

Gert Blumenthal

## Die Sonne und GAIA<sup>1</sup>

### Inhalt

1.	Einführung .....	2
2.	Komplexe Systeme – die ökologische Sicht .....	2
2.1	Merkmale komplexer Systeme .....	2
2.1.1	Vielfalt .....	3
2.1.2	Wechselwirkungen .....	4
	Emergenz .....	5
	Ursache und Wirkung .....	7
	Komplexität und Entropie .....	8
2.1.3	Integration .....	9
2.2	Die systemische Ökologie .....	10
3.	Sonne und Erde .....	11
3.1	Das solare Potential .....	12
3.2	Irdische Wirkungen der Sonne .....	13
3.2.1	Strukturbildung .....	13
	Sonne und Chemie .....	13
	Phase I: Oberflächentemperatur $\geq 1500$ °C bis 300 °C .....	13
	Phase II: Oberflächentemperatur 300 °C bis 150 °C .....	15
	Phase III: Oberflächentemperatur 150 °C bis $< 100$ °C .....	15
	Phase IV: Die Membran .....	17
	Das Leben .....	18
	Die Photosynthese .....	20
	Die Stickstofffixierung .....	23
3.2.2	Verwitterung .....	24
	Auswirkungen der Verwitterung .....	24
	Aspekte der Verwitterung .....	25
	Bodenbildung .....	26
	Chemie und Verwitterung .....	26

---

1   Erweiterte und aktualisierte Fassung eines auf der 3. Leibniz-Konferenz „Solarzeitalter 2006“, Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e.V. (LIFIS), Lichtenwalde, 11.-13. Mai 2006, gehaltenen Vortrages.  
Für Hinweise und Kritiken dankt der Autor den Herren Prof. Dr. Detlev Möller, Dr. Lothar Müller, Eberhard Oettel, Prof. Dr. Gerhard Öhlmann, Prof. Dr. Dieter Schleinitz, Dr. sc. nat. Dietrich Spänkuch, Dr. Peter Starke und Prof. Dr. Klaus Steinitz.

4.	Ökologische Wechselwirkungen	27
4.1	Ökologische Überraschungen	27
4.2	Grenzen	29
4.3	Anthropogene Entropie	30
4.3.1	Allgemeines	30
4.3.2	Verletzungen der Erdkruste	31
4.3.3	Sonne und Mensch	31
4.3.4	Der anthropogene Energiestrom	32
4.3.5	Die Technik des Ökozeitalters	32
5.	Gegenwartsaufgaben	33
	Literatur	35

## 1. Einführung

GAIA – die göttliche Urmutter Erde der griechischen Mythologie – nannte James Lovelock die in ständiger Selbstorganisation befindliche Ökosphäre [1]. Fasziniert von GAIA, unterschätzte er wohl etwas, daß diese nicht leben kann ohne  $RE^2$ , denn noch im 1. Jh. n.Chr. wußte man: „Omnium causa sol“ [2], und Friedrich Engels notierte: „Alle Energie, die jetzt auf der Erde tätig, verwandelte Sonnenwärme“ [3]. In diesem Sinne will der vorliegende Text ergänzen. Weiterhin sollen die vor drei Jahren erschienenen Thesen „Zur ökologischen Transformation“ [4] – seinerzeit mehrheitlich zustimmend aufgenommen – hier tiefer und umfassender begründet werden.

Will man das Wesen der solarogenen Wirkungen auf den Erdball verstehen, kann das nur auf der Grundlage der komplexen Systeme geschehen. Man erkennt dabei, daß die Komplexität der Geosphäre<sup>3</sup> zunächst anwächst – vom Hadäum (Präbiotik) über die Evolution der Biosphäre bis hin zur Noosphäre<sup>4</sup>, um in etwa 2–3 Milliarden Jahren wieder abzunehmen mit dem Aussterben irdischen Lebens. Das ist darum zu erwarten, weil der geologische  $CO_2$ -Kreislauf allmählich zum Erliegen kommt. Dadurch geht die Konzentration des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids zurück, denn  $CO_2$  wird einerseits durch den nachlassenden Vulkanismus immer weniger exhaliiert, andererseits aber infolge des Temperaturanstiegs zunehmend in der Lithosphäre als Calciumcarbonat gebunden [5].

## 2. Komplexe Systeme – die ökologische Sicht

### 2.1 Merkmale komplexer Systeme

Es ist noch immer schwierig, „Komplexität“ (lat. Verflochtenheit) zu definieren. Werner Ebeling et al. formulieren: „Als komplex bezeichnen wir (aus vielen Teilen zusammengesetzte) ganzheitliche Strukturen, die durch viele (hierarchisch geordnete) Relationen bzw. Operationen verknüpft sind... Die Komplexität einer Struktur spiegelt sich in der Anzahl der gleichen bzw. verschiedenen Elemente, in der Anzahl der gleichen bzw. verschiedenen Relationen und Operationen sowie in der Anzahl der Hierarchie-Ebenen wider. Im strengeren Sinne liegt Komplexität dann vor,

- 
- 2 Altägyptischer Sonnengott (auch RA geschrieben), verehrt als Schöpfer und Erhalter allen Lebens.
  - 3 Geosphäre (Erdhülle): Die zum Erdmittelpunkt konzentrische Hohlkugel, die Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre einschließt.
  - 4 Entwicklungsstufe der Evolution, die Sphäre der menschlichen Vernunft. Geprägt von Marie-Joseph Pierre Teilhard de Chardin und Wladimir Iwanowitsch Wernadski.

wenn die Anzahl der Ebenen sehr groß (unendlich) ist... Wir halten den Begriff der Emergenz für so zentral, daß wir die Forderung „Entstehung emergenter Eigenschaften“ mit in die Begriffsbildung für „komplexe Strukturen“ aufnehmen möchten.“ [6]

Jean-Marie Lehn, „Erfinder“ der Supramolekularen Chemie, Chemienobelpreisträger 1987, komprimiert seine Beschreibung komplexer Systeme zu der folgenden Gleichung [7]:

$$\text{Complexity} = (\text{Multiplicity}) (\text{Interaction}) (\text{Integration}).$$

Diese Formel betont die grundlegenden Charakteristika komplexer Systeme und, durch die Multiplikationszeichen, die in derartigen Systemen herrschenden sensiblen Wechselwirkungen, durch die das Ganze mehr wird als die Summe seiner Teile und die kollektiven Eigenschaften dieses Ganzen entstehen.

Die folgende Einführung wird nach dieser Gleichung gegliedert.

### 2.1.1 Vielfalt

Unter „Vielfalt“ ist nicht die Vielfalt des Uniformen zu verstehen. Ein Gas ist nicht komplex, obwohl die Anzahl der Teilchen in einem makroskopischen Gasvolumen in der Größenordnung  $10^{23}$  liegt.

Ein komplexes System muß vielfältig in seiner Variabilität sein, vor allem in den Arten von Wechselwirkung. Vielfalt – das ist also nicht vorrangig die Reichhaltigkeit der Objekte, sondern vielmehr die der Beziehungen zwischen diesen.

Ein Beispiel möge die Mächtigkeit dieses Unterschieds verdeutlichen [8]: Zu bestimmen sei die Anzahl  $N$  der Möglichkeiten, zwischen  $p$  *unterschiedlichen* Punkten eine Anzahl von 0, 1, 2, 3, ...  $n$  Verbindungslinien einzuzichnen derart, daß je zwei Punkte durch eine Linie verbunden sind. Dabei sei  $n$  die Maximalzahl an Linien für eine gegebene Punktzahl  $p$ , dadurch bestimmt, daß jeder Punkt mit jedem anderen Punkt der Menge verbunden ist. Für drei Punkte ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$n_0 =$ null Verbindungslinien	1 Möglichkeit
$n_1 =$ eine Verbindungslinie	3 Möglichkeiten
$n_2 =$ zwei Verbindungslinien	3 Möglichkeiten
$n_3 = n =$ drei Verbindungslinien	1 Möglichkeit.

Die Summe der Möglichkeiten für drei Punkte ist demnach  $N = 8$ . Für vier Punkte ergeben sich 64, für fünf 1.024 und für sechs Punkte 32.768 Möglichkeiten<sup>5</sup>. Schon bei 24 Punkten (hierfür beträgt die Maximalzahl der Verbindungslinien  $n = 276$ ) ist die Summe der Möglichkeiten  $N = 10^{83}$  – die Größenordnung der Anzahl der Atome im Weltall. Diese wird angenommen zu  $10^{90}$  [9].

Die Anzahl der Galaxien im Universum wird gegenwärtig auf  $10^{11}$  geschätzt, die Anzahl der Sterne in einer durchschnittlichen Galaxie ebenfalls auf  $10^{11}$ , und von derselben Größenordnung ist die Anzahl der Neuronen im menschlichen Gehirn. „Die meisten Neurone im Säugerhirn sind mit Zehntausenden bis zu 150.000 Synapsen besetzt, und jedes Neuron verteilt seine Erregung über seine präsynaptischen Endigungen auf Hunderte Neuronen“. Das Synapsennetzwerk enthält

---

5 Allgemein ergibt sich:  $N = 2^n$ .

etwa  $10^{15}$  Synapsen – Grundlage für eine praktisch unendliche Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten [10].

