

Masterarbeit am Lehrstuhl für Informatik und Nachhaltigkeit,
Institut für Informatik, Universität Zürich

Modellierungsparadigmen globaler ressourcenökonomischer Simulationsmodelle

Betreuer:	Prof. Dr. Lorenz M. Hilty
Lehrstuhl:	Informatics And Sustainability Group
Institut:	Institut für Informatik, Universität Zürich
Verfasser:	Dorian-Raphael Signer
Geburtsort:	Saõ Paulo, Brasilien
Matrikel-Nr.:	05-709-134
Abgabe der Arbeit:	14.10.2011

„CHANGE IN THE STATUS QUO IS CERTAIN. IMPROVEMENT IN THE STATE OF THE WORLD IS BY NO MEANS IMPOSSIBLE AND BY NO MEANS GUARANTEED. WE ARE A LONG WAY FROM KNOWING EVERYTHING WE NEED TO KNOW. AND YET WE KNOW ENOUGH ABOUT WHERE WE WANT TO GO AND HOW TO GET THERE TO GET STARTED.“

(Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982, S. 16)

Abstract

In dieser Masterarbeit steht die Identifikation von Modellierungsparadigmen globaler ressourcenökonomischer Simulationsmodelle im Mittelpunkt. Basierend auf der Ansicht, dass die in Modellen vertretenen Paradigmen in deren Struktur und in ihren Annahmen zu finden sind, wird zur Zielerreichung ein Bottom-up-Vorgehen verfolgt: Die Annahmen und Strukturen von vier globalen Modellen (World3, SARUM, FUGI und dem Metal Model) werden analysiert, wobei die Resultate ihrer Simulationen nur soweit diskutiert werden, als sie in ihren Annahmen und Strukturen begründet liegen. Untersucht wurden nur Modelle, welche die Problematik nicht erneuerbarer Ressourcen zum Gegenstand haben. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Aspekten entgegen gebracht, die bei der Erschöpfung von Metallen eine Rolle spielen, ohne sich aber darauf zu beschränken. Die identifizierten Modellierungsparadigmen werden anhand verschiedener Sichten auf die Modelle erläutert und es wird aufgezeigt, dass für eine nachhaltige Lösung der Ressourcenproblematik der technologische Fortschritt eine Schlüsselrolle einnimmt.

The master paper here focuses on the identification of the paradigms within global economic resource simulation models. Based on the view that the paradigms present in models are to be found in the assumptions and the logic structure, a bottom-up approach is pursued: the assumptions and the logic structure of four global resource models are analysed (World3, SARUM, FUGI and the Metal Model), whereas the outcomes of the respective models are only discussed to the extent that the assumptions or the logic applied are the cause of the outcome of simulation models. The models analysed and mentioned here all simulate the long term sustainability of not renewable resources. Special attention was given to all aspect of the sustainability of metal resources, but without limiting analysis only on metals. The paradigms identified in the presented models are discussed under various angles. The finding here is that any sustainable solution for the use of resources stands and falls with the intensity and quality of the future technological progress.

Abkürzungen

BIP	Brutto-Inland-Produkt (Monetäre Kennzahl)
CAP	capita, auf Deutsch Kopf (Mass für Anzahl Menschen)
CGE	Computable General Equilibrium modeling (Modellierungsansatz)
FGMS	FUGI global modeling system (Software für Berechnungen in FUGI)
FIOM	FUGI Input/Output Model (später umbenannt in GIOM)
FUGI	Futures of Global Interdependence (Globales Modell)
GDP	Gross domestic product, siehe auch BIP auf Deutsch (Monetäre Kennzahl)
GEM	Global Economic Model (Teilmodell aus FUGI)
GIOM	Global Input-Output Model (Teilmodell aus FUGI)
GJ	Giga Joule (Mengeneinheit für Elektrizität)
GMEM	Global Macro-Economic Model (später umbenannt in GEM)
GMRM	Global Metallic Resources Model (später umbenannt in GRM)
GRM	Global Resources Model (Teilmodell aus FUGI)
I/O	Input-Output (Modellierungsansatz)
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis (Institut)
IU	Intensity of Use (Abkürzung aus der IU-Hypothese)
KTON	Kilotonnen (Gewichtsmass)
LCA	Life Cycle Assessment (Vorgehensweise)
MIT	Massachusetts Institute of Technology (Institution)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Institution)
OLG	overlapping generations (eine Art Haushalte zu modellieren, Modellart)
PPP\$	Purchasing power parity (künstliche Währung)
SARU	Systems Analysis Research Unit (Forschergruppe)
SARUM	Systems Analysis Research Unit Model (Globales Modell)

Inhalt

ABSTRACT	I
ABKÜRZUNGEN	II
INHALT	III
1 Einleitung	1
2 Grundlegende Begriffe und Theorien	5
2.1 Paradigmen	5
2.2 Verwendeter Modellbegriff	6
2.3 Globale Modelle	7
2.4 Politische Modelle	8
2.5 System Dynamics Modelle und Systemanalyse	9
2.5.1 System Dynamics	10
2.5.2 Systemanalyse	15
2.5.3 Bedeutung von System Dynamics für globale Modelle	17
2.6 Ökonomische Modelle und Theorien	18
2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen	19
2.6.2 Input-Output-Analyse	27
2.6.3 Computergestützte allgemeine Gleichgewichtsmodelle	34
2.6.4 Intensity of Use Hypothese	37
3 Die untersuchten globalen Modelle	41
3.1 World3	44
3.1.1 World3 – Grundannahmen	47
3.1.2 World3 – Struktur	50
3.1.3 Kritik an World3	54
3.2 Systems Analysis Research Unit Model (SARUM)	56
3.2.1 SARUM – Grundannahmen	57

3.2.2	SARUM – Struktur.....	59
3.3	Future of Global Interdependence (FUGI)	62
3.3.1	FUGI – Grundannahmen	63
3.3.2	FUGI – Struktur	64
3.3.3	FUGI – Aktuelle Version	68
3.4	Metal Model	69
3.4.1	Metal Model – Grundannahmen	70
3.4.2	Metal Model – Struktur	77
4	Diskussion	81
4.1	Die Sichten auf ein Modell und ihre Paradigmen.....	81
4.1.1	Zentraler Modellierungsansatz.....	81
4.1.2	Paradigmenwechsel im Laufe der Zeit.....	88
4.1.3	Das Auge des Betrachters	89
4.1.4	Opportunitätskosten gegen die Erschöpfung der Reserven.....	91
4.2	Ausblick.....	94
4.2.1	Der Intergenerationskonflikt	94
4.2.2	Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts	95
4.2.3	Anregungen für weiterführende Arbeiten	100
5	Fazit.....	103
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	V
	LITERATURVERZEICHNIS	VII
	ANHANG	XX

1 Einleitung

Das Gebiet der Ressourcenökonomik untersucht ökonomische Fragestellungen mit Bezug auf natürliche Ressourcen, die für menschliche Zwecke nutzbar gemacht werden (Heal, 1993). Unterschieden werden erneuerbare Ressourcen wie Getreide, tierische und pflanzliche Nahrungsmittel oder Sonnenenergie, von nicht erneuerbaren Ressourcen wie Erdöl, Kohle und Metalle. Relevant bei der Unterscheidung ist dabei nicht die streng physikalische Erneuerbarkeit, denn auch Kohle und Erdöl bilden sich über lange Zeit hinweg neu und die Energie der Sonne hingegen nicht. Diese Veränderungen sind aber im menschlichen Zeithorizont so langsam, dass sie im Verhältnis zum Verbrauch derselben Ressourcen vernachlässigbar sind (Heal, 1993).

Traditionell behandeln die Fragestellungen der Ressourcenökonomik die Bestimmung von optimalen Abbauraten natürlicher Ressourcen, um die Gewinne daraus zu maximieren (Gray, 1914; Hotelling, 1931; Dasgupta & Heal, 1974; Solow R. M., 1974; Stiglitz, 1974a; Stiglitz, 1974b; Stiglitz, 1976). Als Pionier der Ressourcenökonomik gilt Harold Hotelling, der sich die Frage stellte, wie sich zwei Anbieter nicht erneuerbarer Ressourcen unter der Gewissheit verhalten, dass das von ihnen geförderte Gut langfristig versiegt (Hotelling, 1931). Das mathematisch hergeleitete Ergebnis präsentierte er in seiner Publikation *The Economics of Exhaustible Resources*, das später als *Hotellings Regel* bekannt wurde. Die Regel besagt, dass der Preis einer nicht erneuerbaren Ressource unter Annahme eines effizienten Marktgleichgewichts mit der Rate des Kapitalzinssatzes ansteigt (Hotelling, 1931). Er begründet dies damit, dass unter Konkurrenz so der Barwert aller Gewinne über die Zeit hinweg bis zur Erschöpfung der Ressource maximiert wird. Der Barwert der Gewinne bleibt dabei für jede Periode gleich, wobei der abnehmende Zeitwert des Geldes durch den steigenden Preis der Ressource kompensiert wird¹. Empirische Untersuchungen mit Daten zu den letzten 150 Jahren haben gezeigt, dass sich *Hotellings Regel* bei den Rohstoffpreisen nicht bestätigt hat, sondern dass die Preise für nicht erneuerbare Ressourcen gefallen sind, oder konstant blieben (Krautkraemer, 1998). Der Grund, wieso *Hotellings Regel* der Realität nicht näher kommt, liegt in den vereinfachenden Annahmen. Er ging von einem konstanten Zinssatz und einem bekannten Anfangsbestand an Erdöl aus, der ausschliesslich abnimmt. Da

¹ *Hotellings Regel* (Hotelling, 1931): Der Barwert des marginalen Profits der Periode t soll gleich sein wie in Periode $t+1$: $(P_t - MC)/(1+r)^t = (P_{t+1} - MC)/(1+r)^{t+1}$, P =Preis, MC =Marginale Kosten, r =Zinssatz, t =Zeitperiode.

seit 1931 viele weitere Ölreserven gefunden wurden, sank auch der reale Preis ab, natürlich insbesondere dann, wenn neue Reserven entdeckt wurden und somit die Knappheit schlagartig abnahm.

Dasgupta & Heal, (1974), Solow(1974) und Stiglitz (1974a; 1974b) untersuchten die Bedingungen für nachhaltigen Verbrauch unter Berücksichtigung von nicht erneuerbaren Ressourcen. Diese Publikationen zeigen, dass technologischer Fortschritt und eine hohe Substituierbarkeit von nicht erneuerbaren Ressourcen durch erneuerbares Kapital notwendig ist, damit der Verbrauch langfristig nicht abnimmt.

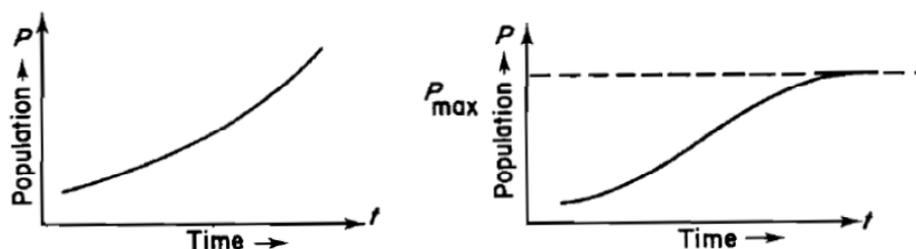
Neben rein ökonomischen Fragestellungen hielten auch ethische Aspekte Einzug. Diese behandelten beispielsweise soziale Gerechtigkeit und den Anspruch kommender Generationen auf nicht erneuerbare Ressourcen (Chichilnisky, Heal, & Beltratti, 1995). Auch dazu wurde der optimale Ressourcenverbrauch gesucht, wobei es abzuwägen galt, wie viel heute konsumiert werden darf, ohne dass die Wirtschaft beziehungsweise die heutige Generation darunter leidet und wie viel für Morgen aufgehoben werden muss, damit zukünftige Generationen noch lange von der Ressource profitieren können. Eine mögliche Antwort dazu lieferten Chichilnisky, Heal, & Beltratti(1995) mit ihrer *Green Golden Rule* unter der Annahme, dass eine Verbrauchsrate existiert, unter welcher der Nutzen für jede Generation gleich gross ist. Möglich gemacht wurde dies unter der Annahme, dass im Laufe der Zeit ein immer grösserer Anteil der Ressource substituiert werden kann (Chichilnisky, Heal, & Beltratti, 1995).

Mit zunehmender Bevölkerung und einem zunehmenden Lebensstandard steigt auch der Verbrauch an nicht erneuerbaren Ressourcen, womit sich die Ressourcenproblematik verschärft (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972; Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Die treibende Kraft hinter diesem Prozess ist das Wachstum (Solow R. M., 1974). Im Zuge des letzten Jahrhunderts hat sich der Abbau von Rohstoffen parallel zum Wirtschaftswachstum enorm beschleunigt. Zurzeit verbrauchen die westlichen Volkswirtschaften pro Person rund 20-40 Tonnen Rohstoffe pro Jahr (Adriaanse, et al., 1997). Dabei ist nicht nur der Verbrauch immer schneller gestiegen, es werden zudem auch immer mehr verschiedene Rohstoffarten verbraucht (Forrester T. , 1988; Moll, 1989, zitiert aus Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Obschon der hohe Verbrauch in den meisten Ländern der Welt zu einem verbesserten Lebensstandard beiträgt, stellt sich auch hier mehr und mehr die Frage nach der Nachhaltigkeit (Weizsacker, Lovins, & Lovins, 1998).

Viele Wissenschaftler haben auf die Risiken eines vorschnellen Abbaus von wichtigen zentralen Ressourcen hingewiesen. Insbesondere nach der Energiekrise in den Siebzigerjahren wurden mit Hilfe von Computersimulationen Prognosen gemacht, die davon ausgingen, dass einige der Ressourcen in 50 Jahren aufgebraucht sein würden (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972).

Forrester (1971) und Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III (1972) legten mit ihren globalen Simulationsmodellen den Grundstein für eine neue Herangehensweise, um diese Thematik zu untersuchen. Sie versuchten, die ökologische Tragfähigkeit der Erde abzuschätzen und zeigten durch die Simulation von Bevölkerungswachstum und Ressourcenverbrauch auf, dass die Überschreitung dieser Grenze des Wachstums zwangsläufig zu einem Abfall der Bevölkerungszahl führen muss, da die Grundbedürfnisse ab diesem Punkt nicht mehr für alle gedeckt werden können (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972; Meadows D. L., 1974; Meadows, Meadows, & Randers, 1992; Meadows, Randers, & Meadows, 2004). In diesem Zusammenhang ist das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung der Menschheit die langsame Annäherung an die ökologische Tragfähigkeit der Erde. Dabei gilt es diese nicht zu überschreiten, wodurch bei Erreichen der Grenze, das Wachstum zum Erliegen kommen muss (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Bevölkerungswachstum und die Grenze der ökologischen Tragfähigkeit



Quelle: (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982, S. 10)

Asboth (1984) definiert globale Probleme als: langfristig, dauerhaft, mit einschneidenden Auswirkungen auf viele Betroffene, wobei die Verursacher und die Lösung zu ihrer Behebung nicht ohne weiteres klar sind. Meadows, Richardson, & Bruckmann (1982) sind der Überzeugung, dass globale Probleme und Herausforderungen auch globale Lösungsansätze und damit globale Modelle benötigen, da sie zum Verständnis weltweiter Abhängigkeiten beitragen. Wie im Laufe dieser Arbeit noch aufgezeigt wird, ermöglichen globale Modelle mit ihrer ganzheitlichen Perspektive detaillierte Untersuchungen zu Handlungsmöglichkeiten und deren weltweiten Wirkungen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Gesellschaft. Lösungsansätze können über Simulationen geprüft und ihre Auswirkungen abgeschätzt

werden. Sie bieten ein Werkzeug, mit dem verschiedene Zukunftsszenarien modelliert und auf ihre Nachhaltigkeit getestet werden können. Um die Simulationen zu ermöglichen, mussten Annahmen zur zukünftigen Entwicklung des Ressourcenverbrauchs und viele weitere Kennzahlen explizit festgehalten werden, um sie in Programmcode und somit in das Modell überführen zu können. Damit flossen auch die Überzeugungen und Weltanschauungen der Entwickler in die Modelle und damit in die Resultate ihrer Untersuchungen mit ein. Nur wenn bekannt ist, aufgrund welcher Paradigmen und zentralen Annahmen diese Modelle erstellt wurden, können deren Strukturen und Ergebnisse klar nachvollzogen und allenfalls relativiert werden.

In dieser Masterarbeit steht die Identifikation von Modellierungsparadigmen globaler ressourcenökonomischer Simulationsmodelle im Mittelpunkt. Basierend auf der Ansicht, dass die in Modellen vertretenen Paradigmen in deren Struktur und in ihren Annahmen zu finden sind, wurde zur Zielerreichung ein Bottom-up-Vorgehen verfolgt: Die Annahmen und Strukturen konkreter globaler Modelle wurden analysiert, wobei die Resultate ihrer Simulationen keine Berücksichtigung fanden. Untersucht wurden nur Modelle, welche die Problematik nicht erneuerbarer Ressourcen integrieren. Die spezifische Bearbeitung von energetischen Ressourcen wie beispielsweise Erdöl oder Kohle ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Aspekten entgegen gebracht, die bei der Erschöpfung von Metallen eine Rolle spielen, wobei sich die Analyse aber nicht darauf beschränkte und jeweils das gesamte Modell betrachtet wurde. Die im Laufe der Analyse in Form von Annahmen und Theorien vorgefundenen Modellierungsparadigmen wurden in einem weiteren Schritt genauer beleuchtet und ihre Rolle diskutiert.

Die Struktur dieser Masterarbeit folgt im Unterschied zur Analyse einer anderen Anordnung: Um eine bessere Verständlichkeit zu erreichen, werden die für globale Modelle zentralen Ansätze und Theorien gleich zu Beginn eingeführt (vgl. Kapitel 2 Grundlegende Begriffe und Theorien). Somit sind wichtige Strukturen und Theorien, auf denen auch globale Modelle aufbauen, bereits bekannt, bevor einzelne Modelle in Kapitel 3 besprochen werden. Das Hintergrundwissen aus Kapitel 2 vereinfacht dadurch nicht nur die Interpretation der Annahmen und Strukturen der Modelle in Kapitel 3, sondern greift auch wichtige Paradigmen auf, die in Kapitel 4 unabhängig von den Modellen diskutiert werden. Die Diskussion gruppiert die identifizierten Paradigmen in verschiedene Dimensionen beziehungsweise Sichten und stellt die gewonnenen Erkenntnisse danach im Kontext der Ressourcenökonomie dar (vgl. Kapitel 4 Diskussion). Zum Schluss werden Anregungen zu möglichen weiterführenden Arbeiten abgegeben.

2 Grundlegende Begriffe und Theorien

In diesem Kapitel werden diejenigen Begriffe und Theorien erläutert, die in den analysierten globalen Modellen verwendet werden. Das Ziel dieses Kapitels ist nicht eine umfassende Einführung in diese weitgreifenden Theorien, sondern es soll eine Basis liefern, die es erlaubt, den Aufbau und die Annahmen der in Kapitel 3 genauer betrachteten globalen Modelle besser zu verstehen. Als erstes werden die für diese Arbeit wichtigen Begriffe konkretisiert. Danach werden in den Kapiteln 2.5 bis 2.6.4 die für diese Arbeit zentralen Theorien und Herangehensweisen eingeführt. Ihre Strukturen und Annahmen bilden die Grundlagen, auf denen die betrachteten globalen Modelle aufbauen.

2.1 Paradigmen

Ein Paradigma steht im Allgemeinen für eine gewisse Weltanschauung oder wissenschaftliche Denkweise. Obwohl der Begriff Paradigma schon älter ist, hat Thomas S. Kuhn die heute verbreitete Interpretation wohl am meisten geprägt (Bell & Bell, 1980). Kuhn (1962) sieht ein Paradigma als ein vorherrschendes Denkmuster zu einer bestimmten Zeit, das einen allgemein akzeptierten Lösungsansatz zu einem Problem liefert. Dabei steht weniger die Lösung an sich im Fokus, sondern mehr die Annahmen, Theorien und Fragestellungen, auf die sie sich abstützt (Kuhn, 1962). Paradigmen sind ein wichtiges Konstrukt, um Wissenschaft an sich zu erklären (Bell & Bell, 1980):

1. Wissenschaft wächst mit einfallsreichen Ideen, die verwendet werden, um Fakten zu suchen.
2. Fakten werden dabei nur im Lichte dieser Ideen gesehen. Forschung zielt darauf ab Fakten aufzudecken.
3. Wissenschaftler versuchen die Ideen zu gruppieren.
4. Es besteht eine starke Tendenz, den Fakten Konformität mit der Idee aufzuzwingen.
5. Vergleiche zwischen konkurrierenden Ideen können anhand ihres Erfolgs in der Erklärung von Fakten gemessen werden. Diese Vergleiche erlauben es, irrtümliche Ideen von anderen zu trennen.

Entgegen anderen Wissenschaftlern seiner Zeit argumentierte Kuhn (1962), dass der fünfte Punkt nicht oder nur begrenzt auf Paradigmen zutrifft. Er glaubt aufgrund der verschiedenen Annahmen und Fragestellungen, die verschiedenen Paradigmen zu Grunde liegen, nicht an deren Vergleichbarkeit (Kuhn, 1962). Ein Paradigmenwechsel von einer irrtümlichen Idee zu einer besseren im Sinne von Punkt fünf kann demnach nur bei identischen oder falsifizierten Grundannahmen stattfinden.

Kuhn postuliert stattdessen (1962):

1. Kein Paradigma kann auf ein anderes reduziert werden, sowie auch mathematische Formulierungen eines Paradigmas nicht auf ein anderes reduziert werden können.
2. Ein Paradigma einem anderen vorzuziehen ist letztendlich ein Schritt des Glaubens.
3. Ein neues Paradigma anzunehmen ist mehr eine emotionale als eine intellektuelle Entscheidung.
4. Die Annahme von Paradigmen breitet sich aufgrund von soziologischen Gründen aus, wie Bekanntheitsgrad des Erfinders oder dessen Unterstützer, Popularität eines Buches in dem das Paradigma Verwendung findet und so weiter.

Bell & Bell (1980) kommen zum Schluss, dass die dogmatische Interpretation des Paradigmenbegriffs von Kuhn intellektuelle und rationale Kriterien zu deren Abwägung ablehnt. Der Vorteil von Kuhn's Sicht ist, dass weniger Paradigmenwechsel stattfinden müssen, da bestehende selten komplett verworfen werden und damit ihre Gültigkeit verlängert wird. Dies motiviert auch Vertreter von älteren Paradigmen, ihre Sichtweise vielleicht eher weiter zu entwickeln anstatt zu begraben, was ein Gewinn an Diversität bedeutet. Nachteilig an Kuhns Sichtweise ist jedoch die absolute Behauptung, dass keine rationalen Kriterien existieren, wieso man sich für eine von zwei konkurrierenden Paradigmen entscheiden soll(Kuhn, 1962)².

Es wird dem Leser empfohlen, im Laufe der Arbeit darauf zu achten, wie bedeutend Kuhns Interpretation des Paradigmenbegriffs wird, je mehr Theorien und Annahmen sich in einem Forschungsprojekt zusammenfügen. Je interdisziplinärer die Teams und je komplexer die betrachtete Problematik, desto wichtiger ist es die Paradigmen anderer nicht nur zu respektieren, sondern auch anzunehmen und wenn möglich mit den eigenen zu verknüpfen.

2.2 Verwendeter Modellbegriff

Im Zusammenhang mit dem Gebiet der Ressourcenökonomie können Modelle als abstrahierte Abbilder der Realität bezeichnet werden. Hier werden beim Modellieren meist mehrere Prozesse eines Systems und ihre wesentlichen Zusammenhänge analysiert und durch klar

² Der Autor sieht in dieser Aussage ein Paradox. Aus seiner Sicht können soziologische Gründe für die Wahl eines Paradigmas durchaus rational sein. Nur weil spezifische Interessen der beteiligten Personen ins Spiel kommen, kann nicht schon von Irrationalität gesprochen werden, auch dann nicht, wenn diese im Konflikt mit den Forschungszielen stehen. In solchen Fällen sollte dann aus Sicht des Autors eher von einem Interessenkonflikt oder einem Objektivitätsverlust gesprochen werden.

definierte Notationen beziehungsweise Programmcode festgehalten. Da es sich bei den untersuchten Prozessen in der Regel um quantitative Transformationen handelt, beispielsweise die Zunahme einer Population unter Berücksichtigung ihrer Wachstumsrate, werden diese durch mathematische Formeln dargestellt. Für eine verbesserte Verständlichkeit der Zusammenhänge in einem Modell werden häufig auch grafische Notationen zur halbquantitativen Darstellung verwendet. Diese können bei der Modell-Erstellung eine konzeptionelle Ausgangslage bieten, indem das abzubildende System erst qualitativ erfasst wird, bevor die Interaktionen der Systemkomponenten mit Formeln und Mengen ergänzt werden (vgl. Kapitel 2.5 System Dynamics Modelle und Systemanalyse). Welche Herangehensweise gewählt wird, hängt davon ab, ob man ein allgemein übertragbares Modell (beispielsweise wie Angebot und Nachfrage den Preis eines Produktes beeinflussen) oder ein konkretes Modell zu formulieren beabsichtigt (zum Beispiel der Grundstückspreis neben dem Flughafen Zürich hängt unter anderem vom Schallpegel des Fluglärms sowie von der Dauer des nächtlichen Flugverbots ab). Abgesehen von der mathematischen oder grafischen Darstellung liegt der Unterschied im Abstraktionsgrad. Im Zuge der Arbeit werden diese beiden Modellarten *Allgemeine Modelle* und *Konkrete Modelle* genannt.³

In den folgenden Kapiteln werden die Entstehung und Bedeutung weiterer Modellbezeichnungen erläutert. Die aus verschiedenen Forschungsgebieten, wie Politikwissenschaften, Systemanalyse und Wirtschaftswissenschaften stammenden Modellierungs-Einflüsse schliessen sich alle im Konstrukt der *Globalen Modelle* zusammen (Siegmann, 1985).

2.3 Globale Modelle

In *globalen Modellen*, werden beispielsweise ökonomische, politische, soziale, demographische und ökologische Themen in einem weltweiten System dargestellt (Siegmann, 1985). Sie unterscheiden sich von regionalen oder sektoralen Modellen neben ihrem Umfang durch eine geschlossene Systemgrenze und beschränken sich auf ein Minimum externer Variablen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Diese Welt-Modelle bilden Zusammenhänge mit Hilfe expliziter Gleichungen ab und erlauben durch deren Simulation, das dynamische Verhalten des Systems zu untersuchen (Siegmann, 1985). Sie gehören somit zur Gruppe der *Simulationsmodelle*, welche mit verschiedenen Startwerten instanziiert werden, um die Unterschiede der daraus resultierenden Systemreaktionen im Verlauf der Zeit

³ Es handelt sich hierbei um eigene Begriffe, da in der Literatur diese Unterscheidung nicht gefunden wurde.

zu analysieren. Verbreitet sind dabei Zeithorizonte, die ca. 30 bis über 100 Jahre in die Zukunft reichen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Die Berechnungen der Systemvariablen mit ihren komplex vernetzten Abhängigkeiten und vielen direkten und indirekten Wechselwirkungen lassen sich nur computergestützt sinnvoll bewältigen. Dies ist auch in der Definition von Meadows et al. (1982) festgehalten:

"Global modeling is just computer modeling done to investigate social questions or problems of global scale." (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982, S. 12).

Wird in Betrachtung gezogen, was sonst noch alles unter diese Definition fällt, gibt das Hinweis auf die Herkunft der globalen Modellierung: In ihr fügten sich in den frühen Siebzigerjahren die traditionellen Modelle der Politikwissenschaft, der Ökonomie und der Systemanalyse beziehungsweise *System Dynamics* zusammen (Siegmann, 1985). Diese Submodelle bilden trotz ihrer Integration noch immer die Hauptelemente globaler Modelle. Näheres über die verschiedenen globalen Modelle und die vier detaillierten Analysen, werden in Kapitel 3 (Die untersuchten globalen Modelle) besprochen.

2.4 Politische Modelle

Obwohl politische Mechanismen keinen Schwerpunkt in dieser Arbeit einnehmen, wird an dieser Stelle kurz auf *Politische Modelle* eingegangen, um deren Bedeutung innerhalb *Globaler Modelle* nicht einfach zu übergehen.

Die Entwicklung Politischer Modelle ist eng verbunden mit den Arbeiten von Harold Guetzkow und seinem Team an der Northwestern University, USA (Siegmann, 1985). Seit einigen Jahrzehnten formalisieren und modellieren sie internationale Politik (Guetzkow & Valadez, 1981). Der zentrale Fokus ihrer Arbeit lag dabei auf politischen Problemen zwischen Ost und West sowie auf militärischen Spannungen. Ihre Interaktions-Modelle zwischen Nationen verwendete diese Gruppe, um Entscheidungsfindungsprozesse zu untersuchen. Sie hofften, durch eine heuristische Simulation verschiedene politische Theorien verbinden zu können, um damit den internationalen Wandel besser zu verstehen (Guetzkow & Valadez, 1981). Für die Durchführung übernahmen Spielerteams die Rolle der Entscheidungsträger in einer computersimulierten internationalen Umgebung. Erst Stuart Bremers (1977) *Simulated International Processor Model* verwendete einen unabhängigen Entscheidungsalgorithmus. In späteren politischen Modellen wie GLOBUS und SIMPEST wurde aber wieder auf Guetzkows Interaktions-Ansatz zurückgegriffen (Siegmann, 1985). Um Entscheidungen in

politischen Modellen endogen treffen zu können, kommen vermehrt auch spieltheoretische Ansätze zum Zug (Sokolowski & Banks, 2009).

2.5 System Dynamics Modelle und Systemanalyse

Die Idee von *System Dynamics* geht ursprünglich auf Jay Forrester zurück, welcher im Jahr 1961 den Grundstein legte, indem er die Theorie der Steuerungs- und Regelungstechnik erstmals auf industrielle Systeme anwendete (Forrester J. , 1961). Berühmt wurde Forrester (1968) jedoch mit seiner Arbeit über *Urban Dynamics*. Dort stellte Forrester erstmals ein Konzept vor, indem er Städte wie Manhattan, Boston und Chicago als dynamische Systeme mit rasch zunehmender und abnehmender Bevölkerung modellierte. Dabei stand die Interaktion zwischen Objekten in komplexen dynamischen Systemen im Vordergrund. Forrester modellierte einerseits vorteilhafte Bedingungen, welche zu einem raschen Bevölkerungsanstieg in den Städten führen. Andererseits bezog er auch die zunehmende Alterung und die Renovationsbedürftigkeit der Häuser und die Standortverschiebung der Industrie in andere Gebiete in sein Modell ein, was wiederum zu einem Bevölkerungsrückgang in den Städten führte. Forrester's Arbeit dient in erster Linie den Städteplanern, mit den neuen Herausforderungen von zunehmend älter werdenden Städten umzugehen und die komplexen wechselhaften Einflussfaktoren zu analysieren (Forrester J. , 1968). Forrester's Ansatz kann selbstverständlich nicht nur auf urbane Systeme angewendet werden, sondern bildet den Grundstein zum Thema *System Dynamics* in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen.

Das Bemerkenswerte an Forrester's Methode, war die Erkenntnis, dass alle komplexen dynamischen Systeme zu unerwarteten und oft nicht intuitiv verständlichen Resultaten führen können. In der Studie „*Toward Global Equilibrium*“ beschreibt Forrester (1973), wie schwierig es ist, das Verhalten von dynamischen Systemen zu verstehen:

„The human mind is not adapted to interpreting how social systems behave. Our social systems belong to the class called multiple-loop nonlinear feedback systems. In the long history of human evolution, it has not been necessary for man to understand these systems until very recent historical times. Evolutionary processes have not given us the mental skill needed to interpret properly the dynamic behavior of the systems of which we have now become a part.“ (Forrester J. , 1973, S. 5)

Insbesondere führt das bloße Nachdenken über komplexe dynamische Systeme oft zu beschränkten und irreführenden Resultaten (Ford, 2010). Im Unterschied dazu hilft das Modellieren von komplexen Systemen, auf unerwartete Lösungen zu stossen und die

Wirkungszusammenhänge besser zu verstehen (Ford, 2010). Forrester betont, dass alle Modelle per se imperfekt sind, weil sie eine vereinfachte Abbildung des Systems wiedergeben. Dessen ungeachtet gibt es jedoch verschiedene Simulationsverfahren, um die Interaktionen zwischen Objekten in komplexen dynamischen Systemen zu modellieren. Im nächsten Abschnitt 2.5.1 wird der Modellierungsansatz System Dynamics erklärt und anschliessend im Kapitel 2.5.2 werden die Resultate des Modells analysiert.

2.5.1 System Dynamics

System Dynamics, zu Deutsch Systemdynamik, ist ein Modellierungsansatz und Analyseinstrument, um das Verhalten von komplexen dynamischen Systemen in Bezug auf deren Langzeitwirkung zu untersuchen. Dabei werden quantitative Werte zur Simulation verwendet. Das wichtigste Merkmal von System Dynamics liegt in der endogenen Perspektive beim Modellieren: sämtliche Feedbackschlaufen und zeitlich verzögerten Reaktionen im dynamischen System werden in der Systemstruktur festgelegt. Die modellierte Struktur bestimmt somit das Verhalten des gesamten Systems (Richardson G. P., 1991; Sterman, 2000).

Dynamische Systeme werden in System Dynamics mittels eines Ursache-Wirkungsdiagramms modelliert (Schenker-Wicki, 2009). Der zentrale Regelkreislauf des komplexen Systems bildet dabei den Kern des Modells. Derselbe Sachverhalt kann jedoch verschieden modelliert werden, je nachdem welche Aspekte ins Modell einbezogen oder vernachlässigt werden. Die Qualität des Modells steht und fällt mit der Aussagekraft der kausalen Kette. In einem ersten Schritt muss somit im Ursache-Wirkungsdiagramm bestimmt werden, welche zentralen Aspekte zwingend Bestandteil des Modells sind und welche Teile ausser Acht gelassen werden können. Abbildung 2 zeigt ein solches Ursache-Wirkungsdiagramm zum Thema: Verkaufs-, Investitions-, Qualitäts- und Produktionsprozess einer Pharmaunternehmung auf. Der zentrale Kreislauf ist in Abbildung 2 zusätzlich blau hervorgehoben. Dieses Netzwerk lässt sich je nach Problemstellung beliebig erweitern.

Die Beziehung zwischen der Konkurrenz und der eigenen Wettbewerbsposition ist in Abbildung 2 mit einem negativen Pfeil modelliert. Diese entgegengerichtete Beziehung (negativer Pfeil) zwischen den beiden Beständen kann folgende zwei Bedeutungen haben:

- *Je mehr* Konkurrenz auf dem Markt besteht, *desto weniger* kann die eigene Wettbewerbsposition des Unternehmens ausgebaut werden.
- *Je weniger* Konkurrenz auf dem Markt besteht, *desto mehr* kann die eigene Wettbewerbsposition des Unternehmens ausgebaut werden.

Jeder Pfeil im Ursache-Wirkungsdiagramm wird daher eindeutig mit einem positiven oder negativen Vorzeichen versehen. Dieses Vorzeichen ist bei der Analyse des Netzwerks von zentraler Bedeutung (vgl. Kapitel 2.5.2 Systemanalyse).

Wie eben beschrieben, können komplexe dynamische Systeme in einem solchen Ursache-Wirkungsdiagramm modelliert werden. Für die konkrete Umsetzung kleinerer Modelle am Computer gibt es verschiedene Simulationsprogramme, wie beispielsweise STELLA oder Vensim. Im nächsten Abschnitt wird erklärt, wie eine grobe Gliederung zwischen all diesen verschiedenen dynamischen Systemen vorgenommen werden kann. Die Gliederung wird anhand der Systemarchetypen von Senge (2006) beschrieben.

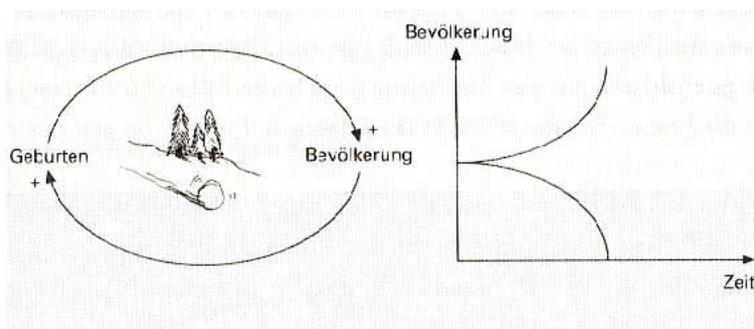
2.5.1.1 Systemarchetypen nach Senge

Anfangs der 90er Jahre entwickelte Peter Senge acht verschiedene Systemarchetypen von Kreisläufen für bestimmte Problemstellungen von Unternehmen und anderen sozialen Organisationen (Senge, 2006). Diese Archetypen charakterisieren das Verhalten des zentralen Regelkreislaufs und werden zur Modellierung der Problemstellung verwendet. Senge hat das Bewusstsein für vernetztes Denken entscheidend geprägt, wobei sein Ansatz eher eine Denkhaltung als eine ausgebaute Problemlösungsmethodik ist (Schenker-Wicki, 2009). Der bereits angesprochene zentrale Kreislauf des komplexen Systems bildet dabei den Kern des Modells und dieser wird dem jeweiligen Archetyp zugeordnet. Nachfolgend werden drei der acht Archetypen anhand je eines Beispiels erklärt (Senge, 2006). Die *Eskalation* und der *Gleichgewichtsprozess* bilden die Grundstruktur aller System Dynamics Modelle und der weiteren Archetypen. Der dritte Archetyp, die *Tragödie der Gemeingüter* wird zusätzlich aufgrund seiner Relevanz für das Ressourcenproblem erläutert und ist gleichzeitig ein Beispiel für die Aussagekraft der Archetypen von Senge (2006).

Der Archetyp *Eskalation* ist ein sich selbstverstärkender Kreislauf und wird auch *Motor* genannt (Schenker-Wicki, 2009). Die Bezeichnung *Motor* ist insbesondere zutreffend, weil

dieser einmal in Schwung gebrachte Kreislauf nicht mehr zum Stoppen kommt. Die Abbildung 3 stellt folgenden dynamischen Prozess dar: je mehr Geburten, desto grösser die Bevölkerung der nächsten Generation. Die gestiegene Bevölkerung erhöht wiederum die Anzahl der Geburten. Ist dieses dynamische System einmal in Schwung gekommen, nimmt die Bevölkerung über die Zeit exponentiell zu. Aufgrund der Bevölkerungsexplosion kann das gesamte dynamische System als destabilisierend bezeichnet werden. Selbstverständlich kann der Prozess auch entgegengesetzt verlaufen: je weniger Geburten, desto kleiner die Bevölkerung, desto weniger werden wiederum die Geburten. In diesem Fall führt das System zu einer Bevölkerungsimplosion, was ebenfalls eine Destabilisation des Systems nach sich zieht. Senge (2006) verwendet aus diesem Grund für den Eskalationsprozess das Symbol der Lawine (vgl. Abbildung 3).

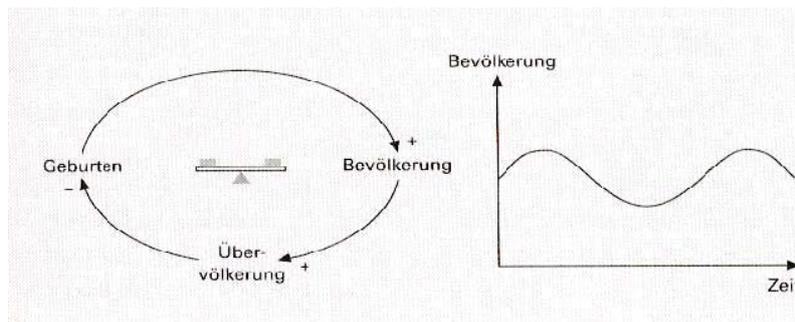
Abbildung 3: Eskalation (eskalierender Kreislauf)



Quelle: (Gomez & Probst, 1999, S. 73)

Der Archetyp *Gleichgewichtsprozess* ist ein dynamischer Kreislauf mit einer negativen Rückkopplung (Schenker-Wicki, 2009). Diese negative Rückkopplung wirkt sich stabilisierend auf das ganze System aus. Die Abbildung 4 stellt einen solchen Gleichgewichtsprozess dar und verdeutlicht die stabilisierende Wirkung in der Bevölkerungsdynamik. Die Grafik stellt folgenden dynamischen Prozess dar: je mehr Geburten, desto grösser die Bevölkerung, desto grösser die Überbevölkerung des Gebiets. Die Überbevölkerung ihrerseits führt zu einer höheren Todesrate in Folge von Krankheit, mangelnder Ernährung und sozialer Missstände, was die Geburten wieder reduziert. Selbstverständlich kann der Prozess auch entgegengesetzt beschrieben werden: Je weniger Geburten, desto geringer die Bevölkerung und so weiter. Die negative Rückkopplung bewirkt, dass die Bevölkerungsentwicklung um ein bestimmtes Niveau pendelt oder sich über die Zeit hinweg stabilisiert (vgl. Abbildung 4). Senge (2006) verwendet aus diesem Grund für den Gleichgewichtsprozess das Symbol der Waage (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 4: Gleichgewichtsprozess (stabilisierender Kreislauf)



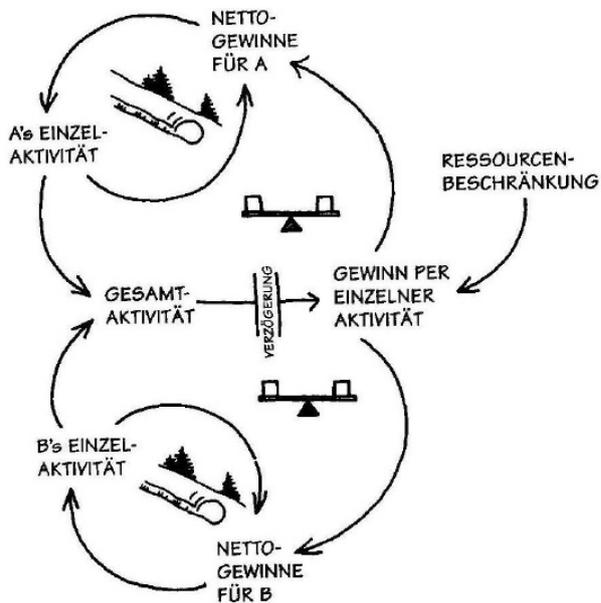
Quelle: (Gomez & Probst, 1999, S. 73)

Um den Aufbau des Netzwerkes und das systemische Verhalten zu analysieren, erfolgt ein mathematisches Verrechnen der Pfeilvorzeichen im zentralen Kreislauf (vgl. blauer Kreislauf in Abbildung 2). Ergibt die Summe der negativen Pfeile im zentralen Kreislauf eine *ungerade Zahl*, handelt es sich um einen dämpfenden Gleichgewichtsprozess (Schenker-Wicki, 2009). Folgt aus der Verrechnung eine *gerade Zahl*, handelt es sich um einen eskalierenden Kreislauf, der im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

Der Archetyp *Tragödie der Gemeingüter* bezieht sich insbesondere auf System Dynamics-Modelle mit freien Ressourcen, welche auch Gemeingüter oder Kollektivgüter genannt werden (Schenker-Wicki, 2009). Kollektivgüter zeichnen sich durch das Merkmal der nicht Ausschliessbarkeit vom Konsum aus (Helfrich, 2009, S. 24). Beispielsweise ist das Meer oder eine Allmend ein Kollektivgut. Die Idee, dass Gemeingüter beziehungsweise Allmende ohne Rücksicht auf deren ökologische Tragfähigkeit übernutzt und letztlich zerstört werden, geht auf Garrett Hardin (1968) zurück. Genau diese Tragik der Allmend wurde von Senge (2006) für seinen Archetyp *Tragödie der Gemeingüter* verwendet. Wie der Abbildung 5 zu entnehmen ist, wird in diesem Modell die Allmend von Personen A und B gemeinsam genutzt. Der Kreislauf von Person A kann wie folgt beschrieben werden: je grösser A's Einzelaktivität, desto grösser fallen die Netto-Gewinne für A aus. Analog dazu verhält sich die Person B. Je grösser A's und B's Einzelaktivität ausfällt, desto grösser ist die Gesamtaktivität auf der Allmend. Die Gesamtaktivität der beiden Konkurrenten nimmt stetig zu und der Gewinn per Einzelaktivität nimmt stetig ab, weil die Wiese auf der Allmend aufgrund der starken Nutzung einen immer kleineren Ertrag abwirft. Beide Personen plündern die Ressourcen der Allmend, bis diese völlig vernichtet sind. Jeder handelt nach seinem persönlichen Vorteil und es kann im Voraus nicht genau abgeschätzt werden, wie sich die andere Person verhält. Um das Verhalten beider Personen bei der Tragödie der Gemeingüter besser modellieren zu können, wird oft das Gefangenendilemma der Spieltheorie zu Hilfe gezogen (Schenker-Wicki, 2009). Lösungsansätze für die Tragödie der Gemeingüter wären

beispielsweise allgemeingültige Rahmenbedingen zur Nutzung der Allmend. In Bezug auf das Meer als Gemeingut besteht eine der möglichen Lösungen darin, international fixe Fangquoten für den Fischfang durchzusetzen.

