

Gekoppelte Systeme. Zur Modellierung und Prognose sozial-ökologischer Transformationen

Egon Becker, Engelbert Schramm

1. Problembeschreibung

Sozial-ökologische Transformationen¹ betreffen sowohl Wirtschaft und Gesellschaft als auch einzelne ökologische Gefüge und die Natursphäre insgesamt. Sozio-ökonomische Ursachen und ökologische Wirkungen sind in diesen form- und strukturverändernden Prozessen komplex verwoben mit ökologischen Ursachen und sozio-ökonomischen Wirkungen. Natürliche und soziale Prozesse werden dabei auf immer neue Weisen miteinander verflochten, was dazu führt, dass sich neuartige Prozesse ausbilden, bei denen es wenig Sinn macht, die sozialen und die physischen Vorgänge konventionell als voneinander unabhängig zu betrachten und in isolierten Betrachtungen zu analysieren.

Grundsätzlich ist zu fragen, ob und wie sich derartig komplexe Zusammenhänge zwischen gesellschaftlichen und natürlichen Systemen, wie sie bei sozial-ökologischen Transformationen vorliegen, noch so weit durchschauen lassen, dass ein adäquates Management der Komplexität möglich ist. Vor allem ist ungeklärt, ob und wie sich in solchen Systemzusammenhängen mit wissenschaftlichen Mitteln Prognosen erstellen lassen, an denen sich die verschiedenen (wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen) Akteure sinnvoll orientieren können. Die Mehrzahl der Modelle der Umweltforschung bilden Beeinflussungen zwischen Natur und Gesellschaft als eine gegenseitige Störung weitgehend autonomer Sphären ab. Nur unter dieser Voraussetzung können Natur und Gesellschaft weiterhin unabhängig voneinander erforscht werden; nur dann ist es ausreichend, ein Modell entweder sozialwissenschaftlich oder naturwissenschaftlich aufzubauen². Die Modelle setzen nicht nur eine strikte Trennbarkeit zwischen den Sphären der Natur und der Gesellschaft voraus, was modelltechnisch auch zu erheblichen Restriktionen führt: Sowohl die in den Systemen miteinander verknüpften Variablen als auch die anthropogenen Störungen sind dabei in der Regel ausschließlich materiell-energetische Größen³; die in den Modellen prognosti-

zierten Effekte sind fast ausschließlich linearer Art. In Gegensatz zur konventionellen Umweltforschung kann eine sozial-ökologische Forschung das Theorem der strikten Trennbarkeit von Natur und Gesellschaft nicht mehr als unhinterfragbare Voraussetzung teilen. Gesellschaftliches Handeln und Wirtschaften haben in den ökologischen Gefügen auch (nicht-lineare) Effekte zur Folge, welche nicht alleine auf physische Faktoren zurückgeführt werden können. Für eine sozial-ökologische Forschung müssen folglich andere Konzepte und Modellierungsstrategien entwickelt werden. Der „Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen“ (WBGU) hat in seinem ersten Jahresgutachten ein allgemeines Rahmenkonzept skizziert, auf das auch in der sozial-ökologischen Forschung zurückgegriffen werden kann. Unterschieden wird auf der höchst aggregierten Stufe zwischen einer „Natursphäre“ und einer „Anthroposphäre“, welche zusammen ein „Erdsystem“ bilden. Beide Sphären sind durch deren „Metabolismen ineinandergeflochten“. – „Nur wenn man umfassende quantitative Kenntnisse über die Kopplung von Natur- und Anthroposphäre besitzt, kann man die zentrale Frage nach der eventuellen Destabilisierung der Natursphäre durch die Dynamik der Anthroposphäre beantworten.“ (WBGU 1993, S. 14)

Diese anschauliche Vorstellung „gekoppelter Systeme“ eröffnet interessante Möglichkeiten für die sozial-ökologische Forschung. Diese wurden in Bezug auf die Prognostizierbarkeit und Modellierbarkeit sozial-ökologischer Transformationen im BMBF-Sondierungsprojekt „Zur Vorhersagbarkeit sozial-ökologischer Transformationen“ ermittelt und z.T. differenzierend überprüft⁴. Für Vertiefungen wurde dabei – aufbauend auf einer Betrachtung verschiedener Versorgungssysteme (vgl. Becker u. Schramm 2001) – der Bereich der Wasserversorgung ausgewählt.

1.1. Grundlegendes zum Konzept gekoppelter Systeme

Eine sozial-ökologische Modellierung sollte die Kopplungskonstellationen zwischen „natürlichen“ und „gesellschaftlichen“ Systemen angemessen berücksichtigen. Wir verstehen unter Kopplungen spezielle Arrangements oder Konstellationen zwischen unterschiedlichen Entitäten (Dingen, Systemen, Strukturen und Prozessen) – z.B. ihre räumliche Anordnung, ihre materielle Beschaffenheit, die Bedingungen für den Stoffwechsel und die Übertragung von Energie und Information –, welche die Rahmenbedingungen für die Wechselwirkungen zwischen diesen Entitäten schaffen. Beschränkt man sich auf stofflich-energetische Wirkungszusammenhänge zwischen der Natur- und der Anthroposphäre (grenzt also zunächst die für die Gesellschaft wesentlichen symbolischen Beziehungen und Deutungen aus) dann lassen sich die verkoppelten Sphären in einer physikalischen Analogie nach der Stärke der Kopplung klassifizieren als:

- vollständig entkoppelte Systeme
- locker gekoppelte Systeme
- stark gekoppelte Systeme
- fest gekoppelte Systeme.

Physikalisch läßt sich diese Klassifikation beispielsweise an zwei Feder-Pendeln mit unterschiedlicher Masse illustrieren: Sind sie „vollständig entkoppelt“, dann schwingt jedes Pendel periodisch mit seiner jeweiligen Eigenfrequenz; sind sie „locker gekoppelt“ (z.B. durch einen dünnen Gummifaden zwischen den Pendelmassen), dann stören sich die Pendel gegenseitig, sie schwingen

leicht aperiodisch mit kleiner Frequenzverschiebung; sind sie „stark gekoppelt“ (z.B. durch einen kräftigen Gummifaden) dann kommt es zu einem Schwingungsverhalten, das sich nicht mehr auf das Verhalten der entkoppelten Pendel zurückführen läßt: sie bilden eine komplexes Gesamtsystem, das in nicht-lineares und häufig auch in chaotisches Verhalten übergehen kann. Sind die Pendel „fest gekoppelt“ (z.B. durch eine Stange zwischen den Pendelmassen), dann schwingt das Gebilde als Einheit periodisch mit einer neuen Eigenfrequenz. Feste Kopplung und vollständige Entkopplung sind in der sozial-ökologischen Forschung vernachlässigbare Extreme: Eine vollständig von der Natursphäre entkoppelte Anthroposphäre ist schon dadurch eine theoretische Fiktion, daß Menschen als Lebewesen immer in einem Stoff- und Energieaustausch mit ihrer Umwelt stehen. Eine feste Kopplung läge etwa bei unauflösbaren Symbiosen vor.

