Ökologie und System: I. Verallgemeinerung physikalischer Systeme

J. Richter

Mit Galilei wird Physik in erster Linie zur kausal-mathematischen Beschreibung einfacher, unbelebter Systeme. Die analysierende Haltung, das isolierende, quantisierende Experiment bestimmen den Erfolg der Physik. Verstehen wird primär gleichgesetzt mit quantitativer Voraussage. Eine kalkulierbare Welt ist veränderbar - muß verändert werden. Seit Descartes gilt der Trugschluß, Verfügung über die physikalische Realität bedeute Beherrschung der Wirklichkeit.

Die analytische Haltung meint, das makroskopische Geschehen stufenweise aus dem Mikroskopischen deduzieren zu können; womöglich seien Gesetze in der Art der Stoßgesetze bei Kugeln der Schlüssel zum Verständnis des Lebens. Der Terminus "Wirkungsmechanismus" geistert durch alle Werke der Biochemie. Jedoch: Bei den Pestiziden ist bis heute in keinem Falle der Wirkungsmechanismus geklärt. Es erweist sich auch als vordringlicher, nach den unerwünschten Nebenwirkungen zu forschen als nach den mikroskopischen Wirkungsmechanismen.

In der Antike bedeutete Physik etwas völlig Konträres: Erforschung der unveränderlichen Formen und Gestalten, der Lebens- und Entwicklungsgesetze der Organismen. Die Antike will primär verstehen, nicht verändern. Es war nicht Unfähigkeit der Griechen, keine Technik zu entwickeln, sondern ihre Geisteshaltung, die sich dem Verwendungstriebe, dem nur Nützlichen verschloß. - In der Neuzeit hat sich der Naturwissenschaftler der Verantwortung für seine Ergebnisse, für die Rückwirkungen seiner Erfindungen auf die Gesellschaft, auf die Umwelt entzogen (WAGNER 1969). Die nunmehr offen zutage liegende Bedrohung der Biosphäre zwingt ihn zur

---

Vortrag, gehalten anläßlich der Tagung der "Gesellschaft für Ökologie", Giessen 1972
Tagungsbericht "Belastung und Belastbarkeit von Ökosystemen"
Anschrift des Verfassers: Dr. J. Richter, 3 Hannover, Herrenhäuser-str. 2.

Reflexion. Was vermag ein Physiker, der sich den Problemen des Wassertransportes in Bodensäulen widmet, z.B. zu großräumigen hydrologischen und ökologischen Problemen beizutragen?
Der in wissenschaftlich-technischen Vorstellungen Gefangene sieht kurzschlüssig die Lösung des Umweltproblemes in der technischen Entwicklung, die es hervorbrachte. Das ist nicht zuletzt eine Konsequenz unseres Komfortdenkens. Was entscheidend sein wird, ist jedoch das Vorhandensein und Wirksamwerden von Vorstellungen, Konzepten und Modellen, die der komplexen Wirklichkeit und ihren Aufgaben in ihren lebensgesetzlichen Zusammenhängen gerecht werden und nicht etwa umgekehrt die Wirklichkeit des Lebens den technischen Möglichkeiten der Zukunft anzupassen suchen.

Es gibt zumindest drei sich teilweise überdeckende Wissenschaftsbereiche, die hier zu nennen sind: die Ökologie, die Systemtheorie und die Thermodynamik. Die Ökologie ist die universelle, Biologie, Physik, Chemie, aber auch die Sozialwissenschaften umgreifende Lehre vom Naturhaushalt der Erde. Sie ist eine Systemwirtschaft, ist primär ganzheitlich orientiert, d.h., daß sich das Verständnis der Systemkomponenten oder Subsysteme aus der Kenntnis des Systemganzen ergibt und nicht umgekehrt. Die allgemeine Systemtheorie als vorwiegend pragmatisch-operationale Methodenlehre ist in den vergangenen 20 Jahren im Kreis um von Bertalanffy als interdisziplinäre Wissenschaft entwickelt worden und hat ihren vielleicht wichtigsten Impuls neuerdings durch FORRESTER (1968) erhalten, der eine allgemeine Methodik zur Simulation komplexer dynamischer Systeme entwickelte.
Auch die Thermodynamik ist eine Systemwissenschaft: keine Veränderung im untersuchten System bleibt ohne Rückwirkung auf die Umwelt. Nimmt z.B. die Entropie, die ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Systemzustandes und damit für die Ordnung im System ist, im System ab, so nimmt die Entropie in der Umgebung um mindestens den gleichen Betrag