Abbildung 5: Die Tragödie der Gemeingüter



Quelle: (Senge, 2006, S. 129)

Allgemein können System Dynamics-Modelle dabei helfen, die einzelnen Interaktionen in dynamischen Systemen besser zu verstehen und darzulegen. Die Interaktionen der Modelle können zusätzlich auch quantitativ untersucht werden. Diese Systemanalyse wird im nächsten Kapitel 2.5.2 erklärt.

2.5.2 Systemanalyse

Eine Systemanalyse beinhaltet in einem ersten Schritt das Untersuchen der relevanten Elemente in einem System und deren Zusammenhänge. Da grössere Systeme häufig aus mehreren Komponenten bestehen, können deren Elemente erst gesondert betrachtet werden, um erst danach die Auswirkungen unter den Komponenten zu bestimmen. Dabei wird eins zu eins festgestellt, welche Auswirkung die Veränderung eines Elements auf das gesamte System hat. Diese gegenseitige Beeinflussung, beziehungsweise die Intensität der Beziehung zwischen den Elementen, wird in der Einflussmatrix ermittelt (vgl. Abbildung 6). Gemäss Hürlimann (2009) kann die Intensität der Beziehung in vier Stufen unterteilt werden: leeres Feld = keine Beeinflussung, $2/3$ = unterproportionale Beeinflussung, 1 = proportionale Beeinflussung, $3/2$ = überproportionale Beeinflussung. Daraus ergibt sich ein mathematisches Modell (sogenannte Einflussmatrix), das das gesamte System abstrahiert darstellt und alle Komponenten mit der Beziehungsintensität im richtigen Feld auflistet. Die Abbildung 6 zeigt

eine solche Einflussmatrix für das Beispiel der Pharmaunternehmung aus Abbildung 2. Sämtliche Elemente des Netzwerks werden auf der x- und y-Achse aufgeführt und die Beziehungsintensität wird entsprechend eingetragen.

Abbildung 6: Einflussmatrix anhand des Beispiels der Pharmaunternehmung

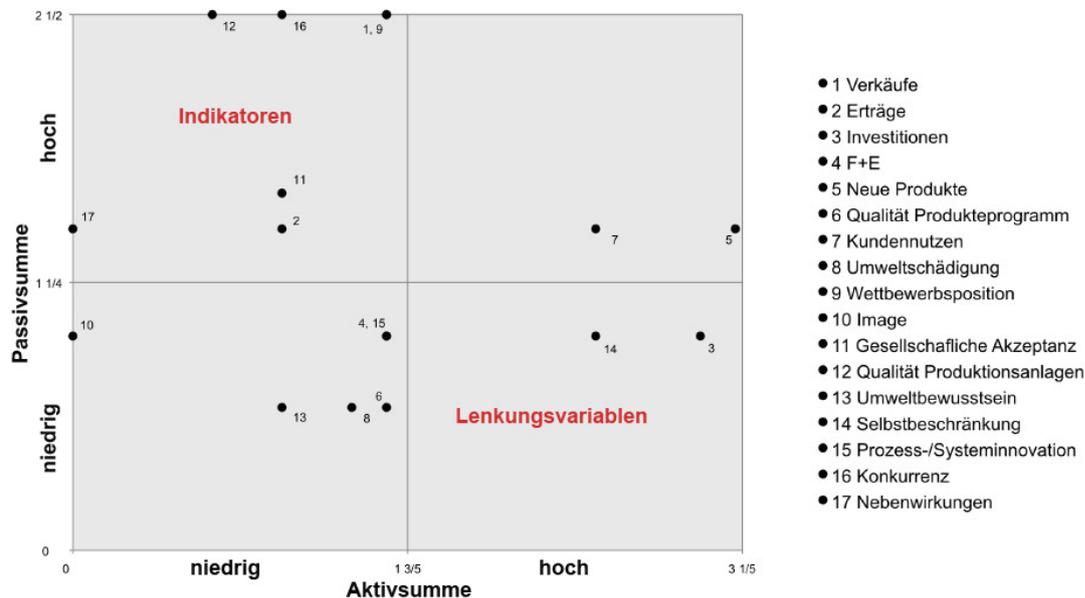
	1 Verkäufe	2 Erträge	3 Investitionen	4 F+E	5 Neue Produkte	6 Qualität Produkteprogramm	7 Kundennutzen	8 Umweltschädigung	9 Wettbewerbsposition	10 Image	11 Gesellschaftliche Akzeptanz	12 Qualität Produktionsanlagen	13 Umweltbewusstsein	14 Selbstbeschränkung	15 Prozess-/Systeminnovation	16 Konkurrenz	17 Nebenwirkungen	AS
1 Verkäufe		1 1/2																1 1/2
2 Erträge			1															1
3 Investitionen				1								1			1			3
4 F+E					1 1/2													1 1/2
5 Neue Produkte						2/3					1	1 1/2						3 1/6
6 Qualität Produkteprogramm							1 1/2											1 1/2
7 Kundennutzen	1							1 1/2										2 1/2
8 Umweltschädigung											2/3		2/3					1 1/3
9 Wettbewerbsposition	1 1/2																	1 1/2
10 Image																		0
11 Gesellschaftliche Akzeptanz										1								1
12 Qualität Produktionsanlagen								2/3										2/3
13 Umweltbewusstsein													1					1
14 Selbstbeschränkung														1				2 1/2
15 Prozess-/Systeminnovation															1	-1 1/2		1 1/2
16 Konkurrenz									-1									1
17 Nebenwirkungen																		0
PS	2 1/2	1 1/2	1	1	1 1/2	2/3	1 1/2	2/3	2 1/2	1	1 2/3	2 1/2	2/3	1	1	2 1/2	1 1/2	

Quelle: (Schenker-Wicki, 2009, S. 40).

Diese Sensitivitätsanalyse gibt Aufschluss darüber, welche Elemente einen starken Einfluss auf das System haben und somit günstige *Steuerungsvariablen* wären, oder welche Elemente auf Veränderungen starke Reaktionen zeigen und somit als *Indikatoren* geeignet sind. Um diese Unterscheidung zwischen Steuerungsvariablen und Indikatoren vorzunehmen, muss in der Einflussmatrix (vgl. Abbildung 6) erst die Passivsumme (PS) und die Aktivsumme (AS) durch horizontale (beziehungsweise vertikale) Addition der Werte berechnet werden. Anschliessend kann das Einflussportfolio (vgl. Abbildung 7) mit der Aktivsumme auf der x-Achse und der Passivsumme auf der y-Achse erstellt werden. Eine hohe Aktivsumme bedeutet, dass eine kleine Änderung der Variable eine grosse Systemveränderung bewirkt. Eine hohe Passivsumme bedeutet, dass eine kleine Systemveränderung eine grosse Änderung der Variable mit sich bringt (Schenker-Wicki, 2009). Alle *Indikatoren* sind jene Variablen mit hoher Passivsumme und tiefer Aktivsumme. Im Unterschied dazu sind *Lenkungsvariablen* solche mit tiefer Passivsumme und hoher Aktivsumme (Schenker-Wicki, 2009). Auf dieselbe

Weise kann das dynamische System im Hinblick auf den zeitlichen Aspekt analysiert werden, wobei die Verzögerungen der Flussgrößen bewertet werden.

Abbildung 7: Einflussportfolio anhand des Beispiels der Pharmaunternehmung



Quelle: (Schenker-Wicki, 2009, S. 42)

2.5.3 Bedeutung von System Dynamics für globale Modelle

Das Gebiet der Systemanalyse oder *System Dynamics* brachte die bekannten Welt-Modelle der frühen 70er Jahre hervor, mit denen in der Literatur der Beginn der *Globalen Modelle* verbunden wird (Siegmann, 1985). *System Dynamics* etablierte sich durch Jay Forrester am MIT und wurde weltberühmt durch das vom *Club of Rome* in Auftrag gegebene Modell *World3* (vgl. Kapitel 3.1 World3). Das Buch dazu, *The Limits to Growth*⁴, verkaufte sich in den ersten zehn Jahren über drei Millionen Mal und wurde in dreiundzwanzig Sprachen übersetzt (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Der *Club of Rome* war auch die treibende Kraft bei der Gründung des *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) in Österreich. Das IIASA stellte eine wertvolle Plattform für Workshops dar, in denen *System Dynamics-Modelle* im Detail diskutiert werden konnten. Die sogenannten IIASA Konferenz Modelle setzen Schwerpunkte in Ökologie, Bevölkerungswachstum, Ressourcenknappheit und ökonomischer Unabhängigkeit. Das von Guetzkow (1981) proklamierte Bestreben, durch Modelle internationale Mechanismen besser zu verstehen, trat in den frühen *System Dynamics-Modellen* von Forrester, Meadows (1972) und anderen mehr

⁴ The Limits to Growth - A report for the Club of Rome's project on the Predicament of Mankind (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972).

in den Hintergrund. Grund dafür war das Image der Modelle, Prognose-Werkzeuge für die Zukunft zu sein. Zwar warnten die Modellierer selbst vor der beschränkten Tauglichkeit der Modelle zur Erstellung aussagekräftiger Zukunftsprognosen, bei einer breiten Öffentlichkeit stiessen die Modelle aber genau deswegen auf grosses Interesse (Siegmann, 1985).

2.6 Ökonomische Modelle und Theorien

In diesem Kapitel werden diejenigen ökonomischen Modelle und Theorien kurz erläutert, die in den analysierten globalen Modellen verwendet werden. Das Ziel dieses Kapitels ist nicht eine umfassende Einführung in diese weitgreifenden Theorien, sondern es gilt eine Basis zu schaffen, um die ökonomischen Aspekte der in Kapitel 3 genauer betrachteten globalen Modelle besser zu verstehen. Besonderes Augenmerk wird auf die jeweiligen Annahmen gelegt, da diese viel über die Weltanschauung einer Theorie verraten.

Während die ersten globalen Modelle von Ökonomen mit starker Zurückhaltung zur Kenntnis genommen wurden, stieg auf der andern Seite das Interesse, ökonomische Modelle für die Analyse globaler Themen zu integrieren (Richardson J. M., 1984). Diese Entwicklung aufgreifend widmete die IIASA ihre *Global Modeling Conference* von 1980 den internationalen ökonomischen Modellen (Hickman, 1983). Die dort diskutierten Modelle verbanden oft individuelle nationale ökonomische Modelle mit einander, um kurz- bis mittelfristige Prognosen, verschiedene Szenarios und Handlungsalternativen zu berechnen. Im Fokus der Modellierer lagen dabei Handelsströme, Wechselkurse, Zinsraten, Preise und regionale makroökonomische Kennzahlen (Hickman, 1983; Siegmann, 1985).

Für Ökonomen, die sich mit der Modellierung nachhaltiger Entwicklung befassen, sind gemäss Faucheux, Pearce, & Proops (1997) die folgenden Aspekte wichtig:

- Erstens möchten die Analysten oft wissen, wie sich ein gewisses Verhalten beispielsweise eine politische Strategie auf die makroökonomischen Variablen einer Ökonomie auswirken.
- Zweitens werden die Auswirkungen auf unterschiedliche Sektoren untersucht. Zum Beispiel wird der Frage nachgegangen, ob sich verändernde Anstellungseffekte stärker im Industriesektor zu spüren sind als im Dienstleistungssektor.
- Drittens sind die Interaktionen und Abhängigkeiten zwischen den Akteuren von Interesse. Beispielsweise wie Ressourcenverbrauch und Schadstoffausstoss in der Produktion von Gütern gehandhabt wird, die ihrerseits wieder als Input für die Herstellung anderer Produkte verwendet werden.

- Schlussendlich stellt sich die zentrale Frage, wie sich die Veränderungen langfristig auf die Wachstumsrate der Ökonomie unter Betrachtung auswirken.

Die im ersten Punkt erwähnten Veränderungen beziehungsweise Strategien können von einfachen Annahmen über politische Entscheide bis hin zu Gesetzen reichen. Sie bilden die Ausgangslage der Analysen und werden in diesem Zusammenhang im Verlauf dieser Arbeit als *Strategien* bezeichnet. *Szenarien* hingegen sind die verschiedenen Situationen und Annahmen, unter denen eine *Strategie* geprüft wird.

Die ökonomischen Modellierungsansätze *Computable General Equilibrium Modeling* (CGE) und die *Input-Output Analyse* entsprechen den oben formulierten Anforderungen von Faucheux, Pearce, & Proops (1997) und sind für die ökonomische Analyse nachhaltiger Fragestellungen weit verbreitet (Moffatt & Hanley, 2001). Diese *allgemeinen Modelle* (vgl. Kapitel 2.2 Verwendeter Modellbegriff) liefern für die *konkreten* globalen Modelle die Ausgangslage der ökonomischen Annahmen und Mechanismen. Sie werden in den folgenden Unterkapiteln nach einer Einführung in die neoklassische Theorie besprochen (vgl. Kapitel 2.6.2 Input-Output-Analyse und Kapitel 2.6.3 Computergestützte allgemeine Gleichgewichtsmodelle). Im letzten Unterkapitel 2.6.4 wird zudem die *Intensity of Use-Hyothese* erläutert, die in einem der analysierten globalen Modelle eine zentrale Rolle spielt.

2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen

Die neoklassische Theorie beruht auf der klassischen ökonomischen Theorie von Adam Smith (1776), der davon ausging, dass Angebot und Nachfrage wie eine unsichtbare Hand und ohne staatliche Interventionen ein Gleichgewicht herstellen zwischen Beschäftigung, Produktion und Nachfrage. Der Neo-Klassizismus löste Ende des 19. Jahrhunderts die klassische ökonomische Theorie ab und steht in Konkurrenz zu den Arbeiten von John Maynard Keynes (1935). Dieser reagierte im Zuge der Weltwirtschaftskrise nach 1929 auf die Existenz von lange anhaltenden Ungleichgewichten mit hoher Arbeitslosigkeit und empfahl staatliche Interventionen über eine expansive Fiskalpolitik (Keynes, 1935). Die Inflation der 60iger Jahre brachte diese Politik und Keynes' Lehre in Misskredit und stärkte erneut die Basis für die Neo-Klassiker, zu denen auch Nobelpreisträger Milton Friedman zählten (Friedman, 1997). Die Neo-Klassiker empfahlen, die Zentralbanken auf nur ein Ziel auszurichten, die Sicherung der Geldwertstabilität, die heute noch Grundlage der Arbeit der europäischen und vieler anderer Zentralbanken ist.

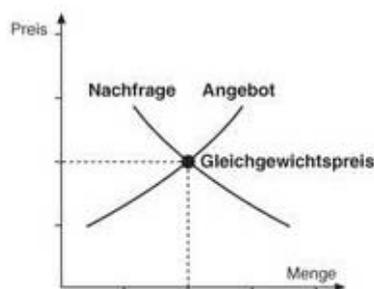
Stark vereinfacht ausgedrückt, sind sich die Verfechter der erwähnten ökonomischen Paradigmen uneinig darüber, wie stark und an welcher Stelle der Staat in die sich selbst

regulierende Marktwirtschaft eingreifen soll. Bis heute hat sich die neoklassische Theorie als das am weitesten verbreitete ökonomische Paradigma etabliert, womit Marktinterventionen nur zurückhaltend und mehrheitlich zur Sicherung der Geldwertstabilität eingesetzt werden (Weintraub, 2002).

In der neoklassischen Theorie liegt der Fokus auf der Ermittlung von Preisen, Produktionsoutputs und Einkommensverteilungen in Märkten, die aufgrund von Angebot und Nachfrage zustande kommen (Weintraub, 2002). Die wohl wichtigste Annahme ist die der Nutzenmaximierung: Individuen maximieren ihren Nutzen durch Konsum, unter Berücksichtigung der eigenen Vorlieben und finanziellen Verhältnisse. Sie liefern damit die Nachfrage, die vom Angebot der Unternehmen gestillt wird. Der Nutzen auf Seiten der Unternehmen wird mit Profit gleichgestellt, den diese unter Berücksichtigung der Kosten ebenfalls zu maximieren versuchen. Wo die Preise eines Produktes (Angebot) gleich der Zahlungsbereitschaft eines Konsumenten sind (Nachfrage) wird durch den Kauf ein Mehrwert an Nutzen für beide Seiten geschaffen. Auf dieselbe Weise bieten Individuen ihre Arbeitskraft bei Unternehmen an und wägen ab, ob für sie das angebotene Gehalt den Verlust an Freizeit kompensiert (Weintraub, 2002).

Die Akteure in der Ökonomie, seien es Individuen beziehungsweise Haushalte oder Unternehmen, werden auch *Agenten* genannt (Weintraub, 2002). Auf der einen Seite steht das unlimitierte Bedürfnis nach Nutzen der *Agenten* und auf der anderen Seite deren Einschränkungen wie das verfügbare Einkommen und die Knappheit von Gütern, Arbeitskräften und Kapital. Diese bewirken im Zusammenspiel mit der Nutzenoptimierung ein ökonomisches Gleichgewicht (vgl. Abbildung 8). Dazu ein Beispiel: Unternehmen stellen nur so lange neue Arbeitskräfte ein, bis ein zusätzlicher Mitarbeiter unter Berücksichtigung der Kosten keinen zusätzlichen Profit mehr liefert. Kosten und Nutzen halten sich im Optimum die Waage, womit dieser maximiert ist (Weintraub, 2002).

Abbildung 8: Gleichgewichtspreis



Quelle: (Malcik & Schachermeier, 2009, S. 1)

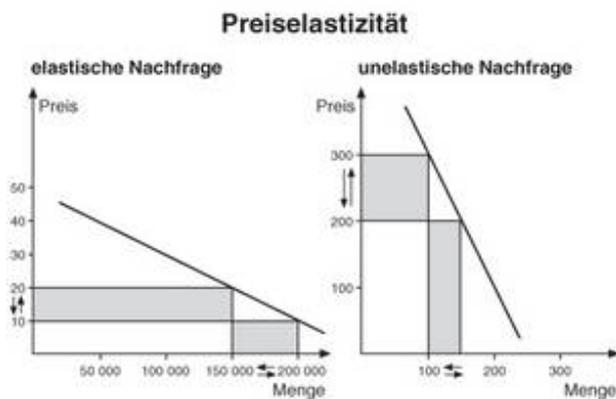
Die neoklassische Ökonomie kann auch als Meta-Theorie bezeichnet werden, da sie innerhalb der Ökonomie gewisse Rahmenbedingungen zur Erstellung konsistenter neoklassischer Theorien liefert (Weintraub, 2002). Dazu gehören fundamentale Annahmen, bei deren Berücksichtigung eine Theorie neoklassisch ist (Weintraub, 2002):

1. Menschen haben rationale Präferenzen und sind sich derer bewusst.
2. Individuen maximieren Nutzen und Unternehmen maximieren Profit.
3. Menschen agieren unabhängig und auf Basis vollständiger Information.

Der erste und dritte Punkt sind Voraussetzungen, damit der zweite Punkt seine Wirkung reibungslos, sinnvoll und wie bereits oben erläutert entfalten kann. Ein Beispiel zu rationalen Präferenzen könnte wie folgt aussehen: Kurt mag Äpfel lieber als Birnen, deshalb ist er bereit für Äpfel mehr zu bezahlen als für Birnen. Die Unabhängigkeit in Punkt 3 ist ein zentraler Aspekt der freien Marktwirtschaft: Niemand kann Kurt vorschreiben, er müsse Birnen kaufen, wenn er doch lieber Äpfel möchte. Die Annahme vollständiger Information stellt sicher, dass Kurt ständig über alle Preise Bescheid weiss. Damit ist es seine eigene nutzenmaximierende Entscheidung, ob er den teureren Apfel des Händlers um die Ecke kaufen möchte, oder den günstigeren Äpfel vom Marktstand am anderen Ende der Stadt.

Neben den oben erwähnten Annahmen, ist das Konzept der Elastizität eine weitere wichtige Grundlage. Je höher der Preis für Äpfel steigt, umso attraktiver ist es für Kurt, stattdessen Birnen zu kaufen. Irgendwann ist der Punkt erreicht, bei dem sich Kurt entscheidet, für den Preis eines Apfels lieber mehrere Birnen zu kaufen, da dies seinen Nutzen neu besser maximiert. Ausschlaggebend sind wieder seine Präferenzen. Je höher die Preiselastizität zwischen Äpfeln und Birnen, desto später wird Kurt teilweise oder ganz auf Birnen umsteigen (vgl. Abbildung 9). Nicht alle Güter lassen sich gegenseitig substituieren und neben der hier geschilderten Preiselastizität existieren noch weitere Elastizitäten, auf die im Zuge dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

Abbildung 9: Preiselastizität



Quelle: (Malcik & Schachermeier, 2009, S. 1)

2.6.1.1 Das Solow-Modell

Ein wichtiger Meilenstein in der Entwicklung der neoklassischen Theorie ist das Wachstumsmodell von Solow (1956), das die Basis für die meisten Wachstumstheorien darstellt (McCandless, 2008). Das simple aber elegante *allgemeine Modell* (vgl. Kapitel 2.2 Verwendeter Modellbegriff) produziert überprüfbare Resultate und gewann durch die Überarbeitung von Romer (1986) und Lucas (1988) nochmals an Popularität, da die Konsistenz mit den tatsächlichen Wachstumsdaten verbessert wurde.

Die einfachste Variante des Solow-Modells stellt eine Wirtschaft mit nur einem Gut dar. Es besteht aus einer aggregierten Produktionsfunktion mit konstanten Skalenerträgen, einem Gesetz für die Kapitalakkumulation und einer exogenen Sparrate. Die Höhe der Investitionen und die Höhe der Ersparnisse befinden sich im Gleichgewicht, womit der Kapitalstock nur durch die Produktion des einen Gutes vermehrt werden kann. Von dieser Basis aus wird eine Differenzgleichung für die Kapitalakkumulation pro Arbeiter aufgestellt, welche die Grundlage der Modellberechnungen bildet (McCandless, 2008).

Um zu verstehen, welche Rolle Produktionsfunktionen bei der Formulierung eines ökonomischen Wachstumsmodells spielen, wird hier der Aufbau von Solows Basismodell dargestellt. Zwischenschritte wie mathematische Umformungen werden dabei bewusst ausgelassen, da einerseits der Fokus auf den Annahmen von Solow liegt und andererseits das Ziel verfolgt wird, dem Leser eine Idee dafür zu geben, was im Kern ökonomischer Modelle

vor sich geht.⁵ Die Basis des Solow-Modells ist wie folgt aufgebaut (Solow R. M., 1956; McCandless, 2008):

Die zentrale Produktionsfunktion des Solow-Modells lautet

$$Y_t = A_t F(K_t, H_t),$$

wobei Y_t für den Output des einzigen Gutes einer hypothetischen Ökonomie zum Zeitpunkt t steht. A_t ist das Technologielevel, K_t der Kapitalstock und H_t die Menge an Arbeit, die in die Produktion einfließt. Das Technologielevel trägt zur Verbesserung der Produktionseffizienz bei und wächst von seiner Ausgangslage A_0 mit der Nettorate α womit $A_t = (1 + \alpha)^t A_0$ ist. Die verfügbare Arbeitskraft⁶ wächst mit einer konstanten Nettorate n , sodass diese mit $H_{t+1} = (1 + n) H_t$ beschrieben wird. I_t sind die Investitionen zum Zeitpunkt t und $k_t \equiv K_t/H_t$ ist das Kapital pro Arbeiter. Unter den genannten Annahmen sieht die Regel für die Kapitalakkumulation der Arbeiter wie folgt aus:

$$k_{t+1} = \frac{(1 - \delta)k_t + i_t}{1 + n}$$

δ steht dabei für die Abschreibungsrate und $i_t = I_t/H_t$ ist das Investment pro Arbeiter zum Zeitpunkt t . Die Ersparnisse s_t sind als fixer Anteil σ des Outputs pro Arbeiter y_t definiert: $s_t = \sigma y_t$. In einer geschlossenen Ökonomie, in die keine Investitionen oder Ersparnisse von aussen eingebracht werden können, sind die jährlichen Ersparnisse die einzige Möglichkeit, um Investitionen zu tätigen und damit Kapital aufzubauen. Dies führt zu einer von Solows wichtigsten Annahmen, welche das Basismodell stark vereinfacht: $i_t = s_t$ die Investitionen pro Kopf können nur genau den Ersparnissen pro Kopf entsprechen. Dadurch kann in der Regel zur Kapitalakkumulation die Investment- mit der Sparrate substituiert werden und diese wiederum mit der Konstante σ mal Output pro Kopf. Wird nun die Produktionsfunktion nach dem Output pro Kopf aufgelöst kann sie in die Regel zur Kapitalakkumulation eingesetzt werden, wodurch die folgende Differenzgleichung resultiert:

$$(1 + n)k_{t+1} = (1 - \delta)k_t + \sigma(1 + \alpha)^t A_0 f(k_t)$$

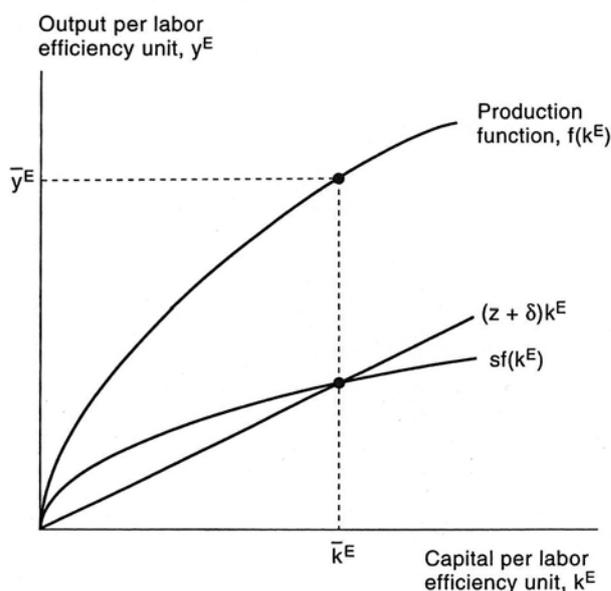
⁵ Alle Annahmen zur Herleitung der resultierenden Differenzgleichung sind hier aufgeführt. Für eine detailliertere schrittweise Erläuterung des Rechnungswegs wird empfohlen, McCandless (2008) zu konsultieren.

⁶ Der Zuwachs von Arbeitskräften wird hier mit dem Zuwachs der Bevölkerung gleichgesetzt.

Dies ist nun die Ausgangslage für alle rekursiven Berechnungen der Zeitreihe. Ein stabiles Wirtschaftswachstum \bar{k} definiert Solow als konstantes Kapital pro Kopf über die Zeit hinweg. Mathematisch ausgedrückt: $k_{t+1} = k_t = \bar{k}$.

Im Basismodell wird davon ausgegangen, dass alle Länder beziehungsweise Ökonomien denselben Zugang zu Technologie haben und dieselbe Sparrate verwenden. Eines der wichtigsten Resultate des Solow-Modells ist, dass ärmere Länder beziehungsweise Ökonomien mit einem tieferen Startwert für Kapital eine höhere Wachstumsrate aufweisen, als reichere. Sehr anschaulich ist diese Aussage in Abbildung 10 nachzuvollziehen. Der Schnittpunkt der Funktion mit der 45° Linie repräsentiert konstantes Kapital pro Kopf über die Zeit. Für die Werte bis zum Schnittpunkt $0 < k_t < \bar{k}$ steigt das Wachstum erst stark an um dann wieder langsam gegen \bar{k} zu konvergieren. Unter Berücksichtigung aller erwähnten Annahmen würde also im Basismodell jede Ökonomie nach einem Schock auf Kapital, Arbeit oder Technologie wieder auf eine konstante Wachstumsrate konvergieren.

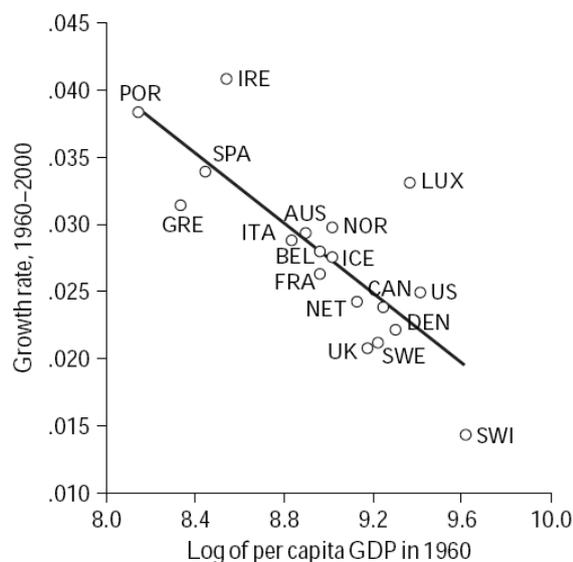
Abbildung 10: Solow-Modell



Quelle: (Obstfeld & Rogoff, 1996, S. 433)

Bestätigt hat sich diese Abhängigkeit zwischen Kapital pro Kopf und der Stabilisierung der Wachstumsrate lediglich in den OECD-Staaten (vgl. Abbildung 11). Bei einer weltweiten Betrachtung weisen die Daten jedoch nicht auf einen solchen Trend hin (Barro & Sala-i-Martin, 2004).

Abbildung 11: OECD-Wachstum



Quelle: (Barro & Sala-i-Martin, 2004, S. 46)

Natürlich vereinfachen die im Basismodell verwendeten Annahmen den Sachverhalt so extrem, dass dessen Anwendung in einem *konkreten Modell* nicht praktikabel wäre. Auch die oben erwähnte Tendenz eines stärkeren relativen Wachstums ärmerer Länder gegenüber reicheren konnte bei weltweiter Betrachtung nicht ausreichend durch historische Daten bestätigt werden (McCandless, 2008; Barro & Sala-i-Martin, 2004). Das Modell ist aber eine wichtige Basis, auf der man sich schrittweise durch Modifikationen der Annahmen der Realität annähern kann. Beispielsweise wurde bis anhin nicht berücksichtigt, dass die Arbeiter ihr Kapital nicht nur sparen und investieren, sondern es auch für den Kauf von Konsumgütern einsetzen können. Die Konsumtion ist auch ein wichtiger Faktor, um damit den Nutzen für die Arbeiter zu bestimmen. Anstatt wie im Basismodell die Sparrate exogen vorzugeben, kann somit in das Modell ein Optimierungsproblem integriert werden, das den Nutzen der Arbeiter beziehungsweise der Bevölkerung maximiert (McCandless, 2008).

Eine verbreitete Erweiterung ist die Verwendung einer *Cobb-Douglas Produktionsfunktion* (Blanchard & Illing, 2004; McCandless, 2008). Sie beschreibt ebenfalls die Verhältnisse von Input zu Output, wobei aber auch die Elastizität zwischen Arbeit und Kapital berücksichtigt wird:

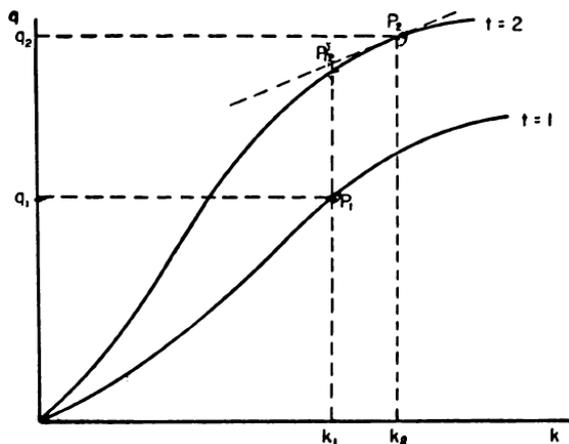
$$Y_t = A_t H_t^\alpha K_t^\beta$$

α und β stehen für die Elastizität des Outputs unter Veränderung der Inputfaktoren Arbeit H und Kapital K . Dies ermöglicht Substitutionseffekte zwischen Arbeit und Kapital in die Untersuchung einfließen zu lassen. α und β geben Aufschluss darüber ob Arbeit oder Kapital

unter-/normal- oder überproportional zum Output beiträgt, wobei die Parameter je nach Definition auch vom technologischen Fortschritt beeinflusst werden können (Blanchard & Illing, 2004).

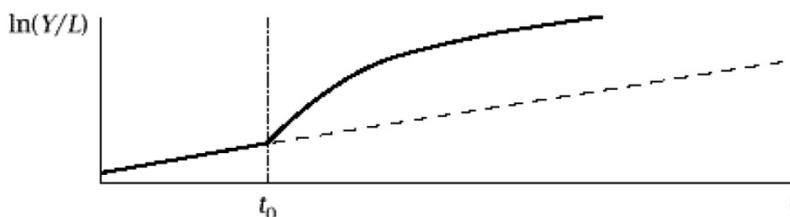
Was das Solow-Modell für diese Arbeit besonders interessant macht, ist die Berücksichtigung von technologischem Fortschritt. Solow (1957) konnte mit seinem Modell und Daten aus den Vereinigten Staaten empirisch aufzeigen, dass Kapitalakkumulation und technischer Fortschritt den Anstieg der Produktion und somit Wachstum auslösen können. Er konnte mit Daten aus den Vereinigten Staaten empirisch belegen, dass in der Zeit von 1909-1949 der technische Fortschritt für 87.5% der Output-Zunahme verantwortlich war (Solow, 1957). Kapitalakkumulation alleine kann Wachstum nicht auf Dauer ermöglichen, womit langfristiges Wachstum ohne ständigen technischen Fortschritt nicht möglich ist (Blanchard & Illing, 2004). Der Schock einer technischen Neuerung ist in Abbildung 12 anhand von zwei Produktionsfunktionen unterschiedlicher Zeitperioden ersichtlich, wodurch in Abbildung 13 das Wachstum auf ein höheres Niveau springt, um sich dort wieder neu zu stabilisieren (Solow, 1957; Romer, 2006).

Abbildung 12: Produktionsfunktionen unter unterschiedlichen Technologielevels



Quelle: (Solow R. M., 1957, S. 313)

Abbildung 13: Wachstumssprung durch technologische Neuerung



Quelle: (Romer D. , 2006, S. 19)

Solow zeigte mit der Ausarbeitung seines Wachstumsmodells auf, wie wichtig Stabilität, Kapital und technologischer Fortschritt für das Wirtschaftswachstum sind und wie es möglich ist, Zeitreihen aufzustellen, die den realen historischen Daten sehr nahe kommen (McCandless, 2008). Er erhielt dafür 1987 den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften. Die Anzahl der Erweiterungen und Anpassungen, die Solow durch sein Wachstumsmodell angestoßen hat, sind unzählbar und können bei zunehmendem Detaillierungsgrad sehr komplex werden. Wie im Laufe dieser Arbeit ersichtlich wird, spielen neoklassische Ansätze mit *Cobb-Douglas Produktionsfunktionen* auch in globalen Modellen eine wichtige Rolle.

2.6.2 Input-Output-Analyse

Die *Input-Output-Analyse* (I/O-Analyse) beruht auf der Überlegung, dass Wertschöpfungsprozesse Informationen, Stoffe oder Energie als Input aus der Umwelt beziehen und in anderer Form als Output wieder an ihre Umwelt abgeben (Winker, 2010; Wiener, 1968). Die Grundzüge der I/O-Analyse sind sehr alt und entstammen teilweise aus der *Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung* (Winker, 2010). Die moderne I/O-Analyse wurde massgeblich von Wassily Leontief (1966) beeinflusst, der für seine Arbeiten den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften erhielt.

Besonders für die produzierende Industrie ist die I/O-Analyse das geeignete Hilfsmittel, um von einzelnen Güterflüssen auf übergeordnete Zusammenhänge verschiedener Sektoren schliessen zu können. Die Betriebe werden dazu in Sektoren unterteilt. In der I/O-Analyse werden die Produktionsfaktoren eines betrachteten Betriebs oder Sektors von den Inputs anderer Betriebe/Sektoren unterschieden. Der zentrale Fokus liegt dabei auf den Abhängigkeiten zwischen den Sektoren, die sich durch die benötigten Vor- beziehungsweise Zwischenprodukte und Dienstleistungen ergeben (Winker, 2010).

Das Ziel der I/O-Analyse ist zum einen die transparente Darstellung dieser Abhängigkeiten unter den Sektoren (Winker, 2010). Dies wird mit Hilfe einer *Input-Output-Tabelle* (I/O-Tabelle) erreicht, die auch das Herzstück bei den nach ihr benannten Input-Output-Modellen bildet. Andererseits ist die I/O-Analyse ein Werkzeug zur Untersuchung der Auswirkungen von Veränderungen in einem Sektor auf die restliche Volkswirtschaft (Winker, 2010). Nach diesen beiden Zielsetzungen sind auch die folgenden Unterkapitel aufgeteilt: Erst wird auf die Struktur der Input-Output-Tabelle eingegangen (vgl. Kapitel 2.6.2.1 Die Input-Output-Tabelle). Sie bildet die Grundlage für die im zweiten Unterkapitel erläuterte Analyse (vgl. Kapitel 2.6.2.2 Input-Output-Analyse mit dem Modell von Leontief).

2.6.2.1 Die Input-Output-Tabelle

Die *Input-Output-Tabelle* (I/O-Tabelle) wird verwendet, um die Abhängigkeiten zwischen Wirtschaftssektoren aufgrund der jeweils benötigten Vorprodukte zu bestimmen (Winker, 2010). Sie stellt dabei einen Zusammenhang zwischen den Nachfragern der Outputs und den Produktionsfaktoren beziehungsweise den Inputs wie Arbeits- und Materialaufwand her.

Die I/O-Tabelle ist eine Weiterentwicklung der betrieblichen *Produktionskonten* (Winker, 2010). Diese listen auf der Entstehungsseite alle Inputs auf, die in einer Periode für die Produktion benötigt werden. Beispiele für Inputs sind Vorleistungen von anderen Betrieben, Importe aus dem Ausland, Produktionsmittel wie Maschinen, die in Form von Abschreibungen einbezogen werden, sowie Löhne, Gewinne und Zinsen für Kapital oder Mieten. Diesen werden auf der Verwendungsseite die Outputs gegenübergestellt, aufgeteilt nach Nachfragern wie privatem Konsum, Investitionen, Staatsnachfrage oder Export (Winker, 2010). In Abbildung 14 sind weitere Kennzahlen aufgeführt, die ein betriebliches *Produktionskonto* enthält. Für die folgenden beiden Abbildungen dient diese Aufstellung auch als Legende zu den Abkürzungen.

Abbildung 14: Produktionskonto einer Unternehmung

Entstehungsseite	Verwendungsseite
Von anderen Unternehmen empfangene Vorleistungen	An andere Unternehmen gelieferte Vorleistungen
nicht abzugsfähige Umsatzsteuer T^{nU}	Konsumgüter für private Haushalte C^{pr}
Abschreibung D	Konsumgüter für den Staat C^{St}
indirekte Steuern abzüglich Subventionen $T^p - Z$	Investitionsgüter I^A
Löhne L	Vorratsveränderungen I^V
Gewinne, Zinsen und Pachten G	Güter für das Ausland X
Vorleistungen aus dem Ausland M	

Quelle: (Winker, 2010, S. 109)

Zur Erstellung einer I/O-Tabelle werden in einem ersten Schritt die *Produktionskonten* aller Betriebe eines Sektors aggregiert (vgl. Abbildung 15). Ob die zusammengeführten Sektoren für einzelne Branchen, nationale Regionen oder Länder stehen, legt der Modellierer fest.

Abbildung 15: Zwischenschritt zur Input-Output-Tabelle - in Sektoren aggregierte Produktionskonten

Entstehung			Verwendung		
S1	S2	S3	S1	S2	S3
V_{11}	V_{21}	V_{31}	V_{11}	V_{12}	V_{13}
V_{12}	V_{22}	V_{32}	V_{21}	V_{22}	V_{23}
V_{13}	V_{23}	V_{33}	V_{31}	V_{32}	V_{33}
D_1	D_2	D_3	C_1	C_2	C_3
$T_1^p - Z_1$	$T_2^p - Z_2$	$T_3^p - Z_3$	I_1	I_2	I_3
$L_1 + G_1$	$L_2 + G_2$	$L_3 + G_3$	X_1	X_2	X_3
M_1	M_2	M_3			
Aufk. Güter Sek. 1	Aufk. Güter Sek. 2	Aufk. Güter Sek. 3	Verbr. Güter Sek. 1	Verbr. Güter Sek. 2	Verbr. Güter Sek. 3

Quelle: (Winker, 2010, S. 110)

Wie in Abbildung 15 ersichtlich sind die Vorleistungen zwischen den Sektoren (S1-3) in den oberen drei Zeilen abgebildet, wobei V_{ij} für den totalen Güterwert steht, der von Sektor j an Sektor i geht. Genau in diesem Bereich sind die Informationen der Entstehungsseite und der Verwendungsseite redundant. Im letzten Schritt werden diese redundanten Felder konsolidiert, um die I/O-Tabelle in Abbildung 16 zu erhalten. Als Mengengrößen dienen monetäre Einheiten, wobei nicht der Preis, sondern immer die Herstellungskosten relevant sind (Winker, 2010). Dies ist aufgrund des Kreislaufcharakters der I/O-Tabellen notwendig, da sonst die Werte der Inputs nicht mehr gleich den Werten der Outputs wären.

Abbildung 16: Struktur der Input-Output-Tabelle

		Entstehung			Endnachfragematrix					
		S_1	S_2	S_3						
Verwendung	S_1	V_{11}	V_{21}	V_{31}						Verbr. Güter Sekt. 1
	S_2	V_{12}	V_{22}	V_{32}	C_1	I_1	X_1			Verbr. Güter Sekt. 2
	S_3	V_{13}	V_{23}	V_{33}	C_2	I_2	X_2			Verbr. Güter Sekt. 3
Primäraufwandmatrix		D_1	D_2	D_3						
		$T_1^P - Z_1$	$T_2^P - Z_2$	$T_3^P - Z_3$						
		$L_1 + G_1$	$L_2 + G_2$	$L_3 + G_3$						
		M_1	M_2	M_3						
		Aufk. Güter Sekt. 1	Aufk. Güter Sekt. 2	Aufk. Güter Sekt. 3						

Quelle: (Winker, 2010, S. 111)

Jede Zeile im oberen Bereich steht für die Verteilung der Outputs auf die Sektoren und die restlichen Nachfrager gemäss der Verwendungsseite. Analog beschreibt jede Spalte im linken Bereich die Herkunft der Inputs wie sie auf der Entstehungsseite in Abbildung 15 abgebildet war. Der durch die Konsolidierung der beiden Seiten überlappende Teil der I/O-Tabelle ist die *Vorleistungsmatrix*, welche alle Vorleistungen zwischen den Sektoren berücksichtigt (vgl. Abbildung 16) (Winker, 2010). Im rechten Teil der Output-Struktur ordnet die *Endnachfragematrix* die Verwertung der Outputs der restlichen Volkswirtschaft zu. Der totale Produktionswert eines Sektors wird rechts neben der *Endnachfragematrix* angegeben und entspricht der jeweiligen Summe der Zeile. Dasselbe gilt auch wieder für die Input-Struktur, die für jede Spalte links in der Tabelle die Vorleistungen und primären Inputs für jeden Sektor aufzeigt (vgl. Abbildung 16). Der untere Bereich der I/O-Tabelle ist die *Primäraufwandmatrix* und beschreibt, wie der Name schon sagt, die Herkunft der primären Aufwände beziehungsweise Inputs, die nicht von einem der betrachteten Sektoren stammen. Die Spaltensummen beziffern den totalen Produktionsaufwand eines Sektors inklusive Steuern und Abschreibungen und ohne Subventionen vom Staat (Winker, 2010).

Aufgrund des Bilanzcharakters der *Produktionskonten*, aus denen die Daten für die I/O-Tabelle stammen, müssen die Spalten- und die Zeilensummen innerhalb der einzelnen Sektoren übereinstimmen⁷ (Winker, 2010). Damit werden die gesamten Herstellungskosten eines Sektors auch entsprechend an dessen Nachfrager weitergereicht.

Ein Beispiel einer ausgefüllten *Input-Output-Tabelle* ist in Anhang A (Input-Output-Tabelle für Deutschland 2006) abgebildet. Sie zeigt die Verflechtungen der inländischen Produktion Deutschlands aus dem Jahr 2006 anhand von 12 Sektoren auf. Damit gehört diese I/O-Tabelle eher zu den kleineren. Die auf EU-Ebene obligatorischen mittelgrossen I/O-Tabellen umfassen 59 Produktionsbereiche und solche mit tiefer Gliederung gar 71 (Winker, 2010). Technisch ist die höhere Disaggregation unproblematisch, da I/O-Tabellen gut skalieren. Der Aufwand, die benötigten Daten zu erheben und ihre Konsistenz zu gewährleisten, ist jedoch enorm. Das ist auch der Grund, wieso beispielsweise in Deutschland nur im zweijährigen Rhythmus und mit grosser Verzögerung kleine und mittelgrosse Input-Output-Tabellen erstellt und veröffentlicht werden (Winker, 2010).