Tatsächlich aber geht ein katastrophales Artensterben vor sich. Nach der Weltnaturschutz-Union (IUCN), Mai 2006, sind von den in der Roten Liste erfaßten 40.000 Tier- und Pflanzenarten 16.000 Arten vom Aussterben bedroht, darunter Eisbären, Nilpferde und Süßwasserfische. Damit stieg die Anzahl der bedrohten Arten in den letzten zwei Jahren um 500 – das Tempo der Artengefährdung nimmt zu [11]. Es ist das schnellste Artensterben, das auf dem Globus je stattgefunden hat, und es ist das erste in Anwesenheit des Menschen. Die Folgeschwere dieser sechsten Extinktion wird meist unterbewertet, weil sie für die Allgemeinheit nahezu unmerklich, nur von Fachleuten beobachtbar, vor sich geht und weil auf Grund der Reichhaltigkeit der ökologischen Wechselwirkungen nicht vorherzusagen ist, wie es langfristig wirkt, wenn eine Art verschwindet oder plötzlich anwächst. Vielleicht ist diese durch anthropogene Einwirkungen verursachte Auslöschung überhaupt die gefährlichste ökologische Bedrohung der Gesellschaft.

Vielfalt ist als eine Ressource in der Entwicklungsgeschichte aufzufassen. Die Gesamtzahl der gegenwärtig lebenden Arten (Pflanzen und Tiere) wird auf 10 bis 14 Millionen geschätzt, wovon etwa 1,4 Millionen wissenschaftlich erfaßt sind. Biodiversität trägt auch das menschliche Dasein. Wo Formenreichtum vernichtet wird, werden Wege in die Zukunft versperrt. Diversifizierung befähigt zu Flexibilität und dadurch zu Stabilität. Bei Abbau von Vielfalt droht die Eintönigkeit.

### 2.1.2 Wechselwirkungen

Komplexe Systeme sind meist netzartig aufgebaut, und manches deutet darauf hin, daß das Netz das allgemeine und skaleninvariante Bauprinzip natürlicher Systeme ist. Es scheint, als prägte das große Netz des Universums seine Organisationsprinzipien allen anderen evolvierenden Systemen auf [12]. „Wenn es also schon gelungen ist, solche Eigenschaften des Raumes wie Inhalt, Krümmung, Verschlingung usw. mit Netzwerken und den Knoten auf ihnen zu verknüpfen, woher kommen dann die Netzwerke. Sie kommen aus dem Beziehungsgefüge der wirklich existierenden Dinge in ihrer Evolution“ [13].

Den Alten war die Vorstellung von dem allumfassenden Seinszusammenhang, dem auch sie sich selbst zugehörig fühlten, selbstverständlich. Davon zeugt unter anderem das „Netz des Indra“ – ein bezaubernd poetisches Bild der Welt, so, wie vor etwa 3.300 Jahren die Arier sie sahen: Ein Netz, jeder Knoten eine Perle, die den Glanz aller anderen Perlen widerspiegelt.

Der Knoten ist nicht wegzudenken aus der Geschichte des Menschen, weder aus seinem Alltag noch aus seinen Weltbildern, und bis heute hat der Knoten seinen Platz auch in der Mathematik [14]. Wissenschaftsgeschichtlich bemerkenswert ist, daß Lord Kelvin 1887 Atome als Wirbelknoten im Äther auffaßte [13-5]<sup>6</sup> – ein Atommodell, das heute in keinem Lehrbuch auch nur erwähnt wird.

Cyanobakterien, die Erbauer der 3,5 Millionen Jahre alten Stromatolithen, sollen schon zu dieser Zeit Netze hervorgebracht haben. Diese Netze seien kommunikativ, adaptiv und kreativ und hätten das Potential eines kollektiven Gehirns [15]. „Der weltweite Neokortex ist...eine Stufe in der fortwährenden Evolution einer vernetzten Intelligenz, die bereits seit langer Zeit existiert. Und sie beschränkt sich weder auf den Menschen, noch ist sie ein Produkt der Technologie.“ [16]

---

6 [13-5] bedeutet: [Zitatnummer 13-Seitennummer 5]

Auch die Menschen sind Knoten in Netzen und tauschen Informationen, Anregungen und Motivierungen. Mit unserem Handeln, insbesondere mittels der Technik, knüpfen wir neue Verbindungen und zerreißen bestehende, haben aber meist nur dunkle Ahnungen von dem dabei Bewirkten oder kümmern uns nicht darum.

Die Betonung der Wechselwirkung verschiebt allgemein die Bedeutung vom einzelnen „Objekt“ zu den „Zusammenhängen“. Nach Gregory Bateson sollte jedes Ding nicht durch das definiert werden, was es an sich ist, sondern durch seine Zusammenhänge mit anderen Dingen. In dieser Forderung spürt man das Werden eines neuen wissenschaftlichen Paradigmas.

Wechselwirkung in natürlichen Systemen schließt ein, daß sich in ihnen alles ständig verändert. Komplexe Systeme sind dynamisch, und all diese Veränderungen sind irreversibel. Das ist das „panta rhei“ des Heraklit. Immerwährende Bewegung ist eine existentielle Bedingung für komplexe Systeme. Wird diese Bewegung blockiert, nimmt das System Schaden. Die ewige Bewegung ist auch das Grundelement der „Autopoiese“ des Humberto Maturana. Bewegung sei das Wesen des Lebens: Ständige Selbsterschaffung durch stabile Kreisprozesse in relativ autonomen Kompartimenten [17].

Man stößt hier auf eine verblüffende Konvergenz von moderner Wissenschaft und alter östlicher Philosophie: Die Grundanschauung des Buddhismus – die ewige Kreisbewegung, die aber nie zu ihrem Ursprung zurückkehrt. Das allgegenwärtige Fließen – die Auswirkung ganzer Felder von Nichtgleichgewichtszuständen. Und wiederum erschafft das Fließen neue Nichtgleichgewichtszustände – eine ewige Dynamik, auf unserem Planeten in Gang gehalten hauptsächlich durch die Sonne.

Dabei erscheint als vorherrschende Art der Bewegung das Pulsieren. Netze pulsieren in Rhythmen auf der Zeitskala von Millisekunden bis zu Äonen, von Herzschlägen bis zur Sternenbildung. Einige dieser Rhythmen sind uns vertraut: Der Rhythmus der Sonnenfleckenhäufigkeit, des Tag- und-Nacht-Wechsels, der von Ebbe und Flut, der oszillierenden chemischen Reaktionen, des Wirtschaftswachstums (Kondratjev-Wellen), der Börsenkurse u. a. m. Uns bisher verborgene Biorhythmen fördert die Chronobiologie zutage [18]. Zu tieferen Einsichten hat die Chaosforschung verholfen, die viele derartiger Rhythmen als chaotisch erkannte, z.B. den Herzschlag, die Tropffrequenz aus einem Wasserhahn usw..

Komplexe Systeme, auch solche der Technik, weisen als ein zentrales Charakteristikum Historizität auf. Sie haben eine Geschichte – eine Phylogenese und eine Ontogenese. Es gibt für ein natürliches komplexes Systems keinen Strukturzustand, der ohne seine Vorgänger denkbar ist. Die Historizität komplexer Systeme bedeutet, daß die Zukunft nicht nur mit der unmittelbaren, sondern auch mit der ferneren Vergangenheit korreliert ist. Damit ist einerseits die „Offenheit der Zukunft“ relativiert und andererseits die politische Zweckthese vom „Ende der Geschichte“ (von dem Francis Fukuyama wohl selbst nicht mehr so recht überzeugt ist) auch wissenschaftlich widerlegt.

### *Emergenz*

Komplexe Systeme können in der Dynamik ihrer Selbstorganisation das qualitativ Neue hervorbringen – die sogenannte Emergenz. Diese Erscheinung ist in Systemen unterschiedlicher Natur und Dimension zu beobachten, z.B. in den funktionalen Zusammenhängen zwischen Häufigkeit und Größe von Lawinenabgängen und Erdbeben sowie im Verhalten der Aktienmärkte. Untersucht wird die Bedeutung der Emergenz für die Informationstheorie wie für die Ästhetik – ein Begriff also von hoher Allgemeinheit, folgend aus einem noch nicht erkannten universellen Prinzip.

Unter der Emergenz (lat. emergere: auftauchen) versteht man das erstmalige Erscheinen vorher nicht vorhandener Eigenschaften oder neuartiger Systemzustände im Verlauf der Evolution eines komplexen Systems, wobei dieses qualitativ absolut Neue sich nicht auf die Eigenschaften der beteiligten Systemelemente zurückführen läßt. Die Emergenz generierenden Mechanismen sind vielfältig. Emergenz kann auch relativ sprunghaft auftauchen, wenn sich nämlich zwei Subsysteme vereinigen – so, wie es die Symbiogenese für die Entstehung einer neuen Art postuliert [31-18].

Obwohl Emergenz das qualitativ Neue, das noch nie Dagewesene bezeichnet, kommt es doch nicht aus dem Nichts. Die Emergenz hängt in gewisser Weise auch von den vorangegangenen Daseinsweisen ab. Trotz aller typischen Momente des absolut Neuen zeigt Emergenz auch Momente der Tradierung. Die Keime der Zukunft sind in den älteren Hierarchieebenen potentiell vorgebildet. Somit widerspiegelt Emergenz das Wirken eines universellen Potentials evolutiver Kreativität, das für unseren, an den Phänomenen geschulten Verstand transzendent ist.

