

2 Modellierungsansätze zur Analyse Globaler Umweltveränderungen

Wie bereits im vorherigen Kapitel verdeutlicht, setzt sich der GW aus vielen verschiedenen Einzelentwicklungen und Phänomenen zusammen. Die systematische Beschreibung der dynamischen Entwicklung des Mensch-Umwelt-Interaktionssystems ist auf Grund der zunehmenden Komplexität und Vielzahl der beteiligten Elemente in der Globalisierung der Problemlagen sowie dem technologischen- und Wissensfortschritt nicht durch eine disziplinäre, eher auf einzelne Phänomene und Sektoren ausgerichtete Forschung, zu analysieren. Die komplexe Dynamik der Interaktion von kurz- und langfristigen Prozessen, über verschiedene räumliche Skalen hinweg, verlangt nach einer disziplinen-übergreifenden und skalen-integrierenden Analysemethode.

Seit den 60er Jahren stellen Systemtheorien einen wichtigen Teil der analytischen Techniken zur Untersuchung holistischer Struktureigenschaften dar. Ausgehend von ihren Quellen in den Ingenieurwissenschaften entwickelte sich die Systemtheorie zu einem Werkzeug zur Analyse dynamischer Entwicklungen und Rückkopplungsmechanismen in der Untersuchung von Organisationsprozessen, sowie urbanen und ökologischen Prozessen (z. B. Forrester 1969, 1971; Collins et al. 1995). Eine der Hauptanwendungen in den Sozialwissenschaften ist der Versuch mit Hilfe holistischer Modelle soziale Strukturen zu rekonstruieren und mithin zu erklären. Die Systemanalyse liefert Wege um organisatorische Strukturen und Prozesse zu zerlegen und zu untersuchen, was oftmals wichtige kontraintuitive dynamische Effekte in der Systemstruktur aufzeigt. Die Analyse der qualitativen Struktur von Kausalbeziehungen in einem System erweist sich oft als viel wichtiger als die Bestimmung der quantitativen Größen ihrer Komponenten (Knapp 1999). Zusammen mit der Entwicklung der technischen Möglichkeiten der Computermodellierung führte der Systemtheorieansatz zu einer rasanten Entwicklung auf dem Gebiet der Simulation der Dynamik komplexer Systeme. Grundsätzlich kann die Dynamik eines Systems als eine Menge von Kausalbeziehungen zwischen Systemelementen oder als Trajektorien in einem Phasenraum dargestellt werden (Lewin 1992).

Ein wichtiges Einsatzfeld der Systemtheorie liegt im Bereich der Analyse der dynamischen Entwicklungen im GW. Der Gedanke einer „*Nachhaltigen Entwicklung*“ ist eng mit der Elastizität und Widerstandskraft der Ökosphäre gegenüber anthropogenen Störungen verbunden (Rotmans 1998a). Der GW kann als die Summe dieser Störungen und der verursachten Reaktionen verstanden werden. Dies verdeutlicht auch die Notwendigkeit systemischer Analyseansätze, die anthropogene und ökologische Elemente sowie die Ursache-Wirkungsketten zwischen ihnen enthalten. Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten drei Dekaden Versuche unternommen, die Welt und ihre Veränderung in einer integrierten, holistischen Systemsicht zu beschreiben. Die für diese Aufgabe entwickelten Modelle zur Analyse und Prognose der Veränderungsprozesse werden als „*Integrated Assessment Models*“ (IAM) bezeichnet. Sie stellen ein Werkzeug zur Verfügung, das es ermöglicht die Komplexität gesellschaftlicher und ökologischer Prozesse sowie ihre Interaktionen in Zeit und Raum in Form formaler Modelle abzubilden. Eine Analyse des Erdsystems benötigt neben einer

Strukturierung und Beschreibung der Komponenten des Systems vor allem ein Verständnis für die im System ablaufenden Prozesse, Interaktionen und Rückkopplungsmechanismen (Rotmans 1998a). „*Integrated Assessment*“ (IA) bietet einen geeigneten Rahmen zur Verknüpfung mehrerer Fachdisziplinen für diese Aufgabe und versucht:

- die koordinierte Erforschung möglicher zukünftiger Zeitverläufe (Trajektorien) des Mensch-Natur-Systems,
- neue Einsichten in die Schlüsselfragen zukünftiger Politikgestaltung zu gewinnen, und
- die Prioritätensetzung von notwendiger Forschung zur verbesserten Identifizierung stabiler politischer Handlungsoptionen (Weyant et al. 1996).

Die für ein IA notwendige Integration von Anthroposphäre und Ökosphäre erfordert von Anfang an eine inter- oder transdisziplinäre Herangehensweise. Um die gestellte Aufgabe erfolgreich bewältigen zu können ist eine enge Zusammenarbeit zwischen dem interdisziplinären integrativen Teil und den Forschungen der einzelnen Fachdisziplinen notwendig. Im Allgemeinen kann zwischen zwei Klassen von IA Methoden unterschieden werden, den analytischen und den partizipativen Methoden. Während die analytischen Methoden stark in den Naturwissenschaften verankert sind und Modell-, Szenario- und Risiko-Analysen umfassen, haben die partizipativen, interaktiven Methoden ihre Wurzeln in den Sozialwissenschaften und beinhalten partizipative Verfahren unter Mitwirkung von Betroffenen sowie Expertengremien, Delphibefragungen und Politikbewertungen.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von „*Integrated Assessment*“ Modellen¹¹

| Vorteile von IAM | Nachteile von IAM |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Auffinden von Wechselwirkungen und Rückkopplungen • flexibles und schnelles Simulationswerkzeug • Rahmen zur Strukturierung von Wissen • Kommunikationswerkzeug komplexer Zusammenhänge | <ul style="list-style-type: none"> • hohe Integrationsebene; Prozesse auf der Mikroebene werden vernachlässigt • ungenügende Behandlung von Unsicherheiten • Abwesenheit eines stochastischen Faktors → Ausschluss von selteneren Extrembedingungen • limitierte Kalibrierungs- und Validierungsmöglichkeit |

Ein Großteil der bisher bestehenden IAM ist auf den globalen Klimawandel fokussiert¹². Ausgehend von verschiedenen räumlichen Skalen werden im Folgenden verschiedene Ansätze zur Analyse und Modellierung von Prozessen des GW auf globaler, regionaler und lokalen Ebene beispielhaft vorgestellt.

¹¹ Zusammenstellung aus Materialien des International Centre for Integrative Studies (ICIS), Universität Maastricht.

¹² Für eine ausführlichere Bewertungen und Umsetzungen von IA wird auf Schellnhuber (1998), Schellnhuber & Yohe (1998), Rotmans (1998, 1998a), Rotmans & Dowlatabadi (1998), Dowlatabadi & Morgan (1993), Morgan & Dowlatabadi (1996), Parson & Fisher-Vanden (1997), Tol & Vellinga (1998) und Weyant et al. (1996) verwiesen.