2.6.2.2 *Input-Output-Analyse mit dem Modell von Leontief*

Die absoluten Grössen in der Input-Output-Tabelle sind weder übersichtlich noch sehr aussagekräftig. Abhilfe schaffen stattdessen Koeffizienten, die den jeweiligen Anteil einzelner Inputs oder Outputs in einem Sektor aufzeigen (Winker, 2010): Nachfolgend steht i für den Zeilen- und j für den Spaltenindex einer Input-Output-*Vorleistungsmatrix* (vgl. Abbildung 16). Ausgegangen wird von der Gütermenge, die von Sektor i an den Sektor oder die Endverbraucherkomponente j geht. Der Output-Koeffizient b_{ij} beschreibt, wie hoch der Anteil dieser Menge am Gesamtoutput des Sektors i ist (Winker, 2010, S. 114):

$$b_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{k=1}^n X_{ik}}$$

Der Output-Koeffizient beantwortet damit aus der Sicht des Sektors i die Frage: „Wie viel Prozent unseres Outputs gehen an den Nachfrager j ?“ Analog beschreibt der Input-Koeffizient den Anteil der Inputs von Sektor i nach Sektor j , im Verhältnis zu allen Inputs für den Sektor j (Winker, 2010, S. 114):

⁷ vgl. dazu in Abbildung 16: *Aufk. Güter Sekt. 1 = Verbr. Güter Sekt. 1*, oder Anhang A: Input-Output-Tabelle für Deutschland 2006

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{k=1}^n X_{kj}}$$

Der Input-Koeffizient beantwortet damit aus der Sicht des Sektors j die Frage: „Wie viel Prozent unserer Inputs kommen von Anbieter i ?“ Alle intersektoralen Abhängigkeiten können in den Koeffizienten abgebildet werden, um damit die Auswirkungen durch Veränderungen in den Inputs oder der Nachfrage auf vor und nachgelagerte Sektoren zu bestimmen (Winker, 2010). Beispielsweise zieht eine erhöhte Produktion (Nachfrage) in der Viehwirtschaft eine höhere Nachfrage an Inputfaktoren nach sich, die aus dem Nahrungsmittelsektor stammen (Winker, 2010). Dies lässt sich so lange weiterführen, bis nur noch eine gestiegene Nachfrage an Primärintputs übrig bleibt.

Um eine Ökonomie nicht nur deskriptiv mittels erhobener Daten zu beschreiben, sondern um auch Prognoserechnungen der Zusammenhänge zu ermöglichen, müssen noch weitere Annahmen getroffen werden (Winker, 2010).

Am weitesten verbreitet ist wohl das statische, offene *Input-Output-Modell* von Wassily Leontief (1963; 1966). Das Leontief-Modell gilt als statisch, da es keinen Zeitablauf berücksichtigt und nach der Terminologie dieser Arbeit gehört es zu den *allgemeinen Modellen* (vgl. Kapitel 2.2 Verwendeter Modellbegriff). Das Leontief-Modell ist offen, da es neben der *Vorleistungsmatrix* auch Primärintputs und die schlussendliche Nachfrage integriert. Damit kann für jede Zeile der *Vorleistungsmatrix* eine Gleichung aufgestellt werden, um zusammen mit der Endnachfrage pro Sektor den Gesamtoutput zu bestimmen (Winker, 2010, S. 118):

$$\begin{array}{rcccl}
 X_{11} + \dots + X_{1n} & + & Y_1 & = & X_1 \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \underbrace{X_{n1} + \dots + X_{nm}} & + & \underbrace{Y_n} & = & \underbrace{X_n} \\
 \text{Intra-/Intersektorale} & & \text{End-} & & \text{Gesamtoutput =} \\
 \text{Vorleistungsverflechtung} & & \text{nachfrage} & & \text{Bruttoproduktionswert}
 \end{array}$$

Bis zu diesem Punkt unterscheidet sich das *Leontief-Modell* noch nicht von der grundlegenden Output-Struktur, wie sie bereits erläutert wurde (vgl. Kapitel 2.6.2.1 Die Input-Output-Tabelle). Solange die Annahme gültig bleibt, dass der Einsatz von Vorleistungen sich proportional zum Output verhält, lassen sich die Input-Produktionswerte sehr einfach in dieselbe Aufstellung durch Multiplikation mit der *Vorleistungsmatrix* integrieren (Winker, 2010). Leontief leitete aus diesen Informationen einen eigenen Ansatz ab. Er verwendete dazu eine Matrix A , die aus allen *Input-Koeffizienten* (siehe oben a_{ij}) der

Vorleistungsmatrix besteht, sowie die mathematische Einheitsmatrix I , um daraus die Inverse $(I - A)^{-1}$ zu bilden⁸. Diese ist auch bekannt unter dem Namen *Leontief-Inverse* (Leontief, 1966; Winker, 2010). Im Unterschied zu den erwähnten *Input-/Output-Koeffizienten* drückt diese aus: „um wie viel die Produktion in jedem Sektor steigen muss, damit die Erhöhung der Endnachfrage nach den Gütern eines bestimmten Sektors um eine Einheit befriedigt werden kann.“ (Winker, 2010, S. 119). Da alle Abhängigkeiten bekannt sind, können somit die Auswirkungen von Veränderungen im Modell direkt über die folgende Gleichung von Leontief (1966) berechnet werden (Winker, 2010):

$$(I - A)^{-1} \Delta Y = \Delta X$$

Die Gleichung sagt aus, dass eine Veränderung im Nachfragevektor ΔY multipliziert mit der Leontief-Inverse $(I - A)^{-1}$ der Veränderung im Outputvektor ΔX entspricht (Winker, 2010). Die Gleichung kann dazu verwendet werden, um den steigenden Bedarf einzelner Primärinputs zu bestimmen, die durch eine steigende Nachfrage zustande kommen.

Leontief hat mit seinem Ansatz den Weg von einer statischen Input-Output-Tabelle zu einem dynamischen Modell geebnet, das durch Extrapolation auch zu Prognosezwecken eingesetzt werden kann (Winker, 2010). Von dieser Basis ausgehend, kann das Modell wie schon bei Solow (vgl. Kapitel 2.6.1.1 Das Solow-Modell) durch Veränderung der Annahmen und eine konsistente mathematische Umsetzung erweitert werden. Beispielsweise werden bis jetzt Externalitäten ignoriert, die Sektoren unter einander ebenfalls beeinflussen. Auch Substitutionen unter den Vorleistungen sind im Leontief-Modell nicht möglich, womit auch wichtige Effekte des technischen Fortschritts nicht modellierbar sind.

Ein nächster Schritt zu einem eingeschränkt dynamischen Modell ist die Berücksichtigung veränderlicher *Input-Koeffizienten* über die Zeit hinweg, womit auch die daraus abgeleitete *Leontief-Inverse* veränderlich wird. Würden die *Input-Koeffizienten* so modelliert, dass auch Preisveränderungen und Elastizitäten diese beeinflussen, könnten auch Substitution und technologischer Fortschritt integriert werden (Winker, 2010).

Das eingeschränkt dynamische I/O-Modell erlaubt, auf Veränderungen in der *Input-Koeffizienten-Matrix* zu reagieren, indem die Produktion der einzelnen Sektoren so angepasst wird, dass eine gleichbleibende Nachfrage befriedigt werden kann (Winker, 2010). Um ein

⁸ Der Beweis der *Leontief-Inversen* wird nicht im Rahmen dieser Arbeit beleuchtet. Die detaillierte Herleitung, und ein Beispiel zu deren Anwendung sind in (Winker, 2010, S. 108-124) beschrieben.

vollständig dynamisches Modell zu erhalten, muss auch die Nachfrage endogen berechnet werden. Möglich wäre dies beispielsweise durch die Kopplung des I/O-Modells an ein Marktmodul, das einerseits die Preise für die Anpassung der *Input-Koeffizienten* liefert, wie auch die Endnachfrage im Zeitverlauf. Zusätzlich müssten auch die Primärinputs wie Löhne endogen durch die Nachfrage ermittelt werden können, um den Schritt zum vollständig dynamischen I/O-Modell abzuschliessen (Winker, 2010). Damit würde sich auch der Kapitalkreislauf zwischen Investitionen, Abschreibungen und Gewinnen schliessen, wobei sich die Unternehmen bei ihren Investitionsentscheidungen auf die Projektionen der erwarteten zukünftigen Nachfrage stützen (Winker, 2010).

Ein solches Modell kann Antworten zu interessanten Fragestellungen liefern wie: „Welche Sektoren profitieren besonders von einer erhöhten staatlichen Nachfrage bestimmter Güter?“ Oder: „Auf welche Sektoren der Volkswirtschaft wirkt sich die zunehmende Erschöpfung nicht erneuerbarer Ressourcen am stärksten aus und werden diese in anderen Sektoren teilweise kompensiert?“ Einziger Wehrmutstropfen dabei ist, dass das I/O-Modell nur beschränkt Hilfestellung bei der Prognose zukünftiger Grössen leisten kann. Die Dynamisierung des I/O-Modells bleibt dadurch eine Erweiterung, deren Annahmen nicht vordefiniert sind, sondern von den Modellierern selbst erarbeitet werden müssen (Muller, 1979; Ma, Hanley, & Wilson, 1997). Vielversprechend sind dabei die Integration der Nutzenoptimierung (vgl. Kapitel 2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen) oder System Dynamics (vgl. Kapitel 2.5 System Dynamics Modelle und Systemanalyse), welche im Zusammenhang mit I/O-Modellen auch in einigen globalen Modellen zur Anwendung kommen (vgl. Kapitel 3 Die untersuchten globalen Modelle) (SARU Staff, 1977; Siegmann, 1985).

2.6.3 Computergestützte allgemeine Gleichgewichtsmodelle

Die Entstehung der allgemeinen Gleichgewichtstheorie beruht grösstenteils auf der Arbeit von Léon Walras Ende des 19. Jahrhunderts (Katzner, 1989). Allgemeine Gleichgewichtsmodelle, beziehungsweise ihre computergestützten Repräsentationen, wie das *Computable General Equilibrium* (CGE)-Modell, werden verwendet, um das Verhalten ökonomischer Systeme zu simulieren (Radulescu, 2007). Ausgehend von den bestehenden institutionellen Strukturen können damit die Auswirkungen verschiedener Finanzinstrumente beziehungsweise *Strategien* getestet werden. Entscheidungsträger haben dadurch eine Möglichkeit, ihre *Strategien* verschiedenen *Szenarien* auszusetzen. CGE-Modelle betrachten makroökonomische Zusammenhänge durch die Analyse tatsächlicher ökonomischer Daten

mit numerischen Verfahren (Peichl, 2005). Dazu müssen umfangreiche Datensätze gesammelt und Elastizitäten ermittelt werden (zu Elastizität vgl. Kapitel 2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen). Sie wurden aus der allgemeinen Gleichgewichtstheorie abgeleitet und integrieren Faktor-, Güter- und Arbeitsmärkte in einer häufig nach Sektoren unterteilten Ökonomie. Auf den Faktormärkten werden die Inputfaktoren für die Produktion wie Rohstoffe, Energie und so weiter gekauft. Davon abgetrennt sind die Gütermärkte welche die produzierten Outputgüter handeln und die Arbeitsmärkte für Arbeitskräfte (Radulescu, 2007). Diese drei Märkte funktionieren alle gleich und nach den Annahmen der neoklassischen Theorie, der die allgemeine Gleichgewichtstheorie angehört. Die drei Hauptkomponenten sind die Gleichungen für Angebot und Nachfrage, Gleichungen für Einkommensverteilungen der Agenten und Gleichgewichtskriterien beziehungsweise die Datenbasis und Nebenbedingungen für die Güter- und Faktormärkte. Die Entscheide der Haushalte und der Firmen werden, wie in neoklassischen Theorien üblich, aufgrund ihrer individuellen Nutzenmaximierung gefällt (vgl. Kapitel 2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen). Neben den Akteuren Haushalte und Firmen kommt typischerweise die Regierung hinzu, die ihre Entscheide aufgrund der Einhaltung einer intertemporalen Budgetrestriktion trifft. Bei lokalen CGE-Modellen übernimmt eine vierte Art von Akteuren die Interessen der restlichen Welt. Der Preismechanismus koordiniert den individuellen Entscheidungsprozess der Agenten, bis ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage erreicht wird (Radulescu, 2007). Gegenstand der Untersuchungen sind die Eigenschaften des Gleichgewichtszustands und dessen Veränderungen aufgrund verschiedener *Strategien* und *Szenarien* (Bryant, 2010).

CGE-Modelle können statisch oder dynamisch sein. Statische Modelle wie die von Shoven & Whalley (1972) repräsentieren nur einen bestimmten Zeitpunkt im Jahr. Der grösste Nachteil dabei ist, dass intertemporale Fragestellungen nicht untersucht werden können, da bei statischen Modellen der Kapitalstock fix bleibt (Radulescu, 2007). Dynamische Modelle berücksichtigen den Prozess der Kapitalakkumulation und können somit beispielsweise aufzeigen, wie Steuern die Investitionen und Sparentscheide beeinflussen können (Fehr, 1999).

Ein häufig erwähntes Unterscheidungsmerkmal von CGE-Modellen ist die Art der temporalen Modellierung ihrer Agenten (Radulescu, 2007): Die Haushalte können einerseits als überlappende Generationen (OLG)⁹ modelliert werden, wobei ein Haushalt aus verschiedenen

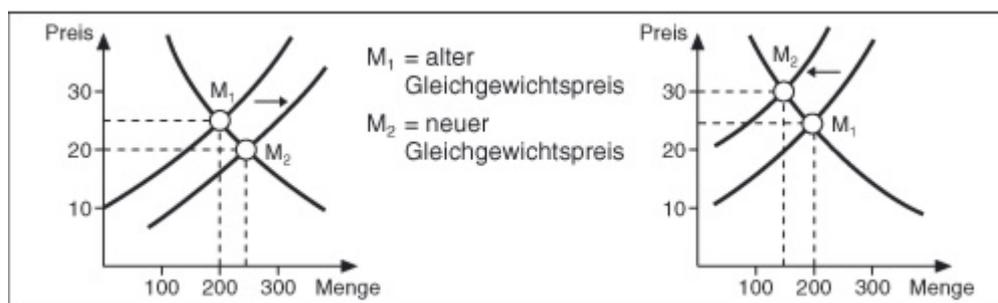
⁹ Aus dem Englischen: *overlapping generations*

Generationen zusammengesetzt ist, deren endliche Lebensdauern sich überlappen. In diesem Fall wird auch von einem OLG-Modell gesprochen. Eine weitere Möglichkeit ist die Haushalte als *Ramsey-Agenten* zu definieren, wobei ein für den Haushalt repräsentatives Individuum mit unendlicher Lebenszeit angenommen wird (Ramsey, 1928). Für die drei übrigen Agenten; Firmen, Regierung und den Rest der Welt, wird auch bei OLG-Modellen eine unendliche Lebenszeit angenommen (Radulescu, 2007).

Weitere Annahmen aus der allgemeinen Gleichgewichtstheorie bleiben je nach Bedarf auch für CGE-Modelle gültig (Boyd & Uri, 1991):

- Die Agenten interagieren über Märkte miteinander: Je nach Modell können aber auch Sektor-interne Märkte und Sektor-übergreifende Märkte unterschieden werden. Dies gilt auch bei der Trennung verschiedener Regionen beziehungsweise Ökonomien.
- Marktgleichgewicht: Durch die Anpassung der Preise bis zu deren Gleichgewichtspreis ist die Angebotsmenge immer gleich der Nachfragemenge. Angebotsüberschüsse beziehungsweise Nachfrageüberschüsse gleichen sich unverzüglich durch eine Preisanpassung aus (vgl. Abbildung 17: Veränderungen in der Angebotskurve). Damit wird aber auch Arbeitslosigkeit ausgeschlossen (Bryant, 2010).
- Vollkommene Märkte: Es herrscht vollkommene Markttransparenz. Güter derselben Art unterscheiden sich nicht und es existieren keine Standortvorteile oder Werbung. Für alle Güter gilt vollkommener Wettbewerb, was Machtungleichheiten wie Monopole ausschliesst.
- Es existieren keine Transaktionskosten: beispielsweise Verhandlungskosten oder Aufwände durch die Fahrt zum Händler sind nicht abgebildet.
- Externalitäten wie beispielsweise Umweltverschmutzung und technologischer Fortschritt werden nicht berücksichtigt.

Abbildung 17: Veränderungen in der Angebotskurve



Quelle: (Malcik & Schachermeier, 2009, S. 1)

Häufig werden einzelne der erwähnten Annahmen weggelassen oder undefiniert, um ein noch realitätsgetreueres, aber gleichzeitig auch komplexeres Modell zu erhalten. Beispielsweise wird technologischer Fortschritt meist als Externalität definiert und nicht berücksichtigt, dennoch wurden Versuche unternommen, diesen zu integrieren (Jorgenson & Wilcoxon, 1990).

Ein Nachteil an CGE-Modellen ist ihre hohe Abhängigkeit von umfangreichen Datensätzen (Moffatt & Hanley, 2001). Matrizen müssen mit konsistenten und vergleichbaren Daten gefüllt werden, die besonders bei verschiedenen Quellen erst noch bereinigt werden müssen. Auch die Spezifikation der Parameter und Elastizitäten für die Produktions- und Nutzenfunktionen sind trotz der Unterstützung durch ökonometrische Analysen alles andere als einfach (Moffatt & Hanley, 2001).

2.6.4 Intensity of Use Hypothese

Empirische Untersuchungen ergaben, dass die Intensität des Verbrauchs von Metallen (definiert als Metallverbrauch in Abhängigkeit des Bruttosozialproduktes) am besten in Abhängigkeit des Pro-Kopf-Volkseinkommens erfasst wird (Malenbaum, 1995; Tilton, 1990). Der empirisch ermittelte Zusammenhang folgt einer inversen U-Kurve: anfangs steigt der Verbrauch überproportional mit dem Volkseinkommen eines Landes, erreicht ein Maximum, und fällt danach wieder. Dieser Zusammenhang wird *Intensity of use* (IU)-Hypothese genannt (Malenbaum, 1995; Altenpohl, 1980; Tilton, World Metal Demand - Resources for the Future, 1990; Roberts M. C., 1996).

Die von Wilfred Malenbaum um 1975 entwickelte IU-Hypothese wurde von Tilton (1990) weiter entwickelt (Malenbaum, 1995). Tilton und andere haben dann diese Hypothese benutzt, um die Veränderungen des Metallverbrauchs zu untersuchen und Prognosen für den zukünftigen Metallverbrauch abgeleitet (Tilton, 1996; Guzmán, Nishiyama, & Tilton, 2005).

Der Aufbau der IU-Kurve veranschaulicht, wie die IU-Hypothese zur Prognose der langfristigen Metallnachfrage verwendet werden kann (Olsson, 2008). Die Rate des Metallverbrauchs IU_t wird als Funktion der Verbrauchsintensität D_t in Abhängigkeit des Volkseinkommens eines Landes Y_t gemessen, alle Werte nehmen immer Bezug auf das jeweilige Jahr t (Tilton, 1990; Olsson, 2008):

$$IU_t = D_t/Y_t$$

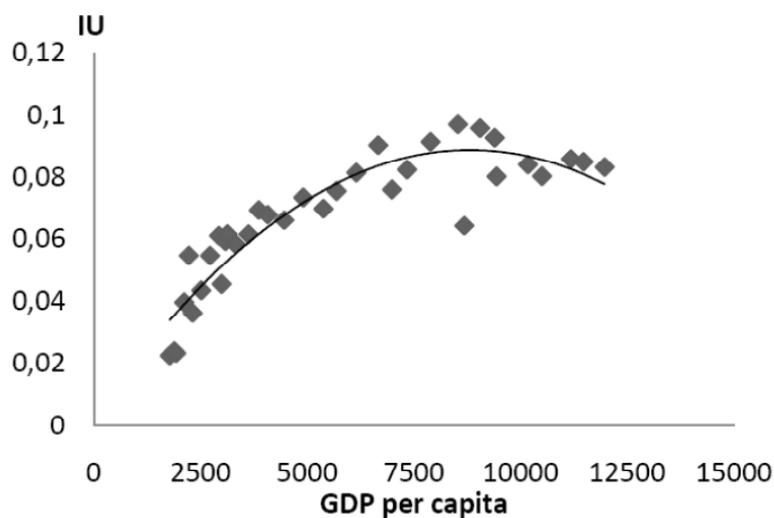
Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass der Stand der wirtschaftlichen Entwicklung das Mass des Metallverbrauchs determiniert. Das wirtschaftliche Entwicklungsniveau eines

Landes wiederum kann durch das Bruttosozialprodukt Pro-Kopf gemessen werden. Darauf basierend ist die Intensität des Metallverbrauchs eine Funktion des Bruttosozialproduktes Pro-Kopf und stellt sich wie folgt dar (Tilton, 1990; Olsson, 2008):

$$IU_t = f(BIP_t/Kopf_t)$$

Länderspezifische empirische Messungen liegen der Bestimmung zwischen der Verbrauchsintensität von Metallen und den volkswirtschaftlichen Bezugsgrößen zu Grunde. Die gefundenen Beziehungen zeigen in der Regel eine inverse U-förmige Kurve wie in der Abbildung 18 gezeigt (Tilton, 1990; Olsson, 2008).

Abbildung 18: Stahlverbrauchsintensität in Abhängigkeit des Pro-Kopf Einkommens in Südkorea 1970-2004



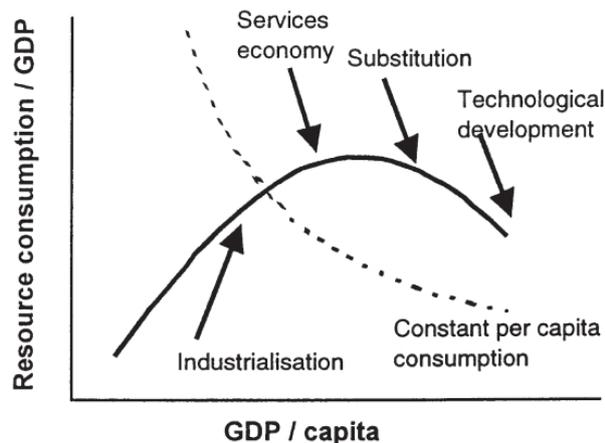
Quelle: (IIS, 1996 zitiert nach Olsson, 2008)

Die oben gezeigte inverse U-Form im Eisenverbrauch für Südkorea zeigt sehr schön, dass die Verbrauchsintensität von Metallen von der wirtschaftlichen Entwicklung eines Landes abhängig ist, die mit drei verschiedenen Entwicklungsphasen erklärt werden (Olsson, 2008): Bei tiefem Einkommen, typisch für eine Agrarvolkswirtschaft, bestimmt durch eine noch schwach mechanisierte Landwirtschaft, ist der Verbrauch insbesondere von Metallen noch tief. Im Zuge der Industrialisierung steigt der Metallverbrauch deutlich, weil diese Infrastrukturen wie Fabriken erfordert, sowie den Verbrauch von materialintensiveren Konsumgütern anstößt. Mit weiter steigendem Pro-Kopf-Einkommen weitet sich der tertiäre Dienstleistungssektor aus, der weniger Infrastruktur und Produktionsinputs und damit einen tieferem Verbrauch von Metallen erfordert (Tilton, 1986; Maddison, 1989). Eine etablierte Volkswirtschaft mit weiter erhöhtem BIP wird in der Folge noch weniger Metall verbrauchen (Tilton, 1990).

Für den fallenden Metallverbrauchs pro Kopf in höher entwickelten Volkswirtschaften ist die Kombination der folgenden drei Einflüsse verantwortlich, die auch eine Erklärung für die Form der inversen IU-Kurve bieten (vgl. Abbildung 19) (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999):

1. Erstarkung des tertiären Sektors,
2. Substitution und
3. technischer Fortschritt

Abbildung 19: Intensity of Use Hypothese



Quelle: (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999, S. 242)

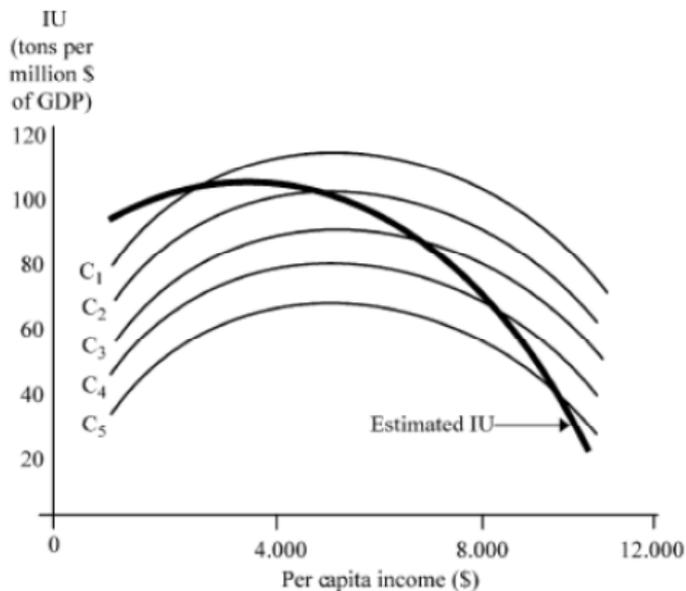
Gemäss Maddison (1989) korreliert der Metallverbrauch in den meisten Ländern mit dem Pro-Kopf Einkommen und dieses wiederum mit der wirtschaftlichen Entwicklungsphase. Auch die Verschiebung von industriellen Aktivitäten aus den Industrieländern in Entwicklungsländer reduziert den Metallverbrauch in den Importländern von Fertigprodukten beispielsweise den USA und erhöht ihn in den produzierenden Entwicklungsländern zum Beispiel in China (Olsson, 2008).

Substitution ist eine weitere Erklärung für einen fallenden Metallverbrauch, wie auch der technologische Fortschritt (Maddison, 1989). Die Industrie produziert durch Technologie effizienter und mit einem erhöhtem Einsatz beispielsweise von Kunststoffen (Forrester T. , 1988; Bernardini & Galli, 1993).

Neue Technologien und Substitutionsprozesse können diese Kurve sowohl anheben als auch senken. Neue Technologien führen in der Regel allerdings zu einem sprunghaftigen Verbrauchsrückgang (vgl. Abbildung 20). Im Vergleich zu historischen Metallverbrauchsdaten zeigt die in Abbildung 20 dargestellte IU-Kurve keine allzu gute Annäherung an die tatsächlichen Verbrauchskurven (Guzmán, Nishiyama, & Tilton, 2005). Sie weist eine stärkere Tendenz auf, mit steigendem pro Kopf Einkommen zu sinken.

Dagegen lässt sich argumentieren, dass der Abfall die Verbrauchssprünge durch Substitution und Technologie kompensiert, welche die geschätzte IU-Kurve nicht abbilden kann.

Abbildung 20: Wirklicher und geschätzter Verlauf der Verbrauchsintensität



Quelle: (Guzmán, Nishiyama, & Tilton, 2005, S. 22)

Die Einfachheit der IU-Hypothese ist ihr grösster Vorteil (Tilton, 1990). Die Variablen zur Schätzung des Metallverbrauchs sind verfügbar. Auch sei es nach Roberts (1996) relativ einfach, realistische Prognosen zum zukünftigen Bruttosozialprodukt und der Bevölkerungsentwicklung in verschiedenen Ländern zu machen. Das Pro-Kopf-Einkommen reflektiert dabei das Niveau der wirtschaftlichen Entwicklung eines Landes und ist aus Bruttosozialproduktprognosen und Bevölkerungsentwicklungsschätzungen ohnehin vorhanden (Roberts M. C., 1996). Mit diesen Bestimmungsfaktoren, so Tilton (1990), könne der künftige Konsum von Metall ohne Schwierigkeiten geschätzt werden.

Die wohl ernsthafteste Unzulänglichkeit der IU-Hypothese besteht darin, dass weder neue Technologien noch Materialsubstitution direkt vom Volkeinkommen pro Kopf abhängig sind (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Beide Faktoren hängen stärker von Preisentwicklungen ab und ihr Auftreten ist über die Zeit nicht gleichmässig verteilt (Guzmán, Nishiyama, & Tilton, 2005). Es ist auch weder möglich mit der IU-Hypothese das unerwartete Auftauchen neuer Materialien noch das plötzliche Hereinbrechen einer Energiekrise und deren Konsequenzen zu prognostizieren (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

3 Die untersuchten globalen Modelle

Ein früher Versuch, globale Entwicklungen durch Simulationen auf ihre Nachhaltigkeit zu untersuchen, wurde von Forster (1971) und Meadows et al. (1972; 1974) am MIT mit ihren populären „*Limits to Growth*“-Modellen World1, World2 und World3 unternommen. Dabei ging es zentral um die Modellierung von Entwicklungen basierend auf dem zu erwartenden Bevölkerungswachstum, der Verschmutzung und dem Ressourcenverbrauch. Die Folgerungen aus den ersten Modellen waren äusserst pessimistisch:

“the limits to growth on this planet will be reached somewhere within the next one hundred years [...] even the most optimistic estimation of the benefits of technology in the model [...] did not in any case postpone the collapse beyond the year 2100” (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972, S. 23, 145).

Die Ergebnisse der ersten Modelle wurden weit herum kritisiert. Einige warfen den Autoren vor, die Modelle verbreiteten Endzeitstimmung (Clark & Cole, 1975). Vor allem die Wirtschaftswissenschaftler kritisieren das Fehlen von Preismechanismen, welche auf die Verknappung der Rohstoffe reagieren sollten (Cole, Freeman, Jahoda, & Pravitt, 1973). Andere wiederum bemängelten fehlende Tests zur Sensitivität von Parametern (Moffatt, 1983). Viele der Kritiken waren wohl angebracht. Es ist aber nur fair zu sagen, dass die ersten Simulationsmodelle wichtige Anreize für eine tiefere Auseinandersetzung mit der globalen Modellierung lieferten.

Andere globale Modelle wie das *Latin American World Model* von Bariloche (Herrera A. M., 1976a) wurden im Gegensatz als hoch optimistisch eingeschätzt, weil es wie viele andere Forschungsansätze auch, die Ressourcenproblematik nicht in ihr Model aufnimmt (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Die Analyse nicht erneuerbarer Ressourcen beschränkt sich dabei auf die statische Erfassung der derzeitigen Verfügbarkeit und auf das folgende theoretische Argument:

„Except for a few cases, the vast volume of the earth's mineral resources, although used, continue to be part of the earth's resources as if they had never been extracted. They can be disseminated throughout the earth or spread over the oceans; they can be chemically combined with other elements; they cannot be destroyed.“ (Herrera A. , 1976b, S. 66)

Auf der Basis dieses Arguments folgerte die Gruppe um das Bariloche-Modell, dass nicht erneuerbare Ressourcen und Umweltprobleme keine wirklichen Probleme sein (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Einmal von Forster (1971) und Meadows et al. (1972; 1974) angestossen schossen in den Siebzigerjahren globale Modelle wie Pilze aus dem Boden. Neben den bereits genannten gehören zu den wichtigsten gemäss Siegmann (1985) und Meadows, Richardson, & Bruckmann (1982): das *World Integrated Model*, auch *Mesarovic-Prestel-Modell* genannt (Mesarovic & Pestel, 1974), MOIRA (Linnemann, De Hoogh, Keyzer, & Van Heemst, 1979), SARUM (SARU Staff, 1977), das *United Nations World Model* von Wassily Leontief (Leontief, Carter, & Petri, 1977), FUGI (Onishi A. , 1983), und *International Futures* oder IFs (Hughes B. , 1980).

Aktuellere globale Modelle zu finden, die gleichzeitig auch die Problematik nicht erneuerbarer Ressourcen behandeln, gestaltet sich schwierig. Es scheint diesbezüglich im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte eine Trendwende zugunsten von Simulationsmodellen gegeben zu haben, die sich auf Umwelt-, Klimaveränderungen und landwirtschaftliche Bodennutzung fokussieren. Die folgenden globalen Modelle untersuchen vor allem wirtschaftliche Aspekte und bilden nur vereinzelt nicht erneuerbare Ressourcen ab: INFORUM (Nyhus, 1991), GINFORS (Lutz, Meyer, & Wolter, 2005), Global Resource Accounting Model (Giljum, Lutz, & Jungnitz, 2008), e3.at (Grossmann, Wolter, & Stocker, 2011) und das Metal Model (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999)

Aus all diesen Modellen wurden vier ausgewählt, die in diesem Kapitel näher analysiert werden. Es wurden mit Bezug auf die Aufgabenstellung die folgenden Auswahlkriterien angewandt:

- Die Modelle sollen nicht erneuerbare Ressourcen abbilden, vorzugsweise Metalle.
- Die Simulationen der Modelle sollen unabhängig von Benutzerinteraktionen ablaufen können¹⁰.
- Der Zeithorizont der Simulationen soll in die Zukunft reichen.
- Es sind vorzugsweise globale Modelle einzubeziehen, die ökonomische Zusammenhänge abbilden.

Bei der Auswahl wurde insbesondere darauf geachtet, dass die Modelle mit unterschiedlichen Ansätzen entwickelt wurden, um deren Strukturen und Annahmen vergleichen zu können. Es wurde die folgende Auswahl getroffen:

¹⁰ Dies ist bei globalen Modellen mit Fokus auf politische Entscheidungen wie beispielsweise dem Mesarovic/Prestel-Modell nicht der Fall (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

- World3, das zwar kein ökonomisches System simuliert, aber als Pionier-Modell einen wichtigen Referenzpunkt darstellt. Es ist das einzige der vier Modelle, das einen reinen System Dynamics-Ansatz verfolgt (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972).
- SARUM (Systems Analysis Research Unit Model), genießt unter den globalen Modellen einen hervorragenden Ruf und beruht grundsätzlich auf einem neoklassischen Ansatz. Es wurde Ende der Siebzigerjahre im Rahmen des OECD Interfutures Project verwendet um Langzeitszenarien zu untersuchen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).
- FUGI (Future of Global Interdependence), ist ein Gemeinschaftsprojekt von drei japanischen Universitäten und besteht aus drei Teilmodellen. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es im Kern einen Input-Output-Ansatz verfolgt, der mit einem dynamischen ökonomischen Gleichgewichtsmodell und einem System Dynamics Ressourcenmodell verknüpft ist (Onishi A. , 2003a).
- Metal Model ist das aktuellste der hier analysierten globalen Modelle und simuliert über die Verbindung eines System Dynamics Modells mit einem neoklassischen Ansatz die Verbrauchsintensität von Metallen ab (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Die vier Modelle werden nachfolgend auf ihre Annahmen und Struktur hin analysiert. Es folgt keine kritische Evaluation der unterschiedlichen Modellergebnisse. Weder die Resultate der Simulationen noch die zahlreichen Szenarien werden berücksichtigt. Nur die Modelle selbst und die Annahmen, unter denen sie aufgebaut wurden, stehen im Fokus dieser Arbeit. Es ist das Ziel der Analyse (Kapitel 2 und 3), alle notwendigen Informationen über die Modelle zu sammeln, um danach in der Diskussion (Kapitel 4) auf deren Paradigmen einzugehen.

Auf Details wie Modell-Formeln und Programmcode kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden, da die meisten Modelle diesbezüglich zu umfangreich sind und bis zu 150'000 Formeln enthalten (OTA, 1982; Onishi, 2005). Die qualitative Beschreibung der Modelle liefert aber einen guten Einblick in deren Annahmen und Struktur. Hier wird stattdessen auf zentrale ökonomische Theorien und Modelle verwiesen, deren grundlegende mathematischen Formeln in Kapitel 2.6 (Ökonomische Modelle und Theorien) dargestellt und erläutert wurden.

Bei einigen Modellen war das Auffinden einzelner relevanter Primärquellen nicht möglich, einerseits weil von vereinzelt Modellen keine detaillierten Dokumentationen publiziert

wurden, andererseits weil in der Sekundärliteratur erwähnte Quellen teilweise nicht zugänglich waren.¹¹ Dazu kommt, dass auch in der verwendeten Sekundärliteratur nicht immer ersichtlich ist, welche Aussagen innerhalb eines Kapitels welcher Primärquelle zuzuordnen sind. Die Sekundärquellen listen in diesen Fällen die Primärquellen ohne Verweise im Text am Ende eines Kapitels auf. Die wichtigsten in diesem Kapitel verwendeten Sekundärquellen sind Richardson (1978), Meadows, Richardson, & Bruckmann (1982) und Siegmann (1985). Die erwähnten Autoren sind fast ausschliesslich selbst Modellierer globaler Modelle und werden in der Fachliteratur oft zitiert, was für die Glaubwürdigkeit ihrer Benutzung als Sekundärquellen spricht. Wo immer Aussagen dieser Texte nicht auf Primärquellen zurückgeführt werden konnten, wird die Sekundärquelle angegeben. Auf diese Massnahme musste ausschliesslich in Kapitel 3 zurückgegriffen werden.

3.1 World3

Mit *World Dynamics* wurde 1971 die erste Publikation über globale Modellierung von Forrester (1971) veröffentlicht. Das Projekt wurde am Massachusetts Institute of Technology (MIT) durchgeführt und vom *Club of Rome* angestossen. Das erklärte Ziel war es, die Möglichkeiten der Menschheit besser zu verstehen, um auf dem Weg von einer ständig wachsenden Gesellschaft in einen Gleichgewichtszustand zu kommen (Forrester J. W., 1971). Forrester stellte mit dem von ihm entwickelten Modellierungsansatz *System Dynamics* ein simples globales Modell zusammen, das im Nachhinein *World1* genannt wurde und eine gute Diskussionsbasis für die Entwicklung der revidierten Version *World2* bot. Kurz danach wurde entschieden, das Projekt weiter zu ziehen, um während zwei Jahren das umfangreichere und komplexere *World3* zu entwickeln (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Die Gruppe der Modellierer am MIT wurde nun von Dennis Meadows geleitet und verwendete *World2* als Ausgangspunkt für *World3*.

Die Publikation zum Projekt *The Limits to Growth - A report for the Club of Rome's project on the Predicament of Mankind* von Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III

¹¹ In die Recherche einbezogen wurden die umfangreichen Literaturplattformen der Universität Zürich, der ETH Zürich, des Bibliotheksnetzwerks NEBIS, der Bibliothekskatalog IDS Deutschschweiz, das Recherche-Portal der Zentralbibliothek Zürich, die E-Zeitschriftenbibliothek der Zentralbibliothek, Google Scholar, Google, sowie die elektronischen Datenbanken relevanter Intermediäre und Verleger, sofern die Universität Zürich beziehungsweise die ETH Zürich in ihrem internen Netzwerk Zugriff darauf ermöglichten.

(1972) wurde über drei Millionen Mal verkauft und in mehr als 23 Sprachen übersetzt (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

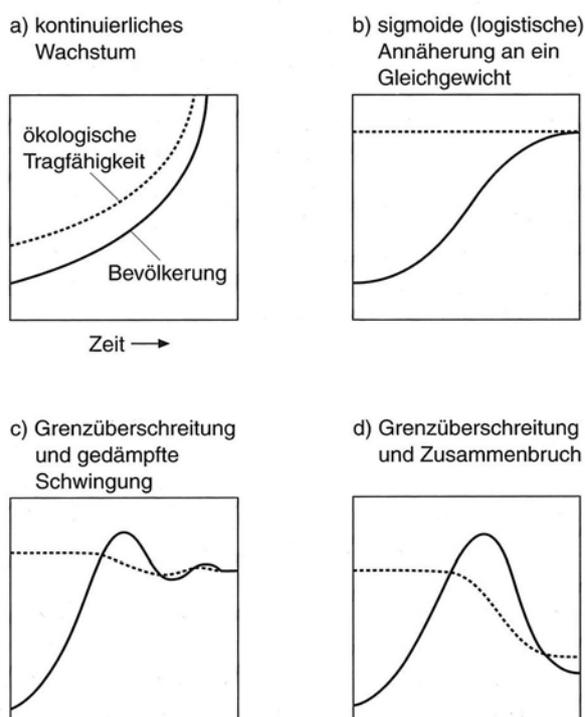
World3 wird aber auch als das meist kritisierte Modell aller Zeiten bezeichnet. Besonders bei Wirtschaftswissenschaftlern fand das Modell kaum Anklang, da es etablierte ökonomische Theorien und Annahmen nicht berücksichtigte (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982; Chagchit & Mize, 1990).

Das Ziel des Projekts war gemäss dem Vorwort des Club of Rome: Einsichten über die Grenzen unserer Welt und deren Einschränkungen bezüglich der Bevölkerungszahl zu gewinnen und wichtige langfristige Einflussfaktoren auf Welt-Systeme zu untersuchen (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972). Gemäss den Modellierern von World3 lässt sich dessen Zweck auf die folgende Fragestellung reduzieren:

„Wie werden sich die wachsende Weltbevölkerung und Wirtschaft im Laufe der kommenden Jahrzehnte auf die begrenzte ökologische Tragfähigkeit der Erde auswirken und an diese anpassen?“ (Meadows, Randers, & Meadows, 2006, S. 141)

Wie die Möglichkeiten der Anpassung an die ökologische Tragfähigkeit aussehen können zeigen Meadows, Randers, & Meadows (2004) anhand von vier Alternativen auf (vgl. Abbildung 21).

Abbildung 21: Möglichkeiten der Annäherung einer Bevölkerung an die ökologische Tragfähigkeit

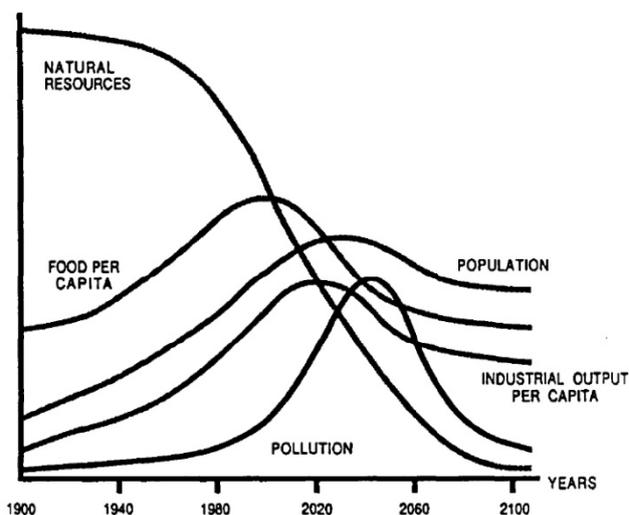


Quelle: (Meadows, Randers, & Meadows, 2006, S. 142)

Alternative a) nimmt kontinuierliches Wachstum, nicht nur der Bevölkerung sondern auch der ökologischen Tragfähigkeit an. Dies ist aber, solange wir an unsere Erde gebunden sind, unrealistisch. Alternative b) zeigt die optimale Lösung bei begrenzter Tragfähigkeit, indem sich das Bevölkerungswachstum und damit der Verbrauch an Rohstoffen langsam der Tragfähigkeit der Erde anpassen. In Alternativen c) und d) wird die Wachstumsgrenze überschritten, was durch Versorgungsmängel zum Rückgang der Bevölkerung führt. Dabei könnte die ökologische Tragfähigkeit durch Umweltschäden wie Verschmutzung Schaden nehmen. In Alternative c) stabilisiert sich der Schaden wieder auf hohem Niveau, nachdem die geringere Bevölkerungsanzahl zu einer reduzierten Belastung führt und sich ebenfalls stabilisiert. Die letzte Alternative d) nimmt eine so starke Beanspruchung der ökologischen Tragfähigkeit an, dass diese regelrecht kollabiert, worauf eine Art Massensterben in der Bevölkerung die Folge wäre, da diese nicht mehr ernährt werden kann (vgl. Abbildung 21).

Die aktuellste Version von World3 unterscheidet elf verschiedene Szenarien (Meadows, Randers, & Meadows, 2004). In der Originalversion führten die Simulationen des Wachstums meistens zum Kollaps durch Verschmutzung, Überbevölkerung, Hungersnöte und Erschöpfung der Ressourcen (vgl. Abbildung 22) (Chagchit & Mize, 1990).

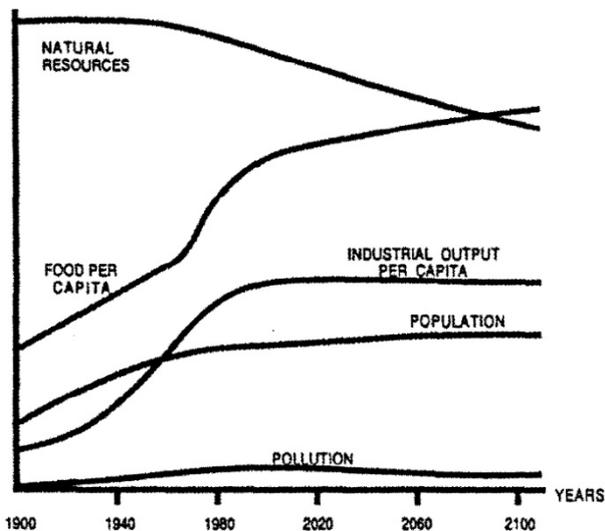
Abbildung 22: World3 Standard Run



Quelle: (Chagchit & Mize, 1990, S. 14)

Um ein globales Gleichgewicht zu erreichen waren drastische Reduktionen der Werte für Umweltverschmutzung, Ressourcenverbrauch und Geburtenkontrolle notwendig, worauf das Team um Meadows auch ihre Empfehlungen für eine nachhaltige Zukunft fussten (vgl. Abbildung 23) (Chagchit & Mize, 1990).

Abbildung 23: World3 Equilibrium Run



Quelle: (Chaghit & Mize, 1990, S. 15)

Eine weitere Empfehlung, war die gleichmässigeren Aufteilung des Kapitals, um eine ausreichende Nahrungsproduktion für die gesamte Bevölkerung zu erlauben. Dies ist ein Lösungsansatz, der aufzeigt, dass World3 kein Wirtschaftssystem zugrunde liegt, das auf der aktuell dominierenden neoklassischen Theorie der Weltwirtschaft beruht (Chaghit & Mize, 1990).