Wie die Komplexität allgemein, wirft speziell die Emergenz spannende Fragen auf:

Komplexe Systeme haben weit in die Vergangenheit reichende Korrelationen. Das Junge ist dem Alten stets ähnlich (Kind–Eltern). Die Evolution bringt immer wieder Selbstähnliches hervor und zeigt damit einen Zug von Fraktalität. Welche Beziehungen bestehen nun zwischen dem absolut Neuen, der Emergenz, und der fraktalen Entwicklung? Bricht Emergenz den fraktalen Fluß? Ist Emergenz die Revolution – Fraktalität die kontinuierliche, schrittweise Umbildung, die Reform?

Und: War der „Urknall“ ein emergentes Phänomen? Wenn ja, welches war dann das vorangegangene System? Wenn nein, war es ein singuläres Ereignis ohne jede Tradierung, eine Schöpfung? Stehen wir hier an einer Grenze unseres Begriffssystems?

Die folgenden Aussagen eines Evolutionsbiologen lassen ahnen, welche tiefreichende Umwälzungen unseres Weltbildes sich ankündigen:

„Meine grundlegende Annahme ist, daß die in der Natur beobachtete Kreativität keine Illusion, sondern Teil einer objektiven Realität ist, und daß sie als solche in die wissenschaftliche Beschreibung der Realität aufgenommen werden sollte. Wenn wir jedoch Wissenschaft als die Möglichkeit verstehen, auf der Grundlage des gegenwärtigen Wissens über ein System dessen künftigen Zustand und künftiges Verhalten vorherzusagen, dann widerspricht ein kreativer Prozeß den Glaubenssätzen der Wissenschaft. Schließlich bedeutet Kreation die Emergenz von etwas Neuem und Unvorhersehbarem, das sich nicht unmittelbar aus dem Gegenwärtigen herleiten läßt. Die von mir vorgeschlagene Lösung dieses Paradoxons führt zu einem neuartigem Bild der Evolution, in dem Fortschritt nicht ein Ergebnis der erfolgreichen Akkumulation von Fehlern bei der Replikation des genetischen Codes ist, sondern das eines gestalteten kreativen Prozesses. Fortschritt geschieht dann, wenn ein Organismus paradoxalen Umweltbedingungen, einander widersprechenden äußeren Bedingungen ausgesetzt ist, die ihn dazu zwingen, auf sich widersprechende Weise zu reagieren. Selbstverständlich kann dies ein Organismus nicht innerhalb seines bestehenden Rahmens leisten. Das neue Bild einer kreativen kooperativen Evolution basiert auf der kybernetischen Kapazität des Genoms und der Emergenz von Kreativität als der Lösung, die kooperative komplexe Systeme für ein existentielles Paradox finden.“ [15]

Die Auffassungen zweier Physiker widerspiegeln die Lebendigkeit der Forschung zur Dynamik komplexer Systeme:

- Peter Kafka: Ein komplexes System tendiere dazu, stets eine noch höhere Komplexität zu erreichen, damit „alles immer ein wenig besser zusammenpaßt“, das System also immer etwas stabiler, d.h. immer besser überlebensfähig wird. Das ist die Tendenz der Selbststabilisierung.

- Per Bak: Komplexität und Kritikalität seien identisch. Unvorhersehbare katastrophale Ereignisse seien komplexen Systemen immanent und darum grundsätzlich unvermeidbar [19] [20]. Das ist die Tendenz der Selbstzerstörung.

Verständlicherweise hat die Baksche Hypothese heftige Kontroversen ausgelöst. Zwei Meinungen dazu: „Es besteht einige Evidenz, daß selbstorganisierte Kritizität ein wesentliches Element von Evolutionsprozessen ist“ [6-46]. Und: „Eine Vielzahl dynamischer Systeme sind auf lange Sicht chaotisch. Wenn wir die Möglichkeit ignorieren, daß solche Erscheinungen wie globale Erwärmung, Herzschläge, Strömungen in Flüssigkeiten und andere Systeme dieses Potential haben, dann können wir vielleicht katastrophale Überraschungen erleben“ [21].

Wenn komplexe Systeme unvorhersehbar reagieren, müssen auch unikale Ereignisse mitgedacht werden, gerade, weil diese sich infolge ihrer Unberechenbarkeit dem gegenwärtigen Wissenschaftsparadigma entziehen. Die Katastrophen der fernen Vergangenheit sind nicht abgetan. Sie wirken bis in die Gegenwart und darüber hinaus.

Komplexe Systeme sind auf lange Sicht grundsätzlich nicht beherrschbar. Diese Einsicht sollte in den Rang eines Entscheidungskriteriums für die Entwicklung jeglicher Großtechnik erhoben werden. Wenn Naturwissenschaftler oder Techniker angesichts dieser systemtheoretischen Erkenntnis und trotz der seit etwa einem halben Jahrhundert erlebten nuclearen Störfälle bis Katastrophen behaupten, eine Sicherheitsgarantie für die Kernenergietechnik von mindestens 1.500 Jahren ausstellen zu können, naturgemäß bar aller diesbezüglicher Erfahrung oder gar aussagekräftiger Meßwerte, verrät das eine statische Denkweise, die den Realitäten eines komplexen Systems nicht gerecht wird.

### *Ursache und Wirkung*

Es gibt in Natur und Gesellschaft kaum eine einzelne Ursache, die, in klassischer Determiniertheit, nur eine einzige Wirkung zur Folge hat. Nebenwirkungen, Kombinationswirkungen (Synergismen), komplexe Wirkungsverzweigungen, verdeckte Synchronisationen, Rückkopplungen, lokale Fernwirkungen und verzögerte Wirkungen sind für komplexe Systeme charakteristisch. Holistische Betrachtung wirkt heuristisch und läßt fragen: Welches sind die „Geschwisterwirkungen“ der einen beobachteten Wirkung? Manche von denen können erst mit Verzögerung eintreten, so daß man den Zusammenhang nicht mehr erkennt. Jede Wirkung aber verändert das Sein, beeinflusst damit die Zukunft und verhindert Wiederholung.

Andererseits ist fast jede Wirkung in komplexen Systemen die Resultante mehrerer Ursachen, die konsekutiv oder parallel auftreten können. In vielen Fällen können derart vernetzte Ursachen zeitlich weit auseinander liegen. Es entstehen dann gleichsam aufgeladene Spannungszustände, die sich zu einem unvorhersehbaren Zeitpunkt durch einen „Trigger“ entladen können.

Auch diesbezüglich hat man sich von dem klassisch-physikalischen Denken zu lösen: Es gibt in den Netzen der Natur keine eindimensionalen Ursache-Wirkungs-Ketten, sondern nur komplexe Systeme mit ihrer letztlich kaum durchschaubaren Fülle an Wechselwirkungen.

Werden in einem komplexen System Veränderungen beobachtet, kann es u.U. äußerst schwierig sein, die dafür maßgebenden realen Zusammenhänge zu ergründen. Das ist der Fall bei fast allen inversen Problemen .

Diese durch die Komplexität der Systeme bedingte Sachlage wird zuweilen zu politischen Zwecken mißbräuchlich ausgenutzt, z. B. indem

- von sogenannten „Klimaskeptikern“ [63-85] behauptet wird, gegen den Treibhauseffekt könne man nichts unternehmen, da noch längst nicht alle Wechselwirkungen in dem komplexen System „Klima“ bekannt seien;
- versucht wird, dem Bürger weiszumachen, daß das System „Kernenergietechnik“ sicher sei und fast alle „Störfälle“ nur auf menschliches Versagen zurückgingen;
- systemkritische Kräfte verwirrt werden mit der Aussage, es gebe keine Alternative zur neoliberalen Politik.

Die disziplinübergreifende Kraft systemtheoretischen Denkens läßt sich in einer neueren Arbeit von Stiehler erkennen: „Eine gesellschaftliche Erscheinung, ein historisches Ereignis ist nie Resultat nur einer Ursache, sondern eines Komplexes bewirkender Faktoren, die ihrerseits einen Raum von Möglichkeiten bilden, innerhalb dessen Wechselwirkungen unterschiedlicher und gegensätzlicher Momente stattfinden“ [22].

### *Komplexität und Entropie*

Der Entropiebegriff hat seinen Ursprungsbereich, die Gleichgewichtsthermodynamik, längst verlassen und wird heute nicht nur in der Molekularstatistik, sondern auch in der Informationstheorie, der Chaosforschung, der Theorie komplexer Systeme, der Sprachwissenschaft, der Ästhetik und in der Ökonomie angewendet. Allein schon die Herausbildung der Entropie der statistischen Mechanik war, verglichen mit der Gleichgewichtsthermodynamik, ein Schritt von wissenschaftshistorischer Tragweite, der selten so eindrucksvoll charakterisiert worden ist wie von Max Planck 1908: „Demnach ist die Entropie proportional dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit ( $S = k \cdot \ln W$ ). Dieser Satz eröffnet den Zugang zu einer neuen, über die Hilfsmittel der gewöhnlichen Thermodynamik weit hinausreichenden Methode, die Entropie eines Systems in einem gegebenen Zustand zu berechnen. Namentlich erstreckt sich hiernach die Definition der Entropie nicht allein auf Gleichgewichtszustände, wie sie in der gewöhnlichen Thermodynamik fast ausschließlich betrachtet werden, sondern ebensowohl auch auf beliebige dynamische Zustände, und man braucht zur Berechnung der Entropie nicht mehr wie bei Clausius einen reversiblen Prozeß auszuführen, dessen Realisierung stets mehr oder weniger zweifelhaft erscheint.“ [6-35]

Die statistische Entropie wird häufig als das Maß der Unordnung bezeichnet, z.B.: „Strukturbildung, also die Herausbildung eines Ordnungszustandes, ist in diesem Sinne mit einer Verminderung der Entropie ...verbunden“ [6-16]. Obwohl eher qualitativ, ist diese Definition doch brauchbar, um das „Vorher–Nachher“ makroskopischer Abläufe zu vergleichen.