Für die sozial-ökologische Forschung bilden stark gekoppelte Gesellschafts-Natur-Systeme die größte Herausforderung. Deren Modellierung steckt immer noch in den Kinderschuhen. Das prognostische Wissen über sozial-ökologische Transformationen, das für ein an Kriterien der Nachhaltigkeit orientiertes gesellschaftliches Handeln benötigt wird, ist daher hochgradig unsicher. In der Sondierungsstudie wurden Möglichkeiten der Modellierung von infrastrukturegebundenen Versorgungssystemen (für Wasser, Energie, Ernährung, Mobilität, usw.) interdisziplinär erkundet. Dabei wurden parallel zwei Wege eingeschlagen: Einerseits wurde untersucht, ob die Einführung des Konzepts starker Kopplungen für die Untersuchung sozial-ökologischer Transformationen überhaupt einen Erkenntnisgewinn bringen kann. Die aus der Physik stammende Vorstellung der starken Kopplungen wurde dabei als analytisches Schema benutzt, um abschätzen zu können, ob mit seiner Hilfe Erkenntnisfortschritte erzielbar sind. Andererseits wurde sondiert, welche einschlägigen Kompetenzen zu ihrer Modellierung nutzbar sind. Dazu wurden zunächst die fachlichen Voraussetzungen für eine mathematische Modellierung entsprechender Kopplungen erarbeitet (vgl. auch Becker et al., in Vorbereitung).

2. Verdeutlichung der Problemlage am Beispiel

Versorgungssysteme

Moderne Industriegesellschaften haben für die Befriedigung der Grundbedürfnisse ihrer Bevölkerung eine effektive Infrastruktur aufgebaut. Versorgungssysteme⁵ für Nahrungsmittel, Wasser und Energie, Verkehrs- und Informationssysteme bilden eine technisch-materielle Struktur, welche die Flüsse von Stoffen, Energie und Information kanalisieren und regulieren. Diese Versorgungssysteme unterliegen einem ständigen Wandel. Die von den Versorgungssystemen zu erbringenden Leistungen orientieren sich am Bedarf, der von der Gesamtzahl der zu versorgenden Menschen, deren Bedürfnissen, sozialem Status und wirtschaftlicher Lage abhängt. Versorgungssysteme müssen also sowohl auf die Populationsdynamik als auch auf die Veränderung von Bedürfnissen, Sozialstrukturen und Ökonomie reagieren. Versorgungsbetriebe für Wasser, Gas und Elektrizität werden vielfach noch als kommunale Eigenbetriebe oder in der Form kommunaler oder regionaler Zweckverbände betrieben; es dominieren aber große gemischtwirtschaftliche Unternehmen, die derzeit unter starkem Privatisierungsdruck stehen (vgl. die Beiträge von Kluge u. Lux sowie Libbe et al. in diesem Band). Sozial-ökologische Transformationen der Versorgungssysteme, die z.T. krisenhaft verlaufen, resultieren aus Veränderungen auf anderen Beobachtungsebenen (Versor-

gungssysteme sind auf der Meso-Ebene angesiedelt): Auf der Makro-Ebene sind hier z.B. Globalisierungs- und Privatisierungs-Prozesse zu nennen. Auch Veränderungen auf der Mikro-Ebene (z.B. Verhaltensänderungen von Individuen, die zu einem dezentralen Einspeisen von Solarstrom ins Netz oder einem forcierten Wassersparen führen) können einen erheblichen Einfluß haben. Das Zusammenspiel zwischen Vorgängen auf den verschiedenen Ebenen hat Auswirkungen auf das Verständnis der Regulation der Transformationsprozesse. Technologischer Wandel und ökonomische Globalisierung haben in den letzten Jahren die Komplexität der gesellschaftlichen Versorgungssysteme in einem noch kaum überschaubaren Ausmaß gesteigert: Technisch werden immer mehr Systemelemente (z.B. Nahrungsmittelerzeuger, Brunnen, Kraftwerke, Computer) miteinander verbunden, wodurch sich die einzelnen Systeme räumlich ausdehnen und mehr und mehr den gesamten Globus umspannen. Dabei nimmt die Anzahl der in die Systeme eingebundenen und miteinander verbundenen Elemente rapide zu, hierdurch aber auch die Möglichkeiten gegenseitiger Einwirkungen, Rückwirkungen und Abhängigkeiten. Zugleich sind die großen und kapitalintensiven Versorgungssysteme eingebunden in Marktstrategien und Finanzierungsnotwendigkeiten überregional operierender Unternehmen, die zunehmend privatwirtschaftlich verfasst sind. Nahrungsmittel, Wasser und Energie werden als Waren auf globalen Märkten gehandelt. Die Größe und das Funktionieren der Versorgungssysteme ist abhängig von der Anzahl der jetzt und zukünftig zu versorgenden Menschen, den Bedürfnissen und Einkommensverhältnissen der Bevölkerung, von Konsumverhalten und Lebensstilen, aber auch vom industriellen Wasserbedarf und der verfügbaren Technik. Die einzelnen Systeme sind zudem auf einer technisch-materiellen Ebene miteinander verkoppelt: Das System der Nahrungsversorgung setzt ein ausgebautes Güterverkehrssystem voraus und dieses wiederum ein Versorgungssystem für Energie. Und sämtliche Systeme werden mehr und mehr abhängig von leistungsfähigen LuK-Netzwerken. Nur damit lassen sie sich noch technisch regeln und ökonomisch steuern. Jedes dieser technisch-ökonomischen Systeme ist aber auch über vielfältige Wirkungsketten mit natürlichen Systemen verbunden, die einerseits als Ressourcen genutzt und andererseits für die Aufnahme von Abfällen und Schadstoffen gebraucht werden. Dadurch verändern sich aber diese Systeme in einer nur schwer vorhersehbaren Weise. Es entstehen komplexe sozial-ökologische Problemlagen, auf die wiederum mit technischen, ökonomischen, politischen oder rechtlichen Mitteln reagiert wird.

Die kompliziert verketteten Wirkungszusammenhänge zwischen technischen, ökonomischen und ökologischen Faktoren in den verschiedenen Versorgungssystemen und zwischen ihnen lassen sich auf vielfältige Weise beschreiben und darstellen. Es gibt nicht so etwas wie die einzig richtige und sachangemessene objektive Beschreibung, da jede Beschreibung zugleich eine bestimmte Form der Regulation normativ auszeichnet. Bei den Betreibern und in der Öffentlichkeit wächst aber die Skepsis, ob sich derartig komplexe Systemzusammenhänge überhaupt noch so durchschauen lassen, dass ein adäquates Management der Komplexität möglich ist. Noch stärker ist die Skepsis, ob sich in solchen Systemzusammenhängen mit wissenschaftlichen Mitteln Prognosen erstellen lassen, an denen sich die verschiedenen Akteure noch sinnvoll orientieren können. Die Probleme einer Erklärung und Prognose verschärfen sich noch, wenn die Akteure dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung folgen wollen, denn dann müssen auch die Auswirkungen auf die natürlichen Systeme erfasst werden. Im Wasserversorgungsektor kommt es – angestossen durch den Privatisierungsdiskurs – zu betrieblichen Zusammenschlüssen räumlich benachbarter Gewinnungsanlagen verschiedener, weiterhin unabhängig bestehender Unternehmen, um Rationalisierungseffekte durch Konzentrationen in der Ressourcenbewirtschaftung und in der Umweltsiche-