2.1 Globale Ansätze

Aus praktisch-politischen Überlegungen zur zukünftigen Entwicklung des Zivilisations-Natur-Systems entstanden in den 60er / 70er Jahren erste computergestützte Globalmodelle zur Untersuchung der Probleme die aus dem Komplex von Wachstum, Entwicklung Ressourcenausbeutung und Umweltbelastung erwachsen (Bodemer 1984). Diese Computersimulationsmodelle versuchen möglichst viele für eine Problemstellung relevante Ursache-Wirkungsbeziehungen und die zwischen verschiedenen Problemen bestehenden Interaktionen quantitativ zu beschreiben. Die methodischen Wurzeln liegen im Zugang über die klassische Systemanalyse wie sie von Forrester (1971, 1972) im *World2* Modell verwendet wurde. Eine Weiterentwicklung dieses Modells, *World3* (das erste globale Computersimulationsmodell), wurde für den Bericht von Meadows et al. (1972) an den *Club of Rome* verwendet.

World3

World3 ist ein Computermodell zur Simulation und Planung möglicher Entwicklungen der Welt. Es beschreibt die Interaktionen zwischen den wichtigsten sozialen und physikalischen Komponenten der Erdsystems. Das Modell wurde mit dem Gedanken entwickelt, ein besseres Verständnis über die mögliche Tragfähigkeit der Erde in Bezug auf die zivilisatorische Entwicklung zu erlangen. Es soll Aufschluss über die Bedingungen und Entscheidungen für ein Angleichen an diese Grenzen der Tragfähigkeit liefern, ohne in eine Katastrophe abzugleiten. Die wichtigsten Charakteristika des Modells sind die Darstellung von Wachstumsprozessen und ihren Grenzen, Verzögerungszeiten bei der Annäherung an die Grenzen sowie die aus dem Erreichen und Überschreiten der Grenzen resultieren Degradationsprozesse in den Umweltkompartimenten. Das Modell verfolgt die Entwicklung von Bestandsgrößen wie Bevölkerung, Industriekapital oder Umweltverschmutzung durch Zu- und Abflüsse. Viele der kausalen Beziehungen zwischen den Bestandsgrößen und den sie ändernden Faktoren sind nicht-linear. Die modellierten nicht-linearen Beziehungen und Regelkreise liefern eine komplexe Darstellung der Interaktion von Sozioökonomie und Umwelt. Das Modell besteht aus fünf Sektoren und 225 Hauptvariablen, die jeweils für den globalen Durchschnittswert folgender Größe stehen:

1. **Umweltverschmutzung:** Variablen zur Beschreibung des Entstehens von Umweltverschmutzung und zu Chancen des Umweltschutzes; z. B. Umweltverschmutzungsgrad, Technologieentwicklung für Umweltschutz etc.
2. **sich erschöpfende Ressourcen:** Variablen zur Beschreibung der Nutzung von Ressourcen, wie Rate der Ressourcennutzung, Technologie zur Ressourcenschonung etc.
3. **Bevölkerung:** Variablen zur Beschreibung des Bevölkerungsentwicklung und des demographischen Übergangs, wie Fertilitäts- und Mortalitätsraten, Lebenserwartung etc.
4. **Landwirtschaft:** Variablen zur Beschreibung der Ernährungssituation, wie Nahrungsmittelerzeugung, Bodenfruchtbarkeit, Landentwicklung, Erosion etc.
5. **Wirtschaft:** Variablen zur Beschreibung der Leistungen der Industrie und der industriellen Umweltbelastung, wie Industrieoutput, Dienstleistungsoutput, Arbeitsplätze etc.

Für durch Anfangswerte und bestimmte Modellkonfigurationen charakterisierte Szenarien berechnet *World3* alle Wechselwirkungen zwischen den 225 Hauptvariablen und aktualisiert mit den Resultaten die Basisvariablen. Dieser Vorgang wird iterativ in Halbjahresschritten für den Simulationszeitraum von 1900 bis 2100 durchgeführt. Die Resultate der Szenarien wurden in dem Buch „Die Grenzen des Wachstums“ (Meadows et al. 1972) vorgestellt, das eine heftige und kontroverse Debatte über die scheinbar pessimistische Grundhaltung der Autoren auslöste, die das Buch als eine Art Weltuntergangsszenario erscheinen ließ. Auch wurde den Autoren eine zu stark neomalthusianische Sichtweise der Umwelt- und Ressourcenkrise vorgeworfen (Ehrlich & Holdren 1988). Neuere Szenarien und Entwicklungen sowie Entgegnungen der Autoren zu den verschiedenen Kritikpunkten sind in Meadows et al. (1992) dargestellt.

Das *World3* Modell wird oft auch als Modell der ersten Generation bezeichnet (Bodemer 1984). Es inspirierte die Entwicklung weiterer globaler Modelle zur Beschreibung und Prognose von Ressourcenverbrauch, Bevölkerungsentwicklung und Umweltverschmutzung. Beispiele hierfür sind die Modelle der zweiten Generation, die versuchten auf die Kritik zum Meadows-Modell einzugehen und es zu verbessern. Ein erster Schritt stellte das Mesarovic-Pestel-Modell (1974) dar, in dem eine stärkere Regionalisierung der Modellkomponenten vorgenommen wurde. Aus Kritik zum Industrieländerfokus entwickelten lateinamerikanische Sozialwissenschaftler das Beriloche-Modell (Herrera & Skolnik 1977), das auf die Entwicklungschancen und optimierte, wünschenswerte Entwicklungspfade für Entwicklungsländer fokussiert (Bodemer 1984). Der Blickwinkel wurde hier von den „Grenzen des Wachstums“ auf die, nach Auffassung der Autoren, sozioökonomisch und politisch motivierten „Grenzen des Elends“ hin verschoben. Allerdings modellieren weder diese noch andere Modelle, wie beispielsweise SARUM für die landwirtschaftliche Produktion (SARU Staff 1977) oder MOIRA mit einem Fokus auf Welthunger (Linnemann et al. 1979), politische und soziale Probleme direkt.

Kritikpunkte an diesen Modelle sind die starken disziplinären Bindungen der Entwickler, ihre Ausrichtung an den ideologischen und wirtschaftspolitischen Präferenzen der Arbeitsgruppen, die fehlenden Interaktionen zu den Betroffenen und den politischen Entscheidungsträgern sowie die Qualität des verwendeten Datenmaterials (Bodemer 1984).