Komplexe Systeme befinden sich *zwischen* den Zuständen der extremen Ordnung (Idealkristall) und der extremen Unordnung (Gas). Es überrascht den Naturwissenschaftler schon, wenn ein Dichter bereits vor sechzig Jahren einen Schluß zog, der heutigen Erkenntnissen der Systemtheorie entstammen könnte: „Zwei Gefahren bedrohen beständig die Welt, die Ordnung und die Unordnung“ [23].

Die gerade erwähnte Beziehung zwischen Komplexität und Ordnungsgrad legt nahe, daß die Boltzmann-Entropie  $S = k \cdot \ln W$  nicht direkt als Maß der Komplexität übernommen werden kann, sondern der Entropiebegriff zu verallgemeinern ist [20-27] [6-24]. Meinte Robert Havemann derartiges, als er schrieb: „Ganz offensichtlich ist der Entropiesatz innerhalb einer noch allgemeineren Gesetzmäßigkeit der Natur – im dialektischen Sinne – aufgehoben,...“ [24]?

Wenn es zutrifft, daß der allgemeine Attraktor der Evolution die Komplexität ist, dann ist die thermodynamische Entropie in ihrer richtungsweisenden Bedeutung für komplexe Systeme zu relativieren. Das könnte sich für die Vorhersage des Ablaufs chemischer Reaktionen in derartigen Systemen als gravierend erweisen. Das heißt nicht, daß die Entropie in komplexen Systemen nicht gelte. Es existiert aber zwischen den Gesetzen des Elementaren und denen des Komplexen ein nicht triviales Verhältnis, das sich, im wesentlichen nach Ebeling [6-21], mit folgenden Grundannahmen umreißen läßt:

- Die fundamentalen Gesetze der Naturwissenschaft sind auch für komplexe Systeme gültig.
- Komplexe Systeme haben emergente Eigenschaften, was auch besagt, daß das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile. Dieses „Mehr“ resultiert aus der Struktur, der Organisation sowie vor allem aus dem Netz der Wechselwirkungen.
- Die Gesetze der Emergenz komplexer Strukturen beschreiben den einschränkenden „Gesetzeskegel“, wobei die Menge der Einschränkungen mit steigender Komplexität wächst.
- Komplexe Strukturen und deren Gesetzmäßigkeiten sind evolutiv entstanden; Historizität ist ihr zentrales Merkmal.
- Die Evolution eines komplexen Systems schreibt der Systemzeit die Richtung vor.

### 2.1.3 Integration

In dem Faktor „Integration“ kommt zunächst einmal die Ganzheit des Systems zum Ausdruck – der holistische Aspekt. Alles hängt mit allem zusammen – jedes Element beeinflusst alle anderen, wenn auch meist nur indirekt und häufig nicht offensichtlich. Man kann keinen Bestandteil des Systems entfernen oder verändern, ohne das System zu verändern. Für ein holistisches System gibt es kein „Außerhalb“.

Einer der Gründe für die Schwierigkeiten im Umgang mit komplexen Systemen besteht darin, daß ein komplexes System sich nicht verstehen läßt, indem man es in seine Einzelteile zerlegt. Die Analyse ist untauglich für die Untersuchung komplexer Systeme. Die gesamte bisherige Naturwissenschaft und deren Erfolge aber beruhen auf der Analyse. Diese hat damit eine fast unerschütterliche Autorität erworben. Ein komplexes System mit nichtkomplexen Denkweisen verstehen zu wollen, führt zu Resultaten begrenzter Aussagekraft oder sogar zu Fehlaussagen. Es scheint, daß manche aktuellen Meinungsverschiedenheiten, z. B. über das Wesen und die Aussichten der Kernenergie, auch aus Denkweisen unterschiedlichen Komplexitätsgrades herrühren.

Die universale Bedeutung komplexer Systeme zu erkennen und diese Erkenntnis auch im praktischen Handeln zur Wirkung zu bringen – das wird erschwert durch die Entwicklungsgeschichte der Physik. Unter anderem diese Geschichte hat nahezu jedem Naturwissenschaftler dessen „stillschweigende Infrastruktur“ (David Bohm) aufgeprägt mit daraus folgenden Defekten des physikalischen Weltverständnisses. Wissenschaftshistorisch stellt sich das so dar [25]: „Durch die Theorien von Isaac Newton und Galileo Galilei wurden einige wesentliche Aspekte der Wissenschaft an den Rand gedrängt, nämlich die Komplexität, die Individualität, die Historizität und die Subjektivität.“

Über die Ganzheit hinaus bezeichnet der Faktor „Integration“ auch die relativen Begrenzungen des Systems, die dessen Individualität ausmachen, die Unterschiede zu seiner Umgebung. Gemäß der Dynamik komplexer Systeme verändern sich auch die Grenzen unaufhörlich. Hier kommt die

Dialektik ins Bild: Einerseits wird die Ganzheit betont, der allseitige Zusammenhang, andererseits werden die Grenzen hervorgehoben, die Membran, die relative Autonomie der Subsysteme. Arthur Koestler sprach von der „Janusköpfigkeit“ der Evolution [26].

Nach den Gesetzen komplexer Systeme entwickelt sich die Struktur des Universums, das Netz der Galaxien von der Singularität bis in alle Zukunft, und ebenfalls nach diesen Gesetzen verlief die Selbstorganisation des Lebens im Universum. Und woran man sich zu erinnern hat: Die Evolution geht weiter – heute und ewig.

Die Wahrnehmung der komplexen Systeme wird unser Verständnis der Wirklichkeit, der Wissenschaft, der Gesellschaft und insbesondere unsere Vorstellungen von der Zukunft, hierbei auch hinsichtlich einer bedarfsgerechten dezentralen Energiebereitstellung, umwälzend verändern.

Die Theorie komplexer Systeme wird voraussichtlich einen mächtigen Impuls auch auf die Weiterentwicklung des Marxismus ausüben [27].

Die Komplexitätsforschung ist voll im Fluß, und der Begriff „Komplexität“ ist weiterhin zu präzisieren. Das historische Gewicht der Theorie komplexer Systeme läßt sich mit der folgenden Aussage treffend kennzeichnen:

„Die Welt, die wir geschaffen haben, ist das Resultat einer überholten Denkweise. Die Probleme, die sich daraus ergeben, können nicht mit der gleichen Denkweise gelöst werden, durch die sie entstanden sind.“<sup>7</sup>

## 2.2 Die systemische Ökologie

Das bisher praxiswirksamste Ergebnis systemtheoretischen Denkens ist die systemische Ökologie. Ernst Haeckel definierte 1866: „Ökologie ist die gesamte Wissenschaft von den Beziehungen des Organismus zur umgebenden Außenwelt, wohin wir im weiteren Sinne alle Existenzbedingungen rechnen können.“ Eine neuere Definition berücksichtigt systemtheoretische Termini und die Stellung des Menschen: „Ökologie ist das Studium von Struktur und Funktion der Natur. Der Mensch ist Teil dieser Natur“ [28].

Die Wissenschaft hat sich in den letzten fünfzig Jahren der ökologischen Weltsicht stufenweise angenähert. Deren Kern ist die Idee der allseitigen, universalen Vernetzung – die Idee der Ko-Evolution [29]. Deren Wesen ist die Koexistenz, die Kooperation, der Synergismus, die Symbiose – im bewußten Widerspruch zu den kapitalismus-adäquaten Begriffen „Konkurrenz“, „Kampf ums Dasein“ und „Recht des Stärkeren“. „Die Organismen und ihre Umwelt evolvieren in so enger Kopplung, daß man von einem einzigen Evolutionsprozeß sprechen muß“ [1-68]. Es wird für wahrscheinlich gehalten, daß die weitere Entwicklung des Internets zur Ausdifferenzierung eines „globalen Gehirns“ führt – die nächste Stufe der Ko-Evolution von GAIA [30].

Daß die evolutive Kooperation nicht ein Traum von Romantikern, sondern naturwissenschaftlich fundiert ist – dafür steht vor allem die inzwischen akzeptierte „Serielle Endosymbiose-Theorie“ (SET) [31]. Sie sieht in der Symbiogenese nicht einen zufälligen, sporadischen Schritt in der Entwicklung der Bakterien, sondern ein allgemeines, bisher vernachlässigtes Wirkprinzip für die Entstehung neuer Arten. Danach sind alle eukariotischen Zellen und damit letztlich alle Pflanzen und

---

7 Dieses Wort wird Albert Einstein zugeschrieben. Jedoch war dieses oder ein ähnlich formuliertes Zitat in einer Recherche (mit freundlicher Hilfe der Herren Prof. Dr. Hubert Laitko und Prof. Dr. Siegfried Grundmann, der auch die „Albert Einstein Archives, Jewish National & University Library, Jerusalem“ befragte) in Publikationen, Interviews und Briefen Einsteins bisher nicht nachzuweisen.

Tiere symbiogenetischen Ursprungs. Expressis verbis wird hier die Position eines Neo-Lamarckismus vertreten: „Symbiogenese ist entwicklungsgeschichtlicher Wandel durch die Vererbung erworbener Genausstattungen“ [31-18].

