

# 1 Das Prinzip der Nachhaltigkeit

*Räumlich-temporale, entropische und syntropische Charakteristika  
ökonomischer und natürlicher Entwicklungsprozesse aus  
physikalischer Sicht*

Wolfgang Eisenberg<sup>\*</sup>, Uwe Renner<sup>\*\*</sup>

## Zusammenfassung

Naturwissenschaftliche – insbesondere physikalische – Erkenntnisse und Konzepte sollten verstärkt zur Bewertung nachhaltiger wirtschaftlicher und technologischer Entwicklungen herangezogen und ökonomisch genutzt werden. Das Prinzip der Nachhaltigkeit führt in der hier betrachteten Weise auf eine Optimierung der räumlich-zeitlichen Struktur unter der Nebenbedingung einer ökonomischen Nutzung. Der Wert von Ressourcen sollte dabei nicht nur die energetische Umformbarkeit, sondern auch den dissipativen Wärmeverbrauch beinhalten. Denn die natürliche Regenerierbarkeit hat physikalische Grenzen.

## 1.1 Das Nachhaltigkeitsprinzip und die ökologische Ökonomie

Das Prinzip der Nachhaltigkeit stammt aus der Forstwirtschaft – zuerst hat CARLOWITZ 1713 in der Literatur darauf hingewiesen – und wird dort auch praktiziert: der jährliche Holzeinschlag soll bei gleicher Holzqualität nicht größer sein als die nachwachsende Holzmenge.

---

<sup>\*</sup>Gesellschaft für ökologische Technologie und Systemanalyse e.V.,  
Ostheimstraße 3a, D-04328 Leipzig

<sup>\*\*</sup>Wissenschaftszentrum Leipzig – Förderverein e.V.,  
Goldschmidtstraße 26, D-04103 Leipzig

Welche wirtschaftlichen, sozialen und politischen Probleme ergeben sich, wenn dieses physisch-ökologische Prinzip auf andere Wirtschaftsbereiche eines Landes oder auf die Weltwirtschaft übertragen wird?

Erstmals ist 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung im BRUNDTLAND-Bericht (s. [1]) das Prinzip der Nachhaltigkeit, das auf einen Ausgleich zwischen den Zielen der Wohlstandsmehrung und der Umwelterhaltung orientiert, als Leitbild für die wirtschaftliche Entwicklung formuliert worden. Nachhaltige Entwicklung – *sustainable development* – wird definiert als eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.

Ausgehend von der Definition der „Sustainability“ haben die Umweltökonom Managementregeln zur Aufrechterhaltung der ökologischen Funktionen entwickelt. So lautet z. B. die erste Regel: Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen darf ihre Regenerationsrate nicht überschreiten. In der Forstwirtschaft ist das bereits heute die Regel, indem der Wald „nachhaltig“ genutzt wird, d. h. nur soviel Holz geschlagen wird wie auch nachwächst. Hier ist das Konzept der Nachhaltigkeit schon dynamisch interpretiert, nicht nur statisch (der Zustand soll ohne zeitliche Begrenzung fort dauern), wobei z. B. der Holzvorrat in Festmetern konstant bleiben soll. Noch weiter faßt GROSSMANN die dynamische Nachhaltigkeit. Danach bedeutet sie die Erhaltung der Funktions- und vor allem der Widerstandsfähigkeit des Waldes auch gegenüber neuen und unvorhergesehenen Einwirkungen [2]. Die zweite bekannte Regel lautet: Die Stoffeinträge in die Umwelt dürfen die Belastbarkeit der Ökosysteme nicht überschreiten. Mit dem Vorsorgeprinzip versucht man in der Umweltpolitik, diese Regel umzusetzen. Die dritte Regel beinhaltet, daß der Abbau nicht-erneuerbarer Ressourcen nur dann legitimierbar ist, wenn spätere Generationen dadurch nicht schlechter gestellt werden (siehe z. B. [3]). Über die beiden ersten Regeln besteht im Grunde Konsens, und sie sind in die praktischen Leitlinien schon z. T. eingegangen. Die Operationalisierbarkeit der Regeln bereitet in der Praxis aber erhebliche Probleme. Wann ist z. B. die Belastbarkeit des Ökosystems überschritten? Oder: welche Emissionen können noch zugelassen werden? Natürlich kennen wir mittlerweile eine stattliche Anzahl von Nachhaltigkeitsprinzipien, die formuliert worden sind für erneuerbare bzw. nicht-erneuerbare Ressourcen, hinsichtlich der irreversiblen Schäden, der Assimilationskapazität und des Vermögens zur Kompensation der natürlichen Umwelt (siehe z. B. [4]).

„Sustainable development“ und das Prinzip der Nachhaltigkeit sind ersichtlich die zentralen Begriffe im zeitgenössischen internationalen Diskurs zur

Entwicklung einer „ökologischen Ökonomik“. Demzufolge ist auch die ökologische Ökonomik als Wissenschaft des nachhaltigen Wirtschaftens nicht eine „rein“ theoretische Disziplin, unabhängig von ihrer „Umwelt“, sondern eine „praktische“ Wissenschaft des nachhaltigen Managements knapper Ressourcen. Für den sich konstituierenden Umriß eines paradigmatischen Umbaus der Ökonomik ist der wirtschaftliche Prozeß nicht im neoklassischen Kreislaufparadigma von Produktion und Konsumtion, als ein selbstregulierendes und -stabilisierendes System, das unabhängig von externen (ökologischen, sozialen und moralischen) Systemelementen und -faktoren ist, zu sehen.

„Eine derartige Reformierung von Gegenstand und Methode der (ökologischen) Ökonomik ist nicht möglich, ohne ausdrückliche Bezüge zu Ethik, Politik und Physik (physis) – ganz ähnlich der traditionellen (,vor-modernen‘) oikonomia-Lehre“ [5]. Damit akzeptiert die ökologische Ökonomie die Einsicht, daß menschliche Systeme Teilsysteme des ökologischen Systems sind. Dies muß auch in den Arbeitsdefinitionen der Nachhaltigkeit, deren es schon 60 gibt, zum Ausdruck kommen, die zudem noch in brauchbare ökonomisch-operationalisierbare Begriffe übersetzbar sein sollten. Schwierig wird diese Übersetzbarkeit allerdings, wenn Nachhaltigkeit sogar im naturphilosophischen Kontext bestimmt wird [6]. In diesem Artikel wird Nachhaltigkeit gefaßt als *Optimierung der räumlich-zeitlichen Struktur* im Rahmen einer ökonomischen Nutzbarkeit.

## 1.2 Bewertung nachhaltigen Wirtschaftens – Wohlfundfunktionen

### 1.2.1 Einleitung

Produktentwicklung beruht in der Regel auf der Umwandlung *niederwertiger* Rohstoffe in Waren mit einem bestimmten Gebrauchswert. Ungeklärt ist jedoch die Frage, was niederwertig ist. Meist ist dabei die strukturelle Beschaffenheit der unmittelbaren Rohstoffe gemeint. Daß die Strukturierung der Produkte auf der energetischen Dissipation bzw. Entropieerhöhung (als Grad für die unvollständige thermische Rückführbarkeit und das damit verbundene Wachsen von Unordnung) anderer Rohstoffe wie der Energieträger (z. B. Kohle, Erdgas) beruht, wird zumeist nur im Aufwand für deren Gewinnung berücksichtigt. Wie lange noch?

Ständig soll sich der Wohlstand der Gesellschaft erhöhen, allerdings nicht allein quantitativ, was sich durch die zunehmende Konsumtion bemerkbar

macht. Wohlstand bedeutet aber auch Verschleiß, spätestens nachdem die Waren ihren Gebrauchswert verloren haben. Immer mehr Produkte in immer kürzerer Zeit verlangen nach einer Entsorgung (Deponien, Verbrennung) und führen demnach zu einer Erhöhung der Entropie. Es entsteht somit die Frage, wie ein nachhaltiger Wohlstand aussehen sollte, der den Anforderungen nach minimalem Verschleiß Rechnung trägt.