Der Welt-System-Theorie-Ansatz

Dieser Ansatz widmet sich hauptsächlich dem historischen Verständnis politischer und sozialer Entwicklungen der Zivilisationsgeschichte. Der Welt-System-Theorie Ansatz stellt einen politikökonomischen Ansatz zur Beschreibung soziologischer Prozesse auf globaler Ebene dar (Bornschiefer 1984). Ziel dieser soziologischen Weltbeschreibung ist die Erzeugung vergleichend angelegter, prediktiver Makrotheorien der Entwicklung mit einem besondere Fokus auf Kapitalismus und der Entstehung von Disparitäten zwischen Peripherie und Zentrum (Antweiler 1999). Zentrales Konstrukt der Welt-System-Theorie ist die selbsterhaltende Reproduktion von Ungleichheit zwischen Zentrum, Semiperipherie und Peripherie die eine starke historische Dynamik über die letzten 500 Jahre darstellt (Chase-Dunn & Hall 1997, 1997a). Ohne diesen weltweiten Blickwinkel sind die Transformationsprozesse einzel-

ner Länder nicht zu verstehen (Antweiler 1999). Dieses iterative Modell von Transformation im Welt-System geht auf das Werk von Immanuel Wallerstein (1974) zurück. Primäres Ziel seines Ansatzes ist die Beschreibung von historisch gewachsenen Entwicklungsdisparitäten und -hierarchien zwischen Gesellschaften im Welt-System: Das Zentrum prosperiert durch Ausbeutung der Peripherie. Seine inhaltlichen Quellen sind (Antweiler 1999):

1. Der **Marxismus**: Ausgehend vom marxistischen Konzept des Kapitals und der Ausbeutung stellt Wallerstein nicht den Klassenkampf, sondern die Entwicklung des kapitalistischen Weltsystems als Markosystem zwischen Staaten in den Vordergrund (Antweiler 1999).
2. Die „**Annales**“-**Schule**: In seiner Welt-System-Sicht beruft er sich auf den französischen Historiker Fernand Braudel und die Schule der „*Annales*“, die die Entstehung und Dynamiken globaler Wirtschafts- und Herrschaftsnetzwerke untersuchen (Knapp 1997).
3. Die **Dependenztheorien**: Diese lateinamerikanische Schule der Abhängigkeitstheorien stellen eine Kritik der Modernisierungstheorien mit der Idee einer nachholenden Entwicklung dar. Ihre Hauptaussage sieht in der „Entwicklung“ in den einen Regionen die Ursache für die „Unterentwicklung“ in den anderen Regionen und stellt damit die Abhängigkeit zwischen entwickeltem Zentrum und unterentwickelter Peripherie in der Welt dar (Antweiler 1999). Die systemische Erklärung von „Unterentwicklung“ kann also nicht durch die lokalen Gegebenheiten, sondern nur unter Einbeziehung der Hierarchie des Welt-Systems erfolgen (Bornschiefer 1984).

Die Welt-System-Theorie stellt vor allem die negativen Seiten von Globalisierungsprozessen in den Vordergrund ihrer Betrachtungen. Sie sieht die globale Strukturbildung durch den Gegensatz von Zentrum und Peripherie und die dort vorherrschende Logik von Akkumulations- bzw. Ausbeutungsprozessen bestimmt. Der Zeithorizont ihrer Erklärungsversuche ist, verglichen mit anderen sozialwissenschaftlichen Theorien, sehr langfristig, wobei relativ starke Pfadabhängigkeiten eines Landes von seiner Ausgangsposition am Beginn der Etablierung des modernen Weltsystems im 15. und 16. Jahrhundert angenommen werden.

Im Horizont der aktuellen sozialwissenschaftlichen Forschung zur Entwicklung des Weltsystems, die im Wesentlichen unter dem Stichwort der Globalisierung geführt wird (vgl. Menzel 1998), nimmt die Welt-System-Theorie auf Grund dieser in vieler Hinsicht neo-marxistischen Eigenschaften eine kritische Rolle ein. Insbesondere die „optimistische“ Lesart von Globalisierungsprozessen, wie sie etwa im in der Ökonomie dominanten Neoliberalismus vorherrscht, wird von ihr angegriffen. Auch gegenüber soziologischen Modernisierungstheorien, die das gleichgerichtete Wirken von technischem Fortschritt, wirtschaftlichem Wachstum, gesellschaftlicher Ausdifferenzierung, politischer Regulation und normativer Integration im Weltmaßstab postulieren, verhält sich der Ansatz von Wallerstein und anderen kritisch. Trotz dieser großteils berechtigten Kritik bleibt die Frage offen, ob die Entwicklung des Welt-Systems tatsächlich in dem von der Theorie angenommenen Maße pfadabhängig, d. h. dadurch historisch auch kaum veränderbar, und vor allem als Nullsummenspiel beschreibbar ist, bei dem die Gewinne einer Seite nur als Verluste einer anderen möglich sind. Neuere

empirische Untersuchungen zur Entwicklung des kapitalistischen Weltsystems im Zeitalter der Globalisierung bestreiten genau diese Annahme (Albert et al. 1999).

In der letzten Dekade gibt es verstärkt Ansätze die Welt-System-Theorie auch zur Analyse globaler Umweltveränderungen und Degradationserscheinungen anzuwenden (Chase-Dunn & Hall 1997, 1997a; Bartley & Bergesen 1997, sowie dortige Referenzen). Chase-Dunn und Hall fokussieren in ihrer Weiterentwicklung von Wallersteins Ansatz auf die positive Rückkopplungsschleife zwischen Hierarchiebildung, d. h. der Zunahme sozialstrukturierter Ungleichheiten in oder zwischen Gesellschaften, und Intensivierung, d. h. Technologieentwicklung und die Übernahme von intensivierten Produktionsweisen, sowie zwischen Akkumulation und Domination. Durch die positive Rückkopplung läuft das System in eine Krise wenn die ökologische Tragfähigkeit einer Region erreicht wird. Da im heutigen Welt-System weder weitere Expansion noch eine Reduzierung des Drucks durch Abwanderung möglich ist, fallen ihre Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklung sehr negativ (Krieg, Selbstzerstörung) aus.

Ein wichtiger Kritikpunkt an den verschiedenen Ansätze zur Umsetzung der Welt-System Theorie ist das Ausgehen von der vagen Grundaussage, dass im Welt-System „Alles mit Allem“ verbunden ist (Knapp 1999). Die gesellschaftliche und ökonomische Entwicklung wird nur durch soziale, politische und ökonomische Prozesse zwischen Zentrum — Semi-Peripherie — Peripherie im Welt-System bestimmt. Diese Prozesse haben zwar eine Auswirkung auf die Natur und Umwelt, werden selbst aber nicht, oder nur wenig, von diesen Auswirkungen beeinflusst. Vor allem die starke Vereinfachung naturräumlicher Prozesse im Welt-System-Ansatz führt zu einer stark vereinfachten, auf die politischen und sozialen Gegebenheiten fokussierten Betrachtung globaler Umweltprobleme. Weitere Kritikpunkte an diesem Ansatz aus soziologischer Sicht sind in Antweiler (1999) und den dortigen Referenzen gegeben.