Unter dem Druck der ökologischen Krise werden zuweilen Forderungen vertreten, die auf einen Stillstand in der gesellschaftlichen Entwicklung oder gar auf ein „Zurück zur Natur“ hinauslaufen. Derartige Auffassungen sind desorientierend. Denn das Allgegenwärtige und einzig Ewige ist die Veränderung. Darum ist auch dem Titel des sonst so verdienstvollen Buches von Al Gore, „Wege zum Gleichgewicht“, nur eingeschränkt zuzustimmen. Modernes Denken vorausnehmend, formulierte Ovid in den „Metamorphosen“: „Alles wandelt sich, nichts vergeht.“

Manches spricht dafür, daß die Denkweise der Lebenswissenschaften die der bisher dominierenden der klassischen Physik verdrängen wird. Die Biologie ist dabei, zur „Leitwissenschaft“ zu werden [32]. Die Ökologie stammt aus der Biologie und erbrachte bereits grundlegende Anstöße für die weitere Entwicklung der Systemtheorie.

Die systemische Ökologie beeinflusst alle Ebenen menschlichen Daseins durch neue Fragestellungen und Forderungen, vor allem in den Spannungsverhältnissen Gesellschaft – Natur, Gesellschaft – Technik, Gesellschaft – Individuum und Mensch – Mensch. Diesen Anspruch widerspiegelt der Wertekanon der Tiefenökologie – eine grundsätzliche Kritik an dem bestehenden Gesellschaftssystem [33]:

1. Achtung der Lebensprozesse,
2. Basisdemokratie,
3. Persönliche und soziale Verantwortung,
4. Gewaltlosigkeit,
5. Dezentralisierung,
6. Lokale, gemeinschaftsgetragene Ökonomie,
7. Transpatriarchale Beziehungen,
8. Respekt der Vielfalt,
9. Globale Verantwortung,
10. Generationenbewußtsein.

„Die ökologische Bewegung kann wohl als die folgenreichste Initiative des ausgehenden 20. Jahrhunderts angesehen werden, die gleichermaßen den umweltpolitischen, wirtschaftspolitischen, gesellschaftspolitischen und kulturellen Bereich beeinflusst. Die Ökologie entfernt sich damit mehr und mehr von ihrem eigentlichen Fachbereich. Als Naturwissenschaft steht sie dieser Situation hilflos gegenüber, zumal sich die Anwendung ökologischen Wissens z.B. im gesellschaftspolitischen Kontext unter Umständen der naturwissenschaftlich begründeten Argumentation entzieht“ [34].

### **3. Sonne und Erde**

Die Sonne ist der Motor fast aller Vorgänge in der Biosphäre. Wahrscheinlich reichen die solaren Wirkungen auf unserem Globus tiefer, als wir schon wissen. Versuche, die Lebensfrage „Energie-

versorgung der Erdbevölkerung” unter Abkopplung von der Sonne – quasi geo-autark – zu lösen, entspringen einer überholten Philosophie.

### 3.1 Das solare Potential

Die Systeme der Natur und der Gesellschaft sind offene Systeme, solche also, die in ihrem Prozeß der Selbstorganisation unaufhörlich Stoff, Energie, Syntropie und Information austauschen. Insofern ist das Gleichnis vom „Raumschiff Erde” unzutreffend, denn die Erde ist nicht isoliert, nicht autark. Außerdem können wir GAIA weder steuern noch managen.

Auf der Erde wirken nur drei voneinander unabhängige und damit wirklich *primäre* Energiequellen: Die *Sonnenstrahlung*, die *Geothermie* und die *Gravitation* (einschließlich der von Sonne und Mond). Daneben existieren fünf Sekundärenergien, die überwiegend von der Sonnenstrahlung herrühren: Wind, Wasserkraft, Umgebungswärme, Meeresenergien (thermische und kinetische) und Biomasse<sup>8</sup>.

Physikalisch läßt sich das Potential der Sonnenstrahlung durch die Solarkonstante charakterisieren [35]. Sie beträgt nach neueren satellitengestützten Bestimmungen  $(1.367 \pm 0,1) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (gemessen an der Außenbegrenzung der Atmosphäre). Davon treffen die Erdoberfläche  $1.000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (Meereshöhe, unbewölkt, Sonne im Zenit). Die Vielschichtigkeit des solaren Strahlungseinflusses wird ausführlich von Möller behandelt [36].

Eine lebendigere Vorstellung von der Größenordnung dieser Energien erlauben die folgenden Abschätzungen:

„In einem Jahr verbraucht die Menschheit so viel Energie, wie in 20 min von der Sonne auf der Erde ankommt” [37].

„Das gesamte jemals vorhandene Weltvorkommen an fossilen Brennstoffen...entspricht energiemäßig nur der Sonneneinstrahlung von etwa zwei Wochen” [9-160].

„Das global insgesamt technisch nutzbare Potenzial der erneuerbaren Energien liegt aber selbst bei strengen Restriktionen in der Größenordnung des Sechsfachen des derzeitigen weltweiten Bedarfs an Endenergie” [38].

Die solaren Quellen erlauben auf Grund ihres Potentials wie ihrer Vielgestaltigkeit, eine Energieversorgung, die auch für eine noch wachsende Weltbevölkerung hinreicht, eine Energieversorgung, die zudem geeignet ist, sich in den Selbstorganisationsprozeß von GAIA einzufügen, also nachhaltig ist.

Es ist zu erwarten, daß allein schon dieser industriell-energetische Pfad in das Ökozeitalter sich für die Gesellschaft und die Wissenschaft als umwälzend erweisen wird – in einer noch tieferen Bedeutung als die bisherige wissenschaftlich-technische Revolution. Nimmt man jedoch die schon heute weltweit verbreiteten, unübersehbaren Realitäten der Solartechnik, einschließlich ihrer enormen Wachstumsraten und absehbaren Entwicklungspotentiale [39], vorurteilsfrei zur Kenntnis und billigt man den künftigen Generationen ebensoviel Kreativität zu, wie sie die Menschheit in ihrer bisherigen Geschichte bewiesen hat, müßte jeder Zweifel an der technischen

---

8 Die heutigen fossilen Kohlenstoffressourcen waren einstmals Biomasse. In der aktuellen Betrachtung jedoch sind Biomasse und fossile Kohlenstoffressourcen (Kohle, Erdöl, Erdgas, Methanhydrate) streng voneinander zu trennen.

Möglichkeit einer künftigen Vollversorgung mit ökologischen Energien als nicht wissenschaftlich begründbar verstummen.

## 3.2 Irdische Wirkungen der Sonne

### 3.2.1 Strukturbildung

#### *Sonne und Chemie*

Seit der Agglomeration des kosmischen Materials zur Protoerde läuft hier eine vielfältige Chemie ab – die sogenannte Paläochemie. In folgendem wird eine auf einfachen physikalisch-chemischen Erwägungen beruhende Einteilung des Zeitraums von der Formierung des Erdballs bis zur Entstehung des Lebens vorgestellt. Naturgemäß sind diese Betrachtungen unscharf und gehen von einer relativen Kontinuität aus, die in der Wirklichkeit sicher nicht gegeben war. Der tiefgehende Einfluß planetarer Katastrophen, wie Meteoritenimpacte, Vulkanismus, Polumkehr, Überschwemmungen und Kaltzeiten (Vereisungen), auf diese frühe Chemie ist nicht zu rekonstruieren und wird darum hier nicht betrachtet.

Die vorgeschlagenen vier Phasen können als Stadien der Selbstorganisation der Geosphäre aufgefaßt werden. Der Entropieexport erfolgt in den Weltraum. Jedes Stadium wird kontrolliert durch ein komplexes System von Bedingungen. Dabei wird das Geschehen innerhalb des selbstorganisierenden Systems nicht einfach durch das Bedingungsfeld determiniert, sondern es ko-evolviert ein einheitliches System mit höchster Wechselwirkung und großer Aktivität – das komplexe System ist kreativ.

In der gegenwärtigen Naturwissenschaft wird Systemdenken immer klarer erkennbar: „Entscheidend bleibt die Feststellung der engen Verbindung zwischen der Existenz von Biota und der Luftzusammensetzung. Die Evolution des einen Mediums ist die Geschichte der Evolution des anderen“ [36-23]. Eine übersichtliche Graphik der Entwicklungsgeschichte von der Uratmosphäre über die präbiotische Evolution bis zum Aufstieg der Landpflanzen gibt Fritsche [40].

#### *Phase I: Oberflächentemperatur $\geq 1500$ °C bis 300 °C*

Darunter soll der Zeitraum verstanden werden zwischen der überwiegend noch glutflüssigen Erdoberfläche (900 °C bis  $\approx 1500$  °C) und deren Abkühlung auf etwa 300 °C. Die für die Bildung endothermer chemischer Verbindungen erforderlichen Energiequellen waren in dieser Ära besonders vielfältig:

- Sonnenstrahlung, chemisch wirksam vor allem deren noch ungefilterter UV-Anteil,
- Elektrische Entladungen (Blitze), wesentlich häufiger und energiereicher als heute,
- Wärme vulkanischer Laven mit Temperaturen bis etwa 1500 °C,
- Meteoritenimpacte, die die Erdkruste lokal immer wieder aufschmolzen [41] und dort, je nach Größe des Meteorits, Temperaturen bis zu 6000 °C erzeugten. Dabei wurden die Carbonate pyrolysiert, was die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration schlagartig ansteigen ließ.
- Radioaktivität, die in der Urzeit dreimal so viel Energie in Form ionisierender Strahlung sowie von Wärme übertrug wie heute, darunter auch die atmosphärische Radioaktivität des Radons, sowie natürliche Herde von Kernspaltungsreaktionen [42].