Dabei steht die Menge der natürlichen Energiebereitstellung in Disproportion zur verbrauchten Energie. Die Zeiten bis zum Verschleiß bzw. für die Gewinnung der Energiemenge sind kaum in derselben Größenordnung. Es wird deutlich, daß bei der Beurteilung von Rohstoffbereitstellung, Konsum und Wiederverfügbarkeit die einzelnen Zeiträume von maßgebender Bedeutung sind. So lassen sich charakteristische Entstehungszeiten messen, die groß im Vergleich zu den Konsumzeiten sind. Nachhaltiges Wirtschaften heißt: *Beachtung der unterschiedlichen Zeiträume und Optimierung der Prozesse* unter Beachtung der natürlichen (physikalischen) Bildungs- bzw. Abbauzeiten.

### 1.2.2 Die Wohlfahrtsfunktionen

Will man das vernünftige Maß von Konsum  $Q(t)$  und Umweltqualität  $S(t)$  finden, so hat man zwischen diesen ein Optimierungsproblem hinsichtlich der *gesellschaftlichen Wohlfahrt*  $W[Q(t), S(t)]$  zu lösen [7, 8]. Die Erhöhung der Umweltqualität steht dabei im Wettbewerb mit dem Konsumanspruch. Die Bewertung sollte auch die Wohlstandswerte zu späteren Zeiten berücksichtigen, um dem Prinzip der Nachhaltigkeit Rechnung zu tragen. Es ist der integrale Ausdruck von  $W$  zu optimieren, wobei spätere Zeitpunkte geeignet mit einer passenden Funktion  $w(t)$  zu wichten sind. Das Problem läßt sich dann als die Aufgabe

$$\max \int_0^{\infty} dt w(t) W[Q(t), S(t)] \quad (1.1)$$

formulieren. Häufig wird zur Wichtung die Exponentialfunktion mit

$$w(t) = w_0 \exp(-rt), \quad r > 0$$

gewählt, die einen Zerfall des aktuellen Wohlstandswertes mit einer zumeist konstanten Rate  $r$  beschreibt. Das Problem besteht nun in der Maximierung des LAPLACE-Funktional

$$\mathcal{W} = \int_0^{\infty} dt e^{-rt} W[Q(t), S(t)] \rightarrow \max.$$

Jedoch setzt diese konstante Rate  $r$  stationäre Bedingungen (gesellschaftliche Konstanz) des Verhaltens voraus, was jedoch nicht langfristig zutreffen muß.

Daher sind auch kompliziertere Zerfallsmuster in die Betrachtung einzubeziehen. Zumeist lassen sich solche Zerfallsprozesse durch eine Überlagerung von Zeitfunktionen der Form  $w(t) = \sum a_i \exp(-b_i t)$  beschreiben. Selbst die für größere Zeiten langsameren algebraischen Zerfälle  $w(t)$  sind denkbar. Spätere Zeiten beeinflussen also die Wohlfandsbeurteilung nicht unerheblich.

### 1.2.3 Die Optimierungsaufgabe – Fallbeispiele

Die obengenannte Optimierungsaufgabe aus der ökologischen Ökonomie bedeutet eine Suche des optimalen Entwicklungspfad, der sich als Lösung der zugehörigen Variationsaufgabe ergibt.

Die Optimierung der Wohlfandsfunktion soll die Ressourcenentwicklung  $R(t)$  bei Entzug  $Q(t)$  berücksichtigen, z. B. in der Form:

$$\dot{R}(t) = f[R(t)] - Q(t). \quad (1.2)$$

Das ist ein Variationsproblem mit nichtholonomen Nebenbedingungen [9] für die Ressource  $R(t)$ .

Zur *Wohlfandsfunktion* (nur Konsum, ohne Schadensfunktion)

$$\mathcal{W} = \int_0^\infty dt e^{-rt} W[Q(t)]$$

gehören eine LAGRANGE-Funktion  $L$  und eine Multiplikatorfunktion  $\lambda(t)$ :

$$L = e^{-rt} W[Q(t)] - \lambda(t) \left\{ \dot{R}(t) - f[R(t)] + Q(t) \right\}.$$

Eine Verallgemeinerung auf mehrere Variablen, d. h. mehrere Ressourcen, ist leicht möglich.

Die EULER-LAGRANGE-Gleichungen des zur Optimierung gehörenden Variationsproblems

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{Q}}, \quad (1.3)$$

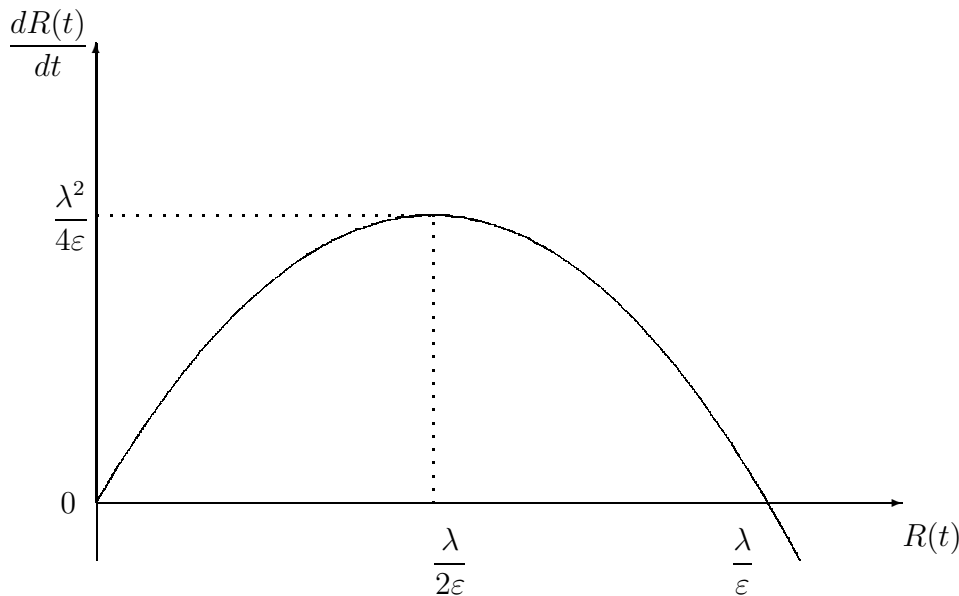
$$\frac{\partial L}{\partial R} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{R}} \quad (1.4)$$

liefern zusätzlich Bewegungsgleichungen zu Gl. (1.2), wobei sich aus (1.3) die Multiplikatorfunktion zu

$$\lambda(t) = e^{-rt} \frac{\partial W[Q]}{\partial Q}$$

bestimmen läßt.

Zur Illustration des Ausgeführten seien im folgenden zwei typische Fallbeispiele vorgestellt (s. [7]).



**Abb. 1.1:** Beziehung zwischen Ressourcenbestand  $R(t)$  und dessen Änderung  $\frac{dR(t)}{dt}$

### Beispiel 1: Umwelt als Rohstofflieferant

Es wird ein Ein-Sektoren-Modell mit einer regenerierbaren Ressource (ohne Produktions- und Entsorgungsbereich) betrachtet. Die Ressource kann ohne Einsatz von Arbeit als Konsumgut verwendet werden.

Die Bewegungsgleichung für die Ressource  $R(t)$  lautet (Abb. 1.1):

$$\dot{R}(t) = \lambda R(t) - \varepsilon R^2(t).$$

Die Konstanten  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  werden durch die Art der Ressource (Fisch- oder Waldbestand) bestimmt. Ein Beispiel für diesen Zusammenhang ist die Neubesiedlung von Lebensräumen. Der Zuwachs des Fischbestandes in einem See würde sich z. B. erhöhen, wegen Verknappung des Futters das Maximum überschreiten und bei intensiver Nutzung sich wieder verringern, und schließlich wird die Rate bei  $\lambda/\varepsilon$  sogar negativ.