IMAGE 2

Das IMAGE 2.0¹³ Modell (Alcamo 1994) stellt eines der am weitesten entwickelten IAM für den globalen Klimawandel und seine Auswirkungen dar. Das Modell war das Erste, das verschiedene Aspekte von globalen Landnutzungsproblemen und dem Klimawandel in räumlich höher aufgelöster Form (0.5°x 0.5° Raster) in das Design aufnahm. Es stellt einen prozessorientierten Ansatz zum IA dar. Ziele von IMAGE 2 sind zum Einen die Bewertung der Wichtigkeit von Prozessen, Wechselwirkungen und Rückkopplungsschleifen im Gesellschaft-Biosphäre-Klima-System und zum Anderen die Abschätzung der Unsicherheit und ihrer Quellen in diesem komplexen System. Der politischen Nutzen des Modells liegt in der:

- Bereitstellung einer dynamischen Langzeitperspektive zu den Konsequenzen eines GW,
- Einsichten in die Auswirkungen von GW und
- in der Schaffung einer quantitativen Basis zur Analyse der Effektivität verschiedener Handlungsoptionen im Rahmen des GW.

¹³ IMAGE = Integrated Modell to Assess the Greenhouse Effect

Das Modell in drei gekoppelte Subsysteme gegliedert, in denen wissenschaftliche und politische Aspekte des GW zur Unterstützung der politischen Entscheidungsfindung verknüpft werden:

1. **Das Energie-Industrie-Subsystem** berechnet die Treibhausgasemissionen aus 13 Weltregionen als eine Funktion von Energieverbrauch und industrieller Produktion. Ein Hauptkritikpunkt an diesem Modul ist das exogene Anschließen der wichtigsten Triebkräfte (Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum und Technologieentwicklung) über parametrisierte autonome Faktoren.
2. **Das Atmosphäre-Ozean-Subsystem** berechnet die Veränderung der Konzentrationen der treibhauswirksamen Gase in der Atmosphäre, sowie die resultierenden Änderungen in Temperatur und Niederschlag. Das verwendete Klimamodell ist zonal aufgebaut (2-dimensional), d. h. es mittelt über Breitenstreifen. Das verwendete Modell der Spurengas Zusammensetzung in der Atmosphäre ist global gemittelt und unterscheidet nur zwischen troposphärischen und stratosphärischen Konzentrationen.
3. **Das Terrestrische Umwelt Subsystem** simuliert einige wichtige Beziehungen zwischen anthropogenen Landnutzungsänderungen und deren Auswirkungen auf den globalen Klimawandel und die Landbedeckung. In diesem Teil des Modells wird die Transformation der Landbedeckung durch die Einwirkungen der klimatischen, demographischen und ökonomischen Faktoren räumlich hoch aufgelöst ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ Raster) untersucht. Allerdings haben die Triebkräfte hinter diesen Landnutzungs- und Landbedeckungsänderungen nicht die gleiche hohe räumliche Auslösung, sondern werden auf der Ebene der 13 Weltregionen vorgegeben.

Das Modell wird mit historischen Daten kalibriert und für verschiedene Szenarien der demographischen, technologischen, wirtschaftlichen und energietechnischen Entwicklung bis zum Jahr 2100 simuliert. Während der untersuchte Zeitraum für alle 3 Submodelle gleich ist, unterscheiden sie sich stark in ihren zeitlichen Schrittweiten. Die zeitliche Auflösung reicht von einem Tag bis zu 5 Jahren. Als schwächstes Glied in der im Modell beschriebenen Kausalzusammenhänge erscheint die hoch aggregierte Repräsentation der sozialen, ökonomischen und technologischen Triebkräfte sowie die mangelnde Repräsentation ihrer Unsicherheit. Diese aggregierten Faktoren bestimmen die Dynamik des Modells zu einem großen Teil, was unter anderem auch eine adäquate räumliche Auflösung der Modellergebnisse nicht ermöglicht. Durch die Aggregation der sozioökonomischen Faktoren als homogen über 13 Weltregionen entstehen eine eher unzureichende Repräsentationen von lokalen Heterogenitäten von Regionen.

Eine neuere, verbesserte Version des Modells - IMAGE 2.1 (Alcamo et al. 1999) - enthält Verbesserungen in der Berechnung des zukünftigen regionalen Energieverbrauchs im Bereich des Energie-Industrie-Subsystem sowie Verbesserungen der Simulation von globalen Landbedeckungsänderungen im Bereich des terrestrische Umwelt Subsystems. Hier wird neben anderen Verbesserungen vor allem auch der Landbedarf für die Holz- und Brennholzgewinnung berücksichtigt. Im Bereich des Atmosphäre-Ozean-Subsystems wurden die Sulphat-Aerosole in das Modell integriert, um ihrer Bedeutung als Kühlfaktor im Klimageschehen gerecht zu werden.

TARGETS¹⁴

Das TARGETS¹⁵ Modell stellt eine neuere Generation von IAM dar. Hier wird erstmals der verstärkte Treibhauseffekt und die Klimaproblematik in Zusammenhang mit anderen wichtigen Umwelt- und Entwicklungsproblemen wie Bodendegradation, Entwaldung oder der Süßwasserproblematik modelliert. Das Modell versucht das Konzept einer „Nachhaltigen Entwicklung“ von einer globalen Sichtweise aus, unter Berücksichtigung von Weltgesundheit, Bevölkerungsdynamik, Energieressourcen, den globalen biogeochemischen Stoffkreisläufen sowie Land und- Wassernutzungsproblematiken, zu analysieren (Rotmans 1994).

TARGETS ist aus fünf verknüpften Modulen zusammengesetzt, die auf einem „*Pressure, State, Impact and Response*“ (P-S-I-R) Ansatz beruhen, d. h. sie beschreiben den Zustand und die Dynamik eines Systems, den Druck, der auf das System ausgeübt wird, die resultierenden Auswirkungen sowie mögliche politische Handlungsempfehlungen als Antwort (Rotmans 1998). Diese Module stellen Metamodelle dar, d. h., sie sind einfachere, in ihrer Komplexität reduzierte Versionen komplexerer Modelle, die eigenständig zur Modellierung der jeweiligen Problematik eingesetzt werden. Die vertikale Integration der Hauptmodulen erfolgt über Submodule für jede einzelne der P-S-I-R Komponenten (Rotmans 1998a).