Die Gesteinsschmelzen bilden dynamische chemische Systeme, die im wesentlichen Minerale sowie leichtflüchtige, niedermolekulare Verbindungen entstehen lassen. Letztere bildeten die primordiale (erste stabile) Atmosphäre. Deren Hauptbestandteile waren wahrscheinlich: Wasserdampf (ca. 80%), Kohlenstoffdioxid (ca. 17%), Chlorwasserstoff HCl (um 1,5%), ihre Nebenbestandteile Stickstoff, Schwefelwasserstoff H<sub>2</sub>S, Schwefeldioxid SO<sub>2</sub>, Fluorwasserstoff HF, Kohlenstoffmonoxid CO, Methan CH<sub>4</sub>, Ammoniak NH<sub>3</sub>, Wasserstoff H<sub>2</sub> und Argon Ar. Es ist damit zu rechnen, daß auch heterogenkatalytische Umsetzungen an den Oberflächen von Stäuben, aufgewirbelt durch Impacte, Vulkanismus und Stürme in oberflächennahen Atmosphärenschichten, abliefen. Vielfältig waren die Reaktionen zwischen den Gasen und den Komponenten der Gesteinsschmelze, z.B. unter Bildung

- von Alkalimetall- und Erdalkalimetallhalogeniden aus entsprechenden Silicaten und den Halogenwasserstoffen der Atmosphäre,
- von Stickstoffmonoxid NO infolge der Hochtemperatur-Oxidation von Stickstoff durch höherwertige Metalloxide, die selbstverständlich auch weitere Verbindungen zu oxidieren vermochten,
- oxidierter Verbindungen in der Kruste durch Reaktion reduzierter Stufen (Metalle sowie niederwertige Oxide) mit Wasserdampf unter Freisetzung von Wasserstoff.

Freier Sauerstoff, gebildet durch die Photolyse und Radiolyse der Wassermoleküle, wäre von den reduzierenden Bestandteilen dieser Atmosphäre schnell gebunden worden. Jedoch waren thermisch, photo- und strahlenchemisch getriebene Oxidationsreaktionen mit den Oxidatoren Wasser, Kohlenstoffdioxid und Metalloxiden über Jahrtausende möglich, ohne daß freier Sauerstoff existierte. Der Urey-Effekt (die Abschirmung der solaren UV-Strahlung durch O<sub>2</sub>-Moleküle) hätte in diesem Zeitabschnitt also nicht wirksam werden können.

Eine analoge Annahme liegt auch den 1953 durchgeführten Versuchen von Stanley L. Miller zugrunde, in denen ein gasförmiges Ausgangsgemisch von Wasser, Ammoniak NH<sub>3</sub>, Methan CH<sub>4</sub> und Wasserstoff H<sub>2</sub> elektrischen Entladungen ausgesetzt wurde [37-23]. Mehrere Autoren fanden in derartigen Versuchen als Reaktionsprodukte eine beträchtliche Anzahl komplizierter organischer, auch sauerstoffhaltiger Moleküle – essentiell für Organismen und möglicherweise in der Urzeit Vormaterial für die Entstehung des Lebens, darunter nicht nur Carbonsäuren und Aminosäuren, sondern auch Purine, Zucker, Nucleotide und Porphyrine.

Obwohl in dieser Phase die natürlichen Reaktionsbedingungen wesentlich härter waren als in den erwähnten Laborversuchen, gibt es dennoch hinreichend Gründe anzunehmen, daß schon in diesem ersten, abiotischen Stadium mit seinen unphysiologischen Bedingungen (hohe Temperaturen, Abwesenheit von freiem Sauerstoff und flüssigem Wasser, hochenergetische Strahlung) auch organische Verbindungen in beträchtlicher Variationsbreite entstanden sind, zu denen vermutlich primär die einfachen Moleküle Formaldehyd HCHO (wahrscheinlich aus Methan und Wasserdampf) und Cyanwasserstoff HCN (aus Methan und Ammoniak) zählten. Auf die Bedeutung des Cyanwasserstoffs scheint die folgende stöchiometrische Entsprechung hinzuweisen: 5 HCN = Adenin C<sub>5</sub>N<sub>5</sub>H<sub>5</sub> – selbstverständlich nicht beweisend für diese Genese.

Dieser primären chemischen Welt haftet hinsichtlich ihrer Entwicklungspotenz allerdings ein Nachteil an: Alle diese Moleküle liegen in der Gasphase in sehr niedrigen Konzentrationen vor, eine wäßrig-flüssige Phase existiert noch nicht (eventuell vorübergehend in Wolken), und die Festkörpergrenzflächen sind noch so heiß, daß sie nur wenige Umsetzungen robuster Moleküle katalysieren können.

In den oberen, kälteren „Stockwerken“ der Atmosphäre ist mit photochemischen Umsetzungen zu endothermen Reaktionsprodukten zu rechnen. In derartigen Molekülen ist Sonnenenergie fixiert. Also: Schon lange vor Erscheinen flüssigen Wassers auf der Erdoberfläche beginnt die Sonne ihre strukturbildende Wirkung in der irdischen Atmosphäre. Damit und mit zahlreichen anderen Reaktionen in dem Temperaturgefälle zwischen der noch jungen, instabilen, heißen Kruste und dem kalten Weltraum bereiten sich schrittweise die Bedingungen für eine komplexere Chemie vor.

Obwohl über die quantitative Zusammensetzung der primordialen Atmosphäre bis jetzt keine zuverlässigen Aussagen möglich sind, ist aber eine Tatsache unabweisbar: Diese Atmosphäre enthält die Wasserdampfmengen, die Millionen Jahre später, nach dem Abregnen, den gesamten Vorrat an Wasser für die Hydrosphäre liefern. Nach neueren Abschätzungen ist ein großer Anteil der irdischen Wasservorräte extraterrestrischen Ursprungs.

#### *Phase II: Oberflächentemperatur 300 °C bis 150 °C*

Die zeitlichen Übergänge zwischen Phase I und Phase II sind fließend und umfassen riesige Zeiträume. Die lokale Temperaturverteilung über die Erdoberfläche ist ungleichmäßig, weil schon abgekühlte Regionen, aktive Vulkanzonen und partielle impactbedingte Aufschmelzungen über lange Zeiten koexistieren.

Neu in dieser Phase ist ein lokaler, intermittierender Ur-Regen. Aus massiven Wolkenschichten fällt CO<sub>2</sub>-gesättigter saurer Regen, und ein Teil davon erreicht erstmalig den noch heißen Boden. Das Wasser verdampft sofort wieder. Über hunderttausende von Jahren benetzt dieser Primärregen immer wieder die Erdoberfläche, je kühler diese, desto häufiger, und desto länger auch sind die Verweilzeiten der warmen flüssigen Phase, bevor sie wieder verdampft. Dieser intermittierende Regen sollte schon eine erste Auflockerung der ansonsten reaktionsträgen Mineraloberflächen bewirkt haben – erste Verwitterungsfolgen, korrosive Einwirkungen von z.T. überhitztem Wasserdampf, Halogenwasserstoffen und Kohlenstoffdioxid. An den immer noch oberhalb der Siedetemperatur des Wassers befindlichen Gesteinen der Oberfläche laufen chemische Reaktionen annähernd unter Hydrothermalbedingungen ab, z.B. Pyrohydrolysen (an Si–O–Si-, Al–O–Al- und Si–O–Al-Gruppen), Umsetzungen des CO<sub>2</sub> mit Calciumsilicaten unter Bildung von Calciumcarbonat sowie metasomatische Umwandlungen (z.B. Kaolinitisierungen) bis hin zur Hydrothermal-synthese sowie zur partiellen Amorphisierung von Mineralen.

#### *Phase III: Oberflächentemperatur 150 °C bis < 100 °C*

Das ist der Zeitraum bis zur dauerhaften Existenz flüssigen Wassers. Ozeane existieren bereits 100-200 Millionen Jahre nach Formierung des Erdballs [43].

In dieser Phase III wird in oberflächennahen Bereichen die Siedetemperatur des Wassers immer häufiger und schließlich endgültig unterschritten, so daß der Niederschlag nicht mehr vollständig verdampft. Langsam kühlt die Atmosphäre ab, und dann geht über zehntausende von Jahren ein Dauerregen nieder. Unter den heutigen meteorologischen Bedingungen brauchte der Regen 60.000 Jahre, um alle als leer angenommenen Ozeanbecken zu füllen (s. 3.2.2), seinerzeit aber bestand die Atmosphäre anfänglich zu 80% aus Wasserdampf.

Der Regen und das sich ansammelnde Wasser haben tiefgreifende Folgen:

- Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre verändert sich: Zur Hauptkomponente wird Kohlenstoffdioxid (rund 75-80%). Die wasserlöslichen Verbindungen, wie Halogenwasserstoffe, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Schwefeldioxid, sind durch den Regen

aus der Atmosphäre ausgewaschen worden, die Gehalte an Methan, Stickstoff und Kohlenstoffmonoxid entsprechend angestiegen. Die so entstandene Atmosphäre enthält nun nur noch wenig Wasserdampf – der Treibhauseffekt und damit die Temperatur der Atmosphäre gehen weiter zurück.