### Beispiel 2: Berücksichtigung des Konsums

Verwendet der Mensch zum Zeitpunkt  $t$  einen Teil des Bestandes für den Konsum, gegeben durch  $Q(t)$ , dann gilt:

$$\dot{R}(t) = \lambda R(t) - \varepsilon R^2(t) - Q(t).$$

Ist  $Q(t) = \lambda R(t) - \varepsilon R^2(t)$ , dann befindet sich das System im stationären Zustand;  $R(t)$  und  $Q(t)$  sind konstant. Aus der Optimierungsbedingung ergeben sich die optimalen Werte von  $R$ :  $R^*$  und von  $Q$ :  $Q^*$  zu:

$$R^* = \frac{\lambda - r}{2\varepsilon}, \quad Q^* = \frac{\lambda^2 - r^2}{4\varepsilon}.$$

Ist  $\lambda \leq r$ , dann gibt es keine stationäre Lösung, und die Ressourcen werden vollständig aufgezehrt.

Die zu jedem Zeitpunkt maximierenden Lösungen  $R^0$ ,  $Q^0$  unterscheiden sich von  $R^*$ ,  $Q^*$ . Denn es gilt:

$$R^0 = \frac{\lambda}{2\varepsilon} \quad \text{und} \quad Q^0 = \frac{\lambda^2}{4\varepsilon}.$$

Nur für  $r = 0$  sind die beiden Lösungen identisch. Dieses Ergebnis entspricht dem behaupteten Ergebnis aus der Wachstumstheorie, daß bei Mindererschätzung zukünftiger Güter (d. h.  $r > 0$ ) der *Golden-Rule-Pfad* (Pfad, der maximalen Pro-Kopf-Konsum ermöglicht) nicht der optimale ist.

Was folgt noch aus diesen Beispielen? Ein Nichtbeachten der einzelnen Zeitskalen, hier gegeben durch  $\lambda$  und  $r$ , kann in ökologischen Systemen zum Aussterben der Individuen und sogar zum Zusammenbruch des Ökosystems führen. Wir sind demnach angemahnt, mit den Zeittakten der Natur und ihren Uhren zu leben und uns ohne Verzug aufzumachen, einen der optimalen Wege zu gehen. Nachhaltiges Wirtschaften müßte sich auf diese Forderungen  *einstellen und beachten*, daß es Uhren auf den verschiedensten Entwicklungsstufen – von den atomaren bis hin zu den kosmischen Uhren – gibt. Dazwischen liegen die uns besonders interessierenden biologischen Zeiträume der Evolution mit ihren individuellen Lebenszeiten. Jede Uhr wird durch bestimmte Prozesse charakterisiert, die auch die Folgen unseres Handelns auszeichnen. Daher ist es ratsam, sich mit diesen charakteristischen dynamischen Prozessen ([10], S. 89) und Zeitskalen besonders auseinanderzusetzen.

## 1.3 Dynamik charakteristischer Prozesse und Zeitskalen

### 1.3.1 Die Uhr der Evolution

Üblicherweise wird die physikalische Zeit in atomaren Schwingungsperioden gemessen. Doch ist diese Einheit bei der Betrachtung aller in der Natur vorkommenden Prozesse vom Pikosekundenbereich bis hin zum Milliarden-Jahre-Zeitraum kosmischer Entwicklung zweckmäßig? Welche Bedeutung hat wohl

die Sekunde im Verlauf eines Lebens? Für die evolutionäre Entwicklung ist andererseits nur die Zeit für die Entstehung neuer Spezies von Interesse. Damit ist die Zeit als Abfolge ihrer Ereignisse und der entsprechenden Zeitspannen (Lebenszeiten) charakterisiert. Bei dieser anderen Betrachtungsweise besitzt die Natur anscheinend viele Uhren (Takte) und damit Zeitskalen – ein praktikabler konzeptioneller Gedanke.

Unser Verständnis der Natur zeigt eine *Hierarchisierung* der Bestandteile, etwa nach dem Grobschema: Die Gesellschaft besteht aus Individuen, diese aus Organen, diese aus Zellen, diese aus chemischen Stoffen, diese aus Atomen . . . Entsprechend sind dann die charakteristischen Lebenszeiten strukturiert. Hierbei ist die Individualzeit oft wesentlich kleiner als die Zeit für das Bestehen des kollektiven Ensembles. Individuen sind austauschbar – Persönlichkeiten jedoch nicht.

Eine grobe Einteilung der Prozesse nach zeitlichen Maßstäben gibt die folgende Aufstellung, wobei einige einmalig, andere hingegen periodisch auftreten: Kosmos (Milliarden Jahre) – Entstehung des Leben (Millionen Jahre) – Zivilisation (Jahrtausende) – gesellschaftliche Epochen (Jahrhunderte) – Menschheitsalter (Lebenszeit) – Jahreszyklus – Biorhythmen – Tag und Nacht (Hell/Dunkel, Ebbe/Flut) – Zellalter – atomare Prozesse (Pikosekunden).

### 1.3.2 Zeitlich kontinuierliche und diskrete Prozesse

Die Beschreibungen von Prozessen kann man grob in zeitlich kontinuierliche  $x(t)$ ,  $x \in \mathbb{R}$  und diskrete  $x_n$ ,  $n \in \mathbb{N}$  einteilen, wobei die Größen  $x(t)$  bzw.  $x_n$  selbst wieder in kontinuierlicher Form und auch in diskreter Anzahl auftreten können. Im ersten Fall läuft unsere Uhr andauernd, im diskreten Fall wird sie nur beim Auftreten von Ereignissen weitergestellt. Die Evolution in der Zeit läßt sich somit auf zweierlei Weise charakterisieren, jedoch treibt sie die Zeiger der Uhr in beiden Fällen voran.

Zeitkontinuierliche Prozesse haben vor allem dann Sinn, wenn sich der Zustand mit der Zeit laufend ändert, etwa die Population von Fischen bei einer großen Zahl von Individuen. Die Änderungen werden dann zumeist durch Ableitungen  $\dot{x}(t)$  ausgedrückt. In dieser Beschreibung ist die stetige Änderung des Systemzustandes als ein vergrößertes oder mittleres Verhalten anzusehen. Komplexeres Verhalten wird dann durch die lineare oder nichtlineare Kopplung der Zustandsgrößen beschrieben. Ist das allgemeine Verhalten bei linearer Kopplung  $\dot{x}_i = \sum a_{ij} x_j$ , wobei  $a_{ij}$  die Elemente der Kopplungsmatrix  $\mathbf{A}$  sind, als Superposition der Eigenzustände in Abhängigkeit von den Anfangswerten gegeben, so kann man im nichtlinearen Fall das allgemeine Verhalten zumeist



nicht vorausbestimmen. Selbst chaotische Zustände sind in Abhängigkeit von den Kopplungsstärken möglich.

Ein Beispiel für die kontinuierliche Populationsänderung wird durch die logistische Gleichung in ihrer standardisierten Form  $\dot{x}(t) = \lambda x(t)(1 - x(t))$  bei gegebener Anfangspopulation  $x(0)$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  beschrieben. Die Konstante  $\lambda$  mit  $\lambda > 1$  charakterisiert dabei die Vermehrungsrate bzw. -geschwindigkeit der Population. In dieser Beschreibung gibt es mit der Zeit ein stabiles Gleichgewicht ( $\dot{x} = 0$ ) bei  $x = 1$ , unabhängig von  $\lambda$ . Aber auch das mit  $\dot{x} = k_{11}x - k_{12}xy$  und  $\dot{y} = k_{21}xy - k_{22}y$  gegebene Räuber-Beute-System ( $x$ : Beutedichte,  $y$ : Räuberdichte) nebst ihren Modifikationen hinsichtlich des Freßverhaltens sind Beispiele ökologischer Beschreibungsweisen.