3.1.1 World3 - Grundannahmen

Gemäss den Entwicklern von World3 ist anzunehmen, dass eine globale Wachstumsgrenze existiert und wahrscheinlich, dass sie erreicht wird (vgl. Abbildung 21) (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972). Der Zeithorizont der Betrachtung und somit auch der Simulation reicht von 1900-2100 (Meadows, Randers, & Meadows, 2004).

Die wichtigsten Annahmen in World3 können wie folgt zusammengefasst werden (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982):

1. Bevölkerungswachstum¹² wird beeinflusst durch Platzmangel, Nahrungsaufnahme, Verschmutzung und den materiellen Lebensstandard. Ein Anstieg in jedem dieser vier Faktoren wirkt bremsend auf die Geburtenrate. Die Todesrate sinkt mit steigender Nahrungsaufnahme und materiellem Lebensstandard und steigt mit steigender Verschmutzung. Zunehmender Platzmangel lässt die Todesrate nur wenig steigen.
2. Der materielle Lebensstandard hängt vom Kapitalstock in Relation zur Bevölkerungsgrösse, sowie von der Kapitalproduktivität ab.

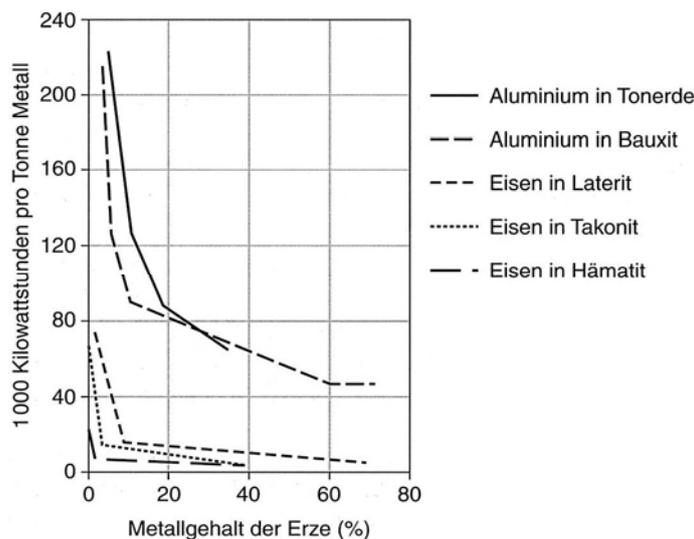
¹² Differenz zwischen der Geburtenrate und der Sterberate

3. Nicht erneuerbare Ressourcen werden kontinuierlich von Produktionsprozessen aufgebraucht. Je tiefer die verbleibenden Ressourcenvorräte sinken, desto mehr Kapital muss zu deren Förderung eingesetzt werden. Damit verringert sich auch die Kapitalproduktivität zur Produktion von Gütern.
4. Die landwirtschaftliche Produktion hängt davon ab, wie viel Land und Kapital in sie investiert wird. Land kann aufgrund von Investitionsentscheiden entweder bebaut werden oder brach liegen. Der Ernteertrag eines Landstücks kann unter sinkendem Grenzertrag mit Aufwendungen von Kapital gesteigert werden.
5. Verschmutzung wird durch den Produktionsprozess generiert und schrittweise von der Umwelt aufgenommen. Eine hohe Konzentration an Verschmutzung verringert die Aufnahmekapazität der Umwelt.

Technologie kann diese Grenze ausweiten, aber nicht unendlich weit und nur mit steigenden marginalen Kosten (Siegmann, 1985). In der ursprünglichen Version von 1972 wurde der technologische Fortschritt gemäss Kritikern noch nicht genügend berücksichtigt, was stark kritisiert wurde (Chagchit & Mize, 1990). Bis zur aktuellen Version World3-03 aus dem Jahr 2003 wurde dieses Defizit jedoch behoben (Meadows, Randers, & Meadows, Limits to Growth - The 30-Year Update, 2004).

Die Industrie in World3 verbraucht für jede Einheit produzierter Güter nicht erneuerbare Ressourcen. Mit wachsendem technischem Fortschritt reduziert sich die benötigte Inputmenge. Diese kann jedoch nie auf null absinken, da auch bei höchster Effizienz noch immer Ressourcen als Input benötigt werden. Mit der Erschöpfung der nicht erneuerbaren Ressourcen reduziert sich jedoch die Effizienz des zum Abbau eingesetzten Kapitals. Dies wird mit dem höheren Aufwand gerechtfertigt, um die immer schlechter erreichbaren und in schwächerer Konzentration vorkommenden Ressourcen nutzbar zu machen. Beispielsweise zeigt Abbildung 24, wie für Erze mit einem tiefen Metallgehalt der Energiebedarf für die Herstellung von Metallen ansteigt.

Abbildung 24: Energiebedarf für die Herstellung von Metallen aus Erzen



Quelle: (Page & Creasey, 1975 zitiert aus Meadows, Randers, & Meadows, 2006, S. 150)

Was die Grenzen der Welt betrifft, wurden in World3 die folgenden Annahmen getroffen, die unter anderem über technischen Fortschritt, politische Eingriffe und veränderte Zielsetzungen gelockert oder verschärft werden können (Meadows, Randers, & Meadows, 2004):

- Die landwirtschaftliche nutzbare Fläche der Erde wird auf 3,2 Milliarden Hektar geschätzt. Die Grenzkosten zur Erschliessung von Böden steigen mit dem Anteil bereits erschlossener Fläche. Erosion kann durch Kapitalaufwand aufgehalten werden.
- 1900 wurde die Bodenfruchtbarkeit ohne Düngemittel auf 600 kg Getreideäquivalente pro Hektar festgelegt.
- Durch den Einsatz von Düngemitteln kann die natürliche Bodenfruchtbarkeit höchstens um das 7.4 fache also um 740% gesteigert werden.
- Die Fähigkeit der Erde, Schadstoffe aufzunehmen und abzubauen, basiert auf vielen verschiedenen Prozessen. Die Annahmen zu Halbwertszeiten von toxischen Stoffen wurden nach Aussage der Modellierer aber sehr optimistisch festgelegt.
- Die nicht erneuerbaren Ressourcen in World3 setzen sich aus Mineralien, Metallen und fossilen Brennstoffen zusammen. Zu Beginn der Simulation im Jahr 1900 werden die Reserven in der Erdkruste auf das 7000fache des Abbaus desselben Jahres geschätzt¹³.

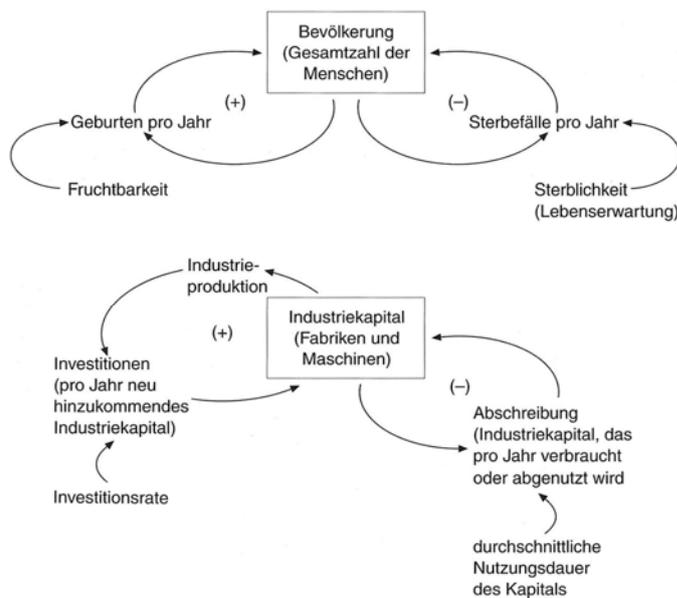
¹³ Nur in zwei Szenarien wird dieser Grundstock an nicht erneuerbaren Ressourcen auf die Hälfte gesetzt.

3.1.2 World3 – Struktur

World3 wurde als reines *System Dynamics*-Modell implementiert. Als Hilfsmittel beziehungsweise Programmiersprache wurde für die erste Version des Modells im Jahr 1972 DYNAMO verwendet (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972). Im Zuge der Weiterentwicklung wurde es auf die *System Dynamics* Entwicklungsumgebung STELLA portiert¹⁴.

Inhaltlich unterscheidet das Modell fünf Sektoren (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972): Bevölkerung, Kapital, landwirtschaftlich genutzte Flächen, nicht erneuerbare Ressourcen und Umweltverschmutzung. Deren quantitative Bestände stellen auch gleich wichtigen Kennzahlen des Modells dar. Die Bestandsveränderungen im Modell werden über Flüsse bestimmt wie (Meadows, Randers, & Meadows, 2004): Geburten und Sterberate (bei der Bevölkerung), Investitionen und Abschreibungen (beim Kapital), oder Schadstoffemissionen und Schadstoffabbau (bei der Umweltverschmutzung).

Abbildung 25: Rückkopplungsschleifen, die das Wachstum von Bevölkerung und Kapital bestimmen

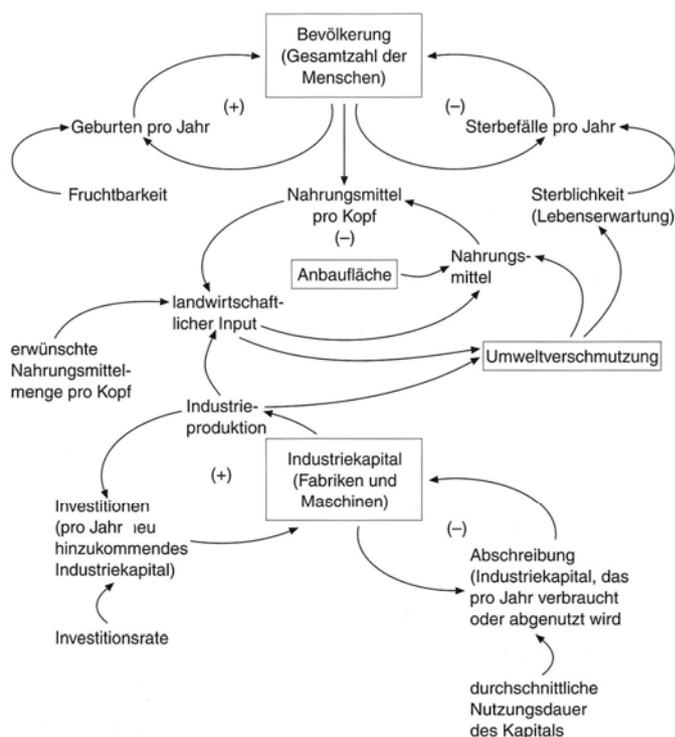


Quelle: (Meadows, Randers, & Meadows, 2006, S. 146)

¹⁴ Das aktuelle World3-03 ist in Zusammenhang mit einer grafischen Benutzeroberfläche auf einer CD über die Verleger Chelseagreen und co.Tec Verlag oder im Buchhandel erhältlich (Meadows, Randers, & Meadows, 2006). Abgebildet sind aber nur die in Meadows, Randers, & Meadows (2004) vorgestellten elf Szenarien, wobei die Interaktionsmöglichkeiten begrenzt sind. Das Modell selbst kann nicht verändert werden. Im lokalen Buchhandel ist die offizielle deutsche Version erhältlich (siehe *Weltmodell Word3-03* von Hartmut Bossel). Die schriftliche Dokumentation aller Modellteile und Annahmen sind im über 600 Seiten starken technischen Bericht *Dynamics of growth in a finite world* von Dennis L. Meadows zu finden (Meadows, 1974).

Die vielen einzelnen kausalen Abhängigkeiten zwischen zwei Variablen des Modells sind einfach nachzuvollziehen. Die Komplexität der Struktur liegt einerseits in der Gewichtung der Abhängigkeiten und andererseits besonders in den vielen Rückkopplungen und den oft nichtlinearen Beziehungen (Meadows, Randers, & Meadows, 2004). Ein Beispiel für einfachere Rückkopplungen im Modell bietet Abbildung 25, die das Wachstum von Bevölkerung und Kapital beschreibt. Werden aber noch weitere Abhängigkeiten von World3 berücksichtigt, wie sie beispielsweise in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt sind, ist erkennbar, dass bei der Veränderung einer Variable eine Vielzahl an Rückkopplungseffekten ausgelöst werden. Die Bevölkerung und das Industriekapital werden durch Anbauflächen und Umweltverschmutzung beeinflusst (vgl. Abbildung 26), genauso wie durch Dienstleistungskapital und nicht erneuerbare Ressourcen (vgl. Abbildung 27).

Abbildung 26: Rückkopplungsschleife für Bevölkerung, Kapital, Landwirtschaft und Umweltverschmutzung

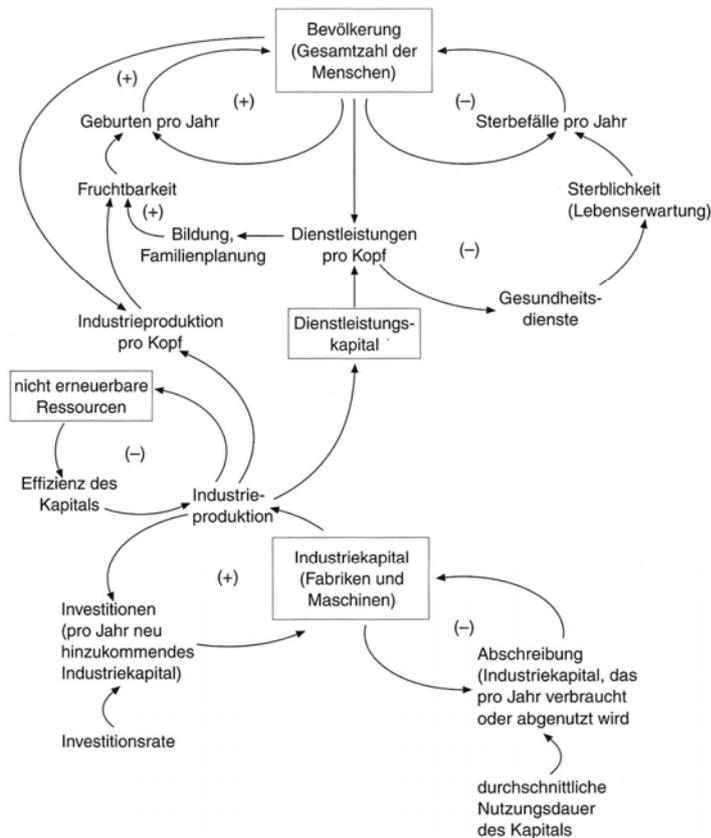


Quelle: (Meadows, Randers, & Meadows, 2006, S. 148)

Neben den Rückkopplungen erschweren auch die nichtlinearen Beziehungen die Arbeit der Modellierer. Ein anschauliches Beispiel für die nichtlineare Beziehungen ist der abnehmende Grenznutzen: hat ein Mensch Hunger bringt jedes Stück Brot einen hohen Nutzen. Dieser nimmt aber mit dem Essen ab und irgendwann setzt die Sättigung ein. Ein weiteres Stück Brot kann dann sogar den Nutzen durch Unwohlsein verringern. Ähnliche Dynamiken spielen sich in World3 bezüglich Weltbevölkerung, Ernährung und Lebenserwartung ab (Meadows, Randers, & Meadows, 2004). Eine hochgradig nichtlineare Beziehung besteht auch zwischen

den noch vorhandenen Ressourcen und dem Kapital, das zu deren Abbau investiert werden muss. (vgl. Kapitel 3.1.1 World3 Grundannahmen).

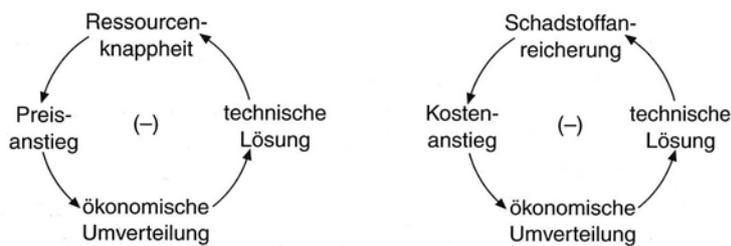
Abbildung 27: Rückkopplungsschleife für Bevölkerung, Kapital, Dienstleistungen und Ressourcen



Quelle: (Meadows, Randers, & Meadows, 2006, S. 149)

Das Wirtschaftssystem wird in World3 im Unterschied zu anderen globalen Modellen nur sehr oberflächlich modelliert und reduziert sich auf Kapitalflüsse mit Investitionsrückkopplung. Die Erhöhung der Ressourceneffizienz wird über das Zusammenspiel von Markt und Technologie erreicht (Meadows, Randers, & Meadows, 2004). Über Marktmechanismen, die in World3 nur über Annahmen abgebildet sind, wird die Knappheit eines Gutes erkannt und derjenige belohnt, der dafür ein Substitut entwickelt oder verkauft. Der technologische Fortschritt liefert die Lösung selbst, während der Markt die notwendigen Anreize schafft (Meadows, Randers, & Meadows, 2004). Umgesetzt wird dieses Denkmodell in World3 durch negative Rückkopplungsschleifen (vgl. Abbildung 28).

Abbildung 28: Negative Rückkopplungsschleifen



Quelle: (Meadows, Randers, & Meadows, 2006, S. 216)

In World3 wird der technologische Fortschritt für drei Bereiche berücksichtigt: zur bereits erläuterten Erhöhung der Ressourceneffizienz, zur Schadstoffminderung und zur Ertragssteigerung. Zentral sind für jeden Sektor das zu erreichende Endziel, die Rate mit der die Technologie jährlich verbessert wird und die Zeitverzögerung, mit der sie verfügbar ist. Die Durchschnittswerte für die Verbesserungsrate liegt bei 4% und für die Zeitverzögerung bei 20 Jahren von der Entwicklung im Forschungslabor bis zur Marktreife (Meadows, Randers, & Meadows, 2004).

Neben dem technologischen Fortschritt wurden in der aktuellsten Version von World3 aber noch weitere Massnahmen integriert, welche die Erschöpfung der Ressourcen verzögern sollen. Beispielsweise können politische Annahmen aktiviert werden, wie eine globale Verpflichtung zu konsequentem Recycling oder die gemeinsame Bekämpfung von Umweltverschmutzung ab einem bestimmten Jahr.

Obwohl Meadows, Randers, & Meadows (2004) mit ihrem aktuellen Modell World3-03 ein viel optimistischeres Bild zeichnen als noch 1972, so kommen sie dennoch zum Schluss, dass das Wachstum die Grenze der ökologischen Tragbarkeit durchbrechen wird, statt sich nur anzunähern. Je steiler der Winkel ist, mit dem sich die beiden Linien sich treffen werden, desto verheerender werden die Auswirkungen sein (vgl. Abbildung 21). Für dieses Überschreiten der Grenze sprechen auch die verzögerten Effekte von technologischen Neuerungen und die Auswirkungen träger Rückkopplungen (Meadows, Meadows, & Randers, 1992). Die einzige Chance die Grenzüberschreitung zu verhindern oder wenigstens abschwächen zu können, sehen Meadows, Meadows, & Randers (1992) durch ein Umdenken in der Gesellschaft und damit in einer Anpassung des Wertesystems. Statt Wirtschaftswachstum als vorherrschendes Ziel zu verfolgen, könnten soziale Gerechtigkeit und langfristige Existenzfähigkeit an dessen Stelle treten. Strebt das Wertesystem nach Nachhaltigkeit, so die Modellierer von World3, dann werden damit Anreize für Markt und Technologie geschaffen sich danach auszurichten (Meadows, Meadows, & Randers, 1992).

3.1.3 Kritik an World3

Die Resultate aus den Simulationen von World3 sind eine Herausforderung an ein fundamentales Prinzip der modernen Zivilisation: andauerndes wirtschaftliches Wachstum (Chagchit & Mize, 1990). Anfänglich führte dies zu schwerer Kritik gegen die Weltmodelle der MIT-Gruppe um Forrester und Meadows. Einige der Kritiker, wie insbesondere Kahn et al. (1976), aber auch Beckwith (1986), sind selber Wirtschaftsexperten und mit der Wachstumstheorie bestens vertraut. Die heftigste Kritik kam von Cole, Freeman, Jahoda, & Pravitt (1973), die jedes einzelne Modul von Welt3 einer vertieften Analyse unterzog. Die kontroversen Beurteilungen von World3 können als Optimismus gegen Pessimismus charakterisiert werden (Chagchit & Mize, 1990).

Das Team um World3 vertritt eine eher pessimistische Sicht, basierend auf den Annahmen, dass die Quantität der natürlichen Ressourcen endlich ist, die Geburtenrate als Folge eines Anstiegs der Nahrungsversorgung pro Kopf vorerst jedoch zu stark ansteigt, die Verschmutzungskrisen und Überbevölkerung auslöst, was schliesslich in einer Katastrophe mit einem Kollaps der Bevölkerung endet (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972). Diese Ergebnisse und Annahmen der Simulationen waren für die Optimisten nicht akzeptabel (Chagchit & Mize, 1990).

Eine der grössten Differenzen in der Anschauung des Forrester-Meadows Teams und ihrer Gegner zeigt sich in der Beurteilung der Rolle der Technologie (Chagchit & Mize, 1990). Sie kann in der pessimistischen Sicht den Kollaps nur hinauszögern, nicht verhindern (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972). Die Optimisten in Sachen Technologie glauben an Produktivitätsgewinne und einen höheren Lebensstandard. Und dieser erst werde dann seinerseits tiefere Geburtenraten zur Folge haben. Auch das Problem der natürlichen Ressourcen und der Verschmutzung werde sich mittels Technologie lösen lassen. Das in der Folge tiefere Bevölkerungswachstum würde zusammen mit der normalen Todesrate für ein nachhaltiges Gleichgewicht sorgen (Chagchit & Mize, 1990).

Die vier zentralen Kritikpunkte gegen die Weltmodelle der Forrester/Meadows-Gruppe lassen sich wie folgt zusammenfassen (Chagchit & Mize, 1990):

- Unterschätzung der Verfügbarkeit von nicht-erneuerbaren Ressourcen
- Unterschätzung des Nutzens von technologischem Fortschritt
- Unterschätzung der Effektivität in der Bekämpfung der Verschmutzung
- Behandlung der Welt als ein einziges globales System.

In World3 hängen die Simulationsergebnisse zentral an den natürlichen Ressourcen. Man geht von einer schnellen Erschöpfung der hochwertigen Reserven von nicht-erneuerbaren Ressourcen aus, dies gelte vor allem für die knappen Metalle (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972). Jones (1980) weist darauf hin, dass die potentielle Verfügbarkeit fast aller Metalle viel höher sei als in World3 vorgeschlagen. Kahn et al. (1976) sind der optimistischen Auffassung, dass 95% der Weltnachfrage nach Metallen nur fünf Metallen gilt, die unerschöpflich vorhanden seien, nämlich Eisen, Aluminium, Silikon, Magnesium und Titan. Technologischer Fortschritt und mehr Wiederaufbereitung würden weitere sieben Metalle (Kupfer, Zink, Mangan, Chrom, Blei, Nickel und Zinn) ebenfalls unerschöpflich machen. Ähnlich argumentieren Beckwith (1972) und Page (1973). Dies bedeutet indessen nicht, dass die Erschöpfung von Ressourcen mit Sicherheit vernachlässigt werden kann. Nach Berücksichtigung von diversen Arten von Energie Ressourcen wie Erdöl, Uran für Kernspaltung, Kernfusion, solarer Energie und so weiter kommt Jones (1980) zur Beurteilung, dass die pessimistische Sicht von World3 einerseits und die optimistische Sicht zur Energiezukunft andererseits ersetzt werden sollten durch eine konservativere Einschätzung. Die Energieproduktion auf Basis von nicht-erneuerbaren oder verschmutzenden Techniken sollte eingeschränkt oder ihre negativen Auswirkungen zumindest begrenzt werden. Insbesondere sollten Anstrengungen in Richtung von umweltverträglicher Energiegewinnung gemacht werden. Die Folgerung aus dieser Sicht ist, dass die Forschung für die Suche nach dem Ersatz von nicht-erneuerbaren natürlichen Ressourcen zu verstärken wäre, womit sich ihr Verbrauch reduzieren würde (Chagchit & Mize, 1990).

In World2 kam eine der Simulationen zum Ergebnis, dass der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen durch den Einsatz von mehr Technologie verlängert würde, allerdings auf Kosten einer Umweltverschmutzungskrise (Chagchit & Mize, 1990). Auch in World3 hatte das Team um Meadows nur wenig Vertrauen in Technologie, obschon diese für die Zukunft der Gesellschaft als von vitaler Bedeutung beurteilt wurde. Die positiven Ergebnisse mit Umweltschutz und Substitution würden nicht berücksichtigt. Dies umreisst den Dissens mit technologischen Optimisten wie Cole, Freeman, Jahoda, & Pravitt (1973) und Kahn, Brown, & Martel (1976) als den Vertretern der Meinung, dass Technologie eher zu einem neuen Gleichgewicht als zu einem Kollaps führen werde (Chagchit & Mize, 1990).

Ein weiterer Kritikpunkt in World3 ist, dass die Welt als eine globale geografische Einheit betrachtet wird (Chagchit & Mize, 1990). Dies hat zu intensiven Diskussionen geführt. Der Hauptvorwurf zielt darauf, dass damit die Unterschiede zwischen reichen und armen Ländern

nicht berücksichtigt werden. Dies wäre jedoch mit einem zusätzlichen Modellierungsmehraufwand verbunden (Chagchit & Mize, 1990).

3.2 Systems Analysis Research Unit Model (SARUM)

Die Zielsetzung der *System Analysis Research Unit* (SARU), einem Team des UK Department of the Environment unter der Leitung des Experimentalphysikers Peter C. Roberts war es, die Implikationen für nationale und internationale Politik von Langzeittrends in Umwelt und Gesellschaft zu erforschen (SARU Staff, 1977 zitiert aus Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Im Speziellen interessierte sich Roberts dafür, wie globale Modelle zuverlässiger gemacht werden könnten und ab wann sie in Entscheidungsfindungsprozessen einen effektiven Beitrag leisten können (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Um diese und weitere Fragen zu beantworten, entschieden sich Roberts und das UK Department of the Environment, ein eigenes globales Modell zu entwickeln. Das resultierende *Systems Analysis Research Unit Model* (SARUM) war ein Simulationsmodell, das auf neo-klassischen Theorien der Ökonomie beruht und so weit wie möglich auf empirische Daten basierte (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Es wurde das erste Mal an der IIASA im September 1976 präsentiert und danach nochmals bis 1978 erweitert.

Die erklärten Ziele des Modells waren laut Siegmann (1985) und Meadows et al. (1982):

- die Simulation der weltweiten ökonomischen Mechanismen unter den Auswirkungen steigender Preise für sich erschöpfende natürliche Ressourcen
- Preise und Märkte zu modellieren
- die Möglichkeit, das Modell auf beliebige Regionen und Sektoren aufzuteilen
- neue Einsichten durch die Interaktionen in einem globalen System zu gewinnen, statt nur isolierte Probleme zu analysieren
- Bereiche¹⁵ ausfindig zu machen, die im Zuge der Entwicklung des globalen Systems besonderen Belastungen ausgesetzt sind und zu simulieren, wie hoch das Ausmass dieser Belastungen sein könnte
- mehr zu erfahren über die Schwierigkeiten globaler Modellierung und wie sie gemeistert werden können.

¹⁵ Ob hier regionale, sektorale oder andere Bereiche gemeint sind lässt sich aus der Quelle nicht schliessen.

Besondere Erwähnung soll hier das erstgenannte Ziel finden, da es eng mit einer der Zielsetzungen dieser Arbeit verknüpft ist.

Roberts Skepsis über die Datenbasis und allgemeine Tauglichkeit der globalen Modelle der ersten Stunde wirkte sich auch auf seine Herangehensweise aus:

“it is unwise to lay much emphasis on the character of the "futures" which are simulated. Of more importance is establishing the validity of the data base and the relationships. Not until there is some confidence in the soundness of the basic work is it appropriate to draw conclusions and make recommendations.” (SARU Staff, 1977, S. ix)

Dies hatte zur Folge, dass in SARUM möglichst nur empirisch validierte Daten einfließen und bei Unsicherheiten Variablen lieber weggelassen wurden, als diese zu schätzen, wie es in System Dynamics-Modellen teilweise notwendig war (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

3.2.1 SARUM – Grundannahmen

Die theoretischen im Annahmen von SARUM basieren auf der neo-klassischen Ökonomie, reflektieren aber auch die Arbeiten von John Maynard Keynes (1935) (vgl. Kapitel 2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen) (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Das Modell schließt globale Desaster wie nuklearen Krieg oder drastische Klimaveränderungen aus. Des Weiteren wird das fortlaufende Funktionieren adaptiver Mechanismen im Sinne der neo-klassischen Ökonomie angenommen (SARU Staff, 1977; zitiert aus Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Auf mikroökonomischer Ebene wurden folgende neun Annahmen definiert (SARU Staff, 1977, S. 9; zitiert aus Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982):

1. Konsumenten wählen unter Berücksichtigung des Preises diejenigen Güter und Dienstleistungen, die ihren Nutzen maximieren.
2. Unternehmer wählen unter Berücksichtigung des Preises diejenige Produktionstechnik, die ihren Nutzen maximiert.
3. Produzenten können den Verkaufspreis ihrer Güter nicht über die Steuerung der Output-Menge beeinflussen.
4. Produzenten können den Kaufpreis der Güter, die sie kaufen, nicht über die Steuerung ihrer Nachfrage beeinflussen.
5. Arbeitskräfte und Investitionen werden in den Industrien angezogen, in denen die Löhne und Profite am höchsten sind.

6. Preise sind eine inverse Funktion der Vorräte.
7. Es existiert eine Konstellation von Equilibrium-Preisen bei denen alle Märkte leergeräumt sind, mit Ausnahme der gewünschten Vorräte¹⁶.
8. Konsumenten kaufen mehr von einem Gut, wenn deren Preis fällt und vice versa¹⁷. Ausnahmen bilden inferiore Güter.
9. Der Eintritt oder Austritt eines Unternehmers in eine Industrie hängt davon ab, ob sie profitabel ist oder nicht.

Unter den gegebenen ökonomischen Voraussetzungen versucht das Modell, den materiellen Wohlstand der Benachteiligten innerhalb der Population zu verbessern, ohne die restliche Population dabei schlechter zu stellen¹⁸ (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Zum internationalen Handel wurden die folgenden Annahmen getroffen (SARU Staff, 1977, S. 9):

1. Ein Land kann seine Nachfrage bei mehr als einer Angebotsquelle stillen, auch wenn zwischen ihnen signifikante Preisunterschiede bestehen.
2. Ein Land kann dasselbe Gut importieren und exportieren, wenn es Teil unterschiedlicher Produkte beziehungsweise unterschiedlicher heterogener Kombinationen von Gütern ist.
3. Wegen langjähriger Geschäftsbeziehungen und langwierigem Infrastrukturwandel, beispielsweise für Eisenbahnschienen, Häfen, Pipelines, usw. reagiert der Weltmarkt träge auf Preisveränderungen.
4. Manche Länder verstehen Handelsregularien und Tarife als strategische politische Werkzeuge, um die eigenen Interessen im In- und Ausland zu fördern.
5. Der Welthandel muss längere Transportwege in Kauf nehmen als der regionale Handel. Die Transportkosten können ein entscheidendes Element für den schlussendlichen Preis am Markt sein.

Ein ambivalentes Verhältnis hat das SARU-Team dem technologischen Wandel gegenüber: Die in der Vergangenheit beobachtete Rate des technischen Wandels wurde in der Wachstumsphase des Modells berücksichtigt. Von der Implementierung eines fortwährenden

¹⁶ Der korrekte ökonomische Fachausdruck dafür ist *Market Clearing* (Frank, 2006)

¹⁷ Ausgenommen sind inferiore Güter, bei denen die Nachfrage bei steigendem Einkommen sinkt (Frank, 2006).

¹⁸ Der korrekte ökonomische Fachausdruck dafür ist *Pareto-Optimum* (Frank, 2006)

technologischen Wandels in die Voraussage wurde jedoch abgesehen. Aus Sicht der Modellierer von SARUM (1977) ist das Konzept potentiell unendlichen Fortschritts unwahrscheinlich. Unterstützt wird diese Meinung von der Befürchtung, Kritiker könnten optimistische Resultate des Modells auf die Annahme unendlichen technischen Fortschritts reduzieren (SARU Staff, 1977).

3.2.2 SARUM – Struktur

Das Modell orientiert sich stark an der neoklassischen Theorie, bezieht aber auch Elemente von *System Dynamics* und andere ökonomische Ansätze mit ein (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972).

SARUM ist ein multiregionales, multisektorales Model (SARU Staff, 1977). Die erste Version reduzierte sich auf eine Welt mit drei Regionen, die sich an verschiedenen Lohnraten unterschieden. Die neuste Version unterscheidet 15 Regionen, die über Handelsbeziehungen und Hilfsleistungen vernetzt sind. Hierfür wurden Geld- und Güterflüsse modelliert. Jede Region ist identisch strukturiert und umfasst 13 mit einander vernetzte ökonomische Sektoren (vgl. Tabelle 1), neun landwirtschaftliche und vier nicht-landwirtschaftliche (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Tabelle 1: Die 13 Sektoren in SARUM

9 agricultural sectors	4 non-agricultural sectors
1 raw grain and starchy roots production	10 non-food products and services
2 all other vegetables and fruits production	11 capital
3 vegetable processing	12 primary energy
4 non-food crops	13 minerals
5 agricultural services	
6 livestock production	
7 livestock processing	
8 land (for agriculture)	
9 water (for irrigation)	

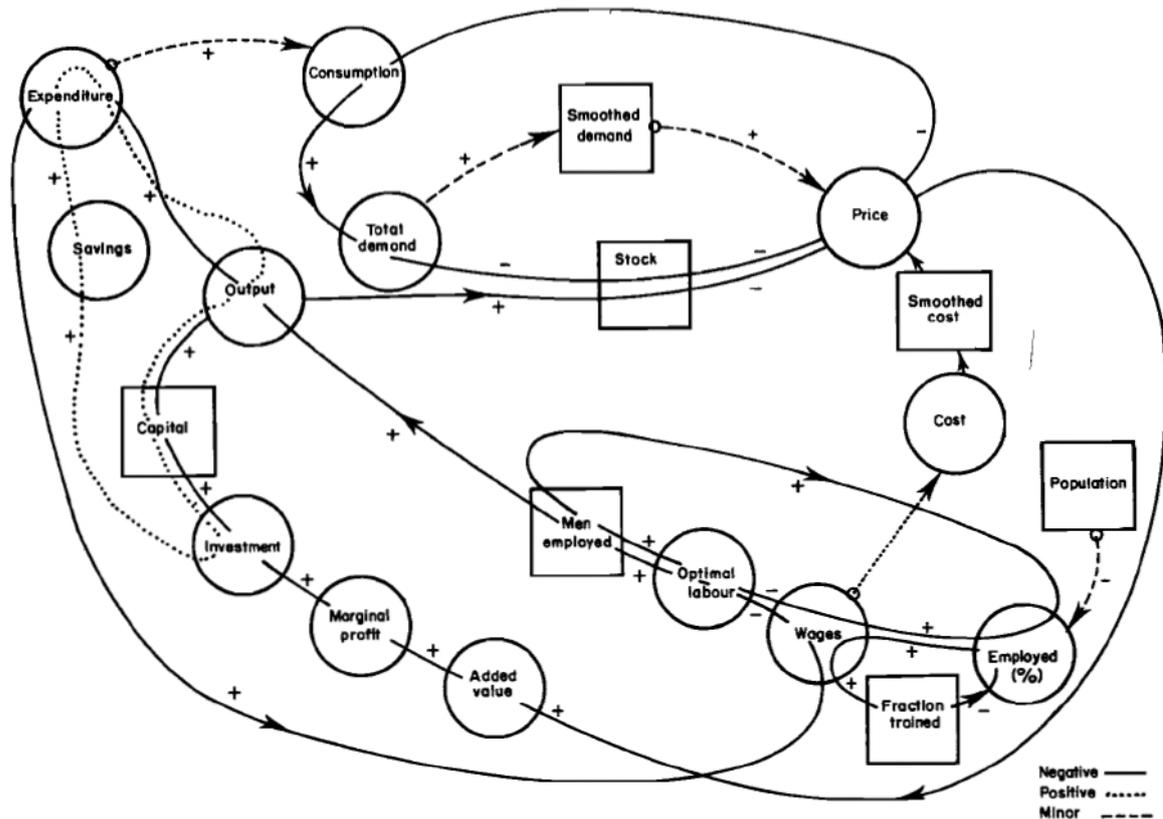
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Siegmann, 1985, S. 70)

Die nicht-landwirtschaftlichen Sektoren sind deutlich stärker zusammengefasst. Lediglich der Sektor *minerals* wird hier weiter aufgelöst: er enthält mineralische Düngemittel, Erze und Altmetall, Stein- und Ton-Abbau (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Alle Metalle für die Industrie sind also in der Gruppe Erze und Altmetall aggregiert.

Um die Umsetzung der neo-klassischen Synthese in SARUM besser kennen zu lernen, ist ein näherer Blick auf die innere Struktur der modellierten Sektoren sinnvoll. Die in Abbildung 29 dargestellte Repräsentation eines ökonomischen Sektors zeigt auch, wie sehr der

Modellierungsansatz von SARU dem *System Dynamics*-Ansatz ähnlich ist¹⁹ (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Auch hier wie in *System Dynamics* beeinflussen Veränderungen der Variablen durch Rückkopplungen das Modell zeitlich verzögert. Die dominanten Feedback-Loops im Model beeinflussen Arbeitsangebot, Löhne, Output-Produktionsniveaus, Kapitalakkumulation und Preise.

Abbildung 29: Dynamik SARUM



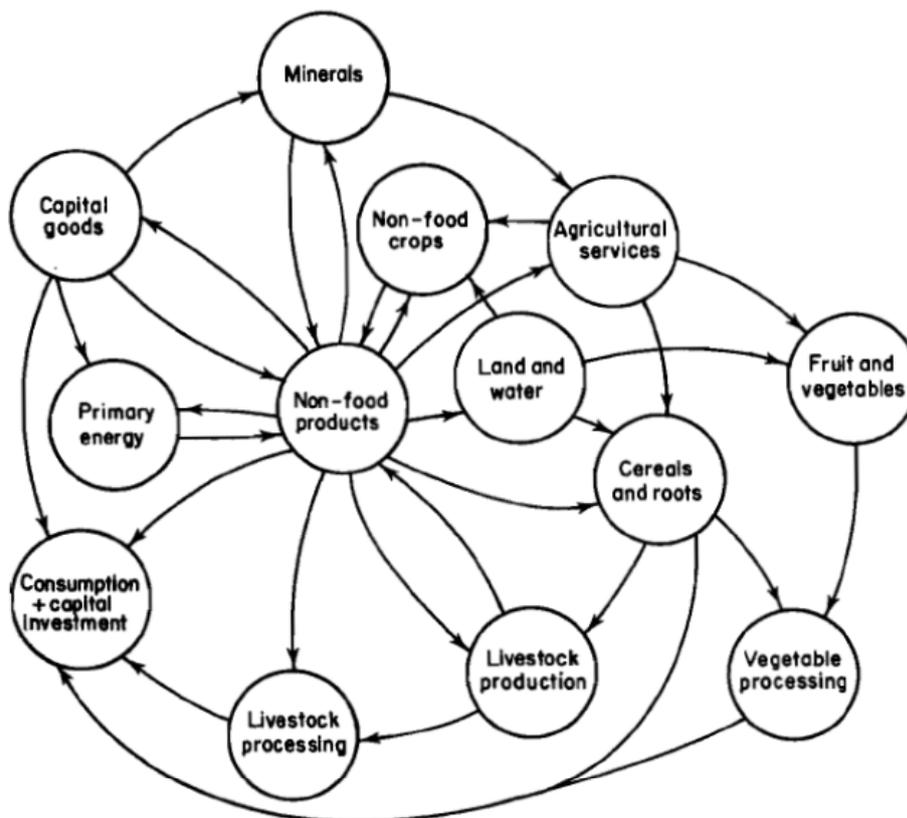
Quelle: (SARU Staff, 1977, S. 23)

Der Preismechanismus beziehungsweise Angebot und Nachfrage reagieren verzögert, um die Trägheit von Wechselkosten und Nachfrage-Gewohnheiten zu simulieren. Output-Mengen werden über eine klassische *Cobb-Douglas Produktionsfunktion* bestimmt, die Arbeit, Kapital und Güter berücksichtigt (vgl. 2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen) (Siegmann, 1985; Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Das Modell berechnet die Werte der verschiedenen Variablen und insbesondere das Preis-Equilibrium zwischen Angebot und Nachfrage (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Diese Vorgehensweise entspricht der allgemeinen Gleichgewichtstheorie, wie sie auch in computergestützten allgemeinen

¹⁹ Nicht jeder Sektor sieht genauso aus wie in Abbildung 29, manche Landwirtschaftssektoren unterscheiden sich in einigen Details davon (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Gleichgewichtsmodellen (CGE-Modellen) zur Anwendung kommt (vgl. Kapitel 2.6.3 Computergestützte allgemeine Gleichgewichtsmodelle). Die Sektoren innerhalb einer Region tauschen Arbeits-, Kapital- und Güterflüsse unter einander aus. Abbildung 30 zeigt die Verbindungen zwischen den einzelnen Sektoren. Die Sektoren versorgen sich gegenseitig indirekt über Vorräte. Investitionen werden je nach Profitabilität auf alle Sektoren verteilt und Lohnraten beeinflussen die Arbeitsflüsse zwischen den Sektoren (SARU Staff, 1977).

Abbildung 30: Sektorenverbindungen SARUM



Quelle: (SARU Staff, 1977, S. 27)

Die interregionalen Güterströme werden nicht ausschliesslich über Preise festgelegt, sondern für jede Region existiert eine Abweichungs-Matrix, die es ermöglicht, implizite und explizite Handelsbarrieren zu berücksichtigen (Siegmann, 1985). Interregionale Unterschiede werden über unterschiedliche regionale Startwerte und Parameter berücksichtigt. Die wichtigsten exogenen Inputs in das Modell sind Population, Arbeitsangebot, technologisches Wachstum bezüglich Kapital- und Arbeitsproduktivität, technologisches Wachstum bezüglich der Wirksamkeit von Düngemitteln, Produktionsniveaus, Kapitalpreise, Löhne und die Einkommensverteilung innerhalb der Regionen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982; Siegmann, 1985).

SARUM wurde nach seiner Erweiterung auf 15 Regionen vom OECD Interfutures Projekt verwendet, um eine Reihe von Langzeitszenarios zu simulieren (OECD Interfutures Project,

1979). Mit dem Ende des Interfutures Projekts haben sich die Aktivitäten der SARU bezüglich globaler Modellierung reduziert. Das Team konzentriert sich seither mehr darauf, Forschungsgruppen bei der Anwendung von SARUM zu unterstützen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

3.3 Future of Global Interdependence (FUGI)

Das FUGI Projekt startete 1976 als Kooperation der japanischen Universitäten von Tokyo, Osaka und Soka und wurde unterstützt vom *National Institute for Research Advancement*, dem *Japan's Ministry of Trade and Industry* und dem japanischen *Club of Rome* (Onishi A. , 2005; Richardson J. M., 1978).

Die Erstellung des Modells war regional motiviert und sollte Japans Rolle in der zukünftigen globalen Gesellschaft untersuchen. Erfreulicherweise führte dieses auf Japan fokussierte Ziel nicht zu einem beschränkten Welt-Modell, sondern es wird unter Modellierern geschätzt, weil es auch die Problematiken der Dritten Welt und ihrer Entwicklung gut integriert (Richardson J. M., 1978). Richardson (1978) ist sogar der Meinung, dass FUGI frei von methodischem Dogmatismus sei, da es einen dynamischen Modellierungsansatz mit Input-Output- und Systems Dynamics-Modellen integriert.

Das FUGI Projekt und seine Entwicklung wurde seit 1977 immer wieder am *IIASA global modeling symposium* vorgestellt. Das originale Modell besteht aus drei interagierenden Teilmodellen: dem *Global Input-Output Model* (GIOM), dem *Global Resources Model* (GRM) und dem *Global Economic Model* (GEM)²⁰ (Onishi A. , 2005). 1981 wurde das erst 15 Länder beziehungsweise Regionen enthaltende Modell auf 62 Länder erweitert. Zu diesem Zeitpunkt bestand das Modell aus ungefähr 30'000 Gleichungen (Onishi A. , 1981). Die laufende Weiterentwicklung brachte immer neuere Versionen hervor, sowie das *FUGI Global Modeling System* (FGMS), ein Software-Paket, mit dem Berechnungen im Modell durchgeführt werden können (Onishi A. , 2005). Seit 1990 wird FUGI auch als „*integrated global model for sustainable development*“ bezeichnet (Onishi A. , 2005, S. 102). Die Aktuelle Version, das *FUGI global model 9.0, M200PC* aus dem Jahr 2000, kann mit FGMS 200 unter Windows XP ausgeführt werden. Es unterscheidet 200 Länder oder Regionen und besteht aus über 150'000 Gleichungen (Onishi A. , 2005).