zung zu erzielen. Die Konzentration der Wassergewinnung in wenigen Anlagen wird einerseits zur Folge haben, dass derzeit bestehende Wasserschutzzonen z.T. aufgegeben werden und das Niveau des Umwelt- und Gewässerschutzes in diesen Gebieten sinkt; andererseits ist ungeklärt, ob die dann konzentriertere Entnahme von Wasser an wenigen Stellen nicht zu höheren Umweltschäden (z.B. durch eine stärkere Absenkung des Grundwasserspiegels) führt. Privatisierung und Liberalisierung haben auch Auswirkungen auf die Pflege des Verteilungsnetzes: Einsparungen bei Ersatzinvestitionen im Rohrnetz haben teilweise erhebliche ökologische Auswirkungen, weil es aufgrund von Undichtheiten dann zu höheren Wasserverlusten aus dem Netz kommt und die Wasserentnahmemengen wesentlich über den Verbrauchsmengen liegen⁶. Zusätzlich kommt es zu Infiltrationen aus der Versorgungsleitung ins Grundwasser; diese unbeabsichtigte (in der Regel material- und energieaufwendige) Grundwasseranreicherung führt dazu, daß chemisch konditioniertes (z.B. gechlortes) Wasser in die Grundwasserleiter eintritt. In speziellen Fällen kann es aufgrund der undichter Netze aber auch zum Eindringen von Grundwasser ungesicherter hygienischer Qualität in die Versorgungsleitungen kommen.

In der Vergangenheit war es relativ einfach, infrastrukturegebundene Versorgungssysteme zu betreiben. Bedarfsprognosen liessen sich bis in die 1970er Jahre relativ einfach erstellen, so dass es nicht schwierig war, die richtige Auslegung der Versorgungsinfrastruktur zu ermitteln (z.B. Erschließung von Wasserressourcen, Dimensionierung von Pumpen und Rohrleitungen, Bau von Wasserzweischenspeichern, Steuerung der Verteilung). Zunehmend wird es jedoch schwieriger, adäquate Bedarfsprognosen zu erstellen. Mittlerweile ist für den Wasserbedarf gesichert, dass eine Ausstattung mit Wasserspartechiken, der wirtschaftliche Strukturwandel (von der wasserintensiven Produktion zu Dienstleistungsbetrieben), aber auch die umwelt- bzw. preisbewußteres Verbrauchsgewohnheiten in den Haushalten dazu führten, daß in den alten Bundesländern der durchschnittliche Wasserverbrauch nicht mehr kontinuierlich stieg, sondern in den 1990er Jahren sogar (von 145 l pro Mensch und Tag auf 136 l pro Mensch und Tag) gesunken ist (vgl. Ipsen et al. 1998). Ökonomisch dominieren in der Wasserversorgung fixe Kosten für Wassergewinnungs- und -verteilungsanlagen; sie machen etwa 80 % des Wasserpreises aus. Daher kommt es durch den Verbrauchsrückgang zu einem Ansteigen des Wasserpreises, was wiederum dort, wo – wie für den Wasserverbrauch in den neuen Bundesländern festgestellt wurde (vgl. Preissendörfer 1998) – ökonomisch rational gehandelt wird, zu weiteren Einsparungen führt. Es ist unklar, wie sich in Zukunft der Wasserbedarf weiter entwickeln wird. Kann die Wasserversorgung also zurückgebaut werden oder muß weiterhin überdimensioniert werden?

Erhebliche Überkapazitäten müssen auch vorgehalten werden, weil es starke Verbrauchsschwankungen innerhalb des Tagesablaufs gibt und eine kontinuierliche Versorgung aller Verbrauchsstätten gewährleistet werden soll⁷. Mit zunehmender Differenzierung von Lebensstilen und zunehmender Flexibilisierung in den individuellen Zeitabläufen sind diese Verbrauchsschwankungen, die zu erheblichen Verteilungsproblemen führen können, nicht mehr in klassischer Weise prognostizierbar; einen bereits praktizierten Ausweg bietet hier der Einsatz von Neuronalen Netzwerken an. Derartige „selbstlernende“ Prognosemodelle bieten allerdings keinen analytischen Schlüssel für ein Begreifen des Verbrauchsverhaltens. Versorgungssysteme provozieren Entsorgungssysteme: Durch die Nutzung des Wassers entstehen Abwässer, die Energieversorgung produziert Abfälle und Schadstoffe, durch Ernährung und Konsum entsteht Müll. Folglich ergibt sich die Notwendigkeit, eigene Entsorgungssysteme zu entwickeln und zu betreiben, um Gesund-

heitsschäden und ökologische Gefährdungen zu vermeiden. Im Zusammenspiel von Versorgung und Entsorgung entstehen weitere sozial-ökologische Problemlagen, für die jede Gesellschaft eigene Regulationen entwickeln muss. Beispielsweise kann der Rückgang im Wasserverbrauch dazu führen, daß der Klärreaktor, in dem das Abwasser biologisch gereinigt wird, nun zu groß dimensioniert ist, so dass die Wirtschaftlichkeit des technischen Ablaufs nicht mehr unbedingt gegeben ist und es – wie in Teilen Ostdeutschlands – zum Widerstand der Bevölkerung gegen zu hohe Abwassergebühren und gegen den Zwangsanschluß an die Kanalisation kommen kann⁸.

3. Darstellung der Spezifika der sozial-ökologischen Forschung an diesem Beispiel

In der handlungsorientierten sozial-ökologischen Forschung werden seit einigen Jahren Problemlagen in verschiedenen „Bedürfnisfeldern“ analysiert (wie Ernährung und Wohlbefinden, Bauen und Wohnen, Mobilität und Verkehr, Gesundheit und Hygiene). Dabei wird versucht, die gesellschaftlichen Widersprüche zwischen sozialen, ökonomischen und ökologischen Entwicklungen im Sinne des Nachhaltigkeitskonzepts auszubalancieren. Unter pragmatischen Aspekten ist dies durchaus ein sinnvolles Verfahren. Doch sowohl die Auswahl und die Begründung der einzelnen Bedürfnisfelder als auch deren empirische Eingrenzung sind unter einem theoretischen Aspekt problematisch. Zum einen wegen der Unklarheit der dabei benutzten Vorstellung von „Bedürfnissen“, zum anderen wegen des ungeklärten Verhältnisses von Bedürfnisbefriedigung und „Umweltproblemen“. Für eine mathematische Modellierung müsste der Ansatz überhaupt erst begrifflich präzisiert und empirisch operationalisiert werden. Wir schlagen hier ein anderes Vorgehen vor: Die Modellierungen sollten sich auf einen empirisch klar beschreibbaren gesellschaftlichen Bereich konzentrieren, der zudem auch begrifflich gut zu fassen ist: Versorgungssysteme erfüllen diese methodischen Kriterien besonders gut. Sie lassen sich zum einen als eine zwischen „Gesellschaft“ und „Natur“ vermittelnde technisch-materielle Struktur begreifen, zum anderen als eine Form der Regulation gesellschaftlicher Naturverhältnisse. Dadurch erschließt sich eine neue Forschungsperspektive.