Ist man beim kontinuierlichen Verlauf der Zeit an dem Zustand zu *jedem* Zeitpunkt  $t$  interessiert, so betrachtet man bei letzterer nur die abzählbare Folge von Ereignissen, etwa die jährliche saisonbedingte Änderung der Populationszahl, wenn  $n$  die Jahre zählt. Auch hierfür gibt es eine zeitlich diskrete Form der logistischen Gleichung  $x_{n+1} = \lambda x_n(1 - x_n)$  mit dem Startwert  $x_0$ ;  $\lambda$  stellt einen Vermehrungsfaktor dar. Bei kleinen Werten von  $\lambda$  wird ein Gleichgewichtszustand ( $x_{n+1} = x_n$ ) bei  $x_\infty = 1 - \frac{1}{\lambda}$  erreicht. Bei größeren Parameterwerten können selbst in diesem Fall Periodenverdopplung, aber auch Chaos auftreten, wie es das FEIGENBAUM-Szenarium beschreibt. In der Kontinuumsdarstellung sind solche reichhaltigen Strukturen nicht enthalten.

Der Idealfall einer deterministischen Beschreibung wird aber oft von stochastischen Komponenten wie Rauschen überlagert. Solche Prozesse werden durch die Wahrscheinlichkeit bei einer endlichen Anzahl von Ereignissen bzw. durch die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Eintreten eines kontinuierlichen Spektrums von Ereignissen charakterisiert.

Die Vielfalt zeitlicher Verhaltensweisen soll in den folgenden Abschnitten näher charakterisiert werden. Es soll deutlich werden, daß die (Natur-)Wissenschaften, insbesondere die Physik, ein reiches Methodenspektrum zur Verfügung stellen.

### Periodische Prozesse

Aus der Erfahrung sind uns periodische Zeitverläufe vor allem im Tages- und Jahreszyklus bekannt. Diese beeinflussen Systemparameter wie Helligkeit, Temperatur u. a. wesentlich (neben Schwankungen, s. u.). Sie stellen somit eine äußere Uhr (Metronom) für das System dar.

Periodische Schwingungen lassen sich durch die Beziehung  $f(t) = f(t + \tau)$  mit der Periodendauer  $\tau$  beschreiben. Als Beispiel sei das Verhalten von  $\sin(t)$

mit der Periode  $2\pi$  genannt. Unter sehr allgemeinen Bedingungen läßt sich periodisches Verhalten in Form einer FOURIER-Reihe

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [a_k \sin(2\pi k\nu t) + b_k \cos(2\pi k\nu t)] \quad (1.5)$$

ausdrücken. Hierbei sind  $a_k$  und  $b_k$  Koeffizienten, welche die Information über die konkrete Verlaufsform enthalten, und  $\nu$  ist die Frequenz.

Mit dieser Periodizität korrelieren andere Prozesse (unter Umständen mit zeitlicher Verzögerung) wie etwa die Nährstoffaufnahme oder die Fortpflanzung bei den Lebewesen. In einer mathematischen Modellierung natürlicher Prozesse gehen diese Einflüsse etwa über äußere additive „Kräfte“ bzw. periodische veränderliche Parameter ein. Bei sehr kurzen Zeiten kann man bei geringen Änderungen der Parameter oft den Momentanwert in der Modellierung verwenden, bei sehr großen Zeiten (groß gegenüber der Periodendauer) dagegen durch den zeitlichen Mittelwert.

### Exponentieller Zerfall und Explosion

Das exponentielle Zeitverhalten

$$x(t) = x(0) \exp\left(\pm \frac{t}{T}\right) \quad (1.6)$$

oder in differentieller Form

$$\dot{x}(t) = \pm \frac{1}{T} x(t),$$

mit der Zeitkonstanten  $T$ , ist ein in der Natur häufig anzutreffendes Prinzip. Es ist Ausdruck einer ungebremsten Entwicklung. Die Dominanz des exponentiellen Gesetzes ist für eine temporale nachhaltige Betrachtung von besonderer Bedeutung.

So verhält sich die Lebenszeit atomarer Objekte der Menge  $x(t)$  zur Zeit  $t$  oft nach diesem Zerfallsgesetz (1.6) mit negativem Vorzeichen. Als Beispiele seien der Zerfall bei chemischen (unimolekularen) Reaktionen der Form  $A \rightarrow B$  mit ihren spezifischen Reaktionsgeschwindigkeiten und der radioaktive Zerfall („Atommüll“) genannt.

Das exponentielle Wachstum (positives Vorzeichen) einer Population – jeder kennt die rasante Vermehrung von Bakterien oder anderer Kolonien von Mikroorganismen – wird hingegen auch für den Bevölkerungszuwachs in der „Dritten Welt“ verantwortlich gemacht, wobei hier aber vorausgesetzt wird,

daß es keine (selbst-)regulierenden und damit bremsenden Mechanismen gibt. Näherungsweise ist die Populationszunahme, wie sie in der logistischen Gleichung beschrieben wird, bei kleinen Bevölkerungszahlen exponentiell.

Der Prozeß wird durch eine *Bezugszeit* (mittlere Generations- bzw. Zerfallszeit)  $T$  charakterisiert. Oft wird anstatt  $T$  der reziproke Wert gewählt. Dieser hat dann die Bedeutung einer Zerfallsrate bzw. (Reaktions-)Geschwindigkeit. Der Zeitbereich von  $T$  kann sich von wenigen Mikrosekunden (Spinrelaxationszeiten) bis hin zu Jahrtausenden (radioaktiver Zerfall) erstrecken. Die Bedeutsamkeit letzterer Größenordnung sollte zumindest seit dem Problem der Entsorgung atomaren Abfalls aus Kernkraftwerken in der Öffentlichkeit klar sein.

Für zeitlich diskrete Prozesse erhält man hingegen die Entwicklungsgleichung  $x_{n+1} = \lambda x_n$  mit dem Vermehrungsfaktor  $\lambda$ . Ähnliche Prozesse mit asymptotisch exponentiellem Zeitverlauf können durch lineare Differenzgleichungen höherer Ordnung beschrieben werden. Ein weiteres Beispiel mit weiter zurückliegender zeitlicher Korrelation ist die bekannte Differenzgleichung 2. Ordnung:  $x_{n+2} = x_{n+1} + x_n$ . Sie beschreibt mit  $x_0 = 0$ ,  $x_1 = 1$  die FIBONACCI-Folge – ein Beispiel für die jährliche Populationszahleentwicklung etwa von Tauben oder Kaninchen.

### Algebraisches Verhalten

Der exponentielle Zerfall mag zumindest bei elementaren Prozessen ein häufig vorkommender Fall sein, doch existieren auch Zerfälle, z. B. in inhomogenen Materialien, mit zumeist asymptotisch-algebraischem Verlauf der Form

$$x(t) \sim t^{-\alpha}. \quad (1.7)$$

In diesen Fällen existiert keine charakteristische Bezugszeit wie im Fall des exponentiellen Zerfalls, maßgeblich ist hier der Wert des Exponenten  $\alpha$ . Ein Vergleich beider Prozesse hinsichtlich einer Bezugszeit läßt sich damit nicht anstellen. Zumindest für asymptotisch große Zeiten verläuft der algebraische Zerfall langsamer als der exponentielle.

Ein Beispiel für diese Zerfallsart ist der zeitliche Verlauf der Konzentration beim autokatalytischen Zerfall  $X + X \rightarrow X + A$  mit  $x(t) \sim t^{-1}$ , d. h.  $\alpha = 1$ . Aber auch Reaktionen, die ursprünglich in homogener Umgebung exponentiell verlaufen, können in bestimmten ungeordneten Medien ein Zerfallsmuster mit algebraischem Verlauf ergeben.