Die Hauptmodule von TARGETS sind:

1. **AQUA** - Modul für integrierte Analyse von Wasserproblematiken. Seine inhaltlichen Komponenten umfassen Hydrologie, Wasserqualität, Wasserbedarf und Wasserversorgung. Die Ergebnisse der Simulationen sind Zeitreihen für die Trinkwasserverfügbarkeit, die Grundwasserreserven, die Verteilung der Trinkwasserressourcen und ihre Qualität. Die Effekte eines Klimawandels auf den Meeresspiegelanstieg, die Trinkwasserverfügbarkeit, den Wasserbedarf, die Wasserversorgungskosten, den Anteil der Bevölkerung mit Zugang zu sauberem Wasser, die landwirtschaftliche Bewässerungsfläche sowie den Anteil notwendigen Oberflächenwassers für den Erhalt ökologisch verträglicher Bedingungen sind weitere Resultate.
2. **CYCLES** - Modul zur Beschreibung der langfristigen Dynamiken der globalen C, N, P und S Zyklen, ihrer Interaktion, sowie ihres Einwirken auf den globalen Umweltwandel. Es berücksichtigt die Beziehungen zwischen den Ursachen (anthropogene Störungen der Zyklen), den Mechanismen (Veränderungen der Kreisläufe selbst), und den Auswirkungen (globaler Umweltwandel). Zusätzlich werden noch FCKWs, troposphärisches Ozon und toxische Substanzen in das Modell einbezogen.
3. **ENERGY** - Modul zur Simulation der Nachfrage und des Verbrauchs von kommerziellen Brennstoffen und Elektrizität für verschiedene vorgegebene Stufen ökonomischer Aktivität, der resultierenden Emissionen sowie des Landbedarfs für die Bereitstellung der Brennstoffe. Das Modul besteht aus Submodulen für Energienachfrage, Elektrizitätsgewinnung sowie für verschiedene Brennstoffarten (fest, flüssig, gasförmig).

¹⁴ TARGETS = Tool to Assess Regional and Global Environmental and Health Targets for Sustainability

¹⁵ Die Beschreibung des TARGETS Modells basiert auf Informationen von der TARGETS 1.0 Modell CD-ROM.

4. **TERRA** - Modul zur Beschreibung von Landbedeckung und Landnutzung. Die Nachfrage nach Nahrungsmitteln und Rundholz wird als Funktion von Bevölkerungszahl und Einkommen gesehen. Weitere Determinanten der Landflächen- und Zustandsveränderungen im Modell sind die Wasserverfügbarkeit zur Bewässerung, der Klimawandel und die Bodendegradation. In 3 Submodulen werden die Landnutzungs- und Landbedeckungsdynamik und die Nahrungsmittel- und Futterproduktion in Abhängigkeit von Erosion, Landnutzung und Klimawandel modelliert. Die Folgen werden in Form von Nahrungsmittelengpässen, Verlust von Wäldern und Bodendegradation berechnet, die die Produktivität der Anbauflächen und damit auch das Nahrungsmittelproduktionspotential bestimmen. Mögliche Reaktionen auf die Degradationen sind Neulandgewinnung, Ausweitung von Bewässerungslandwirtschaftsfläche, Intensivierung, Bodenschutzmaßnahmen und Aufforstung.
5. **Population & Health** – Modul zur Simulation der Änderung von Krankheitsanfälligkeit und Sterblichkeit unter verschiedenen sozialen, ökonomischen und Umweltbedingungen. Ausgehend von mehreren sozioökonomischen und ökologischen Determinanten werden Größe und Gesundheit der Bevölkerung bestimmt. Das Modul besteht aus 3 Teilmodulen, einem Fertilitäts-, einem Krankheits- und einem Demographiemodul.

Neben diesen Teilmodellen gibt es als sechstes Element noch einen ökonomischen Szenariengenerator (ECONOMY), der eine einfache Beschreibung der Ökonomie zur Erzeugung von Zeitreihen eines Bruttoweltprodukts (BWP) liefert. Das BWP wird als Summe von Verbrauch, Wert der Industrieproduktion und Dienstleistungen und dem Geldwert der Nahrungsmittelproduktion berechnet und ein Teil des industriellen Outputs den notwendigen Investitionen für Nahrung, Wasser und Energie zugewiesen.

TARGETS startet seine Simulation im Jahr 1900 und läuft bis 2100, wobei die Zeitschritte von einem Monat bis zu einem Jahr variieren können. Im Rahmen der Szenarien werden drei verschiedene Perspektiven für das Wertesystem der Bevölkerung angeboten, die die Eckpunkte eines Wertedreiecks liefern: „*Hierarchist*“, „*Egalitarian*“ und „*Individualist*“. Dabei werden systematische Änderungen in den jeweiligen Modellannahmen der Teilmodelle vorgenommen um die jeweiligen Handlungsweisen modellieren zu können. Die erste Version des Modells läuft mit global aggregierten Variablen. Für folgende Versionen ist eine Unterteilung in 6 Weltregionen geplant, für die dann ein jeweils repräsentatives Land modelliert wird. Der Wert des Modells liegt eher im Verständnis der Prozesse des GW als in seiner Vorhersagekraft (Rotmans 1998a).

2.2 Regionale Ansätze

Für viele der im Rahmen des GW zu untersuchenden Problemlagen ist eine Abschätzung regionaler Folgen und Beiträge zu den globalen Prozessen sehr wichtig. Deshalb wurden in der letzten Dekade verstärkt Anstrengungen unternommen, die regionalen Auswirkungen und Folgen von globalen und regionalen Einflüssen auf Umwelt und Gesellschaft abzuschätzen. Zwei Beispiele für solche Ansätze zur Untersuchung von regionalen

Auswirkungen globaler und regionaler Zivilisation-Natur-Interaktionen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

WAVES¹⁶

Das WAVES Kernprojekt am Potsdam- Institut für Klimafolgenforschung beschäftigt sich mit der Integration der Forschungsaktivitäten eines internationalen Forschungsverbunds zu die zu erwartenden Klimaänderungen im semi-ariden Nordosten Brasiliens. Hauptziel ist es, die Wechselwirkungen zwischen Wasserverfügbarkeit und Migration aus ländlichen Gebieten zu verstehen, um so mögliche Wege einer nachhaltigen Entwicklung aufzeigen zu können. Das Gesamtmodell wird derzeit in einem Projektverbund mit deutschen und brasilianischen Partnern entwickelt (Krol et al. 2000). Für die Rückkopplung innerhalb der Einzelmodelle der beteiligten wissenschaftlichen Disziplinen werden die relevanten sektoralen Prozesse in unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen zunächst interdisziplinär-kompatibel definiert. Das Gesamtmodell versucht über die einzelnen wissenschaftlichen Disziplinen hinweg zu integrieren und Modelle der Klimatologie, Hydrologie, Agrarökonomie sowie der Soziologie / Psychologie der Migration, die menschliches Entscheidungsverhalten beschreiben, zu koppeln. Im Modellkonzept ist die Landflucht als eine Anpassung der Bevölkerung an die sich verschlechternden Lebensbedingungen definiert. Beschäftigung und Einkommen auf der Basis von Ackerbau und Viehzucht sind wichtige Faktoren für die Lebensqualität, die stark vom Klima und der Wasserverfügbarkeit abhängen.