3.1. Regulationen gesellschaftlicher Naturverhältnisse

Das Geflecht der Beziehungen zwischen Gesellschaft und Natur und die sich darin herausbildenden Muster bezeichnen wir zusammenfassend als gesellschaftliche Naturverhältnisse. Sie müssen in jeder Gesellschaft dauerhaft reguliert werden, damit ein menschenwürdiges Leben möglich ist und der gesellschaftliche Lebensprozess intergenerativ fortgesetzt werden kann. Dabei ist aber nicht eindeutig festgelegt, auf welcher gesellschaftlichen Ebene das Beziehungsgeflecht lokalisiert und untersucht wird. Ist es die Ebene, auf der durch das Zusammenwirken individueller Handlungen gesellschaftliche Naturverhältnisse sich herausbilden – oder ist es die Ebene von Institutionen und ausdifferenzierten Funktionssystemen? In jedem Fall handelt es sich um historisch variable Beziehungen, die in unterschiedlichen Handlungsbereichen sowohl zur „äußeren“ Natur als auch zur „inneren“ Natur der Individuen aufgebaut werden. Betrachtet man genauer die Formen und

Praktiken, in und mit denen Gesellschaften ihr Verhältnis zur Natur stofflich regulieren und kulturell symbolisieren, dann wird deutlich, dass es basale Naturverhältnisse gibt, welche gewissermaßen anthropologisch vorbestimmt aber hochgradig kulturell geprägt sind. Sie entsprechen weitgehend jenen Grundbedürfnissen, ohne deren ausreichende Befriedigung menschliches Leben nicht möglich ist: Wie andere Lebewesen auch brauchen die Menschen Nahrungsmittel und Wasser, Schutz vor Hitze und Kälte, Möglichkeiten der Fortbewegung und der Fortpflanzung; durch Arbeit und Produktion einerseits, die Möglichkeiten zur kulturellen Symbolisierung andererseits zeichnen sich die Menschen allerdings gegenüber anderen Lebewesen aus. Deshalb ist das Spektrum basaler gesellschaftlicher Naturverhältnisse breiter als die biologischen Lebensfunktionen. Deren Regulierung ist sowohl für die individuelle als auch für die gesellschaftliche Reproduktion unverzichtbar. Dabei spielen Arbeit und Produktion einerseits, Sexualität und Fortpflanzung andererseits eine besondere Rolle, denn ohne sie wäre gesellschaftliches Leben dauerhaft nicht möglich. Deshalb präformieren deren Regulationsordnungen die Formen, in denen andere gesellschaftliche Naturverhältnisse reguliert werden. Sie begrenzen gewissermaßen den Raum möglicher Regulationsweisen.

Wir haben hier analytisch zwischen den anthropologisch bestimmten basalen gesellschaftlichen Naturverhältnissen und den je spezifischen – sozialen, ökonomischen, politischen, wissenschaftlich-technischen, ästhetischen, religiösen – Formen unterschieden, mit denen Gesellschaften ihre Naturverhältnisse materiell regulieren und kulturell symbolisieren. Die Ausprägung und das Zusammenwirken spezifischer, kulturell eingespielter Regulationsmuster lassen sich auf verschiedenen Ebenen analysieren:

- Auf der Mikroebene individueller Bedürfnisbefriedigung sind die Regulationsmuster noch eng verknüpft mit der Körperlichkeit der Menschen und psycho-physischen Prozessen (z.B. Mangelgefühlen, Wahrnehmungsweisen, Motivationen). Diese wiederum verlaufen nicht unabhängig von alltagskulturellen Praktiken.
- Auf einer mittleren Ebene sind die Möglichkeiten der Bedürfnisbefriedigung einerseits von der Verfügbarkeit lebensnotwendiger Güter abhängig und werden von kulturellen Symbolsystemen, kognitiven Modellen, Machtstrukturen und Eigentumsverhältnissen geprägt.
- Auf der Makroebene stabilisieren sich die Regulationsmuster gesellschaftlicher Reproduktion und sozialer Integration beispielsweise in Form von Produktions-, Eigentums- und Geschlechterverhältnissen.

Damit entstehen auf jeder Ebene spezifische Ausprägungen gesellschaftlicher Naturverhältnisse, mit denen ganz unterschiedliche Veränderungen der physischen und organischen Umwelt verknüpft sind. Die Regulationsmuster auf den verschiedenen Ebenen müssen wiederum zusammenwirken, ihre Vermittlung kann gelingen oder misslingen, wodurch Regulationsprobleme zweiter Ordnung entstehen, also Regulation von Regulationen (vgl. Jahn u. Wehling 1998, S. 88).

3.2. Versorgungssysteme in der sozial-ökologischen Forschung

Versorgungssysteme sind ein herausgehobener Bereich sozial-ökologischer Forschung. Einerseits deshalb, weil die Güterversorgung der Bevölkerung mit Wasser, Energie, Verkehrsmittel und Nahrung, sowie Dienstleistungen für Mobilität, Gesundheit, Kommunikation und Bildung nur noch

mittels ausgedehnter (sich zeitlich entwickelnder) sozio-technischer Großsysteme zu garantieren ist. Diese wiederum bilden eine vermittelnde Instanz zwischen Gesellschaft und Natur, welche Flüsse von Stoffen, Energie und Informationen gezielt lenken und umlenken. Andererseits treten in den einzelnen Bereichen sozial-ökologische Problemlagen auf, die sich krisenhaft verschärfen können. Gerade die für die Befriedigung menschlicher Grundbedürfnisse zentralen Bereiche wie Wasser, Energie, Ernährung und Verkehr sind dadurch in vielen Teilen der Welt ernsthaft gefährdet. Versorgungssysteme müssen als solche gesellschaftlich reguliert werden; sie regulieren aber gleichzeitig auch selbst Stoff-, Energie- und Informationsflüsse (und sind abhängig von physischen Regulationsprozessen). Versorgungssysteme haben dadurch einen erheblichen Einfluß auf die Regulierung gesellschaftlicher Naturverhältnisse, ein zentrales Aufgabengebiet sozial-ökologischer Forschung.

Konventionell werden die Probleme von Versorgungssystemen in der Regel entweder zu allgemein als Infrastrukturprobleme oder zu speziell als Probleme einzelner Versorgungssektoren (z.B. Wasser oder Energie) untersucht. Zur Infrastruktur einer Gesellschaft („Unterbau“) zählt man traditionell jene Einrichtungen, die durch die öffentliche Hand betrieben oder beaufsichtigt werden und der generellen „Daseinsvorsorge“ dienen – z.B. Verkehr, Energie, Ausbildung, Forschung, Gesundheitswesen, Wasserbau, Wasserwirtschaft, Anlagen für Kultur, Erholung und Sport sowie die öffentliche Verwaltung. Auch die Gesamtheit ortsfester militärischer Anlagen zur Landesverteidigung (wie z.B. Flugplätze, Ölleitungen, Lazarette, Übungsplätze, Fernmeldenetze) wird Infrastruktur genannt. „Infrastruktur“ ist offensichtlich ein viel zu allgemeiner und wenig trennscharfer Begriff, um die spezifischen Probleme von Versorgungssystemen wissenschaftlich zu bearbeiten. Konzentriert man sich umgekehrt nur auf einzelne Versorgungsbereiche, dann rückt der Systemcharakter und das Zusammenwirken einzelner Ver- und Entsorgungssysteme leicht aus dem Blickfeld.