### 1.3.3 Schicksal Zufall

Die zeitliche Abfolge von Prozessen kann aber auch in zufälliger Weise erfolgen. Bedingt durch äußere Einflüsse, z. B. Kopplung an ein Wärmebad, kann Rauschen das Systemverhalten verändern. Gerade an kritischen Entscheidungspunkten sorgt der Zufall für die weitere Entwicklung des Systems oder bewirkt Übergänge in andere Zustände. Viele Zerfallsprozesse (radioaktiver Zerfall, chemischer Zerfall) erfolgen *mikroskopisch* auf zufällige Weise. Die mikroskopische Welt scheint den Zufall zu bevorzugen. Nicht zuletzt die Quantenmechanik gibt dieser Annahme durch ihre Wahrscheinlichkeitsinterpretation recht.

Dabei beschränkt sich diese Zufälligkeit nicht nur auf zeitliche Ereignisse, auch die Wahl einer Richtung muß z. B. dem Zufall überlassen werden. So ist die BROWNSche Bewegung (Diffusion) eines Teilchens sowohl räumlich als auch zeitlich ein zufälliger Prozeß.

Ein in der Natur sehr häufig auftretender Zufallsprozeß ist der POISSON-Prozeß, er führt zu dem oben angegebenen exponentiellen Zerfall. Aufeinanderfolgende Prozesse sind zeitlich unabhängig, besitzen also kein Gedächtnis über die Vergangenheit. Der maßgebliche Parameter zur Prozeßcharakterisierung ist der Mittelwert der Ereignisse, etwa die mittlere Zeit für den Zerfall eines Teilchens.

Die GAUSS-Dichte mit ihrer glockenförmigen Gestalt ist eine weitere häufig anzutreffende Wahrscheinlichkeitsdichte. Sie beschreibt sowohl die Schwankung der Körpergröße als auch die räumliche Ausbreitung von Teilchen (Diffusion).

Zur Beschreibung der Änderungen der Wahrscheinlichkeitsdichte  $P$  bei gegebener Anfangsbedingung gibt es verschiedene Typen von Transportgleichungen, so z. B. die Mastergleichung

$$\frac{d}{dt}P(x_i, t) = \sum_{j \rightarrow i} [w_{ij}P(x_j, t) - w_{ji}P(x_i, t)],$$

welche die Änderung mit den Übergangsraten  $w_{ij}$  an den diskreten Orten  $x_i$  mit Übergängen von  $j$  nach  $i$  auf einer phänomenologischen Ebene beschreibt. Die Diffusionsgleichung der Form

$$\frac{\partial}{\partial t}P(\vec{r}, t) = D \Delta P(\vec{r}, t)$$

mit dem Diffusionskoeffizienten  $D$  beschreibt hingegen die lokale Änderung zur Zeit  $t$  im mikroskopischen kontinuierlichen Raum, gekennzeichnet durch den Ortsvektor  $\vec{r}$ , auf Grund von Dichtegradienten.

Ursprünglich deterministische Gleichungen wie etwa die NEWTONschen Bewegungsgleichungen können durch Einführung einer additiven stochastischen Kraft zufällig beeinflusst werden (LANGEVIN-Gleichung), wobei diese Kraft neben den deterministischen Kräften das Teilchen vorantreibt.

Der Zufall ist auch als *Schöpfer* neuer Lebensformen tätig. Durch Mutation der Informationen in den Erbanlagen und zufällige Neuknüpfung (Paarung) können neue Formen generiert werden, die in der Auseinandersetzung mit der natürlichen Umwelt entweder im Laufe der Zeit untergehen oder weiterbestehen.

### 1.3.4 Chaos – Die Zeit außer Takt

Die uns vertrauten Naturprozesse verlaufen nach dem Prinzip: kleine Änderungen in den Ursachen bewirken kleine Änderungen in den Wirkungen. Dieses Verhalten ermöglicht eine (lineare) Extrapolation auf zukünftiges Geschehen und läßt zugleich kleine Störungen während der Entwicklung zu. Qualitative Sprünge treten dabei jedoch nicht auf. Der zeitliche Verlauf läßt sich im kontinuierlichen Fall durch eine stetige Funktion – etwa eine FOURIER-Reihe – für alle Zeiten angeben. Der Zustand eines solchen Systems ist zu jedem Zeitpunkt fest vorgeschrieben, und der benachbarte Folgezustand wird durch die Differenzierbarkeit der Beschreibungsfunktion fest bestimmt.

Längst nicht alle Prozesse verlaufen nach diesem kausalen Ähnlichkeitsprinzip. Vor allem bei starken (energetischen) Anregungen und nichtlinearen Kopplungen in komplexen Systemen kann die Synchronisation der Einzelelemente versagen, z. B. bei der Wetterentwicklung und dem plötzlichen Auftreten von Unwettern. Selbst Erdbeben – mit ihren katastrophalen Folgen – lassen sich nicht zuverlässig vorhersagen. Die Natur gerät hier außer Takt. Auch unser Bewegungsapparat – man kann ihn als ein System von Pendeln auffassen – zeigt seine Empfindlichkeit gegenüber Störungen. Instabilität ist die Folge. Wie schwierig ist es z. B. beim Stolpern, wieder in eine stabile Position zu kommen!

Markant ist hierbei, daß *kleine* Änderungen in der natürlichen Umgebung (etwa Keime in der Luft) oder in den Anfangsbedingungen (Justierung des Systems) zum gegenwärtigen Zeitpunkt *unvorhersagbares* Verhalten in der Zukunft bewirken, selbst dann, wenn die zugrundeliegenden Entwicklungsgleichungen voll bekannt und deterministisch sind – man spricht vom *deterministischen Chaos*. Selbst konservative (energieerhaltende) Systeme bilden hier keine Ausnahme. Kleine Ursachen können große Wirkungen hervorrufen – so als ob Sie einen Elefanten mit einer Nadel bändigen wollten. Dieses sensitive

Verhalten ist für das Chaos im allgemeinen charakteristisch – eine Prognose ist auf lange Sicht unmöglich, ähnlich dem Zufall. Auch mit einem „beliebig genau“ rechnenden Computer würde der prognostizierte Zustand durch die (meßtechnisch) fehlerhafte Kenntnis der Anfangsbedingungen nicht mit den beobachteten Daten übereinstimmen.

Chaos bedeutet aber im allgemeinen nicht ein Fehlen von Gesetzmäßigkeiten. Auch wenn in einem mittelfristigen Zeitraum keine Aussage über das Systemverhalten getroffen werden kann, so bildet sich oft für dissipative (energetische Verschleiß-)Prozesse über große Zeiträume ein feststehendes Bild in Form von *seltsamen Attraktoren* im Phasenraum (Orts-Impuls-Darstellung) heraus, mit einer zumeist *fraktalen* Struktur (s. Heft 1 dieser Reihe). Chaos erlangt somit wieder eine Form von Berechenbarkeit, jedoch nicht im gewohnten Sinne. Eine solche Betrachtung von Chaos wird heute durch Bestrebungen der Chaos-Steuerung unterstützt. Die Beherrschung von Chaos mit den gewöhnlichen linearen Reglern wäre hingegen eine kaum lösbare Aufgabe.

## 1.4 Evolution und das Leben im Nichtgleichgewicht

### 1.4.1 Die Syntropie als Bewertungsmaß nachhaltiger Prozesse

Nach STEPHEN W. HAWKING [11] wurde (und wird noch) die Welt nach dem Urknall bei anhaltender Ausdehnung klumpig – mit regionalen Materieinseln unterschiedlicher Dichte. Sollte jedoch ein kosmischer Kollaps eintreten, d. h., käme der Kosmos in einen völlig ungeordneten Zustand, dann gäbe es keinen ausgeprägten thermodynamischen Zeitpfeil mehr. Dieser ist aber die notwendige Voraussetzung des Lebens (da Nahrung Energie in geordneter Form ist). Die Quintessenz ist, daß alles Geschehen zusammenhängt: Es spielt keine Rolle, ob es die Physik, die Biologie oder unser menschliches Tun betrifft. Alles folgt dem Zeitpfeil.