Im Teilmodell des PIK, dem die integrative Aufgabe zufällt, wird die Beziehung zwischen Wasserverfügbarkeit und Migration aus zwei Richtungen untersucht: Zum einen werden die relevanten internen Prozesse sowie die von außen steuernden Kräfte großräumig untersucht, zum anderen werden in den Teilprojekten die Mechanismen der Einzelprozesse teilweise detailliert nachvollzogen, um die Prozessparameter des integrierten Modells abschätzen zu können. Das so entwickelte integrierte Modell **SIM (Semi-arid Integrated Model)** beschreibt die Dynamik des Kausalgeflechts, Wasserverfügbarkeit – Landwirtschaft – Lebensqualität, für die Bundesländer des brasilianischen Nordostens von einer systemtheoretischen Warte aus (Krol et al. 2000). Hypothese über relevante Elemente der Beschreibung der Dynamik des System bestimmte die Auswahl der Variablen und Prozesse die intern im Model repräsentiert werden und von solchen die als Triebkräfte in die integrierten Szenarien eingehen. Als räumliche Diskretisierungseinheit dienen die 332 Munizipien der Bundesstaaten Ceará und Piauí. Die zeitliche Auflösung reicht von einem Tag bis zu fünf Jahren und richtet sich nach dem zugrundeliegenden Prozess. Der Zeithorizont des Modells liegt in der Größenordnung von 50 Jahren.

Das SIM-Modell besteht aus 4 Hauptmodulen:

1. **CLIMO**: Eine der wichtigsten treibenden Kräfte der im Modell betrachteten Prozess, ist das Klima. Eine Rekonstruktion historischer Klimadaten für die 60-jährige Periode von 1920 bis 1980 und eine Simulation der Jahre 2001 bis 2050 wird mit Hilfe eines Klima-

¹⁶ WAVES = **W**ater **A**vailability, **V**ulnerability of **E**cosystems and **S**ociety in the Northeast of Brazil

modells bereitgestellt. Die Variablen sind Niederschlag, Globalstrahlung, minimale und maximale Temperatur, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte. Im Szenario werden statistische Charakteristika der Rekonstruktion mit angenommenen großräumigen Klimatrends kombiniert, die aus transienten Klimaänderungssimulationen eines globalen Klimamodells (ECHAM 4) abgeleitet werden.

2. **HYMO:** Das Modul besteht aus zwei Komponenten für die natürliche Wasserverfügbarkeit unterschiedlicher Wasserspeicher einerseits und für die Wassernachfrage in unterschiedlichen Nutzungssektoren andererseits. Die Kopplung der Teilmodule erfolgt in zwei Schritten über die Zuordnung der Wassernutzungsarten zu den unterschiedlichen Wasserspeichern und einer anschließenden Berechnung der entnommenen Wassermenge in Abhängigkeit von Wasserangebot und Bedarf.
3. **LAMO:** Das Landwirtschaftsmodul stellt die Verbindung zwischen Wasserverfügbarkeit und Lebensqualität her. Die Erträge bestimmen in Abhängigkeit von den Niederschlagsbedingungen und den Böden den ökonomischen Erfolg der Landwirtschaft und damit das Einkommen.
4. **SEMO:** Der sozioökonomische und soziokulturelle Teil versucht über szenarienspezifizierte Annahmen für Einflussvariablen der Lebensqualität, eine Beschreibung der Lebensbedingungen. Abhängig von der Lebensqualität wird eine Tendenz zur Migration abgeleitet, die die dynamischen Prozesse des demographischen Modells und damit die Bevölkerungsentwicklung einer Region beschreibt.

Die Hauptteile bestehen aus Teilmodellen in denen die Entwicklungen bestimmter Variablen beschrieben werden, die durch extern definierte Kräfte oder in anderen Teilmodellen errechnete, interne Variablen beeinflusst werden. Externe treibende Kräfte, wie z. B. Geburten- und Sterberaten oder auch Preisentwicklungen agrarökonomischer Produkte werden nicht im Modell errechnet, sondern gehen als Szenarien in die entsprechenden Teilmodelle ein.

Die McKenzie Einzugsgebietsstudie

In dieser Studie wird ein „*Integrated Regional Assessment*“ für das McKenzie Einzugsgebiet im Norden Kanadas durchgeführt. Diese Studie zeichnet sich vor allem durch ihr „*stakeholder involvement*“ aus, d. h. die Integration der betroffenen Bevölkerung. Das untersuchte Einzugsgebiet ist das zehntgrößte der Erde mit etwa 1.8 Mio. km² und ist nur sehr dünn mit etwa 150 000 Menschen besiedelt. Die Annahme, dass gerade Regionen in höheren Breiten am stärksten von einem Klimawandel betroffen werden, motivierte diese Studie über die Auswirkungen eines Klimawandels auf diese arktische und sub-arktische Region (Cohen 1993, 1994). In der Studie werden Szenarien für Klimawandel und sozioökonomische Trends über einen Zeitraum von 50 Jahren verwendet. Für den Klimawandel wurden 4 unabhängige Szenarien verwendet:

- zwei 2 x CO₂-Gleichgewichtsläufe von Globalen Zirkulationsmodellen (GCM), eines vom „*Canadian Climate Centre*“ (CCC) und eines vom *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* in Princeton (GFDL-R30);

- ein transienter GCM-Lauf vom *Goddard Institute of Space Studies* (GISS); sowie
- ein rasterzellenweise zusammengesetztes Szenario von Daten des CCC, Klimaaufzeichnungen von vergangenen „warmen“ Jahren, paläoklimatischen Daten und positionsanalogen Daten vom Klima anderer Standorte.

Für das Bevölkerungswachstum und die sozioökonomische Entwicklung wurden ebenfalls 4 Szenarien verwendet, um die große Bandbreite möglicher plausibler Entwicklungspfade für die Region darstellen zu können.

Die Analysen wurden von einem Verbund von 40 Forschungsinitiativen an Universitäten, Bundes- und Provinzeinrichtungen auf verschiedenen zeitlichen und räumlicher Skalen durchgeführt. Die genutzten Werkzeuge reichten von Geographische Informationssystemen (GIS) über Modelle hin zu Interpolationsmethoden für das „*Downscaling*“ der Klimadaten. Jede der an der Studie beteiligten Einrichtungen untersuchte mehrfach einen Standort und Auswirkungssektor unter derzeitigen Bedingungen und unter den jeweils 4 Klima- und sozioökonomischen Szenarien. Die Integration erfolgt über die Sektoren hinweg und untersucht die Auswirkungen auf jedem Sektor mit den beteiligten Änderungen in den anderen Sektoren. Zur Reduzierung der Anzahl der Industrien wird das McKenzie Einzugsgebiet mit Hilfe einer angepassten Version des kanadischen regionalen Input-Output-Modells als eine einzelne Region in der Modellierung behandelt. In 2 weiteren unabhängigen Teilprojekten wurde ein GIS-gestütztes Multiattributschema zur Integration der natürlichen Ressourcenbasis entwickelt. Hier sollen in einer Weiterentwicklung auch Informationen aus den physischen, biologischen und sozialen Bereichen mit traditionellem, indigenen Wissen über die regionalen Ressourcen und ihre Klimaabhängigkeit verbunden werden, um so auch die lokalen Adressaten besser ansprechen und in den Analyseprozess integrieren zu können. Die Studie definiert politikrelevante Fragestellungen und geht sehr weit in der Partizipation der lokalen Bevölkerung in den Prozess. Allerdings wird die Effektivität des „*Assessments*“ durch die Diversität der beteiligten Institutionen und der teilweise fehlenden Koordination stark eingeschränkt (Cohen 1993, 1994).