- Geologische Mengen lockeren Gesteins werden durch den Regen in die Ozeanbecken und hier vor allem in die Geosynklinalen transportiert. Niemals enthielten die sich füllenden Becken reines Wasser, denn eine Vielzahl wasserlöslicher Verbindungen, vor allem der Alkali- und Erdalkali-, aber auch vieler Schwermetalle, werden in die Ozeane gespült. Mit dem Regen gelangen die über Jahrmillionen in der Atmosphäre entstandenen chemischen Verbindungen auch in die Ozeane, deren Wasser reduzierend und primär relativ stark sauer ist.
- Der Säuregrad wird durch Umsetzungen mit Metalloxiden sowie durch unterseeische alkalische Quellen vulkanischen Charakters allmählich verringert bis zur schwachen Alkalität der Lösung. Dann setzt ein geologisch folgenreicher Vorgang ein: Atmosphärisches Kohlenstoffdioxid wird von der wäßrigen Phase absorbiert und reagiert darin teilweise zu Hydrogencarbonat- und Carbonat-Ionen,  $\text{HCO}_3^-$  bzw.  $\text{CO}_3^{2-}$ , die mit Calcium- und Magnesium-Ionen schwerlösliche Carbonate bilden. Diese setzen sich als Sedimente ab.
- Die jungen Ozeane waren zunächst noch nahezu siedendheiß und kühlten nur allmählich ab – günstig für relativ hohe Reaktionsgeschwindigkeiten insbesondere von Redox-reaktionen und organischen Umsetzungen.

Nun steht ein neues Reaktionsmedium zur Verfügung: Die „Wunderphase“ Wasser mit ihrer einmaligen Kombination physikalischer und chemischer Eigenschaften.

Erst infolge der Anwesenheit flüssigen Wassers kann der Erdball in großem Umfang und dauerhaft Sonnenenergie aufnehmen – die nun hier festgelegt wird für die Evolution der Biosphäre und für die Verwitterung.

Spezieller gesehen, begünstigt das flüssige Wasser in der Geschichte des Erdballs eine neue Art von Chemie – weitaus komplexer und, infolge der nun höheren Konzentrationen, auch umsatzstärker als die vorangegangenen Gasreaktionen in der Atmosphäre. Eine Mannigfaltigkeit neuer Reaktionswege eröffnet sich: Hydratisierungs- und Hydrolyse-reaktionen (diese erzeugen reaktive OH-Gruppen in Molekülen wie auch als Liganden von Metallkationen), Säure-Base-, Redox-, Komplexbildungs- und Fällungsreaktionen, Homogenkatalysen sowie heterogenkatalytische Umsetzungen an den Grenzflächen von Festkörpern, z.B. von Oxiden, Sulfiden (Pyrit) und Tonen. Tonminerale, insbesondere Montmorillonit und Kaolinit, lassen beim Aufbau ihrer Schichtkristalle eine replikationsähnliche Genese erkennen – ein Prinzip, das in der Fortpflanzung der Organismen zu höchster Effizienz entwickelt wird.

Die chemische Reaktivität erobert über die homogene Phase des Ozeans hinaus neue Kompartimente: Feuchtgebiete, Küstenstreifen und die Meeresböden, hier getrieben durch geothermische, vulkanische, nichtsolare Energie- und Stoffquellen.

Die Sonne rückt an die erste Stelle als Quelle für Wärme und Photonen, ihre strukturbildende Rolle tritt immer deutlicher hervor. Der wachsende Energieinhalt der photochemisch entstandenen Verbindungen geht ausschließlich auf die Sonne zurück. Gegenwärtig beträgt die Energie des geothermischen Stroms nur noch ein Hundertstel der Sonnenenergie. Seit der Entstehung der Erde bis heute hat die von der alternden Sonne abgestrahlte Energie um 25 % zugenommen. Es ist anzunehmen, daß auch der fluktuierende Charakter der Sonnenstrahlung und der durch sie induzier-

ten anderen Energien (Wellen, Wind), sowie der gravitativ bedingten Gezeiten von prägendem Einfluß auf den Selbstorganisations-Rhythmus der chemischen Welt war.

Die neu gebildeten chemischen Verbindungen werden immer energiereicher und komplizierter, sie entfernen sich immer weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht und enthalten zunehmend kinetische Hemmungen, sie werden metastabil.

Über hunderte von Millionen Jahren nähert sich diese chemische Welt allmählich einer Produktivitätsgrenze, die ein weiteres Fortschreiten zu einem höheren Komplexitätsniveau behindert. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich darin, daß der Stoffnachschub nicht gesteigert werden kann und mit steigender Konzentration der Produkte auch deren Zerfall zunimmt. Außerdem sind die Konzentrationen in den Ozeanen und auf dem Land für einen höheren Stoffumsatz nicht ausreichend. Einer der Wege, Moleküle auf Reaktionsdistanz anzunähern, die Adsorption an katalysierenden Festkörperoberflächen, unterliegt gewissen Einschränkungen: In manchen Fällen werden die Reaktionsteilnehmer so energisch adsorbiert, daß sie den Katalysator blockieren.

#### *Phase IV: Die Membran*

Da beschreitet die Evolution einen anderen Weg zur Erhöhung der Stoffkonzentration und bringt die wichtigste Errungenschaft der präbiotischen Ära hervor – die selektiv-permeable Membran. Diese umschließt einen blasenförmigen, der Umgebung gegenüber relativ autonomen Raum (Vesikel, Lipidtropfen [31-99], Koazervattropfen [44]). Leichter verständlich wird die Herausbildung der Membran, wenn als deren evolutives „Vorbild“ (als „template“) Gesteins-Poren und -blasen, vor allem in Eisensulfiden und Schwermetallsilicaten und/oder auch Schichtzwischenräume in Tonmineralen angenommen werden. Derartige, für die Chemie der abiotischen Phase neuartige „Mikroreaktoren“ bieten, verglichen mit dem membranlosen Zustand, der chemischen Selbstorganisation zahlreiche neue Möglichkeiten:

- die chemischen Bedingungen, wie Reaktionsvolumen, pH-Wert und Temperatur, können über längere Zeit in einem nur engen Schwankungsbereich gehalten werden, und die Stoffkonzentrationen können sich auf eine nicht zu niedrige Größe einpegeln;
- Homogenkatalysen unter Beteiligung von Wasserstoff- und Schwermetall-Ionen werden einflußreicher, was nicht nur zu höheren Reaktionsgeschwindigkeiten, sondern auch zu einer Diversifizierung an Reaktionswegen führt.
- Höhermolekulare Verbindungen in größeren Konzentrationen können entstehen, eventuell auch schon Supramoleküle<sup>9</sup>.

Die ersten Vesikeln haben sich vermutlich vorrangig in den Flachwasser-, Brandungs- und Wattbereichen entwickelt, da die inzwischen komplexen Moleküle in diesen Zonen infolge adsorptiver Fixierung besonders günstige Reaktionsmöglichkeiten vorfanden und die Vesikeln, zwecks schnelleren Informationsaustauschs (mittels Molekülen und Ionen), leicht Kolonien bilden konnten. Andererseits mußte die Membran besonders hier die chemischen Komponenten vor Austrocknung sowie vor zu intensiver Sonnenstrahlung und dadurch verursachten Strahlenschäden schützen. Die Membran wirkte nämlich auch als Filter für die harte UV-Strahlung – und das schon Milliarden Jahre vor der Existenz der Ozonschicht. Dadurch konnten innerhalb der Vesikeln wesentlich empfindlichere Moleküle entstehen als in der membranlosen Ära.

---

9 Hochkomplexe chemische Systeme (jenseits der molekularen Chemie) aus Komponenten, die über nicht-kovalente intermolekulare Kräfte wechselwirken.

Auch die Tiefseeböden mit ihren warmen bis heißen Mineralquellen erscheinen geeignet für die Bildung von Vesikeln. Jedoch unterschieden sich die physikochemischen Bedingungen von denen in den euphotischen Bereichen: Abwesenheit von Sonnenlicht (damit auch keine Gefährdung durch UV-Strahlung), hohe Wasserdrücke, andere Diffusionsverhältnisse an den Membranen, weitgehend konstante Temperaturen und eine andere stoffliche Umgebung.

Möglicherweise waren es autokatalytische Umsetzungen, eventuell vom Typ der oszillierende Reaktionen (ähnlich der Bjelousow-Shabotinski-Reaktion), dissipative Systeme, die in den Vesikeln die präbiotische Selbstorganisation komplexer Moleküle, einen relativ schnellen Vorgang, vorangetrieben haben. Ein stochastischer Prozeß hätte dafür mehr Zeit benötigt als das Weltalter [12-209]. In den präbiotischen autokatalytischen Systemen kann man die ersten Spuren des „Gedächtnisses“ [31-99] als die eigentlich emergente Komponente erkennen, die dann später im evolvierenden Organismus ihren immer effizienteren Höchststand erreicht. Es könnte sein, daß auf diesem Niveau das „Supermolekül“ Ribonucleinsäure (RNA) abiotisch entsteht und damit die „RNA-Welt“ vorbereitet wird [31-104].

Wesensverwandt mit diesen von Evolutionsbiologen erarbeiteten Vorstellungen sind die einer emergenten abiotisch-chemischen Selbstorganisation, einer adaptiv-evolutionären Chemie – ein Bild, gewonnen aus der Forschung zur Supramolekularen Chemie. [45]

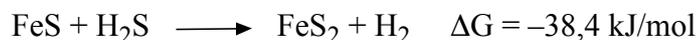
### *Das Leben*

Die leistungsfähiger gewordenen chemischen Umsetzungen beanspruchen nun für die Synthese organischer Verbindungen immer mehr Kohlenstoffdioxid und verringern damit weiter dessen atmosphärische Konzentration.