Daher erhob sicher RIFKIN die Entropie im entropischen Weltbild in den Rang eines weltbildtragenden Begriffes [12]. Aber schon der Physiker ERWIN SCHRÖDINGER verwahrte sich gegen die „Tyrannei“ des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik; denn ein Organismus ernährt sich von negativer Entropie.

Der Biologe RUPPERT RIEDEL hat versucht, den Evolutionsprozeß mit dem Begriff „Negentropie“ als Maß für die Ordnung in Verbindung zu bringen [13]. In den Sozialwissenschaften wird sogar der Begriff *Syntropie* als Synonym für

Negentropie benutzt. Für sie besteht der Vorteil einer syntropischen Beschreibung darin, daß die Syntropie auch Zustände höherer Ordnung von Material bezeichnen kann. Zudem sind die materialen Bestandteile eines Systems „in einer Insel positiver Syntropie nicht ununterscheidbar vermischt, sondern ordentlich getrennt, daher leicht identifizierbar und auch für den ökonomischen Prozeß zu erschließen“ [14] (s. auch [15]).

H.-P. DÜRR hat sich ebenfalls aufgrund des Negativimages, der dem Terminus „Negentropie“ anhaftet, für das Synonym „Syntropie“ entschieden, wenn er Strukturbildungs- und -abbauprozesse der Ökonomik im ökologischen Kontext beschreibt [16]. In der Wirtschaft kommt beim Produktionsprozeß „Wertschöpfung“, „Wertsteigerung“, eine Erhöhung der Ordnungsstruktur des Endprodukts – im Sinne einer höheren Differenziertheit – heraus. So wird ein Auto aus Rohstoffen, Halbfabrikaten und Einfachsystemen funktionsgerecht zu einer komplexeren Einheit zusammengefügt. Diese Ordnungsqualität besitzt dabei eine gewisse Verwandtschaft mit dem physikalischen Begriff der Syntropie oder negativen Entropie. Die Syntropie bleibt bekanntermaßen in offenen Systemen nicht erhalten. Hingegen nimmt die Unordnung entsprechend dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik im abgeschlossenen System – z. B. im Arbeitszimmer – ständig zu und deshalb die Syntropie als Maß der Ordnung immer ab. Daher ist in diesem Sinne jeglicher „Wertschöpfungsprozeß“ notwendig mit einem „Wertzerstörungsprozeß“ verbunden, der ihn überkompensiert. Das gilt auch für die technischen Prozesse. Man nimmt allerdings den Wertschöpfungsprozeß meist nicht wahr oder hält ihn für unwesentlich. Der zugehörige Syntropieverbrauch verwandelt dabei hochgeordnete Energie, z. B. mechanische oder chemische Energie, in niedergeordnete Wärmeenergie. So hat ein DNS-Kettenmolekül eine höhere Ordnungsstruktur, eine höhere Differenziertheit, als ein Einkristall. DÜRR wendet den Syntropiebegriff sogar zur Beschreibung eines Gedichts an. Ein Gedicht ist demnach als hochgeordnet einzustufen – ein interessantes und plausibles Ergebnis.

Die syntropische Beschreibung eignet sich insbesondere zur Darstellung ökologischer Zusammenhänge. In diesem syntropischen Bild wird der irdische Evolutionsprozeß zu immer höheren Lebensformen durch die ständige Syntropiezufuhr der Sonne beschrieben. Syntropiespeicher, natürliche (z. B. Kohle) und künstliche (z. B. H-Fusion), Syntropieverbrauch und Syntropiebilanzen sollten prägend für die zu leistende Syntropieforschung zur Erstellung nachhaltiger Wirtschaftsmodelle sein.

Eine Syntropieforschung hat es in der Medizin schon in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts gegeben. So haben M. V. PFAUNDLER und L. V. SEHT erstmals den Begriff Syntropie in der Medizin geprägt. Danach

charakterisiert Syntropie den Sachverhalt, daß „sich z. B. bestimmte Krankheiten in einer überzufällige Häufigkeit mit anderen Krankheiten kombinieren“ ([17], S. 2). Sie unterschieden „echte“ von „Schein-Syntropie“ und gaben schon 1921 brauchbare und einfache Formeln zur quantitativen Darstellung syntropischer Verhältnisse an, so z. B. den Syntropieindex

$$S = \frac{N(AB) N}{N(A) N(B)}$$

mit Krankheitszuständen  $A$ ,  $B$  und Anzahl der Fälle  $N$  (gesamt),  $N(A)$  an  $A$  erkrankt,  $N(B)$  an  $B$  erkrankt und  $N(AB)$  an  $A$  und  $B$  erkrankt ([17], S. 7).

### 1.4.2 Die Versklavung – Das synergetische Prinzip

Eine Erweiterung und Spezifizierung einer Ganzheitskonzeption ist die von H. HAKEN begründete Lehre vom Zusammenwirken, die *Synergetik* [18]. Es gibt Systeme, die sich nicht im thermischen Gleichgewicht befinden und die die Fähigkeit besitzen, aus sich selbst heraus Strukturen zu entwickeln, d. h. durch Selbstorganisation Ordnung hervorbringen. Wie ist es auch anders zu verstehen, daß sich in der unbelebten Natur aus Chaos – nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik bewegen sich alle Vorgänge in der Richtung zu größerer Unordnung, zum Chaos – hochorganisierte Strukturen bilden?

Die Physik kennt schon lange eine Art der Strukturbildung, nämlich die Kristallbildung. Wenn Wasser abkühlt, bilden sich Eiskristalle. Bei Lebewesen werden die Strukturen durch ständige Energie- und Materialzufuhr (Nahrung) aufrechterhalten. Gibt es eine Entsprechung in der unbelebten Natur? Ja, die spontane Bildung geordneter Strukturen aus Keimen oder sogar aus dem Chaos ist die faszinierende und zugleich alltägliche Antwort. Glücklicherweise gelingt mit dem Konzept der Ordnungsparameter und dem Versklavungsprinzip von HAKEN eine einfache Beschreibung synergetischer Strukturen. Es zeigt sich, daß unter den Ordnungsparametern einige wenige das Systemverhalten dominieren, weil die Bewegung der anderen versklavten Ordnungsparameter sich als von ihrem Zeitverhalten wesentlich abhängig erweisen. Letztlich macht auch das synergetische Prinzip eine Aussage über den Zusammenhang zwischen Struktur und Information in Systemen. Deshalb verdient die Thematik „Struktur und Information“ im vorletzten Abschnitt dieses Beitrags eine besondere Diskussion.



### 1.4.3 Struktur und Information

Viele natürlich gewachsene (Nichtgleichgewichts-)Strukturen zeichnen sich durch Formenreichtum, Komplexität und Detailinformation aus. Hierzu zählen zum Beispiel die durch Aggregation entstandenen Wachstumsformen. Heute versucht man diese natürlichen Strukturen auch durch physikalische Beschreibung (diffusive Ablagerungen) und mathematische Algorithmen (zelluläre Automaten) zu erfassen. Dabei sei auch auf das erste Heft dieser Reihe verwiesen. Nicht zuletzt beweist das Titelbild dieses Heftes, wie ähnlich die durch Computerberechnung erzeugte Myzelstruktur dem biologischen Vorbild sein kann.

Es besteht die Frage, wie sich solche Strukturen durch Zahlen charakterisieren lassen, sei es zur Klassifizierung oder zum Vergleich mit anderen Strukturen. Zur Bewertung der intrinsischen Eigenschaften bieten sich verschiedene Methoden an. So geben Dimensionen wie die Fraktaldimensionen einen ersten Überblick nicht nur zur räumlichen Gestalt (HAUSDORFF-Dimension:  $D_0$ ), sondern auch zur zeitlichen Prozeßstruktur (z. B. Wanderungsdimension, LYAPUNOV-Exponenten).