zu. Das ist eine bekannte Folgerung aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Drei Hauptsätze, formuliert als Unmöglichkeitsaussagen, stehen im Zentrum dieser Wissenschaft. Der Preis für die Universalität dieser Hauptsätze ist, daß sie keine Erklärungen im Mikroskopischen zulassen, derer sie aber umgekehrt auch nicht bedürfen. Vor über 100 Jahren von Ingenieuren und Biologen begründet, diente sie zunächst dazu, Wirkungsgrade von Wärmekraftmaschinen zu bestimmen. In der Entwicklung der letzten 30 Jahre verallgemeinerte man dann ihre Aussagen auf Nicht-Gleichgewichts-Systeme, auf Systeme mit ablaufenden irreversiblen Prozessen. Das machte den Übergang vom sog. geschlossenen System, dessen Grenzen nur durchlässig für Wärme sind, zum offenen System notwendig. Offene Systeme haben zusätzlich einen Stoffaustausch mit der Umgebung. Die Diskussion der Anwendbarkeit dieser verallgemeinerten Thermodynamik auf den lebendigen, sich entwickelnden Organismus hat gezeigt, wie weit das Konzept des Maschinenhaften für den stoffwechselnden Organismus reicht. Es ist nicht so sehr das Prinzipielle im Stoff- und Energiewechsel, was Organismus und Maschine unterscheidet, und es sind damit auch nicht die Fähigkeiten, die häufig als konstitutive Charakteristika des Lebendigen angesprochen werden (nämlich: Reproduktion, Homöostase und Informationserwerb), als vielmehr der Unterschied in der Konstruktion, im Bauplan. Es reicht noch nicht, die Gesetze der Energieumwandlung zu beherrschen, um einen funktionstüchtigen Motor zu bauen. Eine Maschine ist konstruierbar. Sie ist relativ wenig differenziert. Ein Organismus aber ist ein bis ins Kleinste differenziertes, hochkomplexes Gebilde - aus flüssigen, gasförmigen und "ätherischen" Substraten, um den Unterschied zu der schweren Maschine zu unterstreichen. Das hat die Leistungen des Lebendigen zur Folge, wozu auch dessen hohe Effektivität gehört.
Das Gemeinsame von einfachen und komplexen Systemen liegt im Stoff- und Energieaustausch. Die folgende Definition eines Systems kann als allen drei Systemwissenschaften gemeinsam gelten:

Das System ist ein - natürlich oder willkürlich - abgegrenztes Gebilde, das aus Elementen oder Subsystemen besteht, zwischen denen und deren "Eigenschaften" dynamische Beziehungen erklärt sind. Die Systemgrenzen sind durchlössig für alle Formen von Energie, Materie, aber auch für immaterielle Transportgrößen wie z.B. Informationen.