²⁰ Leider konnte keine Primärquelle des für diese Arbeit besonders interessanten *Global Resources Model* (GRM) gefunden werden. Erschwerend kommt dazu, dass einige Veröffentlichungen über FUGI nur auf Japanisch erschienen sind.

FUGI vereint ähnlich wie bei SARUM verschiedene Modellierungsansätze. Hier wurden diese auch von geografisch verteilten Gruppen umgesetzt. An der IIASA war es das erste globale Modell, das sich stark auf den in der Ökonomie bewährten Modellierungsansatz der *Input-Output-Analyse* stützte (vgl. Kapitel 2.6.2 Input-Output-Analyse). Das FUGI-Team veröffentlichte aber kein Buch, um Modell, Vorgehen, Szenarien und Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wie das bei World3 der Fall war (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Das und zahlreiche Publikationen, die nur auf Japanisch verfasst wurden, sind wohl die Gründe dafür, dass FUGI ausserhalb von Japan nicht über die Fachkreise globaler Modellierer und Ökonomen hinaus bekannt ist.

Hier werden als erstes Annahmen und Struktur der Originalversion von FUGI dargestellt. Diese wichtigen Grundlagen blieben auch für die aktuellste Version aus dem Jahr 2000 wegweisend, die im letzten Unterkapitel Erwähnung findet (Onishi A. , 2005).

3.3.1 FUGI – Grundannahmen

Die Entwickler von FUGI legten im Vergleich zu anderen Modellierern globaler Modelle sehr offen dar, worin sie den Zweck und die Ziele von FUGI sehen und wie ihre Vorstellung einer neuen Weltordnung aussieht (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Beispielsweise zweifelten sie an der Tauglichkeit der Wirtschaftswissenschaften bei der Lösung globaler Probleme:

“[...] The frameworks of the economic sciences in the past are losing their efficacy and becoming unable to respond to many of the changes inherent in the new conditions that typify the world scene. This is in part because the angles of vision utilized by economists in the past have been too narrow. [...] Efforts to look squarely at the realities of [the] interdependence among countries and to systematize them within a framework of economic theory have up to now remained, by and large, outside the purview of economists.” (Kaya, Onishi, & Suzuki, 1977, zit. nach Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982, S. 76)

Das FUGI-Team hofft mit der Entwicklung von Szenarien und strategischen Empfehlungen zur politischen Lösung globaler Probleme beizutragen. Sie gingen 1977 davon aus, dass die ökonomischen Abhängigkeiten zwischen den Weltregionen, besonders zwischen entwickelten und weniger entwickelten Ländern zunehmen werden²¹ (Kaya, Onishi, & Suzuki, 1977).

²¹ Rückblickend lässt sich diese Annahme bestätigen, da seit Levitt (1983) und zu Beginn der 90er Jahre der Trend der Globalisierung zunehmend und mit öffentlichem Interesse diskutiert wird.

Das schwerwiegendste Problem unter vielen sehen Kaya, Onishi, & Suzuki (1977) im internationalen Wettbewerb zwischen den Industrieländern und den Entwicklungsländern bei der Herstellung von Gütern. Die bisherigen Industrieländer dominierten bis anhin den Weltmarkt. Japan ist trotz seiner knappen Ressourcen noch immer stark abhängig von seiner Exportwirtschaft. Viele der Entwicklungsländer sind sehr arm an Ressourcen, aber reich an Arbeitskräften, womit deren Zukunft im Aufbau einer Fertigungsindustrie wahrscheinlich ist. Die Entwickler von FUGI stellten sich die Frage, ob und wie ein harmonisches Wachstum beider Ländergruppen möglich ist (Kaya, Onishi, & Suzuki, 1977 zitiert aus Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Eine wichtige Rolle spielt dabei die Annahme, dass eine Verlagerung der Industrie in die Entwicklungsländer und im Gegenzug die Förderung der Landwirtschaft in den Industrieländern notwendig sei. Dabei ist die Verteilung von Entwicklungshilfe als wichtige Kontrollvariable und somit als wichtiges politisches Instrument identifiziert worden (Richardson J. M., 1978).

Neben der starken Fokussierung auf die Abhängigkeiten zwischen Entwicklungs- und Industrieländern, unterscheidet sich FUGI von anderen Modellen besonders im Bezug auf den Zeithorizont der Simulation. Die Beschränkung auf zehn Jahre wurde kritisiert, ist jedoch auch auf strukturelle Eigenschaften des Modells zurück zu führen (vgl. nächstes Kapitel zur Struktur von FUGI) (Richardson J. M., 1978). Generell wurde FUGI aber von anderen Modellierern als qualitativ hochwertiges globales Modell gelobt (Richardson J. M., 1978).

Ungebremstes Wachstum wird wie auch schon bei World3 als eines der Hauptprobleme gesehen. Das Wachstum künstlich zu begrenzen, ohne vorangehende strukturelle Veränderungen durch explizite Steuerungsmassnahmen einzuleiten, wird jedoch noch verheerender eingeschätzt als nicht einzugreifen (Richardson J. M., 1978). Das Modell zeichnet aber grundsätzlich ein optimistisches Bild bezüglich der verfügbaren Ressourcen und der Rolle Japans in der zukünftigen Weltwirtschaft (Richardson J. M., 1978).

3.3.2 FUGI – Struktur

Die Modellierer von FUGI entschieden sich für eine detaillierte Analyse der Interaktionen zwischen Industrie-Sektoren innerhalb der Regionen. Das führte zur Integration einer *Input-Output-Analyse*, die von Ökonomen zur Untersuchung genau dieser Interaktionen eingesetzt wird (vgl. Kapitel 2.6.2 *Input-Output-Analyse*). Jedoch liefert die *Input-Output-Analyse* nur Vorhersagen für ein einzelnes Jahr und ist kein dynamisches Modell. Deshalb entwickelte das Team um FUGI zusätzlich ein stärker aggregiertes dynamisches Modell, das langfristige ökonomische Trends festhält, um sie in den Jahren von Interesse dem disaggregierten Input-

Ouptut-Modell zur Verfügung zu stellen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Zur Analyse von Problemen bezüglich Ressourcen und Energie wurde zusätzlich ein System Dynamics-Modell erstellt, womit FUGI drei Ansätze verfolgt (Richardson J. M., 1978).

Im Laufe der Entwicklung der drei Teilmodelle von FUGI haben sich auch deren Namen verändert.²² Aus Gründen der Vollständigkeit und der Vergleichbarkeit mit möglichst vielen Quellen zu FUGI sollen an dieser Stelle auch die alten Bezeichnungen Erwähnung finden:

- Das *FUGI Input/Output Model* (FIOM) wurde zum *Global Input-Output Model* (GIOM)
- Das *Global Macro-Economic Model* (GMEM) wurde zum *Global Economic Model* (GEM)
- Das *Global Metallic Resources Model* (GMRM) wurde zum *Global Resources Model* (GRM)

Alle Teilmodelle der originalen Version werden hier kurz erläutert, wobei in dieser Arbeit durchwegs die aktuellsten Bezeichnungen aus der Primärquelle von Onishi (2005) verwendet werden. Danach wird auch kurz auf die Struktur der aktuellsten Modellversion 9.0 M200PC eingegangen.

3.3.2.1 *Global Input-Output Model*

Das *Global Input Output Model* (GIOM) unterscheidet in der originalen Version 15 Regionen, die wiederum in 15 regionale Sektoren aufgeteilt sind. Der Kern des GIOM ist ein Input-Output-Modul (vgl. Kapitel 2.6.2 Input-Output-Analyse) (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Die Berechnungen im Modell finden durch das Lösen eines statischen Optimierungsproblems statt, das aber auch Werte für die Gleichungen und Ungleichungen der verwendeten Nebenbedingungen aus dem dynamischen *Global Macro-Economic Model* (GEM) erhält (Richardson J. M., 1978). Die zu optimierende Zielfunktion setzt sich zusammen aus (Richardson J. M., 1978):

- Maximierung der Kapittaleffizienz
- Minimierung der Lohnkosten

²² Vergleiche dazu (Siegmann, 1985) beziehungsweise (Onishi, 2005). Es könnte sich bei den verschiedenen Bezeichnungen aber auch um unterschiedliche Übersetzungen aus dem Japanischen handeln, da nicht in allen Quellen konsistent die eine oder andere Version verwendet wird. Ein Beispiel dafür liefern (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982) Die vorliegenden Quellen zu FUGI geben keinen Anlass zur Vermutung, dass die verschiedenen Bezeichnungen nicht dieselben Teilmodelle beschreiben.

- Maximierung des Beschäftigungsgrads
- Minimierung des Energiebedarfs

Die Nebenbedingungen im GIOM bringen neben den Verbindungen zum GEM sozioökonomische und strukturelle Faktoren wie folgt mit ein (Richardson J. M., 1978):

- Gleichgewicht von regionalem Angebot und Nachfrage
- Gleichgewicht von globalem Angebot und Nachfrage
- Verzögerung bei der Verabschiedung von vergangenen Trends im internationalen Handel
- Verzögerung beim Abbau der Industriestruktur
- Beschäftigungsgrenzen in der Produktion
- Einkommensgrenzen in der Produktion
- Grenzen für den Wandel der Industriestruktur

Das GIOM liefert für ein gegebenes Jahr die Werte zu Ressourcen- und Güterflüssen zwischen den Sektoren. Beispielsweise verwendet der Bausektor Produkte aus dem Landwirtschaftssektor, dem Forst- und dem Fischereisektor und liefert seinerseits Produkte in den Transport- und dem Kommunikationssektor. Ein Sektor kann auch seine eigenen Produkte konsumieren. Zusätzlich wird die Nachfrage des Sektors berechnet, die sich aus den konsumierten Gütern und den exportierten Gütern zusammensetzt. Die Berechnungen werden zur Vereinfachung rein monetär durchgeführt. Ein Handelsmodul berechnet Güterflüsse zwischen Regionen für jeden Sektor durch die lineare Regression vorhergehender Zeitperioden (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Das schlussendliche Volumen sektoraler Importe und Exporte wird über ein lineares Programmierungs-Modul²³ berechnet und fließt zur Berücksichtigung in späteren Perioden auch in das dynamische GEM. Über dieses Modul werden auch Szenarien definiert, die in Form von Zielfunktionen eine bestimmte Weltanschauung oder politische Entscheidung repräsentieren. Das GIOM berechnet darauf auf Makro und Mikroebene die detaillierten Konsequenzen und Implikationen. Zusätzlich müssen Nebenbedingungen für die Optimierung spezifiziert werden, die Informationen aus dem Input-Output-Modul, dem Handelsmodul, dem GEM und exogen beziehen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

²³ Lineare Programmierung ist eine Vereinfachung des Optimierungsansatzes (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982)

3.3.2.2 *Global Economic Model*

Das originale *Global Economic Model* (GEM) bildet dieselben 15 Regionen ab wie das GIOM. Die Regionen sind in drei Gruppen unterteilt (Richardson J. M., 1978): fortgeschrittene Marktwirtschaften, sich entwickelnde Marktwirtschaften und Planwirtschaften. Jede Region unterscheidet die folgenden sechs Sektoren (Richardson J. M., 1978; Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982):

- Produktion (gemessen in Geldeinheiten)
- Aufwendungen am Bruttoregionalprodukt (zu konstanten Preisen)
- Profite und Löhne
- Preise (beziehungsweise die Preisveränderung)
- Aufwendungen am Bruttoregionalprodukt (zu aktuellen Marktpreisen)
- Interregionale Geldflüsse (offizielle Entwicklungshilfe und private Investitionen)

Unter den Regionen findet ein Austausch über Handel, private Investitionen und offizielle Entwicklungshilfe statt. Resultate aus dem GEM werden wie oben erwähnt als Input für das GIOM verwendet (vgl. GIOM). Die Berechnungen hängen von Werten vergangener Zeitperioden ab, was GEM zu einem dynamischen Modell macht (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

3.3.2.3 *Global Resources Model*

Das Global Resources Model (GRM)²⁴ war ähnlich wie World3 ein System Dynamics Modell, das die Welt als Ganzes betrachtete (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Erst später wurden darin neun Welt-Regionen unterschieden (Siegmann, 1985). Auch kannte die ursprüngliche Version des Modells nur eine einzige Ressource, die Kupfer, Aluminium und Eisen in sich aggregierte (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982; Siegmann, 1985). Die Variablen des Modells beinhalten verfügbare Reserven, Extraktionskosten, Nachfrage, Investitionen und Recycling. Das Modell kann Inputs von den anderen Teilmodellen entgegen nehmen, jedoch nicht während der Laufzeit (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Das bedeutet, das GRM ist im softwaretechnischen Sinne nicht integriert. Die exogenen Variablen aus dem GIOM und dem GEM bestehen aus den Produktionsfaktoren Arbeit, Kapital und Energie, sowie der Produktivität für Arbeit (Siegmann, 1985). Ein Feedback der

²⁴ In älteren Quellen auch *Global Metallic Resources Model* genannt (Siegmann, 1985).

Ergebnisse vom GRM in die anderen Teilmodelle ist nicht dokumentiert, beziehungsweise ungewiss (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982; Siegmann, 1985).²⁵

3.3.3 FUGI – Aktuelle Version

Das aktuellste *FUGI global model 9.0 M200* unterscheidet wie bereits erwähnt 200 Regionen beziehungsweise Länder. Die Länder stehen über die Welthandels-Matrix, Export-/Importpreise, Rohstoffpreise, Devisenkurse, Entwicklungshilfe, private internationale Investitionen, Schulden, Zinsen und weiteren Variablen in Wechselwirkung (Onishi A. , 2005). Indirekt beeinflussen sich die verschiedenen Regionen unter einander auch über Veränderungen der Population, über ökonomische Entwicklungspolitik, Energiepolitik, Umweltpolitik und weitere Variablen (Onishi A. , 2005).

Auch die Sektoren in FUGI wurden überarbeitet und zu neun Sub-Systemen weiterentwickelt (Onishi A. , 2005):

- Population
- Nahrung
- Energie
- Umwelt
- Ökonomische Entwicklung
- Frieden und Sicherheit
- Menschenrechte
- Gesundheitswesen
- Digitale Kluft²⁶

Die wichtigste Rolle spielt dabei gemäss Onishi (2005) das System für ökonomische Entwicklung, welches selbst nochmals in elf Themengebiete gegliedert ist.

Das FGMS Software Paket²⁷ enthält die FUGI Modell Datenbank und erlaubt das Austauschen beziehungsweise Aktualisieren von Daten zu Ländern, Regionen, Variablen und

²⁵ Dieses Teilmodell von FUGI wäre für diese Arbeit von speziellem Interesse gewesen. Alle Bestrebungen diese zentrale Quelle zum GRM von Suzuki, Shoji & Murakami (1978) zu beschaffen, blieben erfolglos: Suzuki, Y., Shoji, K., & Murakami, T. (1978). Global metallic resource model, 1978 Summer Computer Conference, July 1978, (S. 710-717) zitiert aus Meadows, Richardson, & Bruckmann (1982). Alle Informationen zum GRM die in der verwendeten Sekundärliteratur zu finden waren, wurden in diesem Abschnitt erwähnt.

²⁶ Deutsche Übersetzung des englischen Begriffs *digital divide*, der die Kluft zwischen Personen mit und ohne IT-Anwenderkenntnisse beschreibt.

Zeitreihen. Parameter können automatisch geschätzt werden und die Resultate der Simulation werden in 170 Welt-Tabellen, Tabellen zu einzelnen Ländern, Matrizen zum Welthandel und weiteren Variablen ausgegeben (Onishi A. , 2005). Sogar ein intelligentes automatisches Fehlerkorrektursystem wurde implementiert, um die Verwendung der komplexen Software zu erleichtern (Onishi A. , 2005).

3.4 Metal Model

Das *Metal Model* von Van Vuuren (1995), beziehungsweise Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999), ist das aktuellste der betrachteten globalen Modelle und simuliert die lanfristigen Trends in Produktion und Verbrauch von Metallen. Die Modellierer beziehen sich auf Arbeiten, in denen die Ressourcenproblematik im Zusammenhang mit Wirtschaftswachstum und technologischem Wandel untersucht wurden (Chapman & Roberts, 1983; De Vries, 1989; Weston & Ruth, 1997; Suzuki & Shoji, 1977; Gordon R. L., 1967; Duchin & Lange, 1994; Ayres & Ayres, 1996; Mannaerts, 1997). Auf der Basis dieser Analysen wurde das nachfolgend beschriebene Modell aufgebaut, das unter anderem mit Hilfe von *System Dynamics* und Ansätzen aus der Ressourcenökonomie entwickelt wurde.

Das *Metal Model* dient der Erforschung der Nachhaltigkeit von Metall-Ressourcen im Kontext von Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum und unter Berücksichtigung von Energie- und Kapitalanforderungen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Beeinflusst wird das Modell auch vom technologischen Fortschritt und der abnehmenden Konzentration von Metallen in der Erdkruste durch deren Abbau. Kalibriert wurde das Modell mit Daten aus den Jahren 1900 bis 1990. Es simuliert von da an die Entwicklungen bis ins Jahr 2100, welche wiederum stark von den Annahmen der angewandten Perspektive abhängen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Diese von Tilton (1996) geprägten Perspektiven zur nachhaltigen Entwicklung nicht erneuerbarer Ressourcen repräsentieren die unterschiedlichen Szenarien der Simulation (vgl. Kapitel 3.4.1.3 Annahmen des Perspektiven-Ansatzes). Besonderes Augenmerk wird im Folgenden auch auf die zentralen Annahmen gelegt, die im *Metal Model* das regionale Wachstum der Ressourcennachfrage bremsen oder sogar sinken lassen (vgl. Kapitel 3.4.1.1 Annahmen zu Angebot und Nachfrage).

²⁷ Ohne Japanisch-Kenntnisse war es mir nicht möglich herauszufinden, wie das FGMS Software Paket bezogen werden könnte. In einer Publikation hat Akira Onishi zwecks Vermittlung der Software seine Mail-Adresse hinterlassen (Onishi, 2003b). Diese ist jedoch nicht mehr aktiv und meine Anfrage konnte nicht zugestellt werden.

3.4.1 Metal Model – Grundannahmen

Im Metal Model wird die potentielle Erschöpfung metallischer Ressourcen über deren Qualität beziehungsweise deren Reinheitsgrad und Konzentration angegangen. Dies beruht auf der Annahme, dass die Ressourcen mit höchster Qualität als erstes abgebaut werden, wobei der Ausdruck *Qualität* hier für Reserven in hoher verwertbarer Konzentration und Erreichbarkeit steht, was den Abbau erleichtert (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Mit jeder abgebauten Menge eines Metalls verschlechtert sich damit die Qualität beziehungsweise die Konzentration und Erreichbarkeit des in der Erdkruste verbleibenden Metalls. Es ist dadurch mehr Aufwand beziehungsweise Geld, Energie oder technisches Wissen notwendig, um aus dem abgebauten Volumen die begehrte Ressource zu gewinnen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

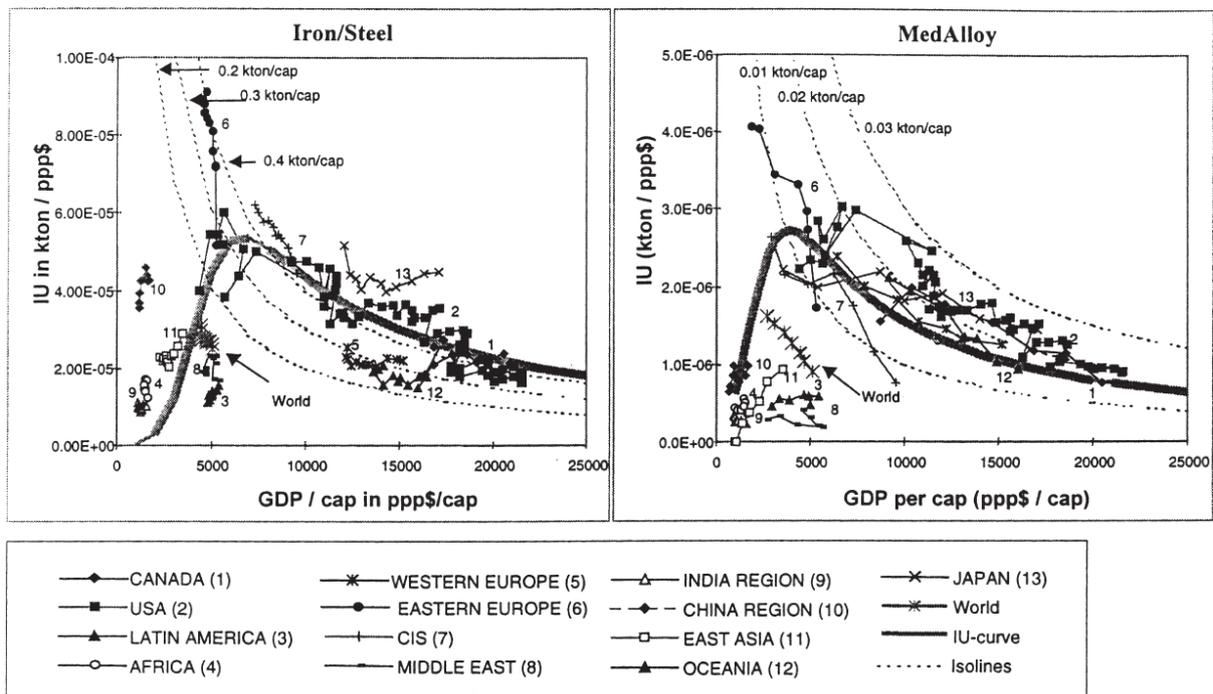
Drei verschiedene Arten von Metallen werden aufgrund ihrer Verfügbarkeit unterschieden (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999): *reichlich vorhandene Metalle* wie Eisen und Aluminium, *halb-seltene Metalle* wie Kupfer und Blei und *seltene Metalle* wie Gold und Platin. Das *Metal Model* reduziert sich auf die ersten beiden Gruppen, wobei in der ersten Gruppe allein Eisen betrachtet wird. Für die zweite Gruppe wurde ein virtuelles Metall *MedAlloy* definiert. Dieses ist eine Aggregation aus Kupfer, Blei, Zink, Zinn und Nickel (De Vries, 1989). *Seltene Metalle* wie Gold, Silber und Platin wurden nicht integriert, da deren mengenmässige Verwendung in Relation zu den vorher genannten Metallen klein ist und sie in Sachen Energieaufwand keine signifikante Rolle spielen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

3.4.1.1 Annahmen zu Angebot und Nachfrage

Das Modell berechnet Angebot und Nachfrage von Eisen und *MedAlloy*, wobei für die beiden Seiten unterschiedliche Annahmen getroffen wurden. Während die Angebotsseite einen aggregierten Weltmarkt für Eisen und *MedAlloy* abbildet, wird auf Seiten der Nachfrage nach 13 Ländern beziehungsweise Regionen unterschieden (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Begründet wird die regionale Aufspaltung der Nachfrage anhand empirischer Daten zum Verbrauch der Metalle in verschiedenen Ländern. Unter anderem zeigen diese auf, dass 50% des Eisens und 70% des Kupfers in den OECD-Staaten verbraucht wird (Klein Goldewijk & Baattjes, 1997; IIS, 1996). Die teils grossen Unterschiede in der regionalen Nachfrage waren auch ausschlaggebend für die Berücksichtigung der *Intensity of Use-Hypothese* (IU-Hypothese), bei der mit steigendem Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf über einem bestimmten Niveau mit einem abnehmendem Ressourcenverbrauch gerechnet wird (vgl.

Kapitel 2.6.4 Intensity of Use-Hypothese). Die wichtigste Ausnahme, für welche die IU-Kurve in Ländern mit hohem Einkommen noch nicht abnehmend ist, ist Aluminium (Moll, 1989). Es ist sogar eher ein Substitut für andere Metalle, was neben den hohen Reserven wahrscheinlich auch einer der Gründe dafür ist, dass das *Metal Model* Aluminium nicht berücksichtigt. Die Abbildung 31 zeigt die IU-Kurven für Eisen und *MedAlloy* anhand der Daten von 1900 bis 1990. In derselben Grafik können auch mit Hilfe der Legende die regionalen Unterschiede verglichen werden²⁸.

Abbildung 31: IU-Kurve für Eisen und *MedAlloy*



Quelle: (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999, S. 243)

Auf der Basis von Abbildung 31 entschieden sich Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999), die Nachfrage und damit den Verbrauch von Eisen und *MedAlloy* in Form je einer IU-Kurve zu formulieren. Die grossen Unterschiede zwischen den Regionen, ihre verschiedenen Entwicklungsrichtungen und die Position des globalen Durchschnitts sprechen gegen die Formulierung einer aggregierten Nachfrage (vgl. Abbildung 31). Der globale Trend zu einer

²⁸ GDP (*gross domestic product*) ist die englische Übersetzung von Bruttoinlandsprodukt (BIP) und ppp\$ (*purchasing power parity*) ist eine künstliche Währung, die die Wechselkurse zwischen Währungen normt. „cap“ ist die Kurzform von *capita*, womit „/cap“ *per capita* beziehungsweise *pro Kopf* bedeutet. „kton“ steht für das Gewichtsmass Kilotonnen.

sinkenden Verbrauchsintensität²⁹ (IU) wird von den Ländern mit hohem Lohnniveau dominiert (vgl. Abbildung 31) (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Die Modellierer nehmen mit Bezug auf die IU-Hypothese des weiteren an, dass neben ökonomischem Entwicklungsgrad, Substitution und technologischem Fortschritt der interregionale Technologietransfer ein weiterer dynamischer Faktor für die Form der IU-Kurve ist (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Diese Annahme wird gestützt durch Benardini and Galli (1993), die in ihren Analysen festgestellt haben, dass das Maximum der IU-Kurve abnimmt, je später ein Land sein Maximum erreicht.

Im Gegensatz zur Nachfrage wird im restlichen *Metal Model* die Welt für die Bestimmung des Angebots auf eine einzige Region aggregiert. Einer der Gründe für diese Entscheidung ist die komplexe Dynamik, die bei mehreren Produzenten zu berücksichtigen ist (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999): nicht nur Produktivität und ein Handelsmodul müssten integriert werden, sondern auch Parameter regionaler Kosten für Arbeit, Kapital, Energie und Transport, wie dies beispielsweise in SARUM der Fall ist (vgl. Kapitel 3.2 SARUM). Dazu kommt, dass zu wenige regionale Daten über die Produktion der relevanten Metalle verfügbar waren (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Die Entwickler des *Metal Models* argumentieren weiter, dass Metalle global gehandelt werden, womit die wichtigsten Dynamiken am Weltmarkt in einer einzigen Weltregion adäquat abgebildet werden können. Sie weisen aber darauf hin, dass dies nur für die Angebotsseite gilt, da der regionale Verbrauch im Modell nur mit Hilfe der regionalen Nachfrage berechnet werden kann (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

3.4.1.2 Annahmen zu Recycling

Recycling, nachfolgend auch Sekundärproduktion genannt, ist eine wichtige Möglichkeit um Ressourcen effizienter nutzen zu können. Prinzipiell reduziert Recycling die Endlagerung von Abfall in der Umwelt und im Fall von Metallen den Energieaufwand in der Produktion. Das Recycling spart besonders die Energie für den Abbau und die ersten Arbeitsschritte zum Raffinieren der Metalle. Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999) rechnen damit, dass der bisherige Trend einer steigenden Recyclingrate anhält. Im *Metal Model* nehmen die folgenden Faktoren Einfluss auf die Recyclingrate: die Verfügbarkeit von wiederverwertbarem Altmittel im Verhältnis zum gesamten Verbrauch, die relativen Kosten zwischen Primär- und

²⁹ Übersetzung aus dem Englischen: *Intensity of use* (IU)

Sekundärproduktion und die Wahrscheinlichkeit für das kosteneffektive Einsammeln des Altmetalls (Duchin & Lange, 1994).

Das *Metal Model* unterscheidet neben der Primärproduktion durch Abbau der Metalle zwei verschiedene Arten von Recycling: *Altmetallrecycling*, das am Ende der Produktlebensdauer direkt nach der Entsorgung weiterverwertet wird (vgl. p=2 in Abbildung 33) und *Schrottreycling*, wobei das Altmetall erst zwischengelagert, beziehungsweise erst nach längerer Zeit wieder zur Weiterverwertung eingesammelt wird (vgl. p=3 in Abbildung 33) (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Schrottreycling war in der Vergangenheit mangels Infrastruktur und Anreizen sowie wegen dem hohem Arbeitsaufwand, der damit verbunden ist, vernachlässigbar. Es wurde aber ins Modell aufgenommen, da es langfristig mit der Erschöpfung der Ressourcen eine zunehmend wichtigere Rolle spielen könnte (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Insbesondere unter der Annahme der sich verschlechternden Qualität, beziehungsweise der höheren Grenzkosten in der Primärproduktion, steigt die verhältnismässige Wirtschaftlichkeit der Sekundärproduktion. Auch beim Recycling kann wieder von der Annahme ausgegangen werden, dass Altmetall von höherer Qualität beziehungsweise Verfügbarkeit zuerst wiederverwertet wird. Das hat zur Folge, dass je höher der Anteil zwischen recyceltem und entsorgtem Altmetall ist, desto mehr Aufwand muss in der Sekundärproduktion betrieben werden und umso teurer wird das wiedergewonnene Metall aus Recycling (Gordon et al., 1987).

3.4.1.3 Annahmen des Perspektiven-Ansatzes

Die Uneinigkeit verschiedener Forschergruppen über die Zukunft lässt sich meist auf die verschiedenen Paradigmen zurückzuführen, die sie vertreten (vgl. Kapitel 2.1 Paradigmen). Bei der Formulierung der verschiedenen Szenarien für das Metal Model versuchten Van Vuuren, Strengers, & De Vries, (1999) dem Rechnung zu tragen: Anstatt die Parameter für verschiedene Szenarien nur über Schätzverfahren und historische Daten zu bestimmen, entschieden sich die Modellierer, drei verschiedene Zukunftsperspektiven zu integrieren. Sie verwendeten dazu eine Herangehensweise von Thompson, Ellis, & Wildavski (1990) als Heuristik, um konsistente Szenarien zu entwickeln. Diese widerspiegeln prominente Paradigmen verschiedener Forschergruppen. Daraus resultierten die folgenden drei Perspektiven zu nachhaltiger Entwicklung, die anhand von Rollenbildern formuliert sind (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999): der *Individualist*, der *Hierarchist* und der *Egalitarist*.

- Der *Individualist* fokussiert sich auf die Entwicklungsmöglichkeiten, die durch technischen Fortschritt und menschliche Kreativität zu Stande kommen. Über die Entwicklung der Natur ist der *Individualist* eher unbesorgt.
- Der *Hierarchist* versucht die soziale Ordnung mit einer kompetenten und autoritären Struktur zu wahren. Aus seiner Sicht kann die Natur den menschlichen Eingriffen nur begrenzt ohne nachhaltigen Schaden Widerstand leisten. Wo diese Grenzen liegen wird durch wissenschaftliche Kompetenz und bürokratische Prozesse in Regierungen beeinflusst.
- Der *Egalitarist* legt Wert auf starke Gruppen mit ähnlichen Zielen und Werten, aber ohne autoritäre Strukturen. Die Natur wird als verletzlich gesehen.

Für jede Perspektive werden Weltanschauung und Managementstil unterschieden (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Die Weltanschauung reflektiert die Annahmen der jeweiligen Perspektive aufgrund von Erfahrungen in der Vergangenheit und Spekulationen über die Zukunft. Der Managementstil gibt Aufschluss über die jeweiligen Lösungsansätze, die zur Erreichung einer nachhaltigen Zukunft verfolgt werden. Eine grobe Aufstellung der Charakteristiken für jede Rolle enthält Abbildung 32.

Abbildung 32: Perspektiven Metal Model

	Hierarchist	Egalitarian	Individualist
<i>General characteristics</i>			
Myth of nature	Perverse, tolerant	Ephemeral	Benign
Concept of human nature	Sinful	Born good, malleable	Self-seeking
Management style	Control, regulatory	Preventive	Laissez-faire, adaptive
Desired system properties	Controllability	Sustainability	Exploitability
Ideal scale	Large	Small	Appropriate
Economic growth	Desirable with conditions	Not a primary goal	Unconditionally desirable
Salient risks	Loss of control	Catastrophes	Threats to free market
Risk-handling style	Institutionalisation	Reduction	Risk-seeking
Attitude to needs/resources	Expanding resource base	Needs-reducing strategy	Rational allocation of resources

Quelle: (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999, S. 249)

Die Perspektiven des *Egalitaristen* und des *Individualisten* wurden in starker Anlehnung an Tilton (1996) definiert. Er unterscheidet mit Bezug auf nicht-erneuerbare Ressourcen die Weltanschauung der *Besorgten* und der *Unbesorgten*, wobei diese Rollen bei Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999) dem *Egalitaristen* und dem *Individualisten* entsprechen. Auf die für diese Arbeit äusserst relevanten Annahmen der einzelnen Perspektiven wird nachfolgend eingegangen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999):

Die *besorgten Egalitaristen* vertreten das von Tilton (1996) beschriebene *Paradigma der beschränkten Reserven*³⁰: Sie nehmen zwar zur Kenntnis, dass im Verlauf der Zeit weitere Ressourcen entdeckt werden und dass Technologie die Ressourceneffizienz laufend verbessert, sehen aber darin keinen Ausweg aus der Abhängigkeit von nicht-erneuerbaren Ressourcen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Das zentrale Problem aus Sicht der *Egalitaristen* ist die schrittweise Erschöpfung der Ressourcen sowie die damit verbundenen Umweltschäden und sozialen Konsequenzen (Friends of the Earth, 1998; WWF/IUCN, 1999). Wegen der wachsenden Weltbevölkerung, dem Wirtschaftswachstum und der damit verbundenen Ausbreitung eines ressourcenintensiven Lebensstils sollten weitgreifende Richtlinien aufgestellt werden, um diese Trends umzukehren. Die Rate des Qualitätsabfalls durch die Förderung von Ressourcen wird pessimistisch eingeschätzt (vgl. Anhang B: Implementation der Perspektiven im Metal Model). Hohe Steuern in der Primärproduktion internalisieren Umweltkosten und begünstigen die Sekundärproduktion über Recycling (Ayres, 1997). Es wird aber erwartet, dass die Ressourcenpreise durch rasche Fortschritte in der Sekundärproduktion schlussendlich nur moderat zunehmen, wobei auch Skalen- und Erfahrungskurveneffekte eine Rolle spielen dürften. Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999) nehmen ausserdem an, dass der egalitäre Managementstil beispielsweise über Technologietransfer das Maximum der IU-Kurve senken wird.

Die *unbesorgten Individualisten* verweisen darauf, dass die Metallreserven in der Erdkruste bei aktuellem Verbrauch noch sehr lange Zeit ausreichen. Bei Kupfer beispielsweise würden die geschätzten 1.5×10^{15} Tonnen erst in 160 Millionen Jahren erschöpft sein (Simon, 1980). Dazu kommt, dass Metalle durch ihre Verwendung nicht zerstört werden (Simon, 1980). Zwar erhöht das Bevölkerungswachstum die Nachfrage und damit den Abbau, aber auch das verfügbare Humankapital. Dieses entwickelt neue Technologien, welche die Extraktionskosten senken und damit den Preis der Ressourcen. Das Vertrauen der *Individualisten* in die Marktwirtschaft ist sehr gross. Die hohe Nachfrage und die steigenden Preise werden dazu führen, dass weitere Ressourcenvorkommen und Substitute gesucht werden und auch das Recycling vorangetrieben wird (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Damit halten sie am *Opportunitätskosten-Paradigma*³¹ fest, das eine schnellere Kostenreduktion durch technologischen Fortschritt und andere Entwicklungen annimmt, als

³⁰ Übersetzt aus dem Englischen: *fixed stock paradigm* (Tilton, 1996)

³¹ Übersetzt aus dem Englischen: *opportunity-cost paradigm*

dass die Preise durch die Erschöpfung der Ressource und die damit verbundenen Umwelt- und Energiekosten ansteigen (Barnett & Morse, 1963). Der Optimismus der individualistischen Weltanschauung wurde im Modell mit einer langsamen Erschöpfung, raschem technologischen Fortschritt, keinen zusätzlichen Ressourcensteuern und einer hohen Nachfrage durch den weiterhin ressourcenintensiven Lebensstil abgebildet (vgl. Anhang B: Implementation der Perspektiven im Metal Model) (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Die *Hierarchisten* wurden als Mittelweg zwischen den beiden oben genannten Perspektiven definiert (vgl. Anhang B: Implementation der Perspektiven im Metal Model). Etwas zurückhaltender sind ihre Erwartungen an den technologischen Fortschritt, wobei sie jedoch keinen Grund dafür sehen, dass dieser schneller voranschreiten wird als in der Vergangenheit. Aus Sicht der *Egalitaristen* und der *Individualisten* beziehen die *Hierarchisten* keine klare Position und versuchen sich dem Trend und der Mehrheit anzupassen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Alle drei Szenarien vertreten auch gemeinsame Annahmen, die wie folgt zusammengefasst werden können (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999):

- Es wird weltweit von einem moderaten bis starken Wirtschaftswachstum von 2.3-3% ausgegangen.
- Die Weltbevölkerung erreicht um 2060 mit 8.8 Milliarden Menschen ihr Maximum und stabilisiert sich dann bis 2100 auf ungefähr 7.1 Milliarden (De Vries, Bollen, Bouwman, Elzen, Janssen, & Kreilemann, 2000)
- Regionen mit aktuell tiefem Einkommen werden in Bezug auf ihre IU-Kurve eine ähnliche Entwicklung durchlaufen wie die Regionen mit aktuell hohem Einkommen. Da fast 80% der globalen Bevölkerung in einkommenschwachen Regionen leben, ist aus dem oben erwähnten Punkt auf eine stark steigende Nachfrage für Metalle zu schliessen.
- Alle Szenarien gehen von steigenden Energiekosten um den Faktor 4 aus³².

Obwohl die Annahme im letzten Punkt für alle Perspektiven gleich ist, wird sie unterschiedlich begründet (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999): In der Weltanschauung des *Egalitaristen* steigen die Energiepreise aufgrund von Steuern, durch

³² Von den Preisen im Jahr 1990 ausgehend (US\$ 4) würde dies Energiekosten von US\$ 15-16 pro GJ bedeuten (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

welche die Nachfrage künstlich reduziert wird, um dem Klimawandel entgegen zu wirken. Im Szenario des *Individualisten* hingegen sind die hohen Energiepreise auf die fortgeschrittene Erschöpfung der Ressourcen und die relativ höhere Verbrauchsrate zurückzuführen (Rotmans & De Vries, 1997).

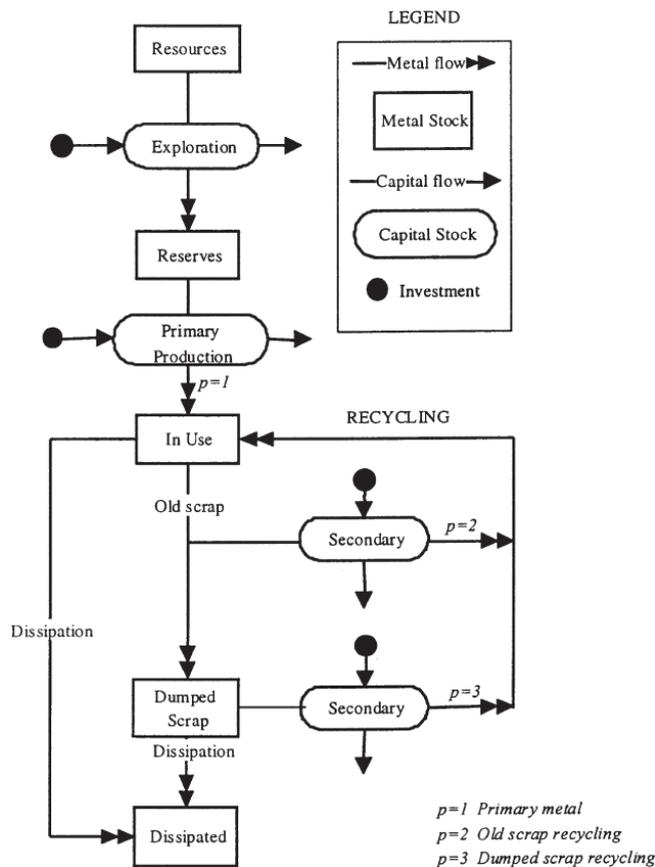
3.4.2 Metal Model – Struktur

Die zentrale Struktur des *Metal Models* basiert auf drei Teilen:

- Dem zuvor beschriebenen Zusammenspiel zwischen Angebot und Nachfrage unter Berücksichtigung der *IU-Hypothese* (vgl. Kapitel 3.4.1.1 Annahmen zu Angebot und Nachfrage),
- der Konkurrenzierung von Primär- und Sekundärproduktion (vgl. Abbildung 33),
- und dem *System Dynamics* Modell, das am Ende dieses Kapitels besprochen wird (vgl. Abbildung 34).

Die wichtigsten Einflussfaktoren zur Berechnung der regionalen Nachfrage sind die regionalen Werte für das BIP, der Preis der Metalle und die IU-Kurve, welche je nach Szenario mit verschiedenen Parameterwerten instanziiert wird. Dazu gehört auch ein Parameter, mit dem der Effekt des Technologietransfers simuliert werden kann, der aber exogen und in Abhängigkeit vom Szenario bestimmt werden muss. Die Nachfrage-Formel und weitere zentrale Gleichungen des *Metal Models* können im Anhang C: Zentrale Gleichungen des *Metal Models* im Detail betrachtet werden. Dazu gehört auch die Formel zur Bestimmung der Marktanteile von Primär- und Sekundärproduktion, die das Modell aus den relativen Preiselastizitäten der Produktionskosten berechnet (vgl. Gleichung 8, Anhang C: Zentrale Gleichungen des *Metal Models*).

Abbildung 33: Die drei Produktionsstufen im Metal Model

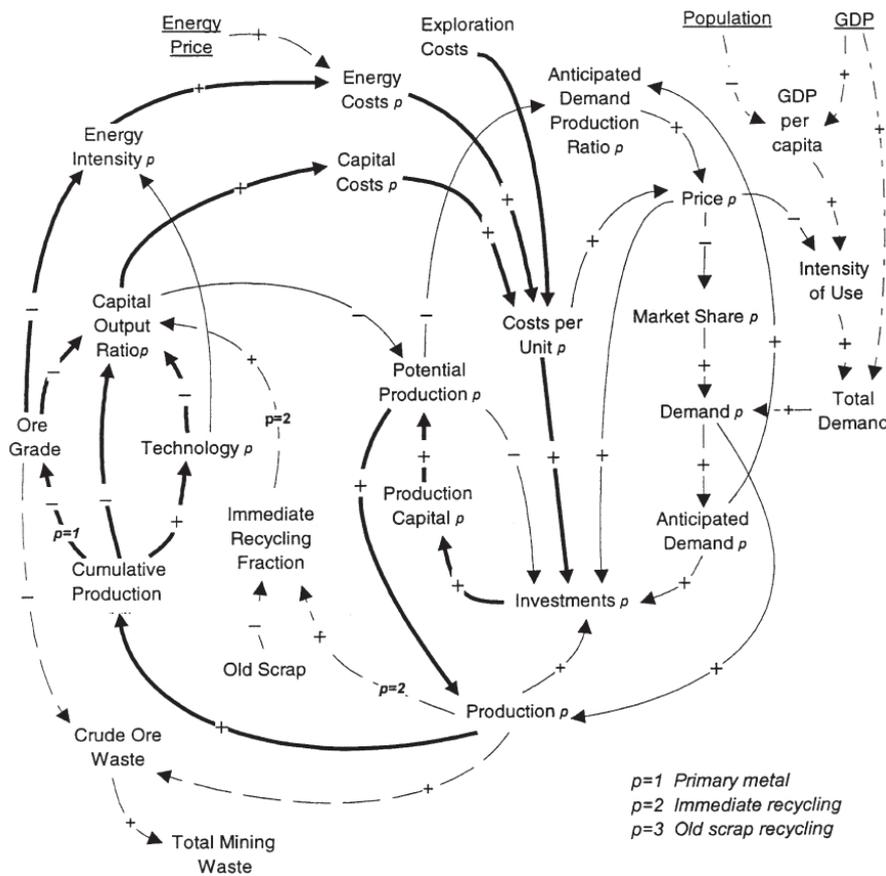


Quelle: (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999, S. 240)

Das Flussdiagramm in Abbildung 33 zeigt anschaulich die wichtigsten Materialflüsse der Primär- ($p=1$) und Sekundärproduktion ($p=2, p=3$) auf: Geologische Ressourcen werden durch deren Entdeckung zu Reserven. In der Primärproduktion werden die abgebauten Metallreserven verwendet um Konsumprodukte herzustellen. Langfristig betrachtet zersetzen sich die Metalle der Produkte langsam während oder nach deren Nutzung und setzen sich in der Umwelt ab. Bevor dieser Prozess abgeschlossen ist, können die Produkte aber auch in *Altmittelrecycling* ($p=2$) oder *Schrottreycling* ($p=3$) wiederverwertet werden, wie dies bereits in den Annahmen beschrieben wurde (vgl. Kapitel 3.4.1.2 Annahmen zu Recycling). Der totale Ressourcenverbrauch im Modell wird durch die Summe aus Primärproduktion und Sekundärproduktion definiert (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Die oben erwähnten Bestände und Flüsse werden im Modell durch verschiedene dynamische Zusammenhänge bestimmt. Die wichtigsten Abhängigkeiten sind im *System Dynamics* Modell in Abbildung 34 dargestellt (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Abbildung 34: System Dynamics des Metal Model



Quelle: (Van Vuuren, 1995, S. 241)

Die Primärproduktion im Modell (vgl. p=1 in Abbildung 34) vereint alle Prozesse vom Abbau über Schmelzen bis zum Raffinieren. Sie kann in zwei zentrale Kreisläufe aufgeteilt werden (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999): den langfristigen Kreislauf, in dem die Erschöpfung der Metalle im Zentrum steht und den kurzfristigen Kreislauf, der sich um Nachfrage, Investitionen, Produktion und Preise dreht.