2.3 Lokale Ansätze

Die im Folgenden vorgestellten Ansätze versuchen vergleichbare Aussagen über regionale Erscheinungsformen globaler Umweltveränderungen aus lokalen Fallstudien zu generieren. Diese Ansätze stehen in der geographischen Fallstudientradition. Vor allem die Beziehung zwischen sozioökonomischer Entwicklung und Landnutzungsänderungen steht hier im Vordergrund der Untersuchungen.

In der Literatur zu globalen Umweltveränderungen werden eine Reihe von Problembereichen sehr eng mit anthropogenen Landnutzungsänderungen verknüpft, wie z. B. Bodendegradation, Biodiversitätsverluste, Verarmung der lokalen Bevölkerung, etc. (vgl. Barrow 1991, 1995; Doppler 1997; Goudie 1994; Johnson & Lewis 1995; Manshard & Mäckel 1995; Nisbet 1994; Roberts 1994; Turner et al. 1995; WBGU 1993 ff.). Dementsprechend lassen sich auch wesentliche Aspekte möglicher kritischer zukünftiger Entwicklungen der Mensch-Um-

welt-Beziehungen gut durch die Dynamik von Landnutzungsänderungen erforschen. Eine weit verbreitete Form der Beschreibung von landnutzungsänderungsbedingten, kritischen Zuständen bzw. Entwicklungen der Mensch-Umwelt-Beziehungen stellen die in der geographischen Tradition erzeugten regionalen und lokalen Fallstudien und Erhebungen dar. Diese Studien liegen zwar in einer sehr großen Zahl für die verschiedenen Regionen der Welt vor, sind allerdings in ihrer Aussagekraft nur schwer vergleichbar und in ihrer Anzahl auch nur schwer überschaubar. Auf Grund der großen Heterogenität von verwendeten Methoden und Fragestellungen sowie den uneinheitlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungsgrad der untersuchten Probleme, führt eine bloße Addition der vorliegenden Resultate allein noch nicht zu einem global kohärenten Bild der vergangenen und der zukünftigen Dynamik. Nur unter Heranziehung zielgerichteter Methoden der vergleichenden Fallstudienauswertung, sowie zusätzlicher Informationsquellen (z. B. globaler Datensätze) und Modellen der Landnutzungs-dynamik, die auch qualitativ und unscharf vorliegendes Wissen verarbeiten können, ist das große, aber bislang weitgehend unausgeschöpfte Potential an regionalen Fallstudien für die möglichst konsistente Analyse globaler landnutzungsbedingter Umweltveränderungen nutzbar (Petschel-Held & Lüdeke 2001).

Ansätze zur Gruppierung der in vielen Fallstudien aufgestellten Wechselwirkungshypothesen finden sich z. B. bei Leonard (1989) für die Entwicklungsländer, nach dessen Untersuchungen hohes Bevölkerungswachstum, landwirtschaftliche Modernisierung auf Gunststandorten sowie ungleiche Landverteilung (eingeschränkter Zugang der ländlichen Bevölkerung zu produktivem Land) in Abhängigkeit von den natur- und sozialräumlichen Gegebenheiten zu spezifischen Landnutzungsänderungsmustern mit Degradationsfolge führen. Kates und Haarmann (1992) systematisieren darüber hinaus auch die sozioökonomischen Auswirkungen landnutzungsänderungsbedingter Degradation der Ressourcenbasis über die Identifikation verschiedener typischer Verarmungs-Degradations-Spiralen. Neben diesen grundsätzlichen methodischen Überlegungen gibt es noch eine weitere, relativ neue Forschungsrichtung aus dem Umfeld der Geographie, die sich im Zuge der Erforschung globaler Umweltveränderungen zu einer wichtigen Integrations- bzw. Metadisziplin herausgebildet hat. Hier werden *systematische Vergleiche des Zustands* und der *Dynamik kritischer Mensch-Natur-Interaktionen* in gänzlich verschiedenen Regionen durchgeführt. Zum Teil ist dies gekoppelt an internationale Forschungsprogramme wie das LUCC-Projekt von IHDP und IGBP.

Neben diesen Forschungsprogrammen stellt vor allem die Arbeit der Gruppe um Kasperson et al. („*Regions at Risk*“ 1995) einen Meilenstein in der problemorientierten vergleichenden geographischen Fallstudienauswertung dar und ist für die integrierte Analyse von regionalen und globalen Umweltveränderungen von großer Bedeutung. Ausgewählt und untersucht wurden in dieser Studie neun Regionen deren *regionale Entwicklungspfade* durch qualitative Zeitverläufe (*Trajektorien*) von aggregierten Variablen charakterisiert werden. Diese qualitative Zeitverläufe beschreiben nur die qualitativen Beziehungen zwischen den Variablen im Sinne von gegenseitiger Verstärkung oder Abschwächung. Diese Herangehensweise führt zur Vergleichbarkeit der beobachteten Prozesse in verschiedenen Regionen. Die in dieser Studie untersuchten Regionen sind:

1. **Amazonien** - eine Region an der Entwaldungsfront mit Umwandlung von tropischem Regenwald zu marginaler landwirtschaftlicher Nutzfläche.
2. **Das östliche Sundaland** (Indonesien, Malaysia) - eine Region tropischen Regenwalds die von internationalen Holzeinschlagsfirmen bedroht wird.
3. **Die Ukambani Region Kenias** - eine semi-aride Region im östlichen Kenia die von einer Änderung der traditionellen Lebensweisen sowie Landflucht der männlichen Bevölkerung betroffen ist.
4. **Eine Gebirgsregion in Nepal** – die von schnellem Bevölkerungswachstum unter Wandel der Produktions- und Nutzungsweisen der fragilen Umwelt betroffen ist.
5. **Das Ordos-Plateau in China** - eine aride Region in der inneren Mongolei, die Ziel eines zentral geplanten Landentwicklungsprojekts wurde.
6. **Die Aralseeregion** - eine aride Region die durch den zentral geplanten Eingriff in den Wasserhaushalt für ein Megabewässerungsprojekt zerstört wurde.
7. **Das Llano Estacado** - eine semi-aride Region in den südlichen USA, wo in großen Maßstab Bewässerungslandwirtschaft auf Kosten fossiler Grundwasserressourcen und unter starker Erosion betrieben wird.
8. **Der Kessel von Mexiko Stadt** - eine der größten Konzentrationen von Menschen und Industrie weltweit, der in einem abgeschlossenen Umfeld durch schnell ansteigende Verschmutzung von Wasser und Luft gelegen ist und in seiner Versorgung von den umliegenden Regionen abhängig ist.
9. **Die Nordsee** - ein gemeinsamer Ressourcenpool, der umgeben von den am längsten industrialisierten und reichsten Nationen der Welt zu einer Senke der Abfälle der Konsumgesellschaft wurde.