Die Informationsdimension

$$D_1 = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{H(r)}{\log_2 r}$$

mit der SHANNONSchen Informationsentropie

$$H(r) = - \sum_{i=0}^{n(r)} p_i \log_2 p_i$$

gibt zusätzliche Aussagen zur Individualität des Objektes, indem sie die Belegungswahrscheinlichkeit  $p_i$  bzw. die Dichte an den einzelnen Raumpunkten  $i$  erfaßt. Den Zahlenwert  $D_1$  erhält man im Grenzfall einer unendlich feinen (äquidistanten) Zerlegung ( $r \rightarrow 0$ ) der  $n(r)$  Raumzellen.

Die RÉNYI-Dimension

$$D_q = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I_q}{\log_2 r} \quad \text{mit} \quad I_q = \frac{1}{1-q} \log_2 \sum_{i=1}^{n(r)} p_i^q$$

als RÉNYI-Information der Ordnung  $q$  [19] stellt eine Verallgemeinerung der letztgenannten Dimensionen ( $q = 0, q \rightarrow 1$ ) dar und gibt zusätzliche Charakteristika für einen von  $-\infty$  bis  $\infty$  reichenden Parameterbereich (Parameter  $q$ ). Im Fall  $q = 2$  erhält man zudem die Korrelationsdimension.

Selbst die obige Einschränkung der Einskalgigkeit kann durch die allgemeinere Multifraktalkonzeption [20] aufgehoben werden. Hierzu führt man die Partitionsfunktion  $\Gamma(q)$  ein mit

$$\Gamma(q) = \sum_i \frac{p_i^q}{l_i^{\tau(q)}} = \text{const.},$$

wodurch  $\tau(q)$  bestimmt wird. Bei konstanten  $l_i$  erhält man die Identität  $\tau(q) = (q-1) D_q$ , ansonsten wird durch die letztgenannte Beziehung  $D_q$  neu definiert.

Die Größe  $D_q$  ist somit eine charakteristische Funktion für die zu untersuchende Struktur. Sie reicht von der Konstanz bei einfachen Fraktalen (z. B. der uniformen CANTOR-Menge mit  $D_q = \ln 2 / \ln 3$ ) bis hin zu einer mehr oder weniger monoton fallenden Funktion bei komplexeren Strukturen wie etwa dem Titelbild. Selbst Strukturen des Chaos lassen sich heute auf obige Weise mit diesen Dimensionen im Phasenraum messen und voneinander unterscheiden. Chaos enthüllt so nach und nach den Schleier!

Auch wenn dieses Herangehen durch Dimensionsbetrachtungen sicher nicht eindeutig ist – man kann immer Gegenbeispiele konstruieren, die dasselbe Wertespektrum besitzen und sich trotzdem visuell voneinander unterscheiden –, so erhält man gegenüber der klassischen Informationsbetrachtung einen sehr umfangreichen Merkmalskatalog von Eigenschaften sowohl zeitlicher als auch räumlicher Strukturen.

Die untersuchten dissipativen Strukturen entstehen fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht als besondere Ordnungsstrukturen unter lokal verschiedenen Zustandsbedingungen für Temperatur, Druck, Konzentration usw. Die obigen Belegungswahrscheinlichkeiten  $p_i$  werden durch die physikalischen Transportprozesse beschrieben und sind somit von den herrschenden Umweltbedingungen abhängig. In dieser Weise geben die Dimensionen auch Auskunft über die zurückliegenden Entwicklungsbedingungen und ihre Geschichte. Sie könnten in Zukunft möglicherweise als Beurteilungskriterium (ähnlich den Jahresringen bei Bäumen) herangezogen werden und ein Maß für die *Syntropie* darstellen.

Information bezieht sich hier im Zusammenhang mit der Theorie offener Systeme fern vom Gleichgewicht auf die räumlich-zeitliche Struktur. Sie unterscheidet sich als objektive Größe vom subjektiven Wissen, das jemand über ein bestimmtes System besitzt. Insofern ist es durchaus von Belang, ob sich das subjektive Wissen (potentielle Information) im Prozeß der Objektivierung – Gewinnung aktueller Information – bewährt. Daher sollten Vorkenntnisse über die raum-zeitliche Strukturierung des Systems vorhanden sein. [21]

### 1.4.4 Das räumlich-zeitliche Zusammenwirken

Prozesse sind zumeist über verschiedene – häufig benachbarte – Strukturen miteinander gekoppelt. So beschreibt die Reaktions-Diffusions-Gleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} c_i(\vec{r}, t) = f_i(c_1, \dots, c_n) + D \Delta c_i(\vec{r}, t)$$

die Änderung der Konzentration  $c_i(\vec{r}, t)$  an verschiedenen Teilen des Raumes, wobei die Umwandlung lokal erfolgt und ein Stofftransport durch Diffusion in andere Bereiche möglich ist. Dort kann der Stoff mit anderen Partner weiter reagieren, so daß dann an den einzelnen Orten sehr unterschiedliche Konzentrationen auftreten. Sogar die Bildung räumlicher Wellenstrukturen ist möglich.

Zwar finden wir raum-zeitliche Strukturen vom größten Maßstab, dem Universum, bis hin zum allerkleinsten Maßstab, den Elementarteilchen. Am vertrautesten sind uns geordneten Strukturen im Zwischenbereich in Form von Wellen oder Wirbeln (Wettergeschehen, Kristalle, gefaltete Sedimentschichten).

Eine paradigmatische Aufmerksamkeit im Rahmen der nichtlinearen Dynamik wird der RAYLEIGH-BÉNARD-Konvektion geschenkt, weil sie als einfaches physikalisches System entfernte Gemeinsamkeiten mit Lebensphänomenen besitzt. Es läßt sich mit Hilfe der physikalischen Grundgleichungen (Bewegungsgleichung, Wärmetransportgleichung, Kontinuitätsgleichung, Zustandsgleichung, Randbedingung) zeigen, daß selbst für einen völlig homogenen Anfangszustand bei bestimmten RAYLEIGH-Zahlen hexagonale Konvektionszellen entstehen, die auch sichtbar gemacht werden können (Bienenwabenstruktur). Dieses Konvektionsphänomen kann sogar ab initio berechnet werden. Entscheidend für die Ausbildung der räumlichen Struktur sind die Nichtlinearitäten. Sie sind enthalten in der Bewegungsgleichung und in der Wärmetransportgleichung als Term  $v \nabla v$  oder  $v \nabla T$  ( $v$ : Geschwindigkeit,  $T$ : Temperatur). Die Struktur wird durch den das System durchströmenden Energiefluß aufrechterhalten (Wärmestrom). Das System erhöht lokal seine Ordnung auf Kosten einer Entropiezunahme der Umgebung (Syntropieverbrauch).

Dabei zeigt das System Anpassungsmechanismen, indem es sich der Geometrie der zeitlichen Ränder anpaßt. Anstelle der Hexagone können in runden Schalen kreisförmige Rollen oder in Rechteckgefäßen parallele Rollen entstehen. Zudem reagiert es auf Störungen mit einer Art „Heilungsprozeß“. Das System bricht nicht zusammen, es zeigt sogar „Kreativität“ und „Individualität“. Eine langsame Erhöhung der RAYLEIGH-Zahl (z. B. durch Intensivierung der Sonnenstrahlung) läßt komplexere Formen entstehen, die bei jedem Versuch anders ausfallen können. Die abrupten Strukturveränderungen (z. B.

Übergänge von Rollen zu Hexagonen) sind Phasenübergänge, die entfernte Ähnlichkeiten mit biomorphologischen Entwicklungsschritten erkennen lassen.