Angesichts der komplexen Problemlage müssen unterschiedliche wissenschaftliche Verfahren angewendet werden, um einzelne Versorgungssysteme und deren Zusammenwirken zu verstehen.

- a) Fragestellungen für historische und kulturvergleichende Untersuchungen einzelner Versorgungssysteme sowie deren Zusammenwirken sind zu entwickeln und interdisziplinär zu bearbeiten;
- b) der Beitrag von Versorgungssystemen (Bedarfsfeldern) zur Regulation gesellschaftlicher Naturverhältnisse ist zu untersuchen;
- c) bei beiden Fragestellungen sollte möglichst konsequent die Gender-Dimension herausgearbeitet werden, beispielsweise durch Untersuchung der geschlechtsspezifischen Arbeitsteilung bei der alltagspraktischen Versorgung;
- d) schließlich sollten – dieses Thema wurde hier ausschließlich sondiert – mathematische Modellierungen mit avancierten Methoden entwickelt werden.

3.3. Sozial-ökologische Systeme – ein neuer Zugang für ihre Modellierungen

Mit dem Konzept der „starken Kopplung“ wird versucht, einen neuen Zugang für mathematische Modellierungen in der sozial-ökologischen Forschung zu eröffnen. Um Versorgungssysteme als sozial-ökologische Systeme beschreiben und modellieren zu können (und nicht nur als sozio-technische) empfiehlt es sich, die Menschen – Konstrukteure, Betreiber und Nutzer – als Elemente des Systems zu beschreiben. Denn dann lassen sich Selbstorganisationsprozesse erkennen, welche das gesamte System erfassen. Dann wird es aber auch sinnvoll, die Theorien und Modellierungstechniken für komplexe selbstorganisierende Systeme auf Versorgungssysteme anzuwenden. Sozial-ökologische Systeme lassen sich in einer physikalischen Analogie nach der Stärke ihrer inneren und äußeren Kopplungen als fest, stark, locker oder entkoppelt beschreiben. Bei Versorgungssystemen können sowohl intern (zwischen den einzelnen Bestandteilen des Systems) als auch extern (zu anderen gesellschaftlichen oder natürlichen Systemen) sämtliche Kopplungstypen auftreten. Die Folgen starker Kopplung sind bisher wenig untersucht. Dies hat neben den bekannten Schwierigkeiten bei der Analyse nicht-linearer Systeme auch noch einen ganz praktischen Grund: Beim Aufbau von Versorgungssystemen wird ingenieurstechnisch offenbar versucht, entweder mit lockeren oder mit festen Kopplungen zu arbeiten – und starke Kopplungen sicherheitstechnisch auszuschließen. Denn starke Kopplungen können zu Fluktuationen, Instabilitäten und partiellen Zusammenbrüchen führen („Strukturbrüchen“); es kann aber auch zur Evolution neuer Ordnungen kommen („Restrukturierung“). Solange man versucht, den Fall der starken Kopplung auszuschließen, wird oft auch deren Möglichkeit übersehen.

4. Betrachtung von Kopplungen zwischen Gesellschaft, Wasserversorgung und Natur

Um starke Kopplungen und die durch sie produzierten Problemdynamiken identifizieren zu können, wurde hilfswise angenommen, daß die Wasserversorgung ein hybrider Bereich ist, der historisch als materielle Vermittlungsinstanz zwischen Gesellschaft und Natur aufgebaut worden ist. Dieses Wasserversorgungssystem kann dann als zwischen Gesellschaft (mit ihren Institutionen und Bereichen) und Natur (mit ihren unterscheidbaren Sphären) „geschoben“ betrachtet werden⁹. Anders als in der Mechanik (z.B. mechanische Verbindungen zwischen Federpendeln) lassen sich in der sozial-ökologischen Forschung Kopplungen nicht leicht identifizieren, da sie sich in speziellen räumlichen Konstellationen zwischen Entitäten ausbilden und deren Metabolismus oder Energieübertragung prägen. In der Sondierungsstudie wurde daher versucht, die Kopplungen über schlüssige Indikatoren zu identifizieren. Für die verschiedenen Typen von Kopplungskonstellationen (lockere, starke, feste) wurden daher aufgrund theoretischer Annahmen über die Kopplungen zwischen mitteleuropäischer Wasserversorgung und einerseits Gesellschaft, andererseits der Natursphäre unterschiedliche Sets von Indikatoren zusammengestellt (vgl. dazu näher Becker u. Schramm 2001). Siedlungen und Gewerbe waren in der Geschichte zunächst fest an das örtlich erschließbare Wasserdargebot gekoppelt: Nur jenes Wasser, das lokal in Still- oder Fließgewässern vorhanden war (oder zusätzlich durch einfache Brunnen verfügbar wurde), konnte auch gesell-

schaftlich genutzt werden. Die ausreichende Versorgung mit vor Ort verfügbarem, qualitativ geeignetem Wasser war demnach ein außerordentlich wichtiger und lange stark limitierender Faktor für die Bevölkerungs-, Siedlungs-, Wirtschafts- und Gesellschaftsentwicklung. Erst die historische Entwicklung einer professionellen Wasserversorgung erlaubte die Emanzipation von dem örtlichen Naturraumpotenzial. Die bis dahin feste Kopplung zwischen Wasserverwendung und örtlichem Wasserdargebot wurde gelockert: Mit Wasserleitungen, aber auch mit frühen Formen der Kanal- und Bewässerungswirtschaft konnte auf weitere, mittelbar zugängliche Wasserressourcen zurückgegriffen werden: Grundwasser, Wasser von entfernteren Orten und aus anderen Regionen. Perfektioniert und universalisiert wurden diese Technologien in der industrizeitlichen Siedlungswasserwirtschaft. Die industrizeitliche Wasserversorgung führte zusammen mit neuen Sanitär- und Produktionstechnologien dazu, daß Wasser zum mengenmäßig größten Stoffstrom wurde. Große Abwassermengen mußten aus den Verbrauchsstätten herausgeleitet werden, konnten aber – auch wegen der enthaltenen Fäkalien usw. – nicht mehr über Gräben, Rinnsteine usw. in die physische Umwelt eingeleitet werden. Innerörtliche Kanalisationssysteme zur Ableitung dieses verschmutzten Abwassers entstanden (zunächst im städtischen Raum), um primäre und (Gewässerverschmutzung!) sekundäre Umweltprobleme zu vermeiden oder zu vermindern¹⁰. Die industrizeitliche Wasserversorgung wird von unterschiedlichen gesellschaftlichen Akteuren betrieben – Ingenieuren des Wasserfachs, Hygienikern, staatlichen Aufsichtsbehörden usw. Diese „Wassermacher“ stellen eine expertokratische Machtelite dar und sind daran interessiert, eine möglichst weitgehende Definitions- und Gestaltungsmacht für die Wasserversorgung zu besitzen und zu erhalten. Der Erhalt ihrer Macht ist in erster Linie davon abhängig, daß die Wasserversorgung gesellschaftlich möglichst unauffällig bleibt und keine eigenen gesellschaftlichen Regulationen (z.B. durch Parlamente oder die staatliche Politik) beansprucht und implementiert werden müssen. Dies erfordert, die Arrangements zwischen Wasserversorgung und Natursphäre einerseits und zwischen Wasserversorgung und Gesellschaftssphäre andererseits möglichst so zu gestalten, daß starke Kopplungen vermieden werden und damit Zustände, die nicht mehr einfach prognostizierbar und beherrschbar sind.