Beim derzeitigen Stand der Forschung muss dieser Ansatz als stimmiger Versuch zur Schließung der weithin konstatierten Lücke zwischen lokalen und regionalen Fallstudien und Weltmodellen bzw. globalen Charakterisierungen menschlicher Umweltveränderungen gesehen werden. Insbesondere die Suche nach regionalen Trajektorien, also die qualitative Charakterisierung von kritischen Zeitverläufen von Variablen, ist ein wichtiger Ansatzpunkt für die integrierte Analyse regionaler und globaler Umweltveränderungen. Als Kritik an dem Ansatz ist das verwendete hohe Aggregationsniveau der Variablen „*Umweltzustand*“ zu nennen. Eine Disaggregation nach gesonderten Trends in der Hydro-, Bio- oder Pedosphäre, ist im Allgemeinen notwendig, um regionalen naturräumlichen Besonderheiten Rechnung zu tragen und die jeweils wichtigen landnutzungsbedingten Umweltschädigungen zu identifizieren. Das Aggregationsniveau „*menschliche Wohlfahrt*“ wiederum müsste angesichts der bekanntermaßen hohen nationalen und regionalen sozioökonomischen Disparitäten differenziert werden. Eine Unterscheidung nach sozialen Gruppen, wie sie etwa bei Rocheleau et al. (1995) angedeutet ist, ist anzustreben.

2.4 Defizite der bisherigen Herangehensweisen

Wie aus der Beschreibung der bisherigen Ansätze zur Analyse globaler und regionaler Umweltveränderungen deutlich wurde, ist noch keine optimale Lösung gefunden. Bei den globalen Modellierungsansätzen findet durch die globale Aggregation der Variablen meist keine räumliche Differenzierung statt. Die Verbindung der einzelnen Modellelemente erfolgt über wenige Austauschparameter und die verwendeten Teilmodelle erscheinen eher als „*black boxes*“. Auch die üblicherweise verwendete Parametrisierung einiger weniger Schlüsselgrößen der Ökonomie als Repräsentanz von ökonomischen und sozialen Handeln, erscheint fragwürdig und wird der Realität nur unzureichend gerecht. Auch die Welt-System-Theorie-Ansätze greifen in ihrer monokausalen Beschreibung über Entwicklungsdisparitäten zu kurz.

Die bisherigen auf Kausalhypothesen beruhenden, quantitativen Modellierungsansätze von regionalen Landnutzungsänderungsdynamiken, wie sie in den globalen IAM (z. B. Alcamo et al. 1998 oder Zuidema et al. 1994 für IMAGE) gegeben sind, fallen oft, was die Berücksichtigung und Verknüpfung von Einflussfaktoren angeht, hinter den Wissenstand um die Wirkungsmechanismen aus den qualitativen Analysen zurück (siehe auch Smil 1993). Bei rein statistischen Ansätzen andererseits (z. B. Veldkamp & Fresco 1996; Mertens & Lambin 1997) bleibt prinzipiell die Frage nach der räumlichen und zeitlichen Übertragbarkeit der Prognose offen. Ausgehend von einer ausführlichen Analyse der bestehenden Beschreibungen und Erklärungen des Landnutzungsänderungskomplexes im Zusammenhang mit dem GW, konstatieren Turner et al. (1995), dass die Modellierung der Dynamik von Landnutzungsänderung und Landbedeckungsänderung durch die große Variation der natürlichen und sozialen Gegebenheiten behindert wird. Die auf relativ einfachen Annahmen beruhenden, global aggregierte Abschätzungen treffen in den wenigsten Teilen der Welt zu, während die lokalen und regionalen IA zu begrenzt sind, um auf andere Maßstäbe extrapoliert werden zu können. Als alternative Forschungsstrategie sollen, ausgehend von einer Initiative des LUCC-Projekts, standardisierte Fallstudienanalysen erfolgen. Neben einem standardisierten Analyseverfahren für bereits bestehenden Fallstudien zu Landnutzungsänderungen und ihren Folgen sollen auch neue, standardisiert durchzuführende Fallstudien erhoben und analysiert werden. Zur formalen Behandlung der Dynamik schlagen Turner et al. (1995) die Verwendung von bisher in anderen Zusammenhängen genutzten qualitativen (Kosko 1986) oder topologischen (Odum 1983) Verfahren zur Analyse der typischen Ursache-Wirkungs-Beziehungen vor. Eine alternative Vorgehensweise über die standardisierte Analyse bereits bestehenden nicht-standardisiert erhobener Fallstudien wird von Petschel-Held und Lüdeke (2001) vorgestellt. In einer systematischen Weiterführung des Syndromkonzepts und des Kasperson'schen Ansatzes (Kasperson et al. 1995) werden hier regionale Fallstudien unter Verwendung Qualitativer Differentialgleichungen (Kuipers 1994; Petschel-Held et al. 1999, 1999a) verglichen und zu qualitativen Modellen riskanter funktionaler Muster (HFP - „*hazardous functional pattern*“) integriert.

Diese methodischen Defizite der bisher bestehenden Herangehensweisen zur Beschreibung und Analyse globaler Umweltveränderungen und des Zivilisation-Natur-Systems motivieren die Beschreibung über typische Ursache-Wirkungsmuster. Dieser Ansatz muss in seiner

funktionalen Auflösung eine mittlere Ebene der Erklärung der Prozesse des GW ansteuern, die die vorhandenen Kausalmechanismen besser repräsentiert als die stark vereinfachten Kausalketten der bisherigen Weltmodelle, aber nicht versucht die Welt aus der atomaren Sicht unzähliger Fallstudien zu beschreiben. Die kleinste, im Bezug auf die wesentlichen Ursache-Wirkungszusammenhänge homogene, räumliche Einheit ist hierbei anzustreben. Die funktionale und die räumliche Auflösung müssen dabei in Übereinstimmung stehen. Es sollte so weit von den individuellen Fallstudien abstrahiert werden, dass die grundlegenden Prozesse erkennbar, vergleichbar beschrieben und analysiert werden können. Diese Aufgabe verlangt auch eine räumliche Abstraktion. Weder kann die Welt als eine „Box“ beschrieben werden, noch kann sie im Maßstab 1:1 reproduziert werden. Der benötigte Beschreibungsansatz muss flexibel von der globalen bis auf die regionale Ebene anwendbar sein. Die benötigte Auflösung muss ein Modellieren auf einer Ebene zulassen, so dass Ergebnisse von Prognosen vor dem Eintritt der Ereignisse fertiggestellt werden können und politische Handlungsempfehlungen zu Prävention aber auch zur Lösung bestehender Probleme abgegeben werden können. Diese Aufgabe wird derzeit erfolgsversprechend mit dem Syndromkonzept zu lösen versucht.