Auf diese geschilderte Weise kann sich eine komplexe Struktur, also Ordnung, gegen den Zerfall durchsetzen und stabilisieren. Sobald aber der Energiefluß aufhört, löst sich die Struktur auf, stirbt das System. Insofern können raum-zeitliche Strukturentwicklungen und Systemgeschichte simuliert, rekonstruiert und vielleicht auch berechnet werden, z. B. in der Syntropieforschung.

## 1.5 Nachhaltige Technologien

In diesem Beitrag wurde der Skalenumfang vor allem zeitlicher Prozesse dargestellt. Komplexität und nichtlineare Kopplungen der Strukturelemente zeigen ein breitbandiges Verhaltensspektrum, das von Periodizität bei kleinen Anregungen bis hin zum Chaos – als Versagen des synchronen Verhaltens – bei starker Nichtlinearität reichen kann.

Andererseits verlangt die Technik ein hohes Maß an Sicherheit und das Vermeiden von „Gefahrenzonen“. Sie sind aber zu berücksichtigen, da durch Störungen starke Abweichungen vom gewünschten Bereich auftreten können. Dieses Verlangen nach höchster Sicherheit engt den eigentlich zur Verfügung stehenden Spielraum ein und steckt die technologischen Grenzen ab. Die menschliche Fremdorganisation (Überwachungsfunktion) bringt zusätzliche Risiken mit sich. [22]

Die Natur hat auf ihrem Entwicklungsweg gezeigt, wie dieses Problem zu meistern ist. So bieten schon heute neuronale Netze mit ihrer Lernfähigkeit eine Möglichkeit, selbst im Chaos Regelungsstrategien zu finden. Auch andere der Natur entlehnte Mechanismen, z. B. Mutation, Selektion, (Auto-)Katalyse, und damit die Fähigkeit zur Selbstorganisation werden in Zukunft ihre technologische Anwendbarkeit zeigen. Sie lassen neue Möglichkeiten für eine optimale Nutzung der Ressourcen etwa in der chemischen Technologie zu, die dann aber fernab vom Gleichgewicht liegen – in einem Bereich, in dem die Natur erfolgreich „arbeitet“ und im Laufe der Zeit faszinierende Strukturen hervorbrachte und -bringt. Eine solche natürliche Technologie könnte man dann auch als *nachhaltige Technologie* bezeichnen. Sie würde die Möglichkeiten der einstmals „gefährlichen“ und somit gemiedenen Bereiche auf natürliche Weise nutzen und ein neues Maß an Sicherheit bringen. Wer die Natürlichkeit der Technik fordert, sollte eine nachhaltige Technologieentwicklung unterstützen!

Nachhaltige Technologie heißt auch, die natürlichen Syntropiequellen wie Sonnen- und Gezeitenzyklus (Tag/Nacht bzw. Ebbe/Flut) für die Energieversorgung „synvoll“ zu nutzen. Natürliche Gradienten, wie sie im Schwerfeld

vorherrschend, könnten verstärkt für Sedimentationsprozesse, Temperaturgradienten durch Wärmekopplungen aber auch zur gezielten Strukturierung genutzt werden. Das Reservoir an nichtlinearen Gestaltungspotentialen kann mit Hilfe der menschlichen Vernunft und der Informationsgewinnung nicht nur zur Schöpfung neuer Güter, sondern auch zur Regeneration der geschädigten Umwelt herangezogen werden.

Der Einsatz dieser Methoden aus dem Reich der Nichtlinearität ermöglicht, die Natur zu schonen, ohne auf Wohlstand zu verzichten. Es gilt auch hier der Spruch von C. F. v. WEIZSÄCKER: Soweit unsere Vernunft ausreicht, kann die Technik gesteuert werden. Die Technik kann aber kein Versagen der Vernunft ausgleichen.

## Literaturverzeichnis

- [1] WCED (Weltkommission für Umwelt und Entwicklung): *Unsere gemeinsame Zukunft* / Hauff, Volker (Hrsg.). – („Brundtland-Bericht“). Greven : Eggenkamp, 1987
- [2] Grossmann, W. D.: *Nachhaltige Wirtschaftsweise und physische Ökonomie*. In: Busch-Lüty, C.; Dürr, H.-P.; Langer, H. (Hrsg.): *Die Zukunft der Ökonomie : Nachhaltiges Wirtschaften*. Sonderheft 1 der Zeitschrift *Politische Ökologie*, München, 1990. – S. 28-29
- [3] Voss, Gerhard (Hrsg.): *Sustainable Development : Leitziel auf dem Weg in das 21. Jahrhundert* / hrsg. vom Institut der Deutschen Wirtschaft Köln. – (Kölner Texte & Thesen ; 17). Köln : div, Dt. Instituts-Verlag, 1994. – S. 9
- [4] WWF (World Wide Fund for Nature): *Sustainable use of natural resources : concepts, issues, and criteria*. Gland (Schweiz) : WWF International, 1993. – S. 227
- [5] *Neuorientierungen in der ökonomischen Theorie. Zur moralischen, institutionellen und evolutorischen Dimension des Wirtschaftens* / hrsg. von E. K. Seifert und B. P. Priddat. Marburg: Metropolis-Verlag, 1995. – S. 324
- [6] Hennig, R.: *Nachhaltigkeitsprinzip, Organismusidee und Organik als Beiträge der Fortstwirtschaft zur Philosophie*. In: *Philosophia Naturalis* 23(1986)1, S. 123
- [7] Faber, M.; Niemes, H.; Stephan, G.: *Entropy, Environment and Resources*, Heidelberg: Springer, 1995.

- Faber, M.; Niemes, H.; Stephan, G.: *Entropie, Umweltschutz und Rohstoffverbrauch*. – (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems). Heidelberg: Springer, 1983. – S. 16
- [8] Pelizon, P.: *Theorie der erschöpfbaren Ressourcen*. Wien: Service-Fachverlag, 1993. – S. 66ff.
- [9] Smirnow, W. I.: *Lehrbuch der Höheren Mathematik*, Teil IV, Abschnitt II: Variationsrechnung. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1982
- [10] Vornholz, G.: *Zur Konzeption einer ökologisch tragfähigen Entwicklung*. Marburg: Metropolis-Verlag, 1993. – S. 115
- [11] Hawking, S. W.: *Eine kurze Geschichte der Zeit*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 1988. – S. 22f.
- [12] Rifkin, J.: *Entropie. Ein neues Weltbild*. Hamburg: Ullstein, 1985
- [13] Riedel, R.: *Energie, Information und Negentropie in der Biosphäre*. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* (Stuttgart) 26(1973) Heft 10
- [14] Altvater, E.: *Der Preis des Wohlstands*. Münster: Verlag Westfälisches Dampfboot, 1991. – S. 34
- [15] Beckenbach, F. (Hrsg.): *Zwischen Entropie und Selbstorganisation*. – (Ökologie und Wirtschaftsforschung, Band 9). Marburg: Metropolis-Verlag, 1994
- [16] Dürr, H.-P.: *Die Zukunft ist ein unbetretener Pfad*. Freiburg i. Br.: Herder, 1995. – S. 68
- [17] Hutter, M.: *Über Syntropie und Dystropie von Krankheiten*. Frankfurt am Main: Dipa, 1981
- [18] Haken, H.: *Synergetik – Eine Einführung*. 3. Aufl. Berlin: Springer, 1990
- [19] Rényi, A.: *Einführung in die Informationstheorie*. In: Rényi, A.: *Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1979
- [20] Leven, R. W.; Koch, B.-P.; Pompe, B.: *Chaos in dissipativen Systemen*. Berlin: Akademie-Verlag, 1989. – S. 79ff.
- [21] Binswanger, M.: *Information und Entropie*. Frankfurt am Main: Campus, 1992
- [22] Kuhlmann, A.: *Überfordert uns die Technik?* Leipzig: Fachbuchverlag, 1992