Bei der Suche nach weiteren Verallgemeinerungen kann man von der Frage ausgehen: wie kommt es überhaupt zu Veränderungen, Abweichungen vom thermodynamischen Gleichgewicht, z.B. zum Austausch von Stoffen? Was bedeutet der Begriff "dynamische Beziehungen"?
Nehmen wir als Beispiel den Boden, den wir hier vereinfachend als kontinuierliche poröse Schicht von endlicher Dicke auffassen wollen. Im Boden finde zwischen zwei Punkten A und B ein Austausch von Wasser statt. Sowohl dieser mengenmäßige Austausch als auch die diesen Austausch verursachenden Potentialunterschiede μ sind meßbare Größen. Auch ein Temperatur- oder ein Druckgefälle kann einen Stoffluß bewirken. Ganz allgemein kann man dieses phänomenologische Ursache-Wirkungs-Prinzip (UWP) ausdrücken durch:

$$I = L \cdot X$$

Wirkung (Fluß) = Modul (spezif. Leitfähigkeit) mal Ursache (thermodyn. Kraft).
Die Ursache für die Ausbildung solcher Potentialdifferenzen legt man zweckmäßigerweise außerhalb des Systems. Für den Wassertransport ist es, genauso wie für die übrigen Stoffkreisläufe in der Biosphäre, die Sonne. Der Fluß ist nun stets so gerichtet, daß er der Heterogenität entgegenzuwirken, das Gleichgewicht wiederherzustellen sucht. Man kann dieses UWP formal nennen, weil es ohne Kenntnis mikroskopischer Zusammenhänge auskommt. Dieses Prinzip ist universell: es gilt für den Transport wie für die Umwandlung der Stoffe ineinander; es ist anwendbar für den elektrischen Strom genauso wie für den Bevölkerungsfluß zwischen zwei Städten unterschiedlicher Attraktivität. Das UWP ist weiter verallgemeinerungsfähig:

1) Überlagerung: $I_i = \sum_k L_{ik} \cdot X_k$ (Beispiel: Membranprozesse, Abb.1)

Für ein komplexes, der phänomenologischen Beschreibung zugängliches System bedeutet L_{ik} eine Eigenschaftsmatrix, die das System hinsichtlich seines Transport- und Umsetzungsvermögens vollständig charakterisiert. Sie kennzeichnet damit auch eindeutig seine Struktur. - Abb.2 zeigt schematisch ein einfaches System, in welchem sich irreversible Transport- und reversible Umsetzungsprozesse abspielen. Dieses Systemmodell gibt z.B. das Eindringen von Wasser in den Boden, seine reversible Adsorption und Umwandlung zu Wasserdampf sowie dessen Export prinzipiell richtig wieder. Anhand eines solchen einfachen diskontinuierlichen Modells lassen sich einige wesentliche "Eigenschaften" offener Systeme erklären.

2) $L_{ik} \neq$ const.; $L_{ik} = L_{ik}$ (intensive Zustandsgrößen)
Konstante Leitfähigkeitskoeffizienten sind meist grobe Näherungen. Die Leitfähigkeit des Bodenwassers variiert in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens über mehrere Zehnerpotenzen.

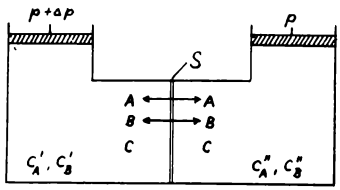
3) Auch die lineare Form des UWP ist ein Spezialfall, ein für einfache Prozesse recht einleuchtender. So trifft er für Transportprozesse oft noch bei sehr hohen Gradienten zu. Bei chemischen Reaktionen, die recht komplex sein können, ist die Anwendung linearer UW-Verknüpfungen stark eingeschränkt.

Neben das UWP tritt als weitere wichtige methodische Grundlage das ökologisch zu nennende Prinzip der Bilanzierung von Erhaltungsgrößen (Masse, Energie) oder Nichterhaltungsgrößen (Stoffe, Entropie S). Wie in Abbildung 2 schon angedeutet, ändert sich die Konzentration c_i eines Stoffes i 1) durch Transport T_i und 2) durch reversible oder irreversible Umwandlung P_i:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = I_i \text{ , mit } I_i = T_i + P_i$$

($P_i \neq 0$: Nichterhaltungsgröße (speziell: $d_i S \gg 0$); $P_i = 0$: Erhaltungsgröße)