Im langfristigen Kreislauf implementiert das Modell die stetige Erschöpfung der Ressourcen allein über die abnehmende Qualität der Metalle (vgl. *ore grade* in Abbildung 34) (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999): Der Qualitätsabfall wirkt sich wiederum auf den Energieaufwand und die Produktionskosten pro Outputseinheit aus. Die Produktionskosten setzen sich aus Energiekosten, Kapitalkosten und den Kosten zur Entdeckung neuer Reserven zusammen. Kapital- und Energiekosten werden durch den technologischen Fortschritt zur Entdeckung und Förderung neuer Reserven und durch die Qualität dieser Reserven beeinflusst. Die technologische Entwicklung ist einer der wichtigsten Faktoren, um den Anstieg der Produktions- und Energiekosten abzubremsen. Gemäss Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999) wurden im *System Dynamics* Modell auch Lerneffekte berücksichtigt, die sich positiv auf die Effizienz auswirken sollen. Sofern diese nicht in Form von

technologischem Fortschritt implementiert wurden, sind sie allerdings anhand der Abbildung 34 nicht nachvollziehbar.

Im kurzfristigen Kreislauf dreht sich Alles um die Investitionen in Primärproduktion, die Nachfrage und den daraus resultierenden Preis (vgl. Abbildung 34). Damit werden Produktionsengpässe, erwartete Profite und Investitionsverhalten in die Betrachtung einbezogen (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Die erwarteten Profite werden durch den Unterschied zwischen Preis und Produktionskosten ermittelt. Um das Verhalten von Investoren zu integrieren, wird eine zusätzliche Nachfragekurve berechnet, die auf der linearen Extrapolation der Nachfrage der letzten fünf Jahre beruht (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Die Parametrisierung des Simulationsmodells über die historischen Daten von 1900-1990 war gemäss Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999) mit Hilfe manueller Anpassungen durch exogene Faktoren sehr erfolgreich. Da das Modell für langfristige Simulationen erstellt wurde, bildet es kurzfristige Schocks wie Krisen nicht nach. Aufgrund dieser Basis wurden Langzeitberechnungen bis ins Jahr 2100 durchgeführt, die auch die charakteristische Nachfragekurve der IU-Hypothese aufweisen (vgl. Anhang D: Grafiken zu Resultaten des Metal Models).³³

³³ Da in dieser Arbeit die Betrachtung der Simulationsresultate ausgeklammert ist, wird wie auch schon in den vorhergehenden Modellen nicht näher auf diese eingegangen. Im Fall des *Metal Models*, wurden einige Grafiken zu den Resultaten dennoch im Anhang beigefügt, da diese besonders anschaulich die Konsequenz der *IU-Hypothese* aufzeigen (vgl. Anhang D: Grafiken zu Resultaten des Metal Models)

4 Diskussion

Die Diskussion dieser Arbeit beleuchtet in einem ersten Teil die Annahmen und identifizierten Paradigmen anhand verschiedener Sichten auf globale Simulationsmodelle. Der zweite Teil greift einzelne der gewonnenen Erkenntnisse auf, um sie im weiteren Kontext der Ressourcenökonomie zu betrachten. Im Kapitel 4.2.3 werden dazu auch Anregungen für weiterführende Arbeiten vorgebracht. Verweise auf die relevanten Stellen der vorangegangenen Kapitel ergänzen die Diskussion, um die gesammelten Informationen nicht detailliert zu wiederholen.

Als Hilfestellung zur Analyse wurde für den Vergleich unter den Modellen ein Schema aufgesetzt, das in Anhang E abgebildet ist. Um die Abhängigkeiten unter den ökonomischen Annahmen und Theorien vor Augen zu führen, wurde ebenfalls eine Tabelle erstellt, die in Anhang F angefügt ist. Die zweite Tabelle unterscheidet verschiedene Betrachtungsebenen und sollte ursprünglich einen Überblick zu den ökonomischen Theorien liefern. Diesem Anspruch konnte aber aufgrund der unübersichtlichen Verflechtungen der zahlreichen Annahmen nicht entsprochen werden. Beide erwähnten Tabellen sind für das Verständnis der folgenden Diskussion nicht notwendig.

4.1 Die Sichten auf ein Modell und ihre Paradigmen

In diesem Kapitel werden wichtige Annahmen und identifizierte Paradigmen in verschiedene Dimensionen beziehungsweise Sichten unterteilt und diskutiert. Wann eine Annahme oder eine Gruppe von Annahmen den Anspruch hat als Paradigma zu gelten, ist nicht klar definiert. Dieser Übergang ist vielmehr fließend, weshalb sich die Diskussion nicht nur auf ausgewiesene Paradigmen beschränkt. Die Aufteilung nach Sichten, wie in den Unterkapiteln umgesetzt, bündelt Themengebiete, in denen sich unterschiedliche Paradigmen oder zentrale Annahmen abgezeichnet haben.

4.1.1 Zentraler Modellierungsansatz

Das wohl prominenteste Unterscheidungsmerkmal globaler Modelle ist der verwendete Modellierungsansatz. Auch in der Literatur der globalen Modellierung haben sich die verschiedenen Ansätze als Paradigmen etabliert (Sokolowski & Banks, 2009; Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982; Chagchit & Mize, 1990). Die vielen Abhängigkeiten und Annahmen, die mit einem Modellierungsansatz verknüpft sind, spielen dabei mit Sicherheit eine wichtige Rolle: Mit der Wahl eines zentralen Modellierungsansatzes übernimmt ein Modellierer zwangsläufig diejenigen Annahmen und Überzeugungen in sein Projekt, die von den ursprünglichen Entwicklern des Ansatzes untrennbar mit diesem verknüpft wurden.

Natürlich gibt es gerade bei den ökonomischen Ansätzen viele Möglichkeiten, um Annahmen aufzuweichen oder gar zu ersetzen, an den Grundfesten lässt sich jedoch nichts ändern. Ein gutes Beispiel hierfür ist der neoklassische Ansatz, der verschiedene Modelle und Annahmen unter sich vereint: das neoklassische Wachstumsmodell von Solow (1956) nahm eine lineare Beziehung zwischen Inputfaktoren und Output an (vgl. 2.6.1.1 Das Solow-Modell). Die lineare Produktionsfunktion und damit diese Annahme lassen sich sehr einfach mit einer nicht linearen Cobb-Douglas-Produktionsfunktion ersetzen, die stattdessen die Elastizitäten der Inputfaktoren berücksichtigt (vgl. 2.6.1.1 Das Solow-Modell). Unter keinen Umständen veränderbar ist hingegen die neoklassische Grundannahme, dass alle Akteure ihren Nutzen maximieren. Diese unveränderlichen Elemente eines Modellierungsansatzes zwingen den Modellierer, die im Ansatz verankerte Weltanschauung entweder für sein Modell zu adaptieren oder einen anderen Ansatz zu wählen. Aus diesem Grund ist festzuhalten, dass die verschiedenen Modellierungsansätze als Paradigmen globaler Simulationsmodelle bezeichnet werden können.

Die zentralen Modellierungsansätze der analysierten Modelle sind:

- Der System-Dynamics-Ansatz
- Der neoklassische Ansatz mit Fokus auf allgemeine Gleichgewichtstheorie
- Die Input-Output-Analyse

Bei den meisten betrachteten globalen Modellen wäre es irreführend, diese eins zu eins und ohne Relativierung den Modellierungsansätzen zuzuteilen, da sie mehrere Modellierungsansätze in sich vereinen. Wird jedoch berücksichtigt, in welchen Ansätzen die Modelle ihre Schwerpunkte gesetzt haben, ist jeweils eine Tendenz in Richtung eines bestimmten Ansatzes erkennbar. Tabelle 2 zeigt anhand der Grösse der eingetragenen X wie stark der Einfluss verschiedener Ansätze auf die jeweiligen analysierten Modelle ist³⁴.

Tabelle 2: Modellierungsansätze und Hilfsmittel

		World3	SARUM	FUGI	Metal Model
Ansätze	System Dynamics	X	(x)	(x)	X
	Neoklassisches Gleichgewicht	-	X	(x)	X
	Input-Output	-	-	X	-
Hilfsmittel	CGE-Modelle	-	X	(x)	(x)
	IU-Hypothese	-	-	-	X
	Input-Output Tabelle	-	-	X	-

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982, S. 99)

³⁴ Legende: (x) = leichter Einfluss, X = grosser Einfluss, **X** = zentraler Modellierungsansatz

Gerade weil diese Tabelle die Zuordnung der Modelle zu den Ansätzen relativieren soll, sind neben den zentralen Modellierungsansätzen auch deren wichtigste ökonomische Hilfsmittel integriert. Einerseits bilden diese wichtige Mechanismen und Annahmen innerhalb des Modells ab, doch als eigenständiger Modellierungsansatz reichen sie zu wenig weit. Die Tabelle 2 liefert keineswegs eine vollständige Auflistung, weder zu den Ansätzen die in der globalen Modellierung bislang verwendet wurden, noch in Bezug auf die ökonomischen Hilfsmittel³⁵. Nachfolgend wird auf die Rolle der Ansätze unter Berücksichtigung ihrer Hilfsmittel in den analysierten globalen Modellen eingegangen.

4.1.1.1 Der System Dynamics-Ansatz in den analysierten Modellen

Der *System Dynamics*-Ansatz liefert die Grundstruktur in World3 dem GRM-Teilmodell von FUGI und dem Metal Model. SARUM wurde zwar von System Dynamics bei der Entwicklung einer eignen Systemdynamik beeinflusst, ist aber weder eine konsequente Umsetzung von System Dynamics, noch beruht darauf die Grundstruktur des Modells (vgl. Kapitel 3.2.2 SARUM – Struktur). In FUGI reduziert sich der Einsatz von System Dynamics auf die Abbildung der Ressourcenproblematik durch das GRM-Teilmodell. Dieses ist mit dem Rest von FUGI nur schwach gekoppelt und erhält von den anderen Teilmodellen lediglich Inputs. Verwunderlich ist die Tatsache, dass das GRM die anderen Module nicht ebenfalls mit Informationen zu den globalen Ressourcen versorgt (vgl. Kapitel 3.3.2.3 Global Resources Model). Daraus lässt sich schliessen, dass die zukünftigen Zustände der Ressourcen auch nicht in den Ergebnissen der anderen Teilmodelle berücksichtigt wurden. Eine solche Designentscheidung ist aus dem Blickwinkel der Ressourcenproblematik zu hinterfragen, denn entweder werden dadurch die anderen Teilmodelle neben GRM auf einmal uninteressant, oder sie bilden eine eigene, vielleicht redundante Repräsentation nicht erneuerbarer Ressourcen ab. Es konnten keine Hinweise zur eindeutigen Klärung dieser Frage gefunden werden. Die schwache Integration des GRM in FUGI könnte aber an der dezentralen Entwicklung der Teilmodelle in verschiedenen japanischen Universitäten liegen.

Ein grosser Vorteil von System Dynamics gegenüber anderen Modellierungsansätzen, ist das von Grund auf dynamische Verhalten. Als einziger Modellierungsansatz ist System Dynamics nicht auf Erweiterungen angewiesen, welche die Zustandsänderungen im Zeitverlauf an die

³⁵ Je nach Argumentation müssten auch Produktionsfunktionen, Optimierungsprobleme und Annahmen wie die vollständige Markttransparenz und viele mehr, als ökonomische Hilfsmittel aufgeführt werden. In diesem Kapitel geht es aber primär um die grundlegenden Ansätze, die den globalen Modellen ihre Struktur verleihen.

nächste Periode übergeben. Ein weiterer Vorzug und gleichzeitig die einzige unveränderliche Eigenschaft des Ansatzes ist der einfache Aufbau von System Dynamics Modellen anhand von Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Die von einem System Dynamics-Modell abhängige Systemanalyse gehört nicht zum Modell selbst und lässt sich problemlos weglassen (vgl. 2.5.2 Systemanalyse) Bedauerlicherweise machten sich dies die Entwickler der analysierten globalen System-Dynamics-Modelle rege zunutze und verzichteten darauf, die Ergebnisse einer Systemanalyse, wie sie im Rahmen dieser Arbeit erläutert wurde, zu dokumentieren.

Vergleicht man über alle Modelle hinweg, wo System Dynamics zum Zuge kommt, scheint es für die Beschreibung der Ressourcenproblematik bestens geeignet zu sein. Ein Nachteil liegt in der vagen quantitativen Gewichtung der Interaktionen zwischen den Variablen, die sich nur schwer aus den verfügbaren Daten ableiten lassen. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle Gewichtungen im Modell so exakt gesetzt wurden, dass es auch nach 100 zeitlichen Iterationen noch eine gute Annäherung an die Realität liefert, scheint sehr klein. Konkrete Bestände mit System Dynamics zu berechnen, deren Flussgrößen auf fehleranfälligen Schätzungen beruhen, scheint nicht ratsam zu sein. In diesen Situationen ist es sinnvoller System Dynamics zur Abschätzung von groben Tendenzen zu verwenden. Hier liegt das Potential des Ansatzes, sowie in der Aufdeckung von Wechselwirkungen und Kreisläufen, die das System ausgleichen oder instabil machen (vgl. 2.5.2 Systemanalyse).

Eher ungeeignet ist System Dynamics zur Simulation von ökonomischen Zusammenhängen, was bei der Betrachtung ressourcenökonomischer Themen genauso so wichtig ist wie eine adäquate Darstellung der Problematik sich erschöpfender Ressourcen. Die Modelle, Theorien und Ansätze der Wirtschaftswissenschaftler haben hierbei einen klaren Heimvorteil. Sie wurden schon mit dem Ziel entwickelt, ökonomische Themen wie Preismechanismen und Anreizstrukturen zu erklären und stützen sich dafür auf das umfangreiche Vorwissen der Wirtschaftswissenschaft.

4.1.1.2 Der neoklassische Ansatz in den analysierten Modellen

Der neoklassische Ansatz verkörpert in vieler Weise das genaue Gegenteil zu System Dynamics. Er kann nicht wie ein Werkzeug verwendet werden, das sich aus der Schublade ziehen lässt, um schnell und einfach ein System zu skizzieren, was mit System Dynamics durchaus möglich ist. Er vereint in sich mehrheitlich statische Verfahren, die über viele Jahrzehnte hinweg immer komplexer geworden sind, um der Realität immer näher zu rücken. Der neoklassische Ansatz ist durch seine vielen Theorien, Modelle und Annahmen, die je nach Bedarf und Anwendungsgebiet auf eine andere Weise kombiniert und angepasst werden,

nur schwer überschaubar (vgl. Kapitel 2.6.1 Neoklassische Theorie und ihre Annahmen). Wie ein Paradebeispiel für die Definition eines Paradigmas steht er für die Überzeugungen der Wirtschaftswissenschaftler und somit für eine streng ökonomische Herangehensweise bei der Entwicklung globaler Modelle. Es zeigt sich, dass das Verhalten von Wirtschaftssystemen zu einem grossen Teil als Maximierung oder Befriedigung von Bedürfnissen der individuellen Akteure interpretiert werden kann, indem beispielsweise Investoren angemessene Gewinne und Arbeitnehmer angemessene Löhne suchen. Es ist eine nützliche Vorgehensweise, ein Modell mit einfachen Spezifikationen zu beginnen, und diese erst dann zu verfeinern, trotzdem kann der neoklassische Ansatz kaum als Bottom-up-Ansatz bezeichnet werden, da diese einfachen Spezifikationen meist nicht bei den empirischen Daten einzelner Agenten beginnen, sondern auf Verallgemeinerungen basieren (vgl. Kapitel 2.6.1.1 Das Solow-Modell).

Etwas greifbarer wird der Ansatz durch die Wahl seiner Hilfsmittel, von denen die *Computable General Equilibrium* (CGE)-Modelle und die *Intensity of Use* (IU)-Hypothese im Laufe dieser Arbeit näher betrachtet wurden. In SARUM wird zwar nicht direkt auf CGE-Modelle verwiesen, aber die Umsetzung der allgemeinen Gleichgewichtstheorie bei der Preisbestimmung von Angebot und Nachfrage entspricht den Annahmen und der Herangehensweise von CGE-Modellen (vgl. Kapitel 2.6.3 Computergestützte allgemeine Gleichgewichtsmodelle, sowie Kapitel 3.2.2 SARUM – Struktur). In SARUM wurde das Gleichgewichtsmodell noch erweitert, indem Transaktionskosten beziehungsweise eine Verzögerung des Marktgleichgewichts integriert wurden. Diese Verzögerung dynamisiert SARUMs Gleichgewichtsmodell und macht sich die Anpassungsfähigkeit des neoklassischen Ansatzes zu nutze. Auch die konsequent umgesetzte Nutzenmaximierung der Akteure ist ein weiteres Indiz dafür, dass bei der Entwicklung von SARUM gezielt bewährte neoklassische Elemente ausgewählt und integriert wurden.

Die IU-Hypothese zeigt auf, wie die Intensität des Metallverbrauchs mit steigendem Pro-Kopf-Einkommen erst ansteigt und danach wieder zu sinken beginnt (vgl. 2.6.4 Intensity of Use Hypothese). Diese Erkenntnis wird auch durch verfügbare empirische Studien bekräftigt, die zeigen, dass der relative Verbrauch von Energie zur Produktion der wichtigen Metalle im langen Zeitvergleich fällt (Tilton, 1990; U.S. Energy Information Administration, 2000). Während dieser Trend wohl anhalten wird, ist es unmöglich, dessen Intensität über lange Fristen angesichts der vielen Einflussfaktoren vorauszusagen, auch weil einige dieser Determinanten nicht bekannt sind (Tilton, 2001). Wie viel der Verbrauchsreduktion durch

technologischen Fortschritt auf Substitutionen oder auf Ressourceneffizienz zurückzuführen ist, erklärt die Hypothese nicht.

Die im Metal Model verwendete IU-Hypothese ist ein gutes Beispiel für die Flexibilität des neoklassischen Ansatzes. Die IU-Kurve steht für den Verbrauch im Verhältnis zum BIP pro Kopf, wodurch sie wie die Nachfragekurve eine Mengen- und eine monetäre Dimension aufweist. Die Entwickler haben die disaggregierten Nachfragefunktionen verschiedener Regionen mit deren IU-Kurve ersetzt und einer aggregierten Angebotsfunktion gegenübergestellt. Im Metal Model findet diesbezüglich ein ähnlicher Gleichgewichtsprozess statt wie in SARUM, wobei die Dynamisierung des Modells nicht in der Verzögerung des allgemeinen Gleichgewichts liegt, sondern in den Iterationen des System Dynamics-Modells. Das Metal Model ist ein sehr interessanter Hybrid, der durch die erfolgreiche Kombination von System Dynamics und neoklassischen Elementen zeigt, dass die beiden Ansätze zur Modellierung ressourcenökonomischer Simulationen durchaus vereinbar sind, solange man deren Grenzen kennt. Diese elegante Lösung wäre für FUGI auch denkbar gewesen, was es auch einfacher gemacht hätte, die Resultate des GRM-Teilmodells in das restliche Modell einfließen zu lassen.

4.1.1.3 Der Input-Output-Ansatz in den analysierten Modellen

Die I/O-Tabelle, welche den Kern der I/O-Analyse ausmacht, vertritt im Grunde einen statischen Bottom-up-Ansatz (vgl. Kapitel 2.6.2.1 Die Input-Output-Tabelle). Die datenintensive empirische Basis ermöglicht detaillierte Rückschlüsse auf konkrete Regionen und Sektoren, wobei für jede Region eine eigene Tabelle angefertigt wird. Der Bilanzcharakter des I/O-Ansatzes hat seine Vor- und Nachteile. Einerseits wird damit eine vollständige Datenbasis vorausgesetzt, die empirische Analysen erlaubt, womit die Resultate an Glaubwürdigkeit gewinnen können. Andererseits birgt dies die Gefahr falscher Sicherheit, da alle verwendeten Werte auf den Herstellungskosten beruhen und somit die Realität nur zu einem Teil präzise nachbilden (vgl. Kapitel 2.6.2.1 Die Input-Output-Tabelle). Aspekte wie Knappheit und Preismechanismen, die für ressourcenökonomische Fragestellungen zentral sind, müssen als Erweiterungen entwickelt und simuliert werden.

FUGI ist das einzige der analysierten Modelle, das einen Input-Output-Ansatz verfolgt³⁶. Genau genommen beschränkt sich dieser auf das Teilmodell *Global Input-Output Model*

³⁶ Dies bedeutet aber nicht, dass es das einzige globale Modell ist, das unter dem Input-Output-Paradigma erstellt wurde. Auf FUGI folgten viele weitere Modelle diesem Ansatz. Siehe dazu (Siegmann, 1985)

(GIOM) (vgl. Kapitel 3.3.2.1 Global Input-Output Model). Dieses bildet das zentrale Modul von FUGI, welches vor allem im Austausch mit dem *Global Economic Model* (GEM) steht, das eher einem neoklassischen Ansatz folgt. Der entscheidende Beitrag des FUGI Projektes besteht darin, dass der zugrunde liegende Ansatz den grundsätzlich statischen und kurzfristigen Charakter von Input/Output-Analysen überwindet, indem dynamische makroökonomische Modellelemente eingearbeitet wurden.

4.1.1.4 Gemeinsamkeiten und die Wahl des richtigen Ansatzes

Abschliessend zu diesem Kapitel über die Modellierungsansatz-Paradigmen wird an dieser Stelle noch kurz auf deren Gemeinsamkeiten eingegangen:

I/O-Modelle und CGE-Modelle bieten die Möglichkeit, Auswirkungen auf viele verschiedene Sektoren zu simulieren. Dies ist ein wichtiger Aspekt, wenn untersucht wird, welche Bereiche einer Ökonomie durch gewisse *Strategien* am stärksten betroffen sind, oder welche Bereiche direkt oder indirekt einen hohen Ressourcenverbrauch aufweisen (Moffatt & Hanley, *Modelling sustainable development: systems dynamic and input-output approaches*, 2001).

Für die Dynamisierung innerhalb des Zeithorizonts der Simulation ist immer ein Gleichgewichtsprozess verantwortlich, wobei Veränderungen einer Variablen auch Auswirkungen auf das ganze restliche System zur Folge haben. Die ökonomischen Ansätze sind darauf ausgelegt, nach einer Veränderung wieder in einen stabilen Zustand zu finden, bis über dynamische Erweiterungen der nächste Shock auf das System den Gleichgewichtsprozess wieder in Gang setzt. Beim System Dynamics-Ansatz unterscheidet sich dieser dahingehend, dass Systemgleichgewichte immer nur als Schwankungen um den eigentlichen stabilen Zustand herum pendeln³⁷. Somit ist ein geschlossenes System, einmal in Gang gebracht, auf keine Inputs mehr angewiesen, um sich über die Zeit hinweg zu entwickeln.

Jeder könnte seinem bevorzugten Modellierungsansatz nachgehen, wäre da nicht die Tatsache, dass die darin angewendeten Methoden beides, die Inputs und die Outputs des Modelles beeinflussen. Der angewendete Modellierungsansatz gibt bereits vieles zur Modellstruktur, des Detaillierungsgrades der Inputs und den möglichen Ergebnissen vor (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Dass verschiedene Ansätze verschiedene

³⁷ Die einzige Ausnahme dazu besteht darin, dass ein System aus dem Gleichgewicht fallen kann und aufgrund einer Eskalation in eine Richtung abdriftet (vgl. Kapitel 2.5 System Dynamics Modelle und Systemanalyse). Diese Kettenreaktion ist aber untypisch für grosse natürliche Systeme (wie unsere Welt) (Odum, et al., 2000).

Ergebnisse liefern, ist bis zu einem gewissen Grad auch wünschenswert, da Modelle die Realität immer abstrahieren und ihre Ergebnisse dadurch relativiert werden. Je mehr Herangehensweisen und Perspektiven in die Ressourcenökonomik einfließen, desto eher liegt die zukünftige Entwicklung irgendwo dazwischen. Die Kunst bei der Auswahl eines Modellierungsansatzes ist es, sicher abschätzen zu können, ob die damit verbundene Methode und das zu bearbeitende Problem zusammen passen.

Bei der Auswahl eines Ansatzes geht es in erster Linie darum, sich der Prioritäten des Modellierungsprojekts klar zu werden. Steht die Ermittlung langfristiger Tendenzen nicht erneuerbarer Ressourcen im Mittelpunkt, ist System Dynamics eine sehr gute Wahl, solange die Detailtreue der Resultate grob sein darf. Ist hingegen eine möglichst präzise Bestimmung der Ressourcenpreise unter gegebenen Marktverhältnissen, wie zunehmender Knappheit oder Handelsbeschränkungen von Interesse, sollte ein neoklassischer Ansatz unter Anwendung einer Gleichgewichtstheorie gewählt werden.

4.1.2 Paradigmenwechsel im Laufe der Zeit

Seit den ersten globalen Modellen der frühen Siebzigerjahre hat die globale Modellierung sich weiterentwickelt. Die Anregungen für diese Entwicklung basierten oft auf der kritischen Betrachtung bestehender globaler Modelle, wobei diesbezüglich World3 eine zentrale Rolle angerechnet werden kann (vgl. Kapitel 3.1.3 Kritik an World3). Nachfolgend werden kurz einzelne Annahmen erwähnt, die sich auffallend unter den analysierten globalen Modellen verändert haben.

Seit World3 dahingehend heftig kritisiert wurde, die Welt als Ganzes zu betrachten, ist die *regionale Disaggregation* aus späteren globalen Modellen nicht mehr wegzudenken. Einerseits ist dies mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden, andererseits können damit die unterschiedlichen Ausgangslagen der Regionen berücksichtigt werden. Ein grosser Vorteil, der Disaggregation liegt in den Vergleichsmöglichkeiten zwischen Regionen, wodurch deren unterschiedliche Reaktionen auf dieselben Szenarien wertvolle Informationen über die regionale Tauglichkeit der getesteten Massnahmen liefern.

Dieselbe Tendenz ist auch auf die Disaggregation der betrachteten Wirtschaftssektoren übertragbar. Das Verständnis der intersektoralen Abhängigkeiten ist zusätzlich interessant, da diese durch ihre Vielzahl an Verknüpfungen meist sehr unübersichtlich und dadurch die Auswirkungen auf Schocks schwerer nachvollziehbar sind (vgl. Kapitel 2.6.2 Input-Output-Analyse).

Viele der globalen Modellierer haben sich die Kritik an World3 zu Herzen genommen, es sei zu schwach durch empirische Daten abgestützt und hätte wichtige ökonomische Mechanismen nicht berücksichtigt (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982; Chagchit & Mize, 1990). Um die Glaubwürdigkeit ihrer Modelle zu verbessern integrierten spätere Modelle zu denen auch SARUM und FUGI gehören Marktmechanismen und versuchten so ihre Annahmen so gut wie möglich mit Daten zu untermauern. Damit veränderten sich auch die zentralen Ansätze, wobei die beiden genannten Modelle Rollenbeispiele dafür sind, dass mehrere Ansätze gleichzeitig verfolgt werden können (vgl. Kapitel 4.1.1 Zentraler Modellierungsansatz) (Chagchit & Mize, 1990).

Der vermehrte Einsatz ökonomischer Ansätze brachte aber auch deren Nachteile mit sich. Statische und datenintensive Verfahren wie die Input-Output-Analyse mussten nicht nur dynamisiert werden, sondern auch der Pflege der in der Anzahl zugenommenen Gleichungen und Parameter musste nachgegangen werden. Ein zusätzlicher Preis für die gewonnene Detailgetreue und die Verwendung ökonomischer Verfahren wurde durch die Reduktion des simulierten Zeithorizonts bezahlt (Chagchit & Mize, 1990).

Auffallend ist auch, dass die globalen Modelle nach World3 bis in die Achtzigerjahre hinein Variablen wie Weltbevölkerung und Umweltverschmutzung nur selten berücksichtigten (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).³⁸ Die Aufmerksamkeit galt in dieser Zeit primär der globalen Wirtschaftssituation (Cole, 1987).

4.1.3 Das Auge des Betrachters

Genauso wie sich die Wahrnehmungen der Realität von Person zu Person im Auge des Betrachters unterscheiden, wirken sich die gemachten Erfahrungen auf das Denken und Handeln von Modellierern aus (Springer, 2005). Die in diesem Kapitel angesprochenen Paradigmen drehen sich um die Perspektiven und Sichtweisen der Beteiligten an globalen Modellen.

³⁸ Wie sich im Laufe der weitreichenden Recherche für diese Arbeit gezeigt hat, gab es diesbezüglich im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte eine Trendwende. Heute sind ressourcenökonomische globale Modelle um ein vielfaches seltener als die zahlreichen Simulationsmodelle zu Umwelt, Klimaveränderungen und landwirtschaftlicher Bodennutzung.

Ein offensichtliches Indiz für die Denkweise und die Paradigmen die Modellierer vertreten ist ihr fachlicher Hintergrund. Für die Modelle World3, SARUM und FUGI können die Fachgebiete der jeweiligen Kerngruppe aus Tabelle 3 entnommen werden³⁹:

Tabelle 3: Fachgebiete der Modellierer

	World3	SARUM	FUGI	Total
Engineering, computer science	1	2	5	8
Management science/systems development	2			2
Management science/operations research		1		1
Economics		1	2	3
Biological sciences	1	1		2
Physics	2	1		3

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982, S. 98)

Obwohl SARUM und FUGI sich für eine ökonomische Herangehensweise entschieden haben, sind die Ökonomen nicht sehr stark in diesen beiden Kerngruppen vertreten. Möglicherweise ist dies auf die schwache Resonanz der ersten globalen Modelle bei den Ökonomen zurück zu führen (vgl. 2.6 Ökonomische Modelle und Theorien). Die Überführung der Theorien, Annahmen und Strukturen in eine von Computern simulierbare Sprache und der damit verbundene Aufwand in den Siebzigern und frühen Achtzigerjahren könnte der Grund für die prominente Vertretung an Ingenieuren und Informatikern sein. Werden weitere Kerngruppen globaler Modelle in die Betrachtung mit einbezogen, dominieren Ingenieure/Informatiker, Ökonomen und Biologen ausgeglichen das Feld der globalen Modellierung (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Die Entwickler von FUGI, selbst Anwender ökonomischer Ansätze, beginnen ihre Arbeit mit der Befürchtung, dass es den Wirtschaftswissenschaften nicht gelingen könnte, die aufziehenden Probleme in den Griff zu bekommen (Kaya, Onishi, & Suzuki, 1977). Noch beunruhigender ist die Aussage, wenn man bedenkt, dass im Kern des FUGI-Teams die Ökonomen mit 2 von 7 Personen stärker vertreten waren als bei so manchen anderen Projekten zur Entwicklung globaler Modelle (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Die geäußerten Bedenken können also durchaus als informiert und glaubwürdig betrachtet werden.

Thomas Kuhn (1962) hat festgestellt, dass das Erlernen von wissenschaftlichen Disziplinen zu einem Grossteil ein Prozess der Sozialisierung an eine bestimmte Art der Weltanschauung ist.

³⁹ Zu den Entwicklern des Metal Models konnten keine Hintergrundinformationen gefunden werden.

Darin sind viele unbewusste und unerkannte Werturteile enthalten. Der *System Dynamics*-Modellierer sieht beispielsweise die Welt als eine Ansammlung von kausalen Abhängigkeiten und nicht linearen Rückkopplungseffekten (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Ein Ökonom hingegen wird die Welt in den Zusammenhängen der ökonomischen Theorien sehen und schätzt den Wert von klaren Prognosen auf kurze Frist. Es ist schwierig für beide Vertreter, einander ihre jeweiligen Standpunkte klar zu machen (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982).

Weitere Perspektiven die unterschieden werden können sind diejenigen auf das globale Modell selbst: langjährige Mitglieder von Gruppen zur Entwicklung globaler Modelle mögen an ganz anderen Aspekten interessiert sein, als die Auftraggeber und Anwender derselben. In den meisten Fällen sind diese beiden Gruppen nicht dieselben (Meadows, Richardson, & Bruckmann, 1982). Entscheidungsträger vertreten eine ganz andere Sicht auf ein Modell, durch ihren Fokus auf Anwendung und Szenarien. Peter Roberts (1984), ein erfahrener Modellierer und zugleich stark eingebunden in die Arbeit der politischen Entscheidungsträger, kennt beide Perspektiven und bezeichnete die Wissenschaftler als unfähig, gesetzgeberisch arbeitende Planer und hohe Beamte für ihre Bedenken zu gewinnen, weil sie wenig verständlich und überzeugend auftreten würden. Die Forscher müssten klarere Aussagen und mehr Überzeugungsfähigkeit entwickeln und im Gegenzug sollten sich die Planer und die Beamten stärker in den Prozess der Modellierung einbinden lassen (Siegmann, 1985). Weitere Anregungen zur Perspektive der Benutzer von globalen Modellen besprechen Steger, Dossani, Williams, & House (1982).

Abschliessend ist festzuhalten, dass für die Paradigmen der verschiedenen Gruppen meist soziologische Gründe wie Hintergrund, Ausbildung und Erfahrungen mit ihren eigenen Annahmen und Theorien verantwortlich sind. Zentral für Modellierer wie auch für Andere, die in der Gruppe arbeiten, ist die Fähigkeit andere Sichtweisen zu adaptieren, beziehungsweise die eigene weiter zu entwickeln.

4.1.4 Opportunitätskosten gegen die Erschöpfung der Reserven

Zu den langfristigen Entwicklungen der Ressourcenproblematik herrscht kein Konsens zwischen den Experten (Tilton, 2001). Wieso diese selbst nach Dekaden der Debatten noch immer so polarisiert denken, liegt an den unterschiedlichen Paradigmen, die sie vertreten (Tilton, 1996). Auf der einen Seite der laufenden Debatte stehen die *Pessimisten*, zumeist Ökologen, Ingenieure und andere Wissenschaftler, die fest davon überzeugt sind, dass die Erde längerfristig die Weltnachfrage nach Erdöl und anderen Mineralien nicht endlos tragen

kann. Diese Gruppe gab den Anstoss für das *Paradigma der Erschöpfung der Reserven* (vgl. Kapitel 3.4.1.3 Annahmen des Perspektiven-Ansatzes) (Tilton, 1996). Auf der anderen Seite stehen die *Optimisten*, zumeist Wirtschaftswissenschaftler, die mit derselben Überzeugung glauben, die Erde trage die Bedürfnisse der Menschheit auch langfristig, unter der Zuhilfenahme von Steuerungsmassnahmen, mittels Beeinflussung von Marktmechanismen, von staatlichen Massnahmen und dank Recycling und der Substitution knapper Ressourcen, ermöglicht durch neue Technologien (Tilton, 2001). Ihr *Opportunitätskosten-Paradigma* kann als direkte Reaktion auf die Meinung der Pessimisten verstanden werden.

Die drei vorgestellten Perspektiven des Metal Models werden zur Diskussion auf die zwei Menschenbilder von Tilton (1996) reduziert, welche schon für den *Egalitärsten (Pessimist)* und den *Individualisten (Optimist)* des Metal Models als Rollenmodelle verwendet wurden (vgl. Kapitel 3.4.1.3 Annahmen des Perspektiven-Ansatzes) (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999).

Die *Pessimisten* beurteilen die Ressourcen über den für die Menschen relevanten Zeithorizont mehrheitlich als nicht-erneuerbar. Damit ist das Angebot endlich, sodass es sich mit der Zeit erschöpfen muss. Darüber hinaus werde die Weltbevölkerung im Zuge einer verbesserten Ernährung und höherem pro-Kopf-Einkommen exponentiell steigen, wodurch sich die Ressourcen noch schneller erschöpfen.

Die *Optimisten* betrachten das Ressourcenproblem mit anderen Augen. Das Konzept der letztlich endlichen Ressourcen sei irrelevant, vor allem weil viele der Mineralien in der Erdkruste für Jahrmillionen, wenn nicht Milliarden reichen würden, wenn die aktuellen Verbrauchsdaten herangezogen werden. Insbesondere würden alle Metalle durch den Verbrauch nicht zerstört. Auch seien die erneuerbaren Rohstoffe in reichem Umfang vorhanden und die Substitution nicht erneuerbarer Ressourcen auf lange Frist sehr vielversprechend.

Es gibt abschliessend einen Punkt, dem eine wachsende Zahl von Pessimisten zustimmen, nämlich dass steigende Extraktionskosten und steigende Preise die Nachfrage lange vor der totalen Erschöpfung eines Rohstoffes einbrechen lässt (Tilton, 2001). Der Konsens wächst zwischen den Vertretern beider Meinungen, dass das *Paradigma der Erschöpfung der Reserven* bezogen auf das Aufspüren und die Gewinnung von mineralischen Ressourcen zugunsten des *Opportunitätskosten-Paradigmas* fallen gelassen werden sollte (Tilton, 2001).

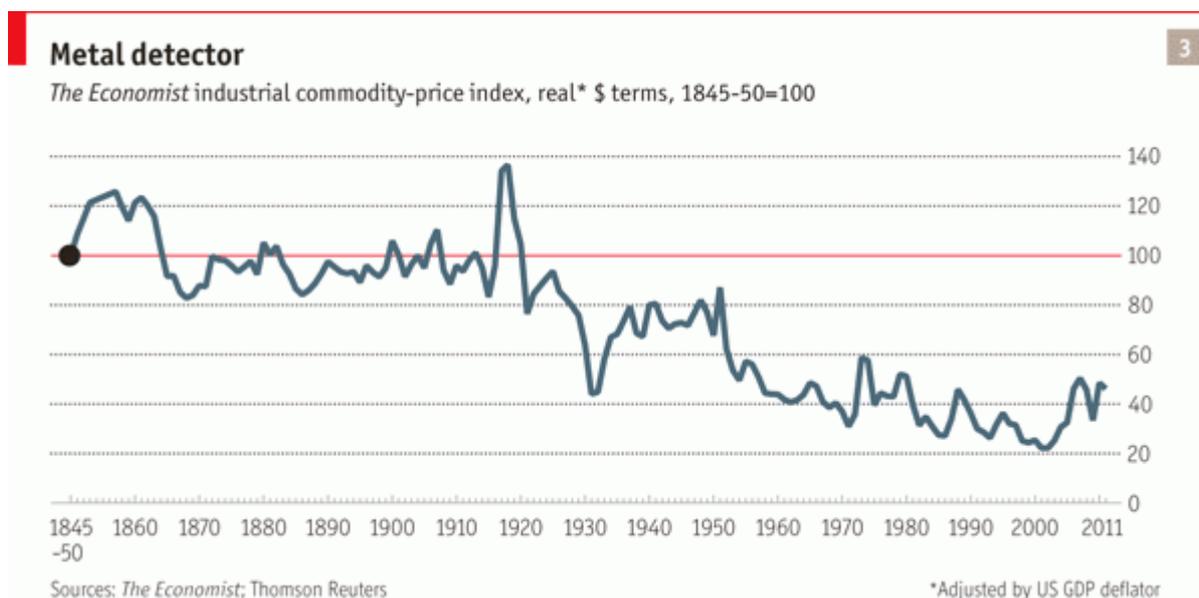
Das *Opportunitätskosten-Paradigma* schliesst steigende Knappheit keineswegs aus. Die zunehmende Erschöpfung eines Rohstoffs löst eine ganze Serie von gegenläufigen Kräften

aus. Höhere Preise stärken die Anreize zu kostensparenden Technologien beim Aufspüren von Reserven und in der Produktion. Sie fördern das Recycling, setzen Anreize für Einsparungen im Einsatz und vor allem fördern hohe Preise zunehmend schnellere Substitutionsprozesse (Tilton, 2001). Diese korrektiven Prozesse waren in der vergangenen Zeit immer wieder wirksam, sodass die Weltwirtschaft auf jede Phase der Knappheit immer wieder sehr widerstandskräftig reagierte (Tilton, 2001). Die im Metal Model berücksichtigte Degradierung der Qualität und die Abnahme der Konzentration von Erzen, je mehr davon abgebaut wurden, ist eine Möglichkeit das *Opportunitätskosten-Paradigma* in ein globales Modell einzubeziehen.

Die *Optimisten* rechnen damit, dass zusätzliche Menschen auch mehr kluge Köpfe und technologische Verbesserungen mit sich bringen. Julian Simon (1981) vertritt im Buch *“The Ultimate Resource”* gar die Ansicht, dass der menschliche Erfindungsgeist die einzige entscheidende Ressource der Menschheit sei, und letztlich nur diese das wirtschaftliche Wachstum und die Wohlfahrt der Menschheit begrenze.

Die *Pessimisten* sind sich der Gegenkräfte gegen die Erschöpfung von Ressourcen bewusst, betrachten indessen die Rohstoffverfügbarkeit als ein Wettrennen zwischen kostenreduzierenden neuen Technologien und dem kostenerhöhenden Effekt des Rohstoffverbrauchs (Tilton, 2001). Bis vor kurzem, konnte der kostenreduzierende Effekt dank neuer Technologien die Oberhand behalten. Doch im Zuge der Entwicklung vor allem Chinas ist eine klar gegenläufige Tendenz messbar (vgl. Abbildung 35) (The Economist, 2011).

Abbildung 35: Rohstoffpreisindex ohne Öl von 1845-2011



Quelle: (The Economist, 2011)

Die Grafik lässt erkennen, dass nur im letzten Jahrzehnt ein stattlicher Teil der realen Preisreduktion seit 1845 wieder weggeschmolzen ist. Die Entwicklung Chinas ist an dieser Trendumkehr mit Sicherheit nicht unbeteiligt. Schon 2010 lag Chinas Anteil am weltweiten Verbrauch von Eisenerz und Kohle bei fast 50%, dicht gefolgt von Blei, Zink, Aluminium und Kupfer, von denen rund 40% des weltweiten Verbrauchs nach China geht.

Neue Technologien werden indessen zunehmend auch als zweischneidiges Schwert betrachtet, weil die dadurch zunehmende Industrialisierung mit erheblichen Risiken behaftet ist (Tilton, 2001). Sie heben die Verfügbarkeit von Ressourcen, schaffen aber auch erhebliche neue Probleme, wie die globale Erwärmung oder Umweltverschmutzung. Tilton (2001) glaubt sogar, die Richtung und Nachhaltigkeit der technologischen Entwicklung sei damit unmöglich vorauszusehen und deshalb sei niemand in der Lage, die Verfügbarkeit von Ressourcen endgültig vorauszusagen.

Nichts desto trotz, was die erwähnte Kostenreduktion betrifft, so zählen *Optimisten* wie auch *Pessimisten* auf den technologischen Fortschritt, der die Verbesserung von Effizienz, Recycling und Substituten laufend vorantreiben soll. In Kapitel 4.2.2 wird die zentrale Rolle des technologischen Wandels auf Basis der hier erwähnten Paradigmen beziehungsweise Perspektiven näher untersucht.

4.2 Ausblick

Zum Abschluss dieser Masterarbeit werden ausgesuchte Erkenntnisse der vorangegangenen Analyse globaler Simulationsmodelle und ihrer Paradigmen in den weiteren Kontext der Ressourcenökonomie eingebettet. Im Kapitel 4.2.3 werden dazu auch Anregungen für weiterführende Arbeiten eingebracht.

4.2.1 Der Intergenerationskonflikt

Die Essenz des Intergenerationskonflikts kann als Allokationsproblem zwischen heutigen und zukünftigen Generationen bezeichnet werden. Das bedeutet, dass alles was heute von einer nicht erneuerbaren Ressource konsumiert wird, steht keiner zukünftigen Generation mehr zur Verfügung und vice versa. Die Ressourcenökonomien sind der Meinung, es müsse eine Lösung für den Intergenerationenkonflikt zu finden sein (Vogt, 1981). Es ist davon auszugehen, dass die problematischen Auswirkungen der zunehmenden Erschöpfung nicht erneuerbarer Ressourcen erst kommende Generationen in ihrem ganzen Ausmass treffen werden. Es liegt in der sozialen Verantwortung jeder Generation, das Problem anzugehen bis es beispielsweise in Form einer nachhaltigen Gesellschaft gelöst ist, die nur noch erneuerbare

Ressourcen konsumiert (Dunning, 2003; Henke, 2010). Falls es jemals so weit kommen wird, so ist der Weg dahin jedenfalls noch unabsehbar.

Es mag verwunderlich wirken, dass keines der analysierten Modelle die Thematik des Intergenerationskonflikts explizit aufgegriffen hat. Auf den zweiten Blick ist aber festzustellen, dass der Intergenerationskonflikt zu den normativen Fragestellungen gehört, die in der Struktur eines deskriptiven Modells fehl am Platz wären. Globale Modelle können Problematiken nicht in einer beliebigen Form integrieren: einige sind darauf ausgerichtet politische Handlungsalternativen zu testen. Bevor die Untersuchung des Intergenerationskonflikts auch in Szenarien globaler Modelle einfließen kann, müssen für die vorgeschlagenen Lösungen, wie beispielsweise die in der Einleitung erwähnte Green Golden Rule von Chichilnisky, Heal, & Beltratti (1995), zuerst konkrete Umsetzungen in der Form von politischen Eingriffen entwickelt und durchdacht werden.