4.1. Ideale Kopplungskonstellationen

Grundsätzlich sind unterschiedliche Kopplungstypen zwischen Wasserversorgung und Gesellschaft einerseits und zwischen Versorgung und Natur andererseits zu unterscheiden: Im Idealfall werden zwischen Gesellschaft und Wasserversorgung feste Kopplungen arrangiert, ähnlich wie sie zuvor bezogen auf die Mengen-Kopplung zwischen Gesellschaft und Natur vorhanden waren: Die Wasserversorger befriedigen den in der Gesellschaft – z.B. aufgrund der Grundbedürfnisse und der sich ausdifferenzierenden gesellschaftlichen Naturverhältnisse der in ihr lebenden Menschen – vorhandenen Bedarf nach Wasser. Der gesellschaftlich ermittelte Bedarf wird dabei von den Versorgern nicht in Frage gestellt, sondern z.B. durch Erweiterung der Ressourcenbasis zu befriedigen gesucht. Wenn die Wasserversorgung diesen Bedarf nicht mehr befriedigen könnte, würde sie politisch auffällig und zum limitierenden Faktor der gesellschaftlichen Entwicklung werden. Solche Zustände sind aus Sicht der Betreiber möglichst zu vermeiden. In der gesellschaftlichen Dynamik könnte es andernfalls zu Krisenerscheinungen kommen, die mit ingenieurtechnischen Mitteln nicht zu bewältigen sind. Um Zustände zu vermeiden, die die expertokratische Selbstorganisation der Wasserversorgung in Frage stellen und die eigene Macht schmälern, waren

daher die Zentralakteure der Wasserversorgung (Betreiber und Organisatoren wie z.B. Ingenieure) industriezeitlicher Versorgungsungen bisher daran interessiert, immer ausreichend Wasser gemäß den gesellschaftlichen Bedarfsanforderungen bereitstellen zu können. Ebenfalls werden im Idealfall zwischen Natur und Wasserversorgungssystem starke Kopplungskonstellationen mit den aus ihnen resultierenden nicht-linearen Wechselwirkungen vermieden. Nach Möglichkeit wird die Extraktion des Wassers aus der Natur vielmehr so gestaltet, daß hierbei lockere Kopplungskonstellationen mit der Natur entstehen¹¹, die sich ingenieurtechnisch beherrschen lassen. Die Orientierung an lockeren Kopplungen zur Natur erlaubt einen dauerhaften Betrieb der Wasserversorgung mit klassischen ingenieurwissenschaftlichen Möglichkeiten¹². Wenn sich dennoch starke Kopplungen ergeben, können sie dann von den Wasserversorgern „toleriert“ werden, wenn sie weder unmittelbar den reibungslosen Betrieb stören (weil sie z.B. nicht in der bewirtschafteten Grundwasserressource selbst relevant sind, sondern z.B. in der Vegetationsdecke an der Erdoberfläche) noch von Einflußgruppen (z.B. Naturschutzverbänden, Parteien) skandalisiert bzw. gesellschaftlich als „störend“ wahrgenommen werden¹³. Im Idealfall können ingenieurtechnische Mittel Kopplungskonstellationen der Wasserversorgung mit der Gesellschaft und mit der Natur ermöglichen, die sowohl das Versorgungssystem dauerhaft sichern als auch die Versorgungsgrundlage der Gesellschaft erhalten (und vielleicht sogar weiterzuentwickeln) anstatt sie zu bedrohen.

4.2. Übergänge zu starken Kopplungen

In Zukunft wird die Wasserversorgung jedoch zunehmend jenseits der ingenieurwissenschaftlich idealen Kopplungskonstellationen betrieben werden. Für einige Wassergewinnungsgebiete (z.B. Vogelsberg, Lüneburger Heide, Hessisches Ried) weisen jedenfalls die gewählten Indikatoren auf die Ausbildung starker Kopplungskonstellationen zwischen Wasserversorgung und Gesellschaft und in manchen Wassergewinnungsgebieten auch zwischen Wasserversorgung und Natur hin. Dies läßt für die nächsten Jahre aufgrund der sich ergebenden Wechselwirkungen und Problemdynamiken auf weitgehende sozial-ökologische Transformationen schließen. Spätestens dann werden sich Natur und Gesellschaft allerdings bezogen auf die mit der Wasserversorgung verbundenen Problemlagen nicht mehr als tendenziell unabhängig voneinander betrachten lassen. Dann werden voraussichtlich die starken Kopplungskonstellationen mit Gesellschaft und Natur dazu führen, daß die Problemdynamik ein nicht-lineares Verhalten aufweist und „chaotischer“ wird; Transformationen werden dann sehr schwer voraussagbar, weil sie sich nicht mehr alleine auf Gesellschaft oder alleine auf Natur beziehen lassen und weil es zu abrupten Änderungen in der Entwicklungsrichtung kommen kann.

Wenn davon ausgegangen werden kann, daß die industriezeitliche Form der Wasserversorgung zumindest auf der Ebene ihrer technischen Infrastruktur ein grosses Beharrungsvermögen hat und hier Transformationen nur sehr langsam stattfinden werden, könnte dies bei einer Zunahme nicht-linearer Effekte jedoch erhebliche Auswirkungen sowohl auf gesellschaftlicher als auch auf ökologischer Ebene haben. Diese Effekte könnten im Extremfall zu einer sozial-ökologischen Transformationsdynamik mit dann erheblichen Strukturbrüchen in der Wasserversorgung führen.

4.3. Richtungen und Bifurkationen sozial-ökologischer Transformationen der Wasserversorgung

Eine genauere Vorhersage dieser Dynamiken ist jedoch beim bisherigen Stand der Forschung nicht möglich. Zudem könnten sozial-ökologische Transformationen der Wasserversorgung verschiedene Entwicklungsrichtungen nehmen; wenigstens an diesen Verzweigungsstellen („Bifurkationen“) handelt sich nicht um (ausschließlich) linear modellierbare Prozesse. Mit Modellen aus der nicht-linearen Physik können diese Prozesse adäquater erfaßt werden (vgl. Becker et al., in Vorbereitung). Bifurkationen sind beispielsweise bei der Entwicklung der technischen Infrastrukturen prognostizierbar: Einerseits ist es denkbar, daß Veränderungen sich alleine auf Ebene der Hausinfrastruktur ereignen (z.B. partielle Versorgung mit Regen- oder auch mit sog. Grauwasser), die die öffentliche Wasserinfrastruktur ergänzt; andererseits könnten auch komplementäre Veränderungen in der Siedlungswasserwirtschaft selbst stattfinden (z.B. Aufbau von doppelten Leitungsnetzen). Tendenziell könnte es durch die infrastrukturellen Veränderungen zu einem vollständigen Strukturbruch des industriezeitlichen Wasserversorgungssystems und Abwasserentsorgungssystems kommen, so daß dieses auch für die zukunftsfähige Versorgung der Mega-Cities des Südens geeignet wäre. Des weiteren sind für Regionen mit einer (natürlichen oder anthropogen, u.U. auch durch Qualitätsprobleme oder Bevölkerungsentwicklung, entstandenen) Wasserknappheit unterschiedliche Auswege denkbar, wenn bewußt starke Kopplungen zwischen Gesellschaft und Wasserversorgung arrangiert werden. Auch hier sind Bifurkationen in der Entwicklung denkbar: Einerseits könnte die Zielstellung sein, eine zivilgesellschaftliche Wasserkultur zu entwickeln, in die eine rationelle Wassernutzung eingebunden wäre; andererseits könnten expertokratisch orientierte Regulierungsverfahren entwickelt werden, die z.B. auf Wasserspar-Marketingkampagnen und einer Grundwasserbewirtschaftung nach Wasserstand im Grundwasserleiter (oder nach Niedrigfließwassermenge in einem Referenz-Gewässer) aufbauen. Schließlich ist es auch möglich, ein Spitzenlast-Management in der Wasserverteilung mit Hilfe von Modellrechnungen (z.B. durch Agentenmodelle) zu betreiben, das zu Strukturbrüchen führt: Das Versorgungssystem kann so umgebaut werden, dass ein (dann wasserfreies) urbanes Fäkalienmanagement möglich wird (vgl. für Belege Becker u. Schramm 2001).