Die Kombination von phänomenologischen und Bilanzgleichungen bei bekannter Abhängigkeit der Leitfähigkeiten und des chemischen Potentials etc. von den intensiven Zustandsgrößen unter Berücksichtigung der Anfangs- und Randbedingungen liefert in vielen Fällen eine ausreichende Grundlage zur Behandlung komplexer Phänomene in der Hydrologie, der Verfahrenstechnik etc. Als Beispiel sei die Behandlung der Nitrifikation im Boden erwähnt (PAUL und DOMSCH 1972).



isotherm; isobar:

$$J_A = L_A \Delta\mu_A + L_{AB} \Delta\mu_B$$

$$J_B = L_{AB} \Delta\mu_A + L_B \Delta\mu_B$$

allgemein:

$$\Delta\mu_i = v_i \Delta p + RT \frac{\Delta a_i}{a_i} + s_i \Delta T$$

Abb.1: Überlagerung von Flüssen am Beispiel des Stofftransportes durch Membranen (S - Membran, $\Delta\mu_i$ - chemisches Potential der Komponente $_i$)

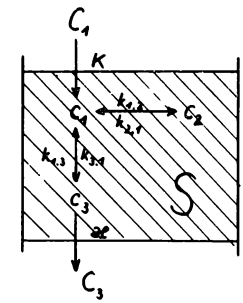


Abb.2: Einfaches diskontinuierliches Modellsystem zur Veranschaulichung der Wasseraufnahme des Bodens; Erläuterung im Text.

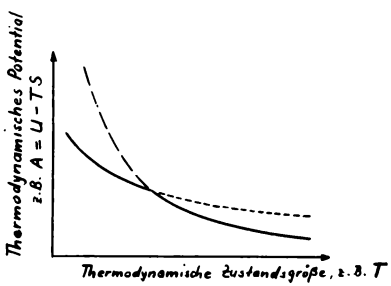


Abb.3: Zur Veranschaulichung der Phasenumwandlung anhand eines thermodynamischen Potentials in Abhängigkeit von einer Zustandsgröße.

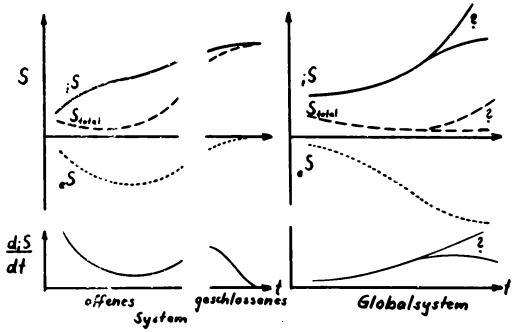


Abb.4: Änderung der im System produzierten Entropie ($_iS$), der Exportentropie ($_eS$) und der Systementropie (S_{total}), sowie der Entropieproduktion d_iS/dt in Abhängigkeit von der Zeit t in einem offenen, einem geschlossenen und im Globalsystem. Der Anstieg von $_iS$ im Globalsystem ist stark abhängig von den Abgrößen (Abwasser, Abgase, Abfälle Abwärme etc.). Die Erhöhung des Entropieexportes im Globalsystem ist im wesentlichen eine Folge des verstärkten Abbaues der in den fossilen Brennstoffen gespeicherten Energie.

Alle komplexen Systeme, sei es ein Organismus, ein Ökosystem, eine Gesellschaft, zeigen eine Tendenz zur Selbsterhaltung, zur Stabilität (Homöostase). Wichtigstes Kennzeichen der Stabilität sind unveränderliche Zusammensetzung und Struktur. So baut ein Organismus bei Wegfall der Stoffzufuhr zunächst die Speicherfette und -Kohlenhydrate ab, regeneriert aber die sich ständig abbauenden konstitutiven Eiweiße. Selbst der Gaswechsel im Boden läßt die CO_2-Konzentration über längere Zeiten praktisch unverändert, obwohl die biologische Aktivität mit der Tageszeit stark variiert. Wie kommt es zu einem solchen stationären Zustand?