Beschränkt man den Intergenerationskonflikt wie oben beschrieben nur auf nicht erneuerbare Ressourcen, so ist dieser nur unter den *Pessimisten* relevant. Die auf den technologischen Fortschritt bauenden *Optimisten* sehen Technologie und Substitution als Lösung und weisen damit die Existenz dieses Problems zurück (vgl. Kapitel 4.1.4 Opportunitätskosten gegen die Erschöpfung der Reserven).

4.2.2 Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts

Mit einer konkreten Antwort auf die brennende Frage zur Lösung der Ressourcenproblematik tun sich die Entwickler globaler Modelle und andere Forscher schwer. Wie im Laufe dieser Arbeit aufgezeigt werden konnte, schwankt diese Antwort überspitzt ausgedrückt zwischen einem pessimistischen „*Es gibt keine Lösung, wir sind alle verloren*“ und einem optimistischen „*Es gibt kein langfristiges Ressourcenproblem, das regelt der Markt*“ (Meadows D. H., Meadows, Randers, & Behrens III, 1972; Tilton, 1990). In diesem Kapitel werden kurz die wichtigsten Lösungsansätze erwähnt und bezüglich ihrer Nachhaltigkeit hinterfragt.

Die Erhöhung der Ressourceneffizienz durch zunehmenden technologischen Wandel, soll einerseits die in der Produktion benötigte Menge an nicht erneuerbaren Ressourcen verringern und andererseits die Explorationskosten bei der Erschließung und dem Abbau reduzieren. Damit wird es möglich, Ressourcen in geringeren Konzentrationen und tieferer Qualität nutzbar zu machen und als Reserven hinzu zu gewinnen. Da eine Effizienzerhöhung aber immer nur relativ stattfindet, kann auf diesem Wege keine Unabhängigkeit von nicht

erneuerbaren Ressourcen erreicht werden. Die Steigerung der Ressourceneffizienz durch technologischen Fortschritt kann damit nicht nachhaltig sein.

Ein interessanter Effekt wird über die *Intensity of Use*-Hypothese erklärt (vgl. Kapitel 2.6.4 Intensity of Use Hypothese). Kann der nationale Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen wie Metallen aufgrund eines wachsenden tertiären Wirtschaftssektors eines weit entwickelten Landes wieder abnehmen? Ein weit entwickeltes Land, dessen Wirtschaft vom tertiären Sektor dominiert wird und vor allem in diesem Bereich wächst, benötigt pro Kopf zwangsläufig weniger natürliche Ressourcen, da Landwirtschaft und Industrie damit pro Kopf schrumpfen. Der sinkende Teil der IU-Kurve trägt dieser Tendenz Rechnung (vgl. Abbildung 19/Abbildung 31). Die Gefahr der IU-Kurve ist, dass der Fokus nur auf dem abnehmendem Pro Kopf-Verbrauch liegt und vernachlässigt wird, dass die Weltbevölkerung exponentiell ansteigt. Die pro Kopf-Betrachtung blendet aus, dass der absolute Ressourcenverbrauch dennoch mit dem exponentiellen Wachstum der Bevölkerung zunimmt, wogegen der reduzierende Effekt weder gegenwärtig noch in absehbarer Zukunft dagegen halten kann (vgl. Kapitel 2.6.4 Intensity of Use Hypothese). Die IU-Hypothese liefert somit lediglich eine Erklärung für einen schwächeren langfristigen Anstieg des Ressourcenverbrauchs, was aber im Vergleich zum absoluten Wachstum des Verbrauchs zum heutigen Tage nicht schwer ins Gewicht fällt.

Ein essentieller Mangel in der Anwendung der IU-Hypothese ist, dass für den Metallverbrauch pro Land nur die Handelsstatistiken für Rohmetalle berücksichtigt werden können (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999). Der tatsächliche Verbrauch eines Landes in Form von Gütern, in denen Metalle verarbeitet wurden, fließt somit nicht in die IU-Kurve mit ein. Dieser Nachteil wiegt umso schwerer, weil Länder mit einem starken tertiären Sektor besonders viele Güter importieren, um ihre tiefe pro Kopf Produktion auszugleichen. Das gleichzeitig hohe Einkommen in weit entwickelten Ländern lässt zusätzlich einen tendenziell höheren Verbrauch an importierten Endprodukten aller Arten vermuten. Ein Vorschlag dazu, wie diese schwerwiegende Schwäche der IU-Hypothese durch die Hilfe der *Ökobilanzierung* beziehungsweise des *Life Cycle Assessments* (LCA) behoben werden könnte, wird in Kapitel 4.2.3.3 (Untersuchung der Intensity of Use-Hypothese) aufgezeigt.

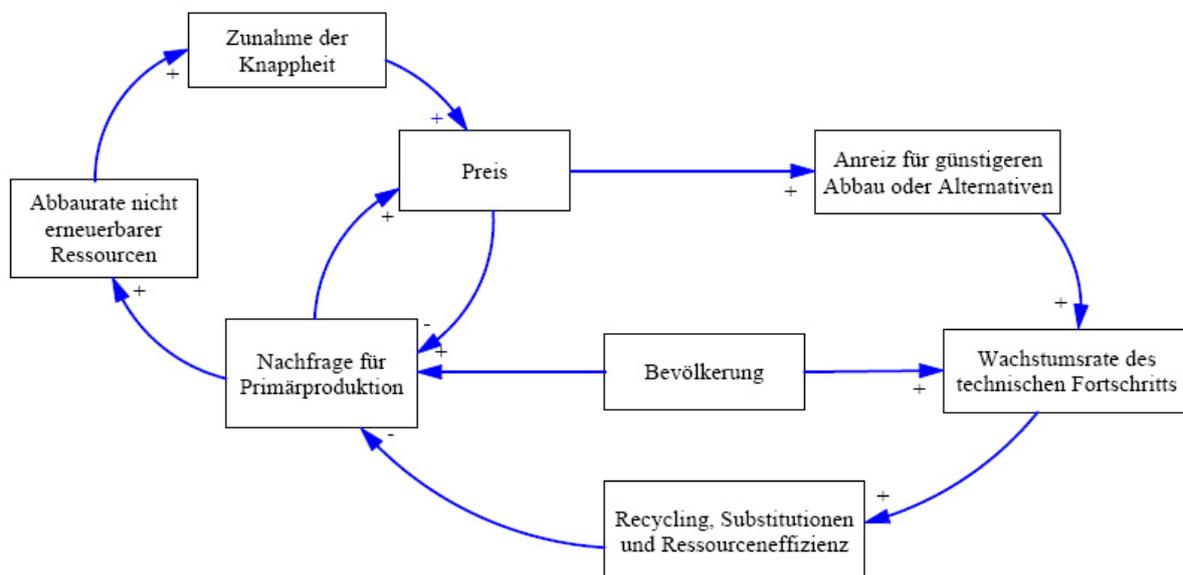
Doch die IU-Hypothese und die Zukunftsforscher stützen sich ja noch auf einen weiteren Faktor, die Substitution. Das Konzept der Substitution von nicht erneuerbaren Ressourcen mit erneuerbaren ist die einzige nachhaltige Lösung, die eine anhaltend steigende Konsumnachfrage befriedigen kann. Der wichtigste Einflussfaktor, welcher die Effizienz von

Substitutionen vorantreibt ist, wie an verschiedenen Stellen dieser Arbeit erwähnt, der technologische Wandel. Dabei soll die Forschung langfristig Substitute entwickeln, die Güter aus nicht erneuerbaren Gütern ersetzt.

Ein weiterer nachhaltiger Lösungsansatz ist die Rezyklierung von nicht erneuerbaren Ressourcen. Dieser weist aber rein konzeptionell im Unterschied zur Substitution eine Limitation auf: Recycling ist in absehbarer Zeit nicht in der Lage, genauso viel nutzbare Sekundärressourcen zu produzieren, wie die Menge des Materials, das seinerzeit als Primärressource gewonnen wurde. Die Effizienz liegt dabei unter 100%, wodurch mit jedem Recycling-Zyklus weniger nutzbare Ressourcen zur Verfügung stehen. Auch für diese Lösung nimmt der technologische Fortschritt eine zentrale Rolle ein, da nur mit neuen Methoden die Effizienz des Recyclings dem theoretischen Maximum von 100% angenähert werden kann.

Aus obigem lässt sich schliessen, dass beide nachhaltigen Lösungen Substitution und Recycling von der Wachstumsrate des technologischen Fortschritts abhängig sind, womit die abschliessende Lösung im technologischen Wandel selbst liegt. Abbildung 36 zeigt diese Argumentation anhand eines sehr einfach gehaltenen Ursache-Wirkungs-Diagramms (vgl. Kapitel 2.5.1 System Dynamics).

Abbildung 36: Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts - Teil 1



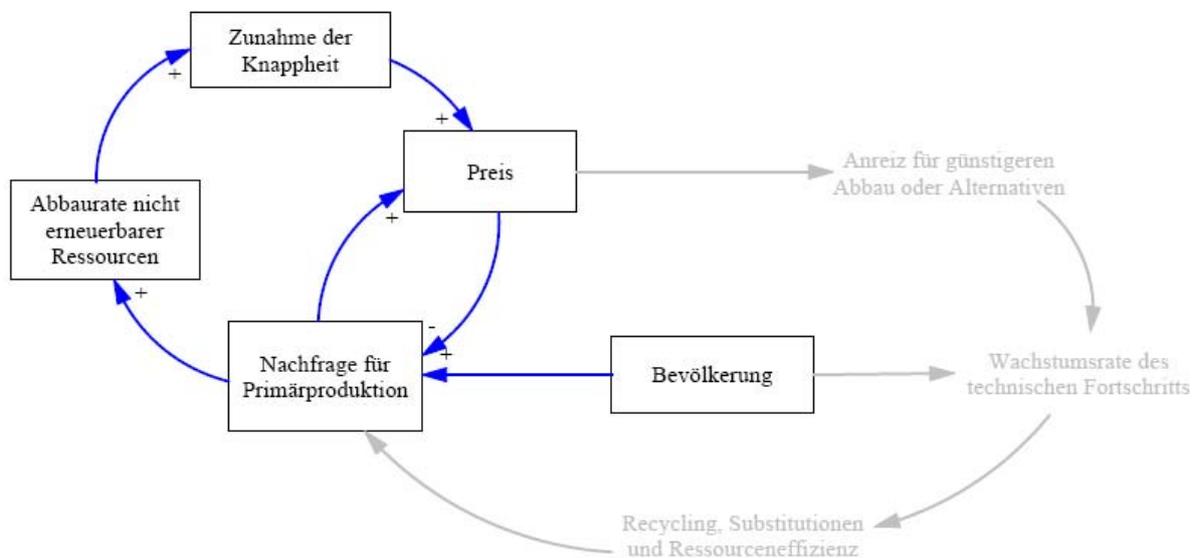
Quelle: Eigene Darstellung.

Dieses minimale System Dynamics-Modell weist zwei Gleichgewichtskreisläufe auf, die über die gemeinsamen Variablen Nachfrage und Preis verbunden sind (vgl. Abbildung 36). Der linke Kreislauf erhöht durch die zunehmende Knappheit nicht erneuerbarer Ressourcen deren Preis, wobei der rechte Kreislauf im Wesentlichen über technologischen Fortschritt die

Primärnachfrage reduziert, indem er Effekte wie Ressourceneffizienz, Recycling und Substitution antreibt. In Schwung gebracht wird das System durch das exponentielle Wachstum der Bevölkerung. Dieses erhöht nicht nur die Nachfrage, sondern ist auch im Sinne von Simons (1981) ultimativer Ressource Mensch, die für die positive Stimulation des technologischen Fortschritts massgebend sei.

Um die zentrale Rolle der Technologie unter diesen Abhängigkeiten hervorzuheben, zeigt Abbildung 37, wie das Diagramm ohne die Möglichkeiten des technologischen Fortschritts aussehen würde.

Abbildung 37: Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts - Teil 2



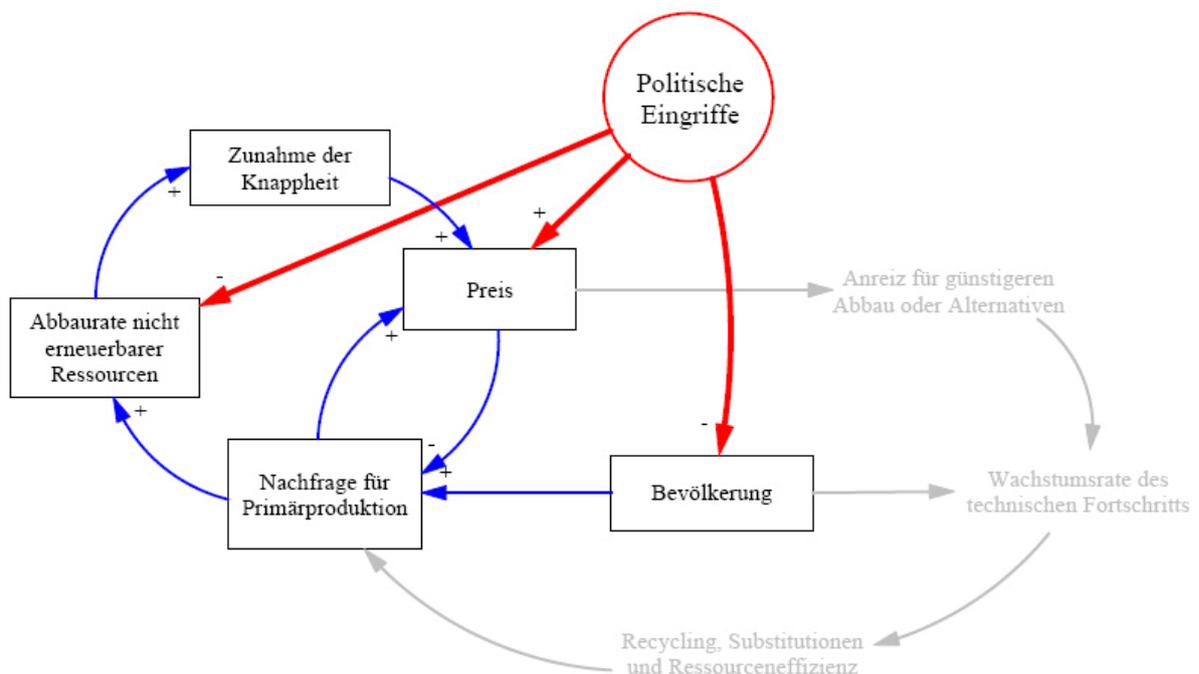
Quelle: Eigene Darstellung.

In diesem System explodiert der Preis von Primärressourcen unter der Annahme, dass Knappheit und Nachfrage diesen dominieren. Ein so rascher Anstieg des Preises führt zu einem ähnlichen Effekt wie die Erschöpfung nicht erneuerbarer Ressourcen, da diese für den Grossteil der Bevölkerung nicht mehr erschwinglich und damit nicht mehr nutzbar werden (vgl. Abbildung 37).

Unter den hier geschilderten Annahmen lässt sich schliessen, dass die Ressourcenproblematik einzig durch ein exponentielles Wachstum des technologischen Fortschritts gelöst werden kann, das allen preissteigernden Effekten so lange entgegen hält, bis Primärressourcen von einer nachhaltigen Gesellschaft nicht mehr nachgefragt werden.

Gemäss Tilton (2001) lässt sich die Entwicklung des technologischen Fortschritts nicht abschätzen. Aber einfach nur gutgläubig abzuwarten, dass der technologische Fortschritt das Problem löst, oder vielleicht doch nicht löst, liegt wohl kaum in der Natur des Menschen, sei er nun *Optimist* oder *Pessimist* (vgl. Kapitel 4.1.4 Opportunitätskosten gegen die Erschöpfung der Reserven). Wie kann also neben einer konsequenten Förderung der Forschung in den Materialwissenschaften das System weiter positiv beeinflusst werden? Globale Modellierer, die bereits politische Handlungsalternativen in Szenarioanalysen untersucht haben, würden darauf wohl „mit politischen Eingriffen“ antworten. Drei mögliche Einflussbereiche politischer Eingriffe sind in Abbildung 38 visualisiert.

Abbildung 38: Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts - Teil 3



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Beschränkung des Abbaus nicht erneuerbarer Ressourcen und die Besteuerung ressourcenintensiver Produkte können nur begrenzt eingesetzt werden, um den Preis nicht auf ein Niveau steigen zu lassen, auf welchem er der Erschöpfung der Ressource nahe kommt. Einen direkteren Weg die mit der Bevölkerung exponentiell ansteigende Nachfrage zu reduzieren, liegt in der Beeinflussung der Geburtenrate. Prominentes Beispiel für eine solch drastische Massnahme und den entsprechenden Fortschritt gab es in China, mit der Ein-Kind-Politik, die das Bevölkerungswachstum stark reduzierte (Central Intelligence Agency, 2011).

Mit oder ohne diese Alternativen, müssten die Effekte des technologischen Fortschritts zumindest genauso schnell ansteigen wie die Bevölkerung, um das Ressourcenproblem nachhaltig zu lösen. Es liegt in der Verantwortung von Ökonomen und

Politikwissenschaftlern, eine nachhaltige Entwicklung durch die Erarbeitung von Eingriffen zu unterstützen. Die Aufgabe der globalen Modellierer ist es, diese Eingriffe in Szenarien zu fassen und deren Wirksamkeit im Modell zu ermitteln. Dazu ist ein reger Austausch durch Kooperation zwischen den Forschergruppen notwendig.

4.2.3 Anregungen für weiterführende Arbeiten

In diesem Kapitel werden Anregungen zu weiterführenden Arbeiten festgehalten, die im Laufe der Auseinandersetzung mit dieser Masterarbeit aufgekommen sind.

4.2.3.1 Die rein ökonomische Seite der Ressourcenökonomik

Das Gebiet der Ressourcenökonomik bietet verschiedene interessante Ideen und Aspekte, die sich auf globale Modelle anwenden liessen. Von Heal (1993) existiert eine umfangreiche Sammlung an Publikationen, die allein die Ökonomie nicht erneuerbarer Ressourcen behandeln. Das Buch und viele andere Publikationen⁴⁰ in diesem Bereich richten sich an Wirtschaftswissenschaftler. Ein Ökonomiestudent höheren Semesters könnte mit Bestimmtheit interessante Anregungen zur Erweiterung von Simulationsmodellen liefern.

4.2.3.2 Der Nutzen der Nutzenmaximierung

Sobald ein Thema mit ökonomischen Ansätzen bearbeitet wird, drängen sich fast schon zwangsläufig grundlegende neoklassische Paradigmen auf. Dies lässt sich nicht vermeiden und ist an die Entscheidung geknüpft, das Projekt auf etablierte ökonomische Theorien zu stützen, was bei einer konsequenten Umsetzung durchaus zur Glaubwürdigkeit eines Projekts beitragen kann. Um dennoch die Paradigmen anderer Perspektiven einfließen zu lassen, ist es notwendig, sich an die Spielregeln der neoklassischen Weltanschauung anzupassen. Hierzu ein Beispiel anhand einer Anregung für weiterführende Arbeiten:

Wie im Laufe dieser Arbeit mehrmals erwähnt, ist eine wichtige Grundfeste der neoklassischen Theorie die Annahme der Nutzenmaximierung. Ist diese realitätsnah? Zu einem grossen Teil. Ist sie hilfreich bei der Modellierung von Verbrauchern und Unternehmen? Unbedingt! Aus dem Konsumverhalten von Verbrauchern und Unternehmen resultiert die Güternachfrage, welche für den Abbau nicht erneuerbarer Ressourcen verantwortlich ist. Der Nutzen muss sich aber nicht zwangsläufig nur aus Konsum zusammensetzen. Den Akteuren im Modell kann ein Nutzen für die Erhaltung der Umwelt beziehungsweise die Förderung der Nachhaltigkeit eingestanden werden, in der

⁴⁰ siehe auch (Martinet & Doyen, 2007) und (Scholl & Semmler, 2000)

Größenordnung ihrer Bereitschaft dies auch zu tun. Für die Umsetzung aus Sicht der Konsumenten sind verschiedene Möglichkeiten denkbar, wie beispielsweise die zusätzliche Zahlungsbereitschaft für Güter aus erneuerbaren Ressourcen oder die eingesparte Menge an nicht erneuerbaren Ressourcen durch den Verzicht auf vereinzelte ressourcenintensiver Konsumgüter. Am besten wäre es, diese Bereitschaft statistisch zu erheben, mit dem Risiko, dass dieser Effekt so tief ausfällt, dass er vernachlässigbar bleibt. Die berechtigte Hoffnung geht dahin, dass in weiter entwickelten Ländern mit einem hohen Konsum an industriellen beziehungsweise ressourcenintensiven Gütern die Bereitschaft, für Umweltschutz ein signifikant höheres Bedürfnis wird als im Weltdurchschnitt und dass diese Tendenz über die Zeit ansteigt. Ein solcher Zusammenhang würde die IU-Hypothese stützen, was zur Folge hätte, dass diese um einen neuen Einflussfaktor für den Umweltschutz-Nutzen zu erweitern wäre. Mit der richtigen Motivation oder Anreizstruktur⁴¹ könnte der Wert im Laufe der Zeit ansteigen und an Relevanz gewinnen.

4.2.3.3 *Untersuchung der Intensity of Use-Hypothese*

Die IU-Hypothese bietet einige Ansatzpunkte für weiterführende Fragen und Verbesserungen. Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999) weisen darauf hin, dass die Trends der IU-Kurve auf die unterliegenden Faktoren (Entwicklung der Wirtschaftssektoren, Substitution und technologischer Wandel) untersucht werden sollten. Dadurch könnte bestimmt werden, wie viel der Verbrauchsreduktion auf die Veränderung der Sektoren, die Substitution oder den technologischen Fortschritt zurückzuführen sind. Insbesondere die Substitutionseffekte durch Plastik und Aluminium empfehlen Van Vuuren, Strengers, & De Vries (1999) zu erfassen, wobei sie auf die Hilfestellung aus dem Bereich *Life Cycle Assessment* hinweisen.

Den wichtigsten Bedarf für eine weitführende Arbeit ergibt sich nach Erachten des Autors dieser Masterarbeit aus dem ernsthaften Mangel der IU-Hypothese: der fehlenden Berücksichtigung importierter und exportierter Konsumgüter in weiter entwickelten Ländern.

Um diese in Kapitel 4.2.2 (Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts) dargelegte Schwäche der IU-Hypothese zu beheben, wären unter Anderem detaillierte Informationen über die materielle Zusammensetzung der importierten und exportierten Güter notwendig.

⁴¹ Diese Anreizstruktur muss nicht monetärer Art sein. Soziale Rollenbilder im persönlichen oder öffentlichen Umfeld für Privatpersonen, oder Umweltschutzzertifikate zur Imagepflege für Unternehmen können gerade bei ethisch motivierten Themen wirkungsvoller sein, weil sie die intrinsische Motivation besser wahren (Herzberg, 1968).

Hierbei wäre es besonders hilfreich, auf die Informationen und Erfahrungen aus dem *Life Cycle Assessment* (LCA) zurückzugreifen, da in diesem Bereich wertvolles Wissen im Umgang und der Nachverfolgung von Produkten und ihrer Zusammensetzung vorhanden ist. Dabei könnten eventuell auch bereits gesammelte Informationen zu einzelnen Ländern aus LCA-Datenbanken (Ecoinvent Centre, 2011) hinzugezogen werden. Mit einem Pilotprojekt müsste abgeschätzt werden, ob Importe und Exporte mit überschaubarem Aufwand und in absehbarer Zeit auf ihre Materialinhalte untersucht werden können. Aussagekräftigere Resultate eines allfälligen Folgeprojekts könnten dazu beitragen, die *Intensity of Use*-Hypothese zu relativieren, oder für einzelne Länder gar zu widerlegen.

5 Fazit

Durch die Analyse der vier vorgestellten globalen Modelle konnten die zentrale Annahmen, Theorien und Strukturen, auf die sie sich stützen, ermittelt werden. Die gesammelten Informationen lassen sich in verschiedenen Sichten auf die Modelle untersuchen und bilden zusammen mit den Ansichten und Überzeugungen der Betrachter deren Paradigmen. Die Ansichten lassen sich auf eine optimistische und eine pessimistische Perspektive reduzieren, die unterschiedliche Überzeugungen in Bezug auf den Umgang und die Lösung der Ressourcenproblematik zeigen. Diese persönlichen Paradigmen der verschiedenen Gruppen lassen sich meist auf soziologische Hintergründe zurückführen. Als zentral wird die Fähigkeit erachtet, dass Wissenschaftler in den Forschergruppen andere Sichtweisen adaptieren, beziehungsweise die eigene weiter entwickeln

Durch Wahl eines Modellierungsansatzes werden immer auch dessen Grundannahmen übernommen. Bei der Auswahl eines Ansatzes geht es in erster Linie darum, sich der Prioritäten des Modellierungsprojekts klar zu werden. FUGI, SARUM und das Metal Model sind gute Beispiele dafür, dass es keinen einzig wahren Ansatz gibt. Sie alle vereinen erfolgreich verschiedene Ansätze und damit auch verschiedene Paradigmen. Das Metal Model ist ein besonders interessanter Hybrid, der durch die erfolgreiche Kombination von System Dynamics und neoklassischen Elementen zeigt, dass die beide Ansätze zur Modellierung ressourcenökonomischer Simulationen durchaus vereinbar sind, solange deren Grenzen berücksichtigt werden. Desweiteren demonstriert es, dass den unterschiedlichen Annahmen der *Optimisten* und der *Pessimisten* im selben Modell Rechnung getragen werden kann.

Im Laufe dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass für eine nachhaltige Lösung der Ressourcenproblematik der technologische Fortschritt eine Schlüsselrolle einnimmt. Die Herausforderung sich erschöpfender nicht erneuerbarer Ressourcen lässt sich wohl weder mit rein ökonomischen oder politischen Herangehensweisen noch durch Simulationen globaler Modelle abschliessend lösen. Wenn Meadows, Richardson, & Bruckmann Meadows (1982) schreiben, globale Probleme würden auch globale Lösungen benötigen, dann denken sie dabei in erster Linie an Simulationsmodelle. Der Ausdruck *globale Lösung* kann in diesem Zusammenhang erweitert werden, auf die interdisziplinäre Kooperation von Modellierern, Ökonomen, Ingenieuren, Materialforschern, Ökologen, Politikern und all den Anderen, die gemeinsam einen Beitrag zu einer nachhaltigeren Zukunft ermöglichen können. Sie sind in ihrem Bereich alle ein Teil des technologischen Wandels und damit auch alle ein Teil der globalen Lösung.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bevölkerungswachstum und die Grenze der ökologischen Tragfähigkeit.....	3
Abbildung 2: Ursache-Wirkungsdiagramm zum Thema: Verkaufs-, Qualitäts- und Produktionsprozess.....	11
Abbildung 3: Eskalation (eskalierender Kreislauf).....	13
Abbildung 4: Gleichgewichtsprozess (stabilisierender Kreislauf).....	14
Abbildung 5: Die Tragödie der Gemeingüter	15
Abbildung 6: Einflussmatrix anhand des Beispiels der Pharmaunternehmung	16
Abbildung 7: Einflussportfolio anhand des Beispiels der Pharmaunternehmung.....	17
Abbildung 8: Gleichgewichtspreis	20
Abbildung 9: Preiselastizität	22
Abbildung 10: Solow-Modell.....	24
Abbildung 11: OECD-Wachstum	25
Abbildung 12: Produktionsfunktionen unter unterschiedlichen Technologielevels	26
Abbildung 13: Wachstumssprung durch technologische Neuerung	26
Abbildung 14: Produktionskonto einer Unternehmung	28
Abbildung 15: Zwischenschritt zur Input-Output-Tabelle - in Sektoren aggregierte Produktionskonten.....	29
Abbildung 16: Struktur der Input-Output-Tabelle	30
Abbildung 17: Veränderungen in der Angebotskurve	36
Abbildung 18: Stahlverbrauchsintensität in Abhängigkeit des Pro-Kopf Einkommens in Südkorea 1970-2004	38
Abbildung 19: Intensity of Use Hypothese	39
Abbildung 20: Wirklicher und geschätzter Verlauf der Verbrauchsintensität.....	40
Abbildung 21: Möglichkeiten der Annäherung einer Bevölkerung an die ökologische Tragfähigkeit	45
Abbildung 22: World3 Standard Run.....	46
Abbildung 23: World3 Equilibrium Run	47
Abbildung 24: Energiebedarf für die Herstellung von Metallen aus Erzen.....	49
Abbildung 25: Rückkopplungsschleifen, die das Wachstum von Bevölkerung und Kapital bestimmen	50

Abbildung 26: Rückkopplungsschleife für Bevölkerung, Kapital, Landwirtschaft und Umweltverschmutzung.....	51
Abbildung 27: Rückkopplungsschleife für Bevölkerung, Kapital, Dienstleistungen und Ressourcen	52
Abbildung 28: Negative Rückkopplungsschleifen.....	53
Abbildung 29: Dynamik SARUM.....	60
Abbildung 30: Sektorenverbindungen SARUM	61
Abbildung 31: IU-Kurve für Eisen und MedAlloy	71
Abbildung 32: Perspektiven Metal Model	74
Abbildung 33: Die drei Produktionsstufen im Metal Model.....	78
Abbildung 34: System Dynamics des Metal Model.....	79
Abbildung 35: Rohstoffpreisindex ohne Öl von 1845-2011	93
Abbildung 36: Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts - Teil 1	97
Abbildung 37: Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts - Teil 2	98
Abbildung 38: Die zentrale Rolle des technologischen Fortschritts - Teil 3	99
Abbildung 39: Input-Output-Tabelle 2006 Deutschland, Teil 1	XX
Abbildung 40: Input-Output-Tabelle 2006 Deutschland, Teil 2	XXI
Abbildung 41: Implementation der Perspektiven im Metal Model.....	XXII
Abbildung 42: Zentrale Gleichungen des Metal Model.....	XXIII
Abbildung 43: Nachfrage	XXIV
Abbildung 44: Anteil Sekundärproduktion (Recycling)	XXIV
Abbildung 45: Durchschnittlicher Metallpreis.....	XXIV
Abbildung 46: Qualität/Reinheitsgrad	XXV
Abbildung 47: Durchschnittlicher Energieaufwand.....	XXV

Literaturverzeichnis

Adriaanse, A., Bingezu, S., Hammond, A., Moriguchi, Y., Rodenburg, E., Rogich, D., et al. (1997). *Resource Flows, The material basis fo industrial economies*. Wahsington DC: World Resources Institute.

Altenpohl, D. G. (1980). *Materials in World Perspective. Assessment of Resources, Technologies and Trends for Key Materials Industries*. Berlin: Springer.

Asboth, T. (1984). World Problems and their Perceptions. A detailed outline of the state of the art. (*Prepared for submission to UNESCO by IIASA*) .

Autonome Hochschule in der Deutschsprachigen Gemeinschaft. (2006). *APA (American Psychological Association)*. Abgerufen am März 2009 von <http://www.ahs-dg.be/PortalData/13/Resources/downloads/apanormen.pdf>

Ayres, R. U. (1997). Metal recycling: economic and environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling* , 21, S. 145–173.

Ayres, R. U., & Ayres, L. W. (1996). *Industrial Ecology—Towards Closing the Material Cycle*. Cheltenham: Elgar.

Barnett, H. J., & Morse, C. (1963). *Scarcity and Growth*. Baltimore: Johns Hopkins.

Barro, R. J., & Sala-i-Martin, X. (2004). *Economic Growth*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.

Beckwith, B. P. (1986). *Ideas About The Future: A History of Futurism*. Palo Alto: Calif.

Beckwith, B. P. (1967). *The Next 500 Years: Scientific Prediction of Major Social Trends*. New York: xposition Press.

Beckwith, B. P. (1972). The predicament of man? A reply. *futurist* , 6 (2), S. 62-64.

Bell, J. A., & Bell, J. F. (1980). System Dynamics and Scientific Method. In J. Randers, *Elements of the System Dynamics Method* (S. 3-22). Cambridge, Massachusetts, and London, England: The MIT Press.

Benardini, O., & Galli, R. (1993). Dematerialisation: long-term trends in the intensity of use of materials and energy. *Futures* , 25, S. 431–447.

Bernardini, O., & Galli, R. (1993). Dematerialisation: long-term trends in the intensity of use of materials and energy. *Futures* , 25, S. 431-447.

Blanchard, O., & Illing, G. (2004). *Makroökonomie*. München: Pearson Studium.

Boyd, R., & Uri, N. D. (1991). Boyd, R., Uri, N.D., 1991. The cost of improving the quality of the environment. *Journal of Policy Modelling* , 13 (1), S. 115-140.

Bremer, S. A. (1977). *Simulated Worlds: A Computer Model of National Decision Making*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.

Bryant, W. D. (2010). *General wquilibrium: theory and evidence*. Hackensack, N.J.: World Scientific.

Central Intelligence Agency. (2011). *The World Factbook: Total fertility rate*. Abgerufen am 02. 10 2011 von Central Intelligence Agency: <https://cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2127.html?countryName=China&countryCode=ch®ionCode=eas&#ch>

Chagchit, C., & Mize, J. H. (1990). World dynamics revisited: a realistic world model simulation. *Socio-Economic Planning Sciences* , 24 (1), S. 11-25.

Chapman, P. F., & Roberts, F. (1983). *Metal Resources and Energy*. London: Butterworths.

Chichilnisky, G., Heal, G., & Beltratti, A. (1995). The Green Golden Rule. *Economics Letters* , 49, S. 175-179.

Clark, J. A., McLean, J. M., & Shepherd, P. (1977). The general-purpose model: observations on SARUM 76. *Futures* , 9 (3), S. 229-233.

Clark, J., & Cole, S. (1975). *Global Simulation Models*. New York: Wiley & Sons.

Cole, H. S., Freeman, C., Jahoda, M., & Pravitt, K. L. (1973). *Models of Doom: A Critique of the Limirs to Growth*. New York: Universe Book.

Cole, S. (1987). Global models: a review of recent developments. *Futures* , 9 (4), S. 403-430.

Dasgupta, P., & Heal, G. (1974). The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies (Symposium on the economics of exhaustible resources)* , 41, S. 3-28.

De Vries, H. J. (1989). Effects of resource assessments on optimal depletion estimates. *Resources Policy* .

De Vries, H. J., Bollen, J., Bouwman, L., Elzen, M., Janssen, M., & Kreilemann, E. (2000). Greenhouse-gas emissions in an equity, environment and service-oriented world. An IMAGE-

based scenario for the next century. *Accepted for publication in Technological Forecasting and Social Change* .

Devarajan, S., & Fisher, A. C. (1981). Hotelling's "Economics of Exhaustible Resources": Fifty Years Later. *Journal of Economic Literature* , 19 (1), S. 65-73.

Duchin, F., & Lange, G. M. (1994). *The Future of the Environment. Ecological Economics and Technology Change*. New York: Oxford University Press.

Dunning, J. H. (2003). *Making Globalization Good - The Moral Challenges of Global Capitalism*. New York: Oxford University Press.

Ecoinvent Centre. (2011). *Home*. Abgerufen am 24. 08 2011 von Ecoinvent:
<http://www.ecoinvent.org/home/>

Faucheux, S., Pearce, D., & Proops, J. (1997). *Models of Sustainable Development*. Cheltenham: Edward Elgar.

Fehr, H. (1999). *Welfare Effects of Dynamics Tax Reforms*. Tübingen: Mohr-Siebeck.

Ford, A. (2010). *Modeling the environment* (2 Ausg.). Washington: Island Press.

Forrester, J. (1961). *Industrial dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.

Forrester, J. (1973). Toward global equilibrium. In D. H. Meadows, D. L. Meadows, & e. D. Meadows (Hrsg.), *Counterintuitive behavior of social systems*. Waltham, MA: Pegasus Communications.

Forrester, J. (1968). *Urban dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.

Forrester, J. W. (1971). *World Dynamics*. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press.

Forrester, T. (1988). *The Materials Revolution - Super Conductors, New Materials and the Japanese Challenge*. Cambridge Mass.: MIT Press.

Frank, R. H. (2006). *Microeconomics and Behavior*. New York: McGraw Hill - Higher Education.

Friedman, M. (1997). "John Maynard Keynes". *Quarterly Journal of Economics* , 83 (2).

Friends of the Earth. (1998). *Uit balans. Sociale en ecologische gevolgen van de Nederlandse consumptie van metalen*. Amsterdam: Milieudefensie.

- Gaitan, B., Tol, R. S., & Yetkiner, H. I. (2004). *The Hotelling's Rule Revisited in a Dynamic General Equilibrium Model*. Abgerufen am 6. August 2011 von Institute of Economic Studies: http://www.ioes.hi.is/events/DEGIT_IX/Papers/Yetkiner_Gaitan.pdf
- Giljum, S., Lutz, C., & Jungnitz, A. (2008). The Global Resource Accounting Model (GRAM): A methodological concept paper. *SERI Studies* , 8.
- Gomez, P., & Probst, G. (1999). *Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens: vernetzt denken, unternehmerisch handeln, persönlich überzeugen*. Bern: P. Haupt.
- Gordon, R. B., Koopmans, T. C., Nordhaus, W. D., & Skinner, W. D. (1987). *Towards a New Iron Age? Quantitative Modelling of Resource Exhaustion*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Gordon, R. L. (1967). A Reinterpretation of the Pure Theory of Exhaustion. *The Journal of Political Economy* , 75, S. 274-286.
- Gray, L. C. (1914). Rent under the Assumption of Exhaustibility. *Quarterly Journal of Economics* , 28, S. 66-89.
- Grossmann, A., Wolter, M. I., & Stocker, A. (2011). *Das integrierte Umwelt-Energie-Wirtschaft-Modell*. Abgerufen am 7. Juni 2011 von Energiemodell.at: http://www.energiemodell.at/wp-content/uploads/2010/02/KONSENS_WP2_Modelldokumentation_e3.at_.pdf
- Guetzkow, H., & Valadez, J. J. (1981). *Simulated International Processes: Theories and Research in Global Modelling*. Beverly Hills / London: Sage.
- Guzmán, J. I., Nishiyama, T., & Tilton, J. E. (2005). Trends in the intensity of copper use in Japan since 1960. *Resources Policy* , 30 (1), S. 21-27.
- Hampicke, U. (1992). *Natur in der ökonomischen Theorie: Teil 4, Ökologische Ökonomie: Individuum und Natur in der Neoklassik*. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Hardin, G. (13. Dezember 1968). The Tragedy of the Commons. *Science* (162), S. 1243-1248.
- Heal, G. (1993). *The economics of exhaustible resources*. Aldershot: Elgar.
- Helfrich, S. (2009). *Wem gehört die Welt? Zur Wiederentdeckung der Gemeingüter*. München: oekom verlag.
- Henke, E. (2010). *Zukunftsfähige Wirtschaft: ökonomischer Paradigmenwechsel als Weg in eine nachhaltige Gesellschaft*. Marburg: Tectum.

- Herfindahl, O. C. (1955). Some Fundamentals of Mineral Economics. *Land Economics* , 31, S. 131-138.
- Herrera, A. M. (1976a). *Catastrophe or New Society: A Latin American World Model*. Ottawa: International Development Research Centre.
- Herrera, A. (1976b). The Latin American World Model. In G. Bruckmann, *Proceedings of the Second IIASA Conference on Global Modeling*. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Herzberg, F. (1968). One more time: how do you motivate employees? *Harvard Business Review* , 46 (1), S. 53-62.
- Hickman, B. G. (1983). *Global International Economic Models*. North Holland, Amsterdam, New York, Oxford: Selected papers from an IIASA Conference.
- Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *The Journal of Political Economy* , 39 (2), S. 137-175.
- Hughes, B. B. (2001). Choices in the face of uncertainty: the international futures (IFs) model. *Futures* , 33, S. 55-62.
- Hughes, B. (1980). *International Futures (IFs): A User Manual*. Mimeo: Case Western University.
- Hürlimann, M. (2009). *Dealing with real-world complexity: limits, enhancements and new approaches for policy makers*. Wiesbaden: Gabler.
- IIIS. (1996). *Steel Statistical Yearbook 1995*. Brussels: International Institute for Iron and Steel.
- Jones, T. E. (1980). *Options for the Future - A Comparative Analysis of Policy-Oriented Forecasts*. New York: Praeger.
- Jorgenson, D. W., & Wilcoxon, P. J. (1990). Intertemporal general equilibrium modelling of US environmental regulation. *Journal of Policy Modelling* , S. 714-744.
- Kahn, H., Brown, W., & Martel, L. (1976). *The Next 200 Years*. New York: Morrow.
- Katzner, D. W. (1989). *The Walrasian vision of the microeconomy: an elementary exposition of the structure of modern general equilibrium theory*. Ann Arbor, Mich.: University of Michigan Press.

- Kaya, Y., Onishi, A., & Suzuki, Y. (1977). Report on project FUGI - future of global interdependence. *Fifth Global Modeling Conference*. Laxenburg: IIASA.
- Keynes, J. M. (1935). *The General Theory of Employment, Interest, and Money*. New York: Harcourt Brace.
- Klein Goldewijk, C. G., & Baattjes, J. J. (1997). *A Hundred Year (1890–1990) Database for Intergrated Environmental Assessments*. Bilthoven: National Institute of Public Health and the Environment.
- Krautkraemer, J. A. (1998). Nonrenewable Resource Scarcity. *Journal of Economic Literature* , 36 (4), S. 2065-2107.
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kydland, F. E., & Prescott, E. G. (1995). The Econometrics of the General Equilibrium Approach to Business Cycles. In K. D. Hoover, *Macroeconomics: Developments, tension and Prospects*. Boston, MA: Kluwer.
- Leontief, W. (1963). *Die multiregionale Input-Output-Analyse; Die multiregionale Input-Output-Analyse im Rahmen der EWG: Statistisch-methodologische Probleme*. Köln: Westdeutscher Verlag.
- Leontief, W. (1966). *Input-Output economics*. New York: Oxford University Press.
- Leontief, W., Carter, A., & Petri, P. (1977). *The Future of the World Economy, a United Nations Study*. New York: Oxford University Press.
- Levitt, T. (1983). The globalization of markets. *Harvard Business Review* , 61 (3), S. 92.
- Linnemann, H., De Hoogh, J., Keyzer, M., & Van Heemst, H. (1979). *MOIRA - Model of International Relations in Agriculture*. Amsterdam: North-Holland Publication Company.
- Lucas, R. E. (1988). On the Mechanics of Economic Development. *Journal of Monetary Economics* , 22 (1), S. 3-42.
- Lutz, C., Meyer, B., & Wolter, M. I. (2005). *The GINFORS model. Report prepared for 3rd MOSUS meeting*. Laxenburg: IIASA.
- Ma, Y., Hanley, N., & Wilson, M. (1997). Using extended input–output approaches to model environmental policy impact. (*Submitted for publication*) .

Maddison, A. (1989). *The World Economy in the 20th Century*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

Malcik, W., & Schachermeier, R. (2009). Ed. Hölzel: *Wirtschaftskundliches Seminar - folge 7: Preisbildung, Teil 1*. Abgerufen am 7. August 2011 von Verlag Ed. Hölzel: http://www.hoelzel.at/cms1/einzelnews.html?&cHash=a52ad80ad2&tx_ttnews%5Btt_news%5D=24

Malenbaum, W. (1995). *World Demand for Raw Materials in 1985 and 2000*. New York: McGraw-Hill.

Mannaerts, H. (1997). *Stream-economic activity and physical flows in an open economy*. The Hague: Current Research. Central Planning Bureau.

Martinet, V., & Doyen, L. (2007). Sustainability of an economy with an exhaustible resource: A viable control approach. *Resource and Energy Economics*, 29, S. 17-39.

McCandless, G. (2008). *The ABCs of RBCs: an introduction to dynamic macroeconomic models*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., & Randers, J. (1992). *Beyond the Limits*. Post Mills, Vermont: Chelsea Green Publishing.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., & Randers, J. (1993). *Die neuen Grenzen des Wachstums - die Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunftschancen*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth - A report for the Club of Rome's project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books/Potomac Associates.

Meadows, D. H., Richardson, J., & Bruckmann, G. (1982). *Groping in the dark: The first decade of global modelling*. Chichester a.o.: Wiley.

Meadows, D. L. (1974). *Dynamics of Growth in a Finite World*. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press.

Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (2006). *Grenzen des Wachstums - Das 30-Jahre-Update*. Stuttgart: Hirzel Verlag.

Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (2004). *Limits to Growth - The 30-Year Update*. White River Junction, Vermont: Ghelsea Green Publishing Company.

