren wie zusammen hängen und welche Schnittstellen zum „Außen“ als auch zwischen mehreren Teilmodellen bestehen.

Wenn man die Ergebnisse eines numerischen Modells erklären und interpretieren will, muss man wieder zum Qualitativen zurück – hier bieten das Master-Modell und die übergreifende Narrative genau die benötigten Anknüpfungspunkte zwischen Qualitativem und Quantitativem. Bei all den hier beschriebenen Stärken der Nutzung von Narrative und verschiedener Methoden zur Erarbeitung/Unterstützung von Narrative muss betont werden, dass vollständige Konsistenz auf Modellebene sehr voraussetzungsvoll und daher nur in seltenen Fällen tatsächlich erreichbar erscheint. Nichtsdestotrotz kann die Konsistenz der qualitativen und numerischen Szenarien gesteigert werden, was die Vollständigkeit, Transparenz und Nachvollziehbarkeit, Konsistenz und Revidierbarkeit von Narrativen unterstützt und für die politische Kommunikation der Ergebnisse wichtig ist.

### **12.1.4 Politische Beratung und Kommunikation von Unsicherheiten**

Die politische Beratung anhand von Ergebnissen aus Simulationsmodellen findet oft in einem Spagat zwischen erhoffter „Scheingenauigkeit“ prognostischer Ergebnisse und wissenschaftlicher Notwendigkeit statt, die mit den Ergebnissen verbundenen Unsicherheiten transparent zu kommunizieren.

Anhand der Ausführungen in diesem Reader wurde deutlich, dass auch prognostische Ergebnisse nur scheinbar genau sein können, da dahinter bestimmte Modellannahmen und -mechanismen liegen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Daher ist die Kommunikation von Unsicherheit eine notwendige Herausforderung, um einem zu schnellen Aufgreifen scheingenauer Zahlen durch die Politik die benötigten Hinweise auf Zustandekommen der Zahlen und damit verbundene Unsicherheiten entgegensetzen zu können.

Auch für diesen Zweck bieten Narrative Hilfestellungen, da sie die in die Modellierung hineingehenden Rahmenannahmen nachvollziehbar darstellen (können) und die Ergebnisse dazu in interpretative Beziehung setzen.

Diese Anforderung gilt jedoch nicht nur für die Modellierenden bzw. die an Modellprojekten Arbeitenden, sondern auch für die Politik. Es ist denkbar bzw. auch beobachtbar, dass Modelle und die Ergebnisse mit Deutungshoheiten vermengt werden und die Modell(ergebnis) bestimmte Meinungen

oder Positionen unterstützen sollen. Werden hier exogene Vorgaben zu bestimmten Variablen gemacht (z.B. zum Wirtschaftswachstum), die eher einer normativen politischen Botschaft als empirisch gesicherten Daten entspringen, so muss auch dieser Aspekt transparent offengelegt werden, um nicht die Modellierungsarbeiten dafür verantwortlich zu machen. Dieser Widerspruch kann nur durch **maximale Transparenz** aufgelöst werden.

## 12.2 Empfehlungen zur Verbesserung der Konsistenz in der Modellentwicklung und Anwendung der Modellergebnisse

- ▶ Eine zentrale Forderung an den Auftraggeber muss es sein, sich mit der Struktur des Modells der beauftragten Modellentwickler vertraut zu machen. Entsprechend sollte auch der Modellentwickler bereit sein, das Modell so transparent zu gestalten, dass es für den Auftragnehmer nachvollziehbar wird. Hierzu bedarf es geeigneter Hilfsmittel, wie beispielsweise CLDs oder einfacher Blockdiagramme. Alternativ sollte es auch möglich sein, mit einfachen Sensitivitätsexperimenten ein „Gefühl“ für die Antwort des Modells auf Parameterveränderungen zu erzeugen.
- ▶ Die Modelle sollen so parametrisiert sein, dass sie in der Lage sind, historische Zeitreihen zu reproduzieren bzw. erklärbar zu machen. Die einfache Extrapolation unter gegebener Parametrisierung und einfache Sensitivitätsanalysen sollten zum Standard gehören, der auch dem Auftraggeber übermittelt wird.
- ▶ Die Rolle von exogen und endogen sollte für die Modelle geklärt und transparent dargelegt werden. Wenn Parameter innerhalb der Formeln verändert werden – z.B. aufgrund von Interventionen –, muss deutlich dokumentiert werden in welcher Logik das passiert.
- ▶ Die Kopplung eines strukturierten Prozesses zur Erstellung eines Narrativ (CIB), welches dann die Modelle treibt und auch einen Rahmen für die Interpretation der Ergebnisse gibt, scheint insbesondere für die Politikberatung ein zielführendes Vorgehen zu sein.
- ▶ Alternativ bzw. flankierend sind Kausalmodelle gut geeignet, um einen grundsätzlichen Modellaufbau transparent und damit auch die Interventionslogik deutlich zu machen. Diese Empfehlung wurde bereits unter dem Stichwort „Master“-Modell diskutiert – ein solches anzulegen wird aus Auftraggebersicht für sinnvoll erachtet.
- ▶ Grundsätzlich wäre anzustreben, Modelle, die mit öffentlichen Fördermitteln entwickelt wurden soweit möglich auch als open source Modelle zur Verfügung zu stellen.
- ▶ Zumindest für die Arbeitsebene ist anzustreben Parametrisierungen und Zeitreihen auch zwischen verschiedenen Projekten austauschbar zu haben bzw. zu halten. Hier muss allerdings gut dokumentiert sein, aus welchen „Modellläufen“ die Ergebnisse stammen.
- ▶ Das Vorhandensein von Grundszenarien als Zusammenstellung von Basisannahmen für die Simulationen wird die Harmonisierbarkeit und Vergleichbarkeit von Simulationsstudien verbessern. Das UBA wird sich bemühen, solche Referenzszenarien mittelfristig zur Verfügung zu stellen.

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

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



Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau

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