5. Zusammenfassung der Ergebnisse des Sondierungsprojektes

Sozial-ökologische Transformationen von Versorgungssystemen sind ein ergiebiges Feld der sozial-ökologischen Forschung. Die durch Veränderungen insbesondere auf der Makro-Ebene forcierten sozial-ökologischen Transformationsprozesse müssen in ihrem möglicherweise krisenhaften Verlauf systematisch herausgearbeitet werden, um Aussagen zu Regulationsmöglichkeiten und –notwendigkeiten in diesen Bereichen treffen zu können. Dazu können Modellierungen und handlungsnaher Prognosen – wie unten ausgeführt wird – einen spezifischen Beitrag leisten. Hierbei sollten in weiteren Untersuchungen auch die Kopplungen zu anderen Versorgungs- und zu Entsorgungssystemen genauer analysiert werden. Eine Konzentration der Forschung auf die verschiedenen Versorgungssysteme führt zu starken thematischen Konzentrationen und zur Präzisierung von Forschungsfragen. Bei Kenntnis krisenhafter Teilverläufe von aktuellen Transformationen in den verschiedenen Versorgungssystemen lassen sich die sozial-ökologischen Trans-

formationen bewußter gestalten; auch können die Perspektiven eines Umbaus technisch-materieller Strukturen genauer bestimmt werden. Fragen nach den Constraints und den Rahmenbedingungen für die (systemexterne und systeminterne) Regulation sozial-ökologischer Transformationen können damit unter Berücksichtigung der bereits ablaufenden Veränderungsprozesse der Versorgungssysteme präzisiert werden. Der sondierte Ansatz gekoppelter Systeme kann zu einer erheblich besseren Vorhersage von kritischen Phasen in diesen Transformationen und zur bewußten Regulation der Transformationen beitragen. Bereits eine an diesem Ansatz orientierte Analyse von Kopplungen zwischen Gesellschaft, Versorgungssystem und Natur, die auf eine mathematische Modellierung verzichtet, ist weiterführend. Sie erlaubt eine disziplinübergreifende, theoriegeleitete Beschreibung, die die bisher übliche problemorientierte Phänomenologie überwindet. Die Interdependenzen von Gesellschaft und Natur können auf diese Weise neu thematisiert und einer transdisziplinären Analyse zugänglich gemacht werden. Dabei können die strukturellen Triebkräfte, ihre Variablen und auch die Besonderheiten des jeweiligen Versorgungssystems gut in den Blick kommen.

Mit Hilfe einer auf dem Ansatz gekoppelter Systeme aufbauenden Analyse von Kopplungen von Versorgungssystemen mit Natur und Gesellschaft lassen sich auch Strategien der Versorger untersuchen, die zu bestimmten Kopplungskonstellationen zwischen Natur und Gesellschaft führen. An diesen Kopplungskonstellationen orientieren bisher aber die Versorger ihr Handeln nur implizit. Sie könnten jedoch auch zu einem expliziten Orientierungswissen der Versorger gemacht werden, wenn sie genauer untersucht worden wären. Aufbauend auf gesicherten Indikatoren für Kopplungen zwischen Versorgungssystemen, Gesellschaft und Natur können die Kopplungskonstellationen genauer als bisher beschrieben und analysiert werden; die Wirkungen der Kopplungen und die Übergänge zwischen verschiedenen Kopplungstypen werden einer weitergehenden Analyse so überhaupt erst zugänglich. Auch lassen sich so Kopplungen zwischen verschiedenen Versorgungssystemen bzw. auch Versorgungs- und Entsorgungssystemen identifizieren und analysieren.

Nach Einschätzung der am Sondierungsprojekt beteiligten Fachleute wird es bei entsprechenden Vorarbeiten auch möglich sein, die potenziellen Variablen der Transformationsprozesse zu identifizieren und dann analytische und mathematische Modelle aufzubauen, mit denen sich ein umfassenderes Verständnis dieser Transformationen erzielen läßt. Beispielsweise wird es dann möglich, die nicht-lineare Dynamik und daraus entstehende Randbedingungen von Bifurkationen genauer zu modellieren. Prinzipiell ist es möglich, derartige Fragestellungen modelltechnisch zu behandeln; auch sind entsprechende Modellierungskompetenzen und -potenziale vorhanden. Es ist es nicht unbedingt erforderlich, Gesamtabläufe zu modellieren. Vielversprechender kann es sein, genauere Analysen von potentiellen Bifurkationsbereichen vorzunehmen¹⁴. Für die Modellierung starker Kopplungen und sozial-ökologischer Transformationen stehen bereits eine Vielzahl von Modellierungstechniken zur Verfügung – z.B. nicht-lineare Dynamik, genetische Algorithmen, agentenbasierte Modelle, neuronale Netze, zelluläre Automaten, fuzzy logic und zahlreiche stochastische Verfahren¹⁵. Entscheidend wird es von der konkreten Fragestellung der jeweiligen Untersuchung abhängen, welche Technik der Modellierung hier zum Einsatz kommen sollte. Allerdings muß in derartige Modellierungen neben interdisziplinärem analytischem Wissen auch das Erfahrungswissen von Praktikern (z.B. Betreiber, beratende Ingenieure, VerbraucherInnen, Naturschutzverbände) einfließen, damit Prognosen zu erwarten sind, die zu praxisnahen Ergebnissen mit Problem-

lösungspotential führen. Mit Hilfe solcher Modelle können dann genauere Aussagen über die Entwicklungslogik im Transformationsprozeß gemacht werden können. So läßt sich Transformationswissen und insofern auch eine gewisse Planungssicherheit gewinnen. Am Beispiel von Versorgungssystemen könnten mit den erwähnten mathematischen Verfahren die Kopplungskonstellationen zwischen Natur und Gesellschaft modelliert werden, um ein besseres Verständnis sozial-ökologischer Transformationen zu erreichen und die Versorgung „robuster“ zu gestalten. Bis zu einer tatsächlichen Entwicklung und praktischen Erprobung entsprechender Modelle bleibt die Erforschung solcher Transformationen, in denen sich Natur und Gesellschaft in ihren Dynamiken nicht mehr voneinander trennen lassen, eine große theoretisch-konzeptionelle und methodische Herausforderung für die zu beteiligenden Wissenschaften und die Praxis.