- Mesarovic, M. D., & Pestel, E. (1974). *Mankind at the Turning Point*. New York: Dutton.
- Moffatt, I. (1983). Some methodological and epistemological problems involved in system dynamics modelling. In D. F. Anderson, & J. D. Sterman, *Morecroft*. Boston: Dynamics Conference Proceedings, MIT.
- Moffatt, I., & Hanley, N. (2001). Modelling sustainable development: systems dynamic and input-output approaches. *Environmental Modelling & Software* , 16, S. 545-557.
- Moll, H. C. (1989). Aanbod van en vraag naar metalen; ontwikkelingen, implicaties en relaties; een methodische assessment omtrent substitutie van materialen. *Institute for Energy and Environment (IVEM). Working report no. 9. University of Groningen, NL* .
- Muller, F. (1979). *Energy and Environment in Inter-regional Input–Output Models*. Boston, Mass.: Martinus Nijhoff.
- Nutt, O. W. (1983). Entering the 21st century: The global 2000 report to the president: The council on environmental quality, U.S. Department of State. *Long Range Planning* , 16 (2), S. 120-124.
- Nyhus, D. E. (1991). The INFORUM International System. *Economic Systems Research* , 3 (1), S. 55-64.
- Obstfeld, M., & Rogoff, K. (1996). *Foundations of international macroeconomics*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Odum, H. T., Wojcik, W., Pritchard, L., Ton, S., Delfino, J. J., Wojcik, M., et al. (2000). *Heavy Metals in the Environment: Using Wetlands for Their Removal*. Boca Raton, London, New York, Washington DC: Lewis Publishers.
- OECD Interfutures Project. (1979). *Facing the Future: Mastering the Probable and Managing the Unpredictable*. Paris: OECD.
- Olsson, A. (2008). *Trends and Developments in the Intensity of Steel Use*. Lulea University of Technology: Bachelor thesis in economics.
- Onishi, A. (2005). Futures of global interdependence (FUGI) global modeling system: Integrated global model for sustainable development. *Journal of Policy Modeling* , 27 (1), S. 101-135.
- Onishi, A. (2003b). Methodologies of Modeling and Simulations of Global Systems, Integrated Global Models of Sustainable Development. In A. Onishi, *Encyclopaedia of Life Support System*. Oxford, UK: EOLLS Publisher, <http://www.eolls.net>.

- Onishi, A. (2003a). The FUGI Global Model 9.0 M200, Integrated Global Models of Sustainable Development. In A. Onishi, *UNESCO Encyclopaedia of Life Support System*. Oxford, UK: EOLLS Publisher, <http://www.eolls.net>.
- Onishi, A. (1981). The FUGI Macroeconomic Model and World Trade to 1990. *Futures*, S. 99-110.
- OTA (Office of Technology Assessment; Congress of the United States). (1982). *Global Models, World Futures, and Public Policy - A Critique*. Washington, D.C.: US GPO.
- Page, N. J., & Creasey, S. C. (1975). Ore Grade, Metal Production, and Energy. *Journal of Research (U.S. Geological Survey)*, 3 (1), S. 9-13.
- Page, W. (1973). The non-renewable resources sub-system. In H. S. Cole, C. Freeman, M. Jahonda, & K. L. Pavitt, *Models of Doom: A Critique of the Limits to Growth* (S. 33-42). New York: Universe Book.
- Peichl, a. (2005). *Die Evaluation von Steuerreformen durch Simulationsmodelle*. Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut Universität zu Köln.
- Peterson, F. M. (1977). The Exploitation of Extractive Resources A Survey. *The Economic Journal*, 87, S. 681-721.
- Radulescu, D. M. (2007). *CGE Models and Capital Income Tax Reforms: The Case of a Dual Income Tax for Germany*. Berlin: Springer.
- Ramsey, F. (1928). A mathematical theory of savings. *Economic Journal*, 38, S. 543-59.
- Richardson, G. P. (1991). *Feedback Thought in Social Science and Systems Theory*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press.
- Richardson, J. M. (1984). Global Modelling in the 1980s. In J. Richardson, *Models of Reality - Shaping Thoughts and Action* (S. 125). Lomond Books in co-operation with Unesco.
- Richardson, J. M. (1978). Global modelling: 1. The models. *Futures*, 10 (5), S. 386-404.
- Roberts, M. C. (1996). Metal use and the world economy. *Resources Policy*, 22, S. 183-196.
- Roberts, P. (1984). Two Cheers for Modeling. *Futures*, S. 214-216.
- Romer, D. (2006). *Advanced Macroeconomics*. Boston: McGraw-Hill.
- Romer, P. M. (1986). Increasing Returns and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy*, 94 (5), S. 1002-1037.

- Rotmans, J., & De Vries, B. (1997). *Perspectives on Global Change—The TARGETS Approach*. Cambridge : Cambridge University Press.
- SARU Staff. (1977). *SARUM-76 - Global Modeling Project - Research Report No. 19*. London: UK Department of Environment and Transport.
- Schenker-Wicki, A. (2009). *Performance Management: Systemanalyse*. Zürich: (Vorlesungsunterlagen, Lehrstuhl für Performance Management, Universität Zürich, Herbstsemester 2009).
- Scholl, A., & Semmler, W. (2000). Sustainable Economic Growth and Exhaustible Resources: A Model and Estimation for the U.S. *Discrete dynamics in nature and society* , 7 (2), S. 79.
- Senge, P. M. (2006). *Die fünfte Disziplin: Kunst und Praxis der lernenden Organisation*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Shoven, J. B., & Whalley, J. (1972). A General Equilibrium Calculation of the Effects of Differential Taxation of Income from Capital in the U.S. *Journal of Public Economics* , 1, S. 281-321.
- Siegmann, H. (1985). *World Modeling*. Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin.
- Simon, J. L. (1980). Resources, population, environment: an oversupply of false bad news. *Nature* , 208, S. 1431–1437.
- Simon, J. L. (1981). *The ultimate resource*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Smith, A. (1776). *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. London: W. Strahan and T. Cadell.
- Sokolowski, J. A., & Banks, C. M. (2009). *Modeling and simulation for analyzing global events*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics* , 70, S. 65-94.
- Solow, R. M. (1974). Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies (Symposium on the economics of exhaustible resources)* , 41, S. 29-45.
- Solow, R. M. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics* , 39, S. 312-320.

Springer, A. (2005). *Wie das Selbst das Denken steuert: der Einfluss independenten und interdependenten Selbstwissens auf die Anwendung exekutiver Funktionen zur Steuerung und Kontrolle der Informationsverarbeitung*. Hamburg: Kovac.

Steger, W., Dossani, N., Williams, T., & House, P. (1982). Global Modeling - A User Perspective. In G. Bruckmann, *Environmental Aspects in Global Modeling* (S. 15-32). Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis.

Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.

Stiglitz, J. E. (1974a). Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths. *Review of Economic Studies (Symposium on the economics of exhaustible resources)*, 41, S. 123-137.

Stiglitz, J. E. (1974b). Growth with Exhaustible Natural Resources: The Competitive Economy. *Review of Economic Studies (Symposium on the economics of exhaustible resources)*, 41, S. 139-152.

Stiglitz, J. E. (1976). Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources. *American Economic Review*, 66 (4), S. 655-661.

Suzuki, Y., & Shoji, K. (1977). Global metallic resource model. In Y. Kaya, *Future of Global Interdependence (FUGI project)*. Laxenburg: Presented at the 5th IIASA Global Modelling Conference.

Suzuki, Y., Shoji, K., & Murakami, T. (1978). Global metallic resource model. *1978 Summer Computer Conference, July 1978*, (S. 710-717).

Sweeney, J. L. (1977). Economics of Depletable Resources: Market Forces and Intertemporal Bias. *Review of Economic Studies*, 44, S. 125-142.

The Economist. (2011). *Commodities: Crowded out*. Abgerufen am 24. 09 2011 von The Economist: <http://www.economist.com/node/21528986>

Thompson, M., Ellis, R., & Wildavski, A. (1990). *Thompson, M., Ellis, R., Wildavsky, A., 1990. Cultural Theory*. Boulder: Westview Press.

Tilton, J. E. (1986). Atrophy in metal demand. *Materials and Society*, 10, S. 241-243.

Tilton, J. E. (2001). *Depletion and the Long-run Availability of Mineral Commodities*. Golden, Colorado: Mining, Minerals and Sustainable Development.

- Tilton, J. E. (1996). Exhaustible resources and sustainable development. *Resources Policy*, 22, S. 91-97.
- Tilton, J. E. (1990). *World Metal Demand - Resources for the Future*. Washington, DC.
- U.S. Energy Information Administration. (2000). *Annual Energy Outlook 2001 With Projections to 2020*. Washington, DC: Government Printing Office.
- Universität de Fribourg / Universität Freiburg. (2008). *Zitate, Quellenverweise und Literaturverzeichnisse gemäss APA-Richtlinien*. Abgerufen am 8. August 2011 von Unifr.ch - Zitierweisen: http://www.unifr.ch/pedg/bild_foto_logo/zitierweisen.pdf
- Van Steenbergen, B. (1994). Global modelling in the 1990s : A critical evaluation of a new wave. *Futures*, 26 (1), S. 44-56.
- Van Vuuren, D. P. (1995). *Modelling metal resource use - documentation, calibration and extension of the TARGETS minerals model*. Department of Science, Technology and Society. Utrecht University, The Netherlands.
- Van Vuuren, D. P., Strengers, B. J., & De Vries, H. M. (1999). Long-term perspectives on world metal use - a system-dynamics model. *Resources Policy*, 25, S. 239-255.
- Vogt, W. (1981). *Zur intertemporal wohlfahrtsoptimalen Nutzung knapper natürlicher Ressourcen*. Tübingen: Mohr.
- Weinstein, M. C., & Zeckhauser, R. J. (1975). The Optimal Consumption of Depletable Natural Resources. *The Quarterly Journal of Economics*, 89 (3), S. 371-392.
- Weintraub, R. E. (2002). *Neoclassical Economics. The Concise Encyclopedias Of Economics*. Abgerufen am 6. August 2011 von <http://www.econlib.org/library/Enc1/NeoclassicalEconomics.html>
- Weizsacker, E., Lovins, A. B., & Lovins, L. H. (1998). *Factor Four: Doubling Wealth, Halving Resource Use*. London: Earthscan.
- Weston, R. F., & Ruth, M. (1997). A dynamic, hierarchical approach to understanding and managing natural economic systems. *Ecological Economics*, 21, S. 1-17.
- Wiener, N. (1968). *Kybernetik*. Reinbek: Rowohlt.
- Winker, P. (2010). Input-Output Analyse. In P. Winker, *Empirische Wirtschaftsforschung und Ökonometrie* (S. 103-125). Giessen: Springer.

WWF/IUCN. (1999). *Metals from the forest. Mining and forest degradation*. Gland: World Wide Fund for Nature/World Conservation Union.

Anhang

Anhang A: Input-Output-Tabelle für Deutschland 2006

Abbildung 39: Input-Output-Tabelle 2006 Deutschland, Teil 1

Lfd. Nr.	Verwendung	Input der Produktions							
		Erzg. v. Produkten d. Land- u. Forstwirtschaft, Fischerei	Gew. v. Bergbau-erz., Steinen u. Erden, Erzg. v. Energie und Gew. v. Wasser	H.v. Mineral-ölerz., chemischen Erz., Glas, Verarb. v. Steinen u. Erden	Erzg.u. Bearb. von Metallen	H.v. Maschinen, Fahrzeugen, DV-Geräten, e.-techn. Geräten	H.v. Textilien, Bekleidung, Leder, Holz, Papier, Sekundärrohstoffen u.Ä.	H.v. Nahrungsmitteln, Getränken und Tabakwaren	Bauarbeiten
Aufkommen		1	2	3	4	5	6	7	8
Gütergruppen ¹ (Zeile 1 bis Zeile 12):									
1	Erzeugn. d. Land- u. Forstwirtschaft, Fischerei	8,2	0,0	0,5	-	-	2,4	29,7	-
2	Bergbauerzeugnisse, Steine und Erden, Energie und Wasser	1,4	31,4	55,8	12,6	5,8	4,9	3,8	2,0
3	Mineralölerz., chem. Erz., Glas, Keramik, bearb. Steine und Erden	4,9	2,5	129,2	10,4	33,6	12,5	5,0	30,1
4	Metalle	0,5	1,6	4,2	117,7	76,5	2,8	1,1	12,2
5	Maschinen, Fahrzeuge, DV-Geräte, e-techn. Geräte	1,4	5,7	4,6	5,2	259,2	2,2	1,4	13,8
6	Textilien, Bekl., Leder und Lederwaren, Erz. des Holz-, Papiergewerbes, Sekundärrohstoffe u.Ä.	0,3	0,4	4,8	3,1	9,3	50,7	3,2	6,4
7	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse	3,6	-	1,5	-	-	0,1	30,8	0,0
8	Bauarbeiten	0,3	1,4	0,9	0,8	1,3	0,6	0,4	8,6
9	Handelsleistungen, Verkehrs- und Nachrichtenübermittlungs-DL, Gaststätten-DL	3,3	5,8	18,6	14,5	43,2	15,2	16,1	13,0
10	DL der Kreditinst. u. Vers., DL des Wohnungsw. und sonst. unternehmensbezogene DL	7,0	10,4	35,2	13,0	69,4	18,3	18,4	31,4
11	DL des Gesundheits-, Veterinär- u. Sozialwesens, Erziehungs- u. Unterrichts-DL, Entsorg.leist.	0,7	0,6	3,3	1,3	1,7	1,7	0,9	0,8
12	DL d. öffentl. Verwaltung, Verteid., Sozialvers., DL von Kirchen, Kultur-DL u.Ä., DL priv. Haushalte	0,3	5,0	1,9	0,8	3,8	3,7	1,1	1,7
13	Vorleist. d. Produktionsbereiche (Sp. 1-12) bzw. letzte Verwendung von Gütern (Sp. 14-19)	31,9	64,9	260,5	179,2	503,9	114,5	112,2	120,1
14	Gütersteuern abzüglich Gütersubv.	1,1	1,7	1,9	1,4	3,5	1,6	2,2	1,5
15	Vorleist. d. Produktionsber. (Sp. 1-12) bzw. letzte Verw. von Gütern (Sp. 14-19) zu Anschaffungspreisen	33,0	66,6	262,5	180,6	507,4	116,1	114,3	121,6
16	Arbeitnehmerentgelt im Inland	7,8	19,4	48,8	40,4	155,8	33,6	21,6	51,3
17	Sonstige Produktionsabgaben abzüglich sonstige Subventionen	-7,3	-0,1	2,2	1,6	3,0	1,3	0,6	1,0
18	Abschreibungen	7,2	13,1	12,3	7,2	24,3	8,4	5,3	4,6
19	Nettobetriebsüberschuss	9,5	13,8	14,0	15,7	25,2	13,7	5,8	25,3
20	Bruttowertschöpfung	17,2	46,2	77,3	65,0	208,4	56,9	33,2	82,3
21	Produktionswert	50,2	112,7	339,8	245,6	715,7	173,0	147,6	203,8
23	Importe gleichart. Güter zu cif-Preisen	21,0	80,5	145,0	86,0	307,4	86,5	39,1	3,0
25	Ges. Aufkommen an Gütern	71,2	193,2	484,8	331,6	1023,2	259,5	186,6	206,8

Quelle: (Winker, 2010, S. 112)

Die Tabelle zeigt die Input-Output-Tabelle für Deutschland 2006 zu Herstellungspreisen für die inländische Produktion und Einfuhr in Milliarden Euro aufgliedert nach 12 Sektoren.

Abbildung 40: Input-Output-Tabelle 2006 Deutschland, Teil 2

bereiche					Letzte Verwendung von Gütern						Gesamte Verwendung von Gütern	Lfd. Nr.
DL des Handels u. Verkehrs, DL der Nachrichtenübermittlung, Beherb.- u. Gaststätten DL	DL der Kreditinst. u. Vers., DL der Grundst.- u. Wohnwesens u. unternehmensbezogene DL	DL des Gesundheits-, Veterinär u. Sozialw., Erziehungs- u. Unterrichts-DL, Entsorgungs-DL	DL der öffentl. Verwaltung, Verteid., Sozialvers., sonst. DL, DL privater Haushalte	zusammen	Private Konsumausgaben im Inland	Konsumausgaben des Staates	Bruttoanlageinvestitionen	Vorratsveränderung und Nettozugang an Wertsachen	Exporte	zusammen		
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	21	
0,9	0,7	0,8	1,2	44,4	15,9	-	3,3	1,1	6,4	26,8	71,2	1
8,0	2,8	4,2	3,3	135,8	40,3	0,2	0,1	4,2	12,5	57,4	193,2	2
19,1	3,0	8,9	2,8	261,9	47,2	11,3	0,9	-12,4	176,0	222,9	484,8	3
3,1	0,4	1,3	0,8	222,3	3,9	-	13,3	-3,2	95,4	109,3	331,6	4
14,5	3,3	5,0	6,6	322,8	81,2	2,8	146,6	2,9	466,9	700,3	1023,2	5
9,5	8,2	3,9	3,1	102,9	71,9	0,1	11,3	-6,1	79,4	156,6	259,5	6
11,2	0,0	5,3	1,2	53,9	94,4	0,2	-	3,9	34,3	132,8	186,6	7
3,7	19,1	3,8	3,5	44,4	3,7	-	158,6	-	0,1	162,4	206,8	8
159,4	12,1	12,4	13,0	326,7	337,5	15,2	19,6	-4,5	106,1	474,0	800,6	9
110,0	268,3	32,4	26,7	640,6	317,5	7,0	35,7	-	50,5	410,8	1051,4	10
6,2	6,6	18,3	4,1	45,5	99,3	220,4	-	-	-	319,7	365,2	11
6,9	18,0	4,2	27,7	75,3	77,2	163,7	4,3	0,4	2,5	248,1	323,4	12
352,6	342,4	100,4	93,3	2 276,5	1 189,8	420,9	393,7	-13,7	1 030,2	3 021,0	5 297,5	13
10,5	13,2	11,0	9,9	59,4	135,1	4,6	29,4	-	-0,2	168,8	228,2	14
363,2	355,6	111,4	103,8	2 336,0	1 324,9	425,4	423,1	-13,7	1 030,0	3 189,8	5 525,7	15
241,9	197,7	183,3	148,1	1 149,7								16
11,3	17,7	-4,8	-1,0	25,5								17
44,1	151,7	33,1	31,9	343,1								18
956,2	208,7	42,0	33,6	575,0								19
392,8	647,8	253,5	212,6	2 093,3								20
756,0	1 003,4	364,9	316,5	4 429,3								21
44,6	48,0	0,3	6,9	868,3								23
800,6	1 051,4	365,2	323,4	5 297,5								25

Quelle: (Winker, 2010, S. 112)

Anhang B: Implementation der Perspektiven im Metal Model

Abbildung 41: Implementation der Perspektiven im Metal Model

	Egalitarian (concerned)	Hierarchist	Individualist (unconcerned)
Demand^a			
Max. population size ^b	As hierarchist	8.8×10 ⁹ in 2050	As hierarchist
GWP/cap in 2100 ^b	47,500 \$ ₁₉₉₀	65,000 \$ ₁₉₉₀	80,000 \$ ₁₉₉₀
Future saturation level ^c			
Iron/steel	As hierarchist	0.45	Hierarchist+20%
MedAlloy	As hierarchist	0.017	Hierarchist+20%
Reduction of IU curve ^d	0.25% per year	–	–
Depletion^e			
Ore grade decline			
Past			
Iron/steel	As hierarchist	25	As hierarchist
MedAlloy	As hierarchist	3.9	As hierarchist
Future			
Iron/steel	20	25	30
MedAlloy	2.4	3.9	5.5
Technological change^f			
Past			
Prim. prod. Iron/steel	As hierarchist	0.80	As hierarchist
Prim. prod. MedAlloy	As hierarchist	0.80	As hierarchist
Sec. prod. Iron/steel	As hierarchist	0.90	As hierarchist
Sec. prod. MedAlloy	As hierarchist	0.90	As hierarchist
Future			
Prim. prod. Iron/steel	0.85	0.80	0.80
Prim. prod. MedAlloy	0.85	0.80	0.80
Sec. prod. Iron/steel	0.75	0.90	0.80
Sec. prod. MedAlloy	0.75	0.90	0.80
Energy prices^g			
	Egalitarian utopia	Hierarchist utopia	Individualist utopia
	TARGETS 1.0	TARGETS 1.0	TARGETS 1.0
	(ca. 16 US\$/GJ in 2100)	(ca. 16 US\$/GJ in 2100)	(ca. 15 US\$/GJ in 2100)
Tax on primary production			
	10% in 2000 ^h	5% in 2000 ⁱ	None
	50% in 2050	10% in 2050	
	100% in 2100	20% in 2100	

^a Demand is determined for 13 regions (see Fig. 4), based on the regional population and economic growth.

^b Scenarios taken from IPCC (1999). Egalitarian=B1-scenario. Individualist=A1-scenario.

^c Parameter x_1 in Box (1).

^d Parameter F in Box (1).

^e Ore grade decline is expressed in terms of a percentual decrease of ore grades for each doubling of accumulated production [=determines depletion constant in Eq. (4)]. Values are based on weighted averages from Deffeyes and MacGregor (1980), low and high estimates.

^f The decrease of the capital output ratio (*COR*) and energy intensity for each doubling of accumulated production [Eq. (5) and (6)].

^g Energy price is based on the average of electricity and fuel prices, taken from utopias in TARGETS 1.0 (Rotmans and De Vries, 1997). The prices are mentioned in constant dollars of 1990. The 1990 energy price is 4 US\$/GJ.

^h Egalitarian taxes on primary metal prices are used to subsidise secondary production.

ⁱ Hierarchist taxes on primary metal prices are used to reduce overall capital costs in the industry sector.

Quelle: (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999, S. 250)

Anhang C: Zentrale Gleichungen des Metal Models

Abbildung 42: Zentrale Gleichungen des Metal Model

Box 1: Crucial model equations.

The Minerals Model is a system-dynamic model of which the most important material flows and information flows (including delays and anticipative behaviour) are indicated in Figs. 1 and 2, respectively. The most crucial model equations are the following:

$$D_R = IU_R * GDP_R * P = \left(\frac{x_1}{GDP_{pcR} + x_2 * GDP_{pcR}^{x_3}} \right) * F * GDP_{pcR} * Pop_R * P \quad (1)$$

(D_R = metal demand per region (kg); IU_R = Intensity of Use (kg/ppp\$); GDP_R = real regional Gross Domestic Product (ppp\$), P describes the effect of price on demand (Eq. (2)), x_1, x_2 , and x_3 are empirically determined constants (for scenarios we will vary x_1), $F = 1$ by default, can be used to scale down demand from historic trends in projections (see text); GDP_{pc} = real regional GDP per caput (ppp\$/caput); Pop_R = regional population (capita)).

$$P = -elas * (\log(price_t) - \log(price_{t-1})) + 1 \quad (2)$$

(Elas = price elasticity, price = price of metal (\$/kg))

$$Y_P = Y_{0,P} * Q_P^{-n} \quad (3)$$

(Y : learning factor; Q : cumulative production (kg); n : learning constant; p indicates the different types of production [primary/secondary]).

$$g_{P-1} = g_0 * Q_m^{-1/l} \quad (4)$$

(g : ore grade; Q_m : cumulative mine production (kg); 1 : depletion constant).

$$El_{P-1} = \varepsilon_{0,SR} + \varepsilon_{0,MM}/g + ((\varepsilon_{SR} + \varepsilon_{MM}/g) * Y) \quad (5)$$

(El = energy intensity (J/kg); in which ε_{SR} and ε_{MM} are the energy requirements (J/kg) for smelting and refining (SR) and mining and milling (MM). A distinction is made in a minimum energy requirement (ε_0) based on thermodynamics and a part depending on technological development).

$$COR_{P-1} = ((\gamma_1 + \gamma_2 * (g_0/g) * Q_{P-1}^{-\alpha} + \gamma_3 * (g_0/g)^{-\beta})) * Y \quad (6)$$

($\alpha, \beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ are constants representing the effects of economics of scale and ore-grade decline on the Capital Output Ratio. Based on De Vries, 1989a).

$$costs_P = C_{en,P} + C_{cap,P} + C_{expl,P-1} = price_{en} * El_P + COR_P * Ann + C_{expl,P-1} \quad (7)$$

(costs: costs per tonne produced (\$/kg); C_{en} : energy production costs (\$/kg); C_{cap} : capital production costs (\$/kg); C_{expl} : exploration costs (\$/kg); $price_{en}$: the average price of energy (\$/J); COR : capital-output-ratio (\$/kg); Ann : annuity factor).

$$prod_p \approx IMS_p * D = (price_p^\lambda / \sum_p price_p^\lambda) * D \quad (8)$$

($prod_p$: production per production category p (primary or secondary) (in kg); IMS : indicated market share; $price_p$: price of metal produced by production category p (more or less equal to costs) (\$/kg); λ : logit parameter). If capacity is insufficient, the real market share of category p can be lower than suggested by IMS .

Quelle: (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999, S. 245)

Anhang D: Grafiken zu Resultaten des Metal Models

Grafiken jeweils zu Eisen (iron/steel) und dem virtuellen Metall MedAlloy.

Legende: Ega = Egalitarian; Hie = Hierarchist; Ind = Individualist; Hist = Historical data.

Abbildung 43: Nachfrage

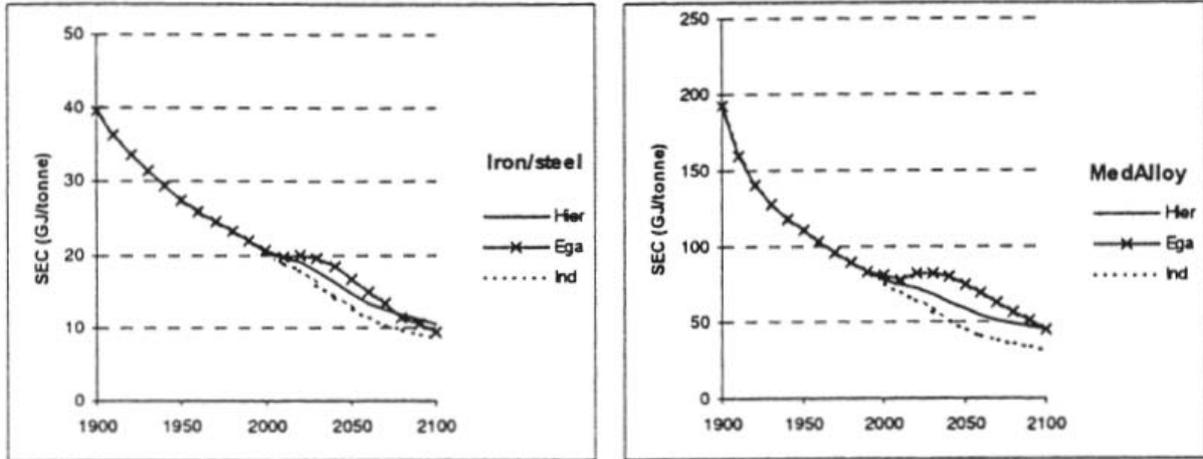


Abbildung 44: Anteil Sekundärproduktion (Recycling)

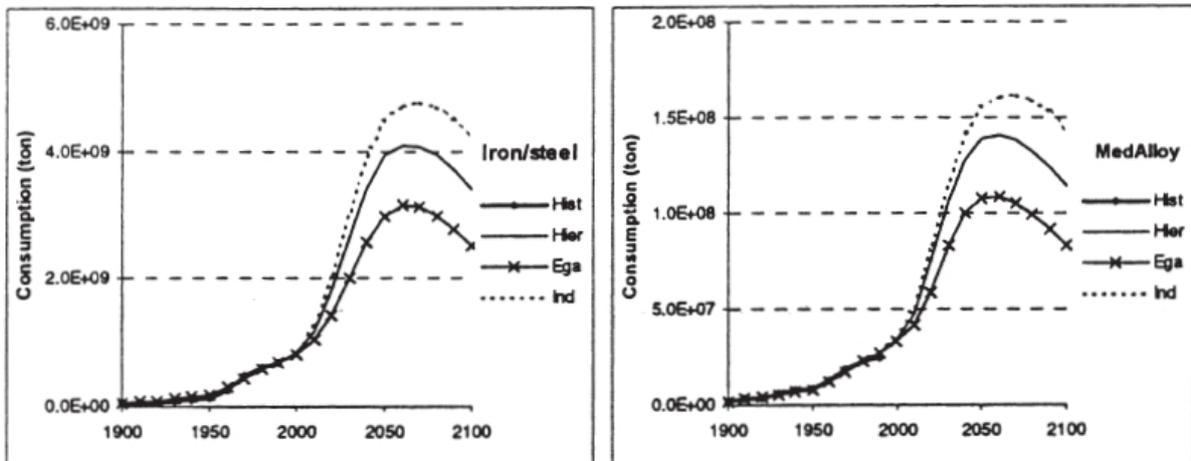


Abbildung 45: Durchschnittlicher Metallpreis

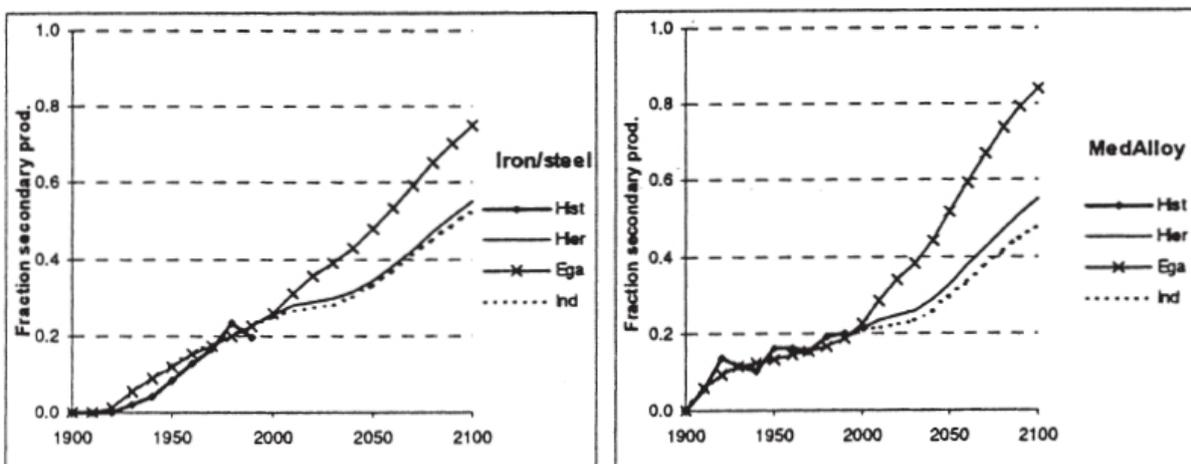


Abbildung 46: Qualität/Reinheitsgrad

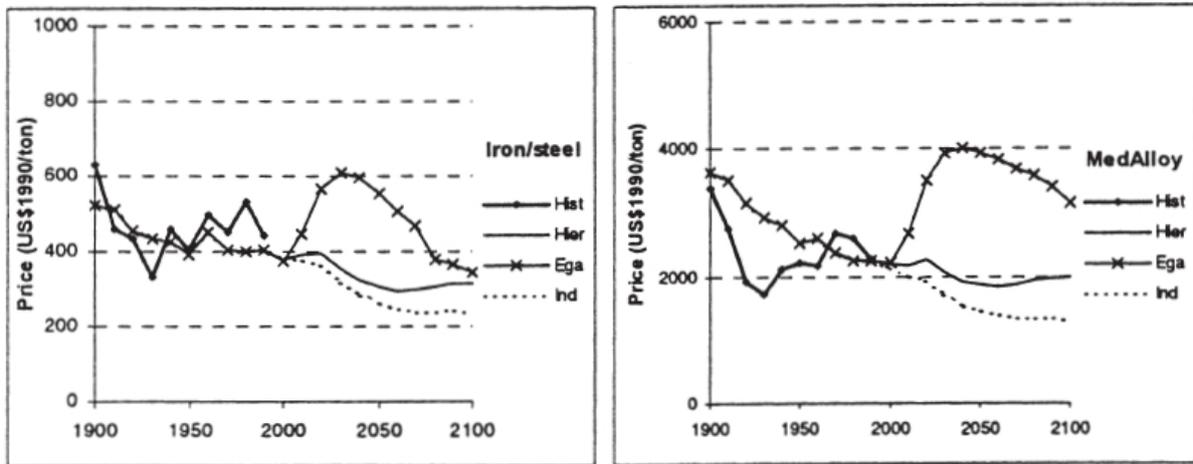
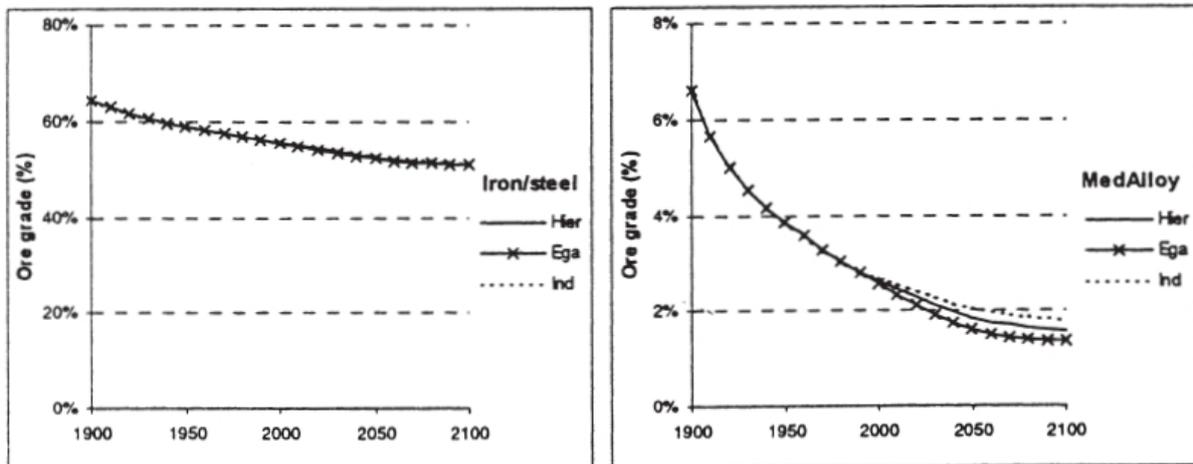


Abbildung 47: Durchschnittlicher Energieaufwand



Quelle: (Van Vuuren, Strengers, & De Vries, 1999, S. 247)

Anhang E: Modellvergleichs-Schema

	World 3	SARUM	FUGI	Metals Model
Modell	World 3	SARUM	FUGI	Metals Model
Projektlauzeit:	1972 - 2003	1973 - 1978	1974 - 2005	1995 - 2001
Zeithorizont der Simulationen:	100 Jahre (1900 - 2100)	nicht fix, bis 50 Jahre praktikabel (100 Jahre möglich)	10/20 Jahre	110 Jahre
Anzahl Regionen:	1 (eine Welt)	3 oder 13	13/62/200	Nachfrage 13, Angebot 1 (eine Welt)
Interregionale Unterschiede beachtet?	nein	ja, über exogene Parameter	ja, über exogene Datenbasis (in der Nachfrage)	ja
Anzahl Sektoren:	5	13	15 oder 9	2 Metalle (Eisen, Metall)
Eigener Sektor für Mineralien?	nein, aber für nicht erneuerbare Ressourcen kein ökonomischer Ansatz wurde konsequent verfolgt	ja	ja, sogar eigenes Teilmodell	ja
Ökonomischer Ansatz:	Preis über Marktschranken modelliert?	Neoklassisch, IO, Cobb-Douglas Produktionsfunktion	IO	Allgemeine Gleichgewichtstheorie
Intergenerationen-Konflikt berücksichtigt?	nein	ja, und exogene	ja	ja
Technologischer Wandel berücksichtigt?	nein	nein	nein	nein
Modellierungsansatz:	ja, nur begrenzt	nur bedingt (nicht zwingend)	Vielseitig mit Input-Output, Optimierung und System Dynamics	System Dynamics, Güter- und Geldflüsse
Berechnungen im Zeitverlauf:	System Dynamics	Dominiert von den ökonomischen Ansätzen, beeinflusst von System Dynamics	Dynamisch	dynamisch
Umweltverschmutzung berücksichtigt?	dynamisch	dynamisch und statisch	dynamisch und statisch (I/O)	nein
Besonderheiten:	ja Wird abgesehen von seinen kleineren vorerstem World1 und World2 als erstes globales Modell verstanden.	Exogene Parameter können während der Laufzeit beeinflusst werden (Abweichungstabelle für Tarife, Zölle und andere regionale Unterschiede)	kurzfristiger Charakter der Input/Output Analyse verbunden mit einem dynamischen makro-ökonomischen Modell; Besteht aus drei interagierenden Teilmodellen, die in Kooperation mit verschiedenen japanischen Universitäten erarbeitet wurden.	Inneuert neue Annahmen bezüglich sinkenden Ressourcenverbrauch (nicht immer nur Substitution durch Technologie)

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang F: Abhängigkeiten der ökonomischen Annahmen

Dimension/Sicht	dient unter	Abhängigkeiten unter den Annahmen:			Modell	Kapitel	Ebene	Weltanschauung
		High-Level	Medium	Grundannahme:				
Paradigmenwechsel im Laufe der Zeit		Themen/Ziele der Ressourcen-ökonomik				1	Meta	besorgt
Paradigmenwechsel im Laufe der Zeit /	4, (1)		optimale Abbaurate			1	Meso	oec (opt.)
Intergenerationskonflikt	2, 4			Zeitwert des Geldes		1	Mikro	oec
Ökonomische Hilfsmittel	1		Hotellings Regel			1	Meso	oec
Ökonomische Hilfsmittel	4			Konstanter Zinssatz		1	Mikro	Vereinfachung
Ökonomische Hilfsmittel	4			Bekannte Reserven		1	Mikro	Vereinfachung
Das Auge des Betrachters	1			Kapazität nicht erneuerbarer Ressourcen ist ein Problem		1	Mikro	besorgt
Umgang mit Technologischem Wandel	21, 11, 52, 53			Technologischer Fortschritt schafft Substitute für nicht erneuerbare Ressourcen		1	Mikro	alle
Umgang mit Technologischem Wandel	21, 52			Kapital fördert technologischen Fortschritt		1	Mikro	alle
Intergenerationskonflikt	1			Berücksichtigung der Ressourcenbedürfnisse zukünftiger Generationen		1	Meta	besorgt
Intergenerationskonflikt	21		Green Golden Rule			1	Meta	oec
Intergenerationskonflikt	11			Nutzen zukünftiger Generationen sichern		1	Meta	oec
Paradigmenwechsel im Laufe der Zeit	1			mehr Lebensstandard, mehr Verbrauch	World3	1	Mikro	besorgt
Das Auge des Betrachters	1			schonier Ressourcenabbau ist zu vermeiden	World3	1	Meta	besorgt
Das Auge des Betrachters	2			optimaler Ressourcenabbau bedeutet Profit-Kapital		1	Meta	oec
Übrige Paradigmen/Annahmen	1			ökologische Tragfähigkeit kann überschritten werden		1	Meta	alle
Das Auge des Betrachters	1		Bevölkerungsanstieg verschärft die Ressourcenproblematik			1	Meta	besorgt
Übrige Paradigmen/Annahmen	SD, 33, 43			Strategien können zur Ermittlung ihrer Wirkung in Szenarien getestet werden	alle	2.6	Global	alle
Übrige Paradigmen/Annahmen	33, 43			Strategien können mit ihrer Wirkung auf Sektoren/Regionen getestet werden	alle ausser World3	2.6	Makro	alle
Übrige Paradigmen/Annahmen	33, 43			Abhängigkeiten zwischen Akteuren werden modelliert	SARUM, FUGI, Metal Model	2.6	Meso	alle
Zentraler Modellierungsansatz			Neoklassische Theorie			2.6.1	Meta	oec
Ökonomische Hilfsmittel	21, 29, 43		Marktgleichgewicht von Angebot und Nachfrage			2.6.1	Meso	oec
Übrige Paradigmen/Annahmen	21			Staatliche Interventionen sind zu vermeiden		2.6.1	Meta	oec
Ökonomische Hilfsmittel	43, 21, 22, 28			Akteure maximieren ihren Nutzen		2.6.1	Mikro	oec
Ökonomische Hilfsmittel	24			Nutzen kann nicht gesättigt werden		2.6.1	Mikro	oec
Ökonomische Hilfsmittel	22, 24, 28			Akteure sind sich ihrer rationalen Präferenzen bewusst		2.6.1	Mikro	oec
Ökonomische Hilfsmittel	21, 28			Akteure handeln unter vollständiger Information		2.6.1	Mikro	oec
Ökonomische Hilfsmittel	21, 22, 29, 43, 8		Preiselastizität Produktionsfunktion repräsentieren das Angebot (aggregiert oder nicht)		SARUM (je Sektor), FUGI, Metal Model (aggregiert)	2.6.1	Makro	oec
(Dis-)Aggregation der Welt	21, 34, 33			Der Kapitalstock erhöht sich durch Wachstum		2.6.1.1	Meso	oec
Ökonomische Hilfsmittel	21, 33			Regionen mit niedrigem Lebensstandard wachsen schneller		2.6.1.1	Makro	oec
(Dis-)Aggregation der Welt	21, 52			Technologischer Fortschritt neigt Wirtschaftswachstum an		2.6.1.1	Makro	oec
Umgang mit Technologischem Wandel	21, 33		I/O-Analyse	Wert der Inputs = Wert der Outputs	FUGI	2.6.2	Makro	oec
Zentraler Modellierungsansatz	21					2.6.2	Meso	oec
Ökonomische Hilfsmittel	33, 35					2.6.2	Meso	oec
Ökonomische Hilfsmittel	33		I/O-Tabelle			2.6.2	Makro	oec
(Dis-)Aggregation der Welt	35		Abhängigkeiten zwischen den Sektoren sind wichtig		alle ausser World3	2.6.2	Makro	alle
Exogene Variablen	35			Inputs (wie Löhne & Investitionen) sind exogen vorgegeben		2.6.2	Mikro	Vereinfachung
Exogene Variablen	35			Nachfrage ist exogen vorgegeben		2.6.2	Mikro	Vereinfachung
(Dis-)Aggregation der Welt	29			Aggregation von Angebot oder Nachfrage	alle	2.6.2	Makro	alle
Zentraler Modellierungsansatz	21, 33, 43, 22			Für die Dynamisierung ist ein Gleichgewichtsprozess verantwortlich	alle ausser World3	2.6.2	Meta	alle ausser SD
Ökonomische Hilfsmittel	35			Preise sind nicht relevant, sondern Kosten		2.6.2	Meso	Vereinfachung
Zentraler Modellierungsansatz	SD, 43, 33			Veränderungen einer Variable ziehen Auswirkungen auf das ganze System nach sich		2.6.2	Global	alle
Zentraler Modellierungsansatz	21		CGE-Modelle			2.6.3	Meso	alle ausser SD
Ökonomische Hilfsmittel	43			Es existiert ein statisches Gleichgewicht		2.6.3	Global	oec
(Dis-)Aggregation der Welt	43			Disaggregation von Faktor- und Gütermärkten		2.6.3	Meso	alle
Intergenerationskonflikt	SD, 43			OLG Agenten haben eine begrenzte Lebenszeit		2.6.3	Mikro	alle
Intergenerationskonflikt	43			Agenten leben unendlich lange		2.6.3	Mikro	Vereinfachung
Ökonomische Hilfsmittel	43			Vollkommene Märkte		2.6.3	Meso	Vereinfachung
Ökonomische Hilfsmittel	43			Keine Transaktionskosten		2.6.3	Meso	Vereinfachung
Exogene Variablen	43			Umweltverschmutzung und technologischer Wandel sind Externalitäten		2.6.3	Global	Vereinfachung
Exogene Variablen	33, 43			Umfangreiche Datenbasis ist zwingend		2.6.3	Mikro	oec
Ökonomische Hilfsmittel	21		IU		Metal Model	2.6.4	Meso	oec
Umgang mit Technologischem Wandel	52			Mit zunehmendem BIP/Kopf kann der Verbrauch einer weit entwickelten Volkswirtschaft wieder sinken		2.6.4	Meso	oec
Übrige Paradigmen/Annahmen	6, 52			Substitute reduzieren den Verbrauch		2.6.4	Meso	alle
Umgang mit Technologischem Wandel	52, 53			Technologischer Fortschritt erhöht die Ressourceneffizienz		2.6.4	Mikro	alle
Ökonomische Hilfsmittel	53			Die Verbrauchintensität ist abhängig vom BIP/Kopf		2.6.4	Meso	oec
Übrige Paradigmen/Annahmen	52			Der tertiäre Sektor benötigt am wenigsten Ressourcen		2.6.4	Makro	oec
Übrige Paradigmen/Annahmen	52			Importe verzerren das Verbrauchsbild einer Region		2.6.4	Makro	alle

Quelle: Eigene Darstellung

Selbstständigkeitserklärung

Institut für Informatik der Universität Zürich

Ich erkläre hiermit ausdrücklich, dass die von mir eingereichte Masterarbeit mit dem Titel:

**Modellierungsparadigmen globaler
ressourcenökonomischer Simulationsmodelle**

eine von mir selbst verfasste Originalarbeit ist. Zudem bestätige ich, dass diese Arbeit nicht zur Abgeltung anderer Studienleistungen an der Universität Zürich eingereicht worden ist. Die vorliegende Masterarbeit habe ich selbstständig verfasst und sämtliche verwendete Bezüge aus fremden Quellen als solche kenntlich gemacht. Die wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen habe ich nach bestem Wissen zitiert und als fremde Quellen ausgewiesen.

Ich bestätige mit meiner Unterschrift die Richtigkeit dieser Angaben.

Name: Dorian-Raphael Signer

Matrikel-Nummer: 05-709-134

Zürich, 14.10.2011