Der Import der Komponente 1 (in Abb.2) läßt sich durch folgende phänomenologische Gleichung beschreiben:

$$I_1 = K (C_1 - c_1)$$

Wird nun infolge einer Störung K verändert und die Konzentration c_1 z.B. erhöht, so erniedrigt sich der Import. Selbstverständlich wird diese Regulation durch die Abhängigkeit der Leitfähigkeit K von der Konzentration im kontinuierlichen System entscheidend modifiziert. Man kann das hier zutage tretende Prinzip der Stabilisierung als eine Verallgemeinerung des LE CHATELIERschen Prinzips auffassen.

Auch durch die Kopplung der Transportprozesse kann es zur Stationarität kommen. Der CO_2-Austausch im Boden liefert das Beispiel: die im Laufe des Tages mit zunehmender Temperatur ansteigende CO_2-Entwicklung wirkt nicht konzentrationserhöhend, weil der Temperaturgradient selber als zusätzliche Transportursache wirkt.

Bis jetzt ist das zentrale Prinzip der Thermodynamik, die Entropiebilanz, nicht erwähnt worden. Dabei hat gerade sie möglicherweise weitreichende ökologische Konsequenzen. Das Ausmaß der Entropieproduktion im System ist linear mit den Flüssen und thermodynamischen Kräften verknüpft. Ein Wärmeübergang z.B. zwischen zwei Körpern kann je nach den Bedingungen weitgehend reversibel sein oder aber mit einer bestimmten Entropieproduktion verbunden sein. Stationäre Zustände zeichen sich, ebenfalls unter bestimmten Bedingungen, durch ein Minimum der Entropieproduktion aus. Ähnlich wie es

z.B. bei Phasenübergängen diskontinuierliche Übergänge gibt, die sich in der Abhängigkeit eines thermodynamischen Potentials von einer Zustandsgröße darstellen lassen (Abb.3), gibt es auch diskontinuierliche Übergänge zwischen verschiedenen stationären Zuständen, was sich in einer sprunghaften Veränderung der Entropieproduktion - in Abhängigkeit vom entsprechenden Gradienten - zeigt.

Es ist i.a. unmöglich, die Entropieproduktion für ein hochkomplexes System zu berechnen. Trotzdem läßt sich folgendes über die Beziehung zwischen der Entwicklung eines hochkomplexen Systems - eines Organismus, eines Ökosystems - und der Entropieproduktion allgemein aussagen: Das Leben spielt sich weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht ab. Zur Aufrechterhaltung wie zur Entwicklung dieses Nicht-Gleichgewichts-Zustandes muß Entropie aus dem System abgeführt werden, um die ständige Zunahme der Systementropie $_iS$ zu kompensieren bzw. überzukompensieren. Voraussetzung für die Dissipation ist, daß das System zwischen zwei Energieniveaus arbeitet. Zwingende Schlußfolgerung für das globale Ökosystem ist, daß die Entropieabfuhr größer bleiben muß als die Entropieproduktion des Systems, soll dasselbe nicht degradieren (Abb.4).

Literaturverzeichnis: FORRESTER, Jay W.: Principles of Systems. Wright-Allen Press, Cambridge, Mass. 1968. PAUL,W. und K.H.DOMSCH: Ein mathematisches Modell für den Nitrifikationsprozeß im Boden. Arch.Mikrobiol. 87, 77-92 (1972). WAGNER,F.: Die Wissenschaft und die gefährdete Welt. (Eine Wissenschaftssoziologie der Atomphysik). München, 2.Aufl. 1969.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie

Jahr/Year: 1972

Band/Volume: 1972

Autor(en)/Author(s): Richter J.

Artikel/Article: Ökologie und System: I. Verallgemeinerung physikalischer Systeme 41-48