Anmerkungen

- ¹ Unter sozial-ökologischen Transformationen werden form- und strukturverändernde Prozesse verstanden, die sich nicht nur auf physische Strukturen und Prozesse beziehen, sondern ebenso auf gesellschaftliche (und damit auch auf Wahrnehmungen, Bedeutungen und Symbolisierungen). Als Kennzeichen sozial-ökologischer Transformationen gilt, daß sich, beispielsweise durch sozio-ökonomische Prozesse und technologischen Wandel angestoßen, neue Wechselwirkungen ausbilden und vielfältige Problemlagen ineinander schieben (vgl. Becker u. Jahn 2000). So kann sich auf globaler Ebene durch das Zusammenwirken eines steigenden Konsumniveaus (durch eine globalisierte Ökonomie) mit der Bevölkerungsentwicklung, der tendenziellen Verstärkung und der physischen Limitationen der Versorgungssystemen eine bedrohliche Krisensituation herausbilden.
- ² Nur bei einem Vorliegen schwacher Störungen können die Zustände des gestörten Gesamtsystems mit seinen beiden autonomen Teilsystemen Natur und Gesellschaft durch Linearkombinationen aus den Zuständen der ungestörten Teilsysteme gewonnen werden. Unter dieser unrealistischen Voraussetzung kann in der mathematischen Modellwelt linearisierter Differentialgleichungen erfolgreich mit Störungsrechnungen gearbeitet werden.
- ³ Ebenso wie die symbolische Dimension ausgeblendet wird, wird „Gesellschaft“ in den Modellen der etablierten (naturwissenschaftlichen) Umweltforschung lediglich undifferenziert als Ursachenkomplex für derartige „anthropogene Störungen“ natürlicher Systeme gesehen, dort aber selbst weder analysiert noch modelliert.
- ⁴ Neben den beiden Autoren führten Eric Sons vom ISOE sowie Dr. Andrea Scharnhorst vom WZB Berlin (jetzt NiWi – Netherlands Institute for Scientific Information Services – Amsterdam) die Sondierung durch, in deren Rahmen auch zwei Workshops mit Fachleuten aus den Bereichen Wasser und Modellierung stattfanden.
- ⁵ Es handelt sich dabei um zugleich produzierende, transformierende und distributierende Einheiten. Auch diese Einheiten müssen wiederum versorgt werden – mit Rohstoffen, Energie, Arbeitskräften. Dadurch sind die einzelnen Versorgungssysteme auf vielfältige Weise miteinander verkoppelt. Die Verteilung der Güter erfolgt entweder über eine eigene technische Infrastruktur (z.B. Leitungsnetze für Wasser, Gas und Elektrizität) oder über Transportsysteme und Märkte.
- ⁶ Während in Deutschland die Verluste in der Regel weit unter 10 % liegen, betragen sie in Großbritannien mittlerweile bei 30 %. Im Falle einer Liberalisierung könnte eine Regulierungsbehör-

de sogar die Netzkosten festschreiben, so daß sich diese Tendenz noch verstärken wird.

- ⁷ In der Schweiz wird hier z.T. technisch gegengesteuert, in dem Waschmaschinen als relevante Wasser- und Energieverbraucher zu bestimmten Uhrzeiten zentral abgeschaltet werden.
- ⁸ Ausserdem müssen nun Abwasserkanäle vermehrt mit Frischwasser gespült werden, um sie funktionsfähig zu halten.
- ⁹ In der Sondierungsstudie konnte auch gezeigt werden, daß sich bereits über eine Reformulierung der Problemlage in der Semantik gekoppelter Systeme interessante Einsichten, insbesondere zu sozial-ökologischen Transformationen, gewinnen lassen (vgl. Becker u. Schramm 2001). Insofern ist der Transfer des Ansatzes gekoppelter Systeme sinnvoll.
- ¹⁰ Im Idealfall können Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung als fest gekoppelt begriffen werden.
- ¹¹ Nach dem Entwurfsideal des 19. Jahrhunderts ist die laufende Entnahme des Wassers und sein Transport durch eine Fernwasserleitung so gestaltet (Quellentnahme, Gravitationsleitungen), daß der Betrieb ohne Maschinen, die physikalische Arbeit leisten, möglich ist. Dieses Ideal ist aber selbst in wasserreichen Ländern wie Deutschland weitgehend aufgegeben worden, da der gesellschaftliche Bedarf die Zahl entsprechend ausbeutbarer Vorkommen wesentlich übersteigt. Zunehmend wird z.B. wird Tiefengrundwasser energieaufwendig gehoben.
- ¹² Locker mit dem Naturhaushalt gekoppelte Extraktionen erlauben folglich eine dauerhafte Entnahme von Wasser aus dem Naturhaushalt ohne besonders aufwendige Prognostik (z.B. Grundwassermodelle, die nicht-lineare Zustände abbilden oder eine permanente Orientierung der Entnahme an Grundwasserganglinien).
- ¹³ Zunehmend zeigt sich allerdings, daß diese sekundären sozial-ökologischen Probleme gesellschaftlich nach-bearbeitet werden müssen.
- ¹⁴ Es wird kaum möglich sein, in mathematischen Modellen die Zeitpunkte solcher Bifurkationen zu bestimmen.
- ¹⁵ Vgl. z.B. Castillo u. Melin (2001). Diese Methoden spielen trotz ihres interessanten Potentials – anders als z.B. Ansätze einer Systems Dynamics – in der Umweltforschung bisher eine vernachlässigbare Rolle.

Literatur

- Becker E, Jahn Th (2000) Sozial-ökologische Transformationen. Theoretische und methodische Probleme transdisziplinärer Nachhaltigkeitsforschung. In: Brand K-W (Hrsg) Nachhaltigkeit und Transdisziplinarität. Berlin, S 68-84
- Becker E, Schramm E (2001) Zur Modellierbarkeit sozial-ökologischer Transformationen. Zentrale Ergebnisse einer Sondierungsstudie. Frankfurt am Main (Materialien Soziale Ökologie 16)
- Becker E, Scharnhorst A, Schramm E (in Vorbereitung) Modellierung in der sozial-ökologischen Forschung. Frankfurt am Main
- Castillo O, Melin P (2001) Soft Computing for Control of Non-Linear Dynamical Systems. Heidelberg, New York
- Ipsen D, Cichorowski G, Schramm E (Hrsg) (1998) Wasserkultur. Beiträge zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung. Berlin (Stadtökologie, Bd. 2)
- Jahn Th, Wehling P (1998) Gesellschaftliche Naturverhältnisse – Konturen eines theoretischen Konzepts. In: Brand K-W (Hrsg) Soziologie und Natur. Theoretische Perspektiven. Opladen

(Soziologie und Ökologie, Bd. 2), S 75-93

Preisendörfer P (1998) Umweltbewußtsein in Deutschland 1998. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Berlin

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (1993) Welt im Wandel: Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen. Jahresgutachten 1993. Bremerhaven