In der präbiotischen wie in der biotisch-anaeroben Epoche nimmt der Schwefelwasserstoff eine dominierende Stellung ein, die auf dem hohen Reduktionspotential des Sulfid-Ions  $S^{2-}$  beruht. Das wird deutlich an dem  $H_2S/H_2$ -Gleichgewicht am Schwefel:



sowie in der wahrscheinlich besonders wichtigen exergonischen Sequenz Pyrrhotin FeS/Pyrit  $FeS_2$ , die gleichzeitig Energie, Pyrit und Wasserstoff liefert – die Basis der „Eisen-Schwefel-Welt“ [54]:



Zumindest seit der Existenz flüssigen Wassers auf der Erdoberfläche, und noch lange vor Geburt des Lebens, wird das chemische Geschehen zu immer höherer Komplexität getrieben, bis eine Kolonie von Vesikeln mit dauerhafter selbstschöpferischer Zyklizität von Reaktionsketten chiraler Moleküle zu dem ersten lebenden Zellverband wurde – etwa 0,8 Milliarden Jahre nach Entstehen des Planeten. Es handelt sich um die Vorläufer von Bacteria und Archaea (Carl Woese [40-81]) – um Prokarioten mit vermutlich chemoheterotrophem Metabolismus, die ihre Energie durch Gärung gewinnen und u. a. Methan abgeben.

Das Leben nun ist ein Prozeß vorher nicht erreichter Komplexität, weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht, ein offenes System auf hohem Energieniveau, das nur durch ständige Energiezufuhr erhalten werden kann, wobei Entropieexport und Informationsaustausch weitere existentielle Eigenschaften des Lebens sind. Es erzwingt eine durchgreifende Reorganisierung al-

ler Verhältnisse in der Geosphäre, z.B. hat es die Austrocknung der Erdoberfläche verhindert. Obwohl der relativ hohe Salzgehalt der Ozeane infolge Hydratisierung dem schnellen Verdampfen und der darauffolgenden photolytischen Spaltung sowie dem damit verbundenen Wasserstoffverlust tendenziell entgegenwirkte, hätte dieser Effekt nicht ausgereicht, um die flüssige Phase dauerhaft an den Erdball zu binden. Dazu war nur das Leben in der Lage, indem es den Wasserstoff mit Schwefel zu Schwefelwasserstoff und, nach Aufkommen der oxygenen Photosynthese, mit Sauerstoff zu Wasser verband und dieses so auf der Erde festhielt [1-128].

Die Übertragung des Informationsbegriffs auf die Naturwissenschaft und auf das Leben eröffnet unserem Verständnis neue Räume. Information sei das Typische des Lebens [46]:

Leben = Materie + Information.

Das Leben sei von seinem Wesen her ein System zur Speicherung von Erinnerung [31-102], und das physikalische Problem, das durch das Selektionsprinzip gelöst werden soll, wurde als Frage formuliert [47]: „Welcher Mechanismus garantiert die gesetzmäßige Entstehung von Information?“ Der Informationsaspekt für die Chemie wird in dem folgenden Zitat skizziert: „And supramolecular chemistry is paving the way towards comprehending chemistry as an *information science*... The outlook of supramolecular chemistry is toward a general *science of informed matter*, bringing forward in chemistry the third component of the basic trilogy matter-energy-information“ [7-199]. John A. Wheeler prognostizierte, daß Information die Grundlage einer universellen Physik bilden werde [48]. Im Anschluß daran fragt sich, ob vielleicht die Informationstheorie zu einer neuen übergeordneten und integrierenden Wissenschaftstheorie wird, die die hemmende Fragmentierung der gegenwärtigen Wissenschaft zunächst zurückdrängen und schließlich aufheben könnte.

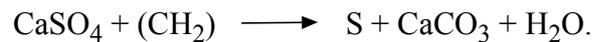
Essentiell für hochorganisierte, offene Systeme (komplexe Fließgleichgewichte) ist das Streben zur Minimierung ihrer Entropie, im Gegensatz zum abgeschlossenen System mit dem Trend zur Maximierung der Entropie. Auch für die in der Zelle ablaufenden Reaktionen sind die Gesetze der Gleichgewichtsthermodynamik zwar notwendig, aber nicht hinreichend. Deren Aussagen sind zeitinvariant [50-427] [49]. Die chemischen Umsetzungen sind im wesentlichen nun nicht mehr thermodynamisch, sondern kinetisch kontrolliert. „Die Ergebnisse thermodynamischer Betrachtungen nützen in der chemischen Kinetik nicht viel“ [50]. Die Reaktionsrichtung wird nicht mehr diktiert durch die Abgabe freier Energie, also durch die Bildung energieärmerer Verbindungen, sondern durch die Tendenz zu energiereicheren, höhermolekularen Verbindungen und zu einer damit verbundenen höheren Komplexität der chemischen Welt.

Schon die ersten Zellen müssen viel Energie dafür aufwenden, einen Konzentrationsgradienten zwischen den membranseparierten Bereichen von Innen- und Außenwelt aufrechtzuerhalten [51]. Schon die Archaea entwickelten Reparaturenzyme für die von der harten UV-Strahlung verursachten Strahlenschäden an der DNA.

Es zeugt von der erstaunlichen Kraft des Lebens, daß es offensichtlich selbst nur halbwegs geeignete Umweltbedingungen nutzt, sich anzusiedeln und auszubreiten. Neben dem von der Sonne angetriebenen Leben in den oberflächennahen Bereichen existiert auch ein anderes: So entdeckte man vor etwa zwanzig Jahren an unterseeischen Hydrothermalquellen eine neue Lebensform: Röhrenwürmer und Muscheln in Endosymbiose mit chemoautotrophen Bakterien. Diese gewinnen ihre Energie für den CO<sub>2</sub>-basierten Aufbau organischer Verbindungen aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff oder Methan – letztlich also nicht aus solaren, sondern aus geothermischen Quellen [40-462].

Aus den erst seit wenigen Jahrzehnten möglichen Tiefseeforschungen wurden Hypothesen abgeleitet, die die Energie- und Stoffquellen des unterseeischen Vulkanismus (heiße Quellen, wie die „black smokers“) als die *alleinigen* Orte ansehen, an denen erstmals irdisches Leben entstand [52]. Angesichts der Mannigfaltigkeit von Entwicklungspotenzen in komplexen Systemen läuft der Monozentrismus derartiger Auffassungen Gefahr, anderweitige Möglichkeiten und Einflüsse, z.B. die der in der Atmosphäre entstandenen chemischen Verbindungen, unberücksichtigt zu lassen.

Als ein weiteres Feld der Lebensentstehung wurden abiogene Kohlenwasserstoff-vorkommen angenommen [53]. Es ist nicht auszuschließen, daß dabei auch der folgenden, der „anaeroben Atmung“ ähnlichen, Umsetzung geologische Bedeutung zukam [(CH<sub>2</sub>) = Kohlenwasserstoff]:



Es scheint, als trage die Evolution fraktale Züge, denn Selbstähnlichkeit fällt auf:

- Die ersten Einzeller, Chemoorganotrophe, verbrauchten allmählich die ihnen zugänglichen Kohlenstoffreservoirs. Diese Situation erzwang vor etwa 3,5 Milliarden Jahren, daß die Autotrophen auftraten, die die benötigten Kohlenstoffverbindungen zunächst chemoautotroph, später photoautotroph aus Kohlenstoffdioxid, Wasser und Sonnenlicht aufbauten. In ähnlicher Weise ist die Menschheit heute dabei, die irdischen Kohlenstoffressourcen, die fossilen Vorkommen und die Wälder, aufzubrechen und steht nun vor derselben Aufgabe wie seinerzeit die Photoautotrophen, nämlich Energie und Stoffe aus Kohlenstoffdioxid, Wasser und Sonnenenergie zu gewinnen.
- Annahmen über die künftige Entwicklung supramolekularer Systeme zu komplexen evolutiven Systemen [7-201] erscheinen selbstähnlich der hypothetischen urtümlichen Selbstorganisation abiotischer Supramoleküle, die über präbiotische Vesikeln bis zur lebenden Zelle führte.

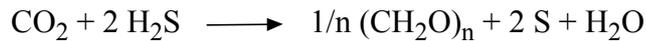
In der oben angegebenen zeitlichen Folge von den Heterotrophen zu den Autotrophen hat sich der Autor auf Grund der vermutlich einfacheren Chemie der Heterotrophen sowie des zunächst großen Vorrats an organischen Nährstoffen den Vorstellungen von Paturi [41-24], Fritsche [40-77] und Möller [36-20] angeschlossen. Es gibt jedoch neuere, plausible Argumente für eine CO<sub>2</sub>-basierte chemoautotrophe Biogenese – vertreten u. a. von Wächtershäuser [54], Margulis [31-106] und Russell [52]. Sollten derartige Theorien wissenschaftliche Akzeptanz erlangen, wären einige Aussagen in der vorliegenden Arbeit neu zu durchdenken.

Es ist absehbar, daß die Systemtheorie Dimensionen öffnen wird, die uns auch die Entstehung des Lebens tiefer verstehen lassen als bisher möglich.

### *Die Photosynthese*

Mit der Photosynthese „explodiert“ das Leben. Durch sie wurde, nachdem sich zunächst die porphyrinoiden Metallkomplexe gebildet hatten („Katalysatoren der ersten Stunde“ [51-27]) und dadurch Chlorophylle verfügbar waren, eine entscheidende Entwicklungsstufe erreicht – ein hochendothermes biochemisches Redoxsystem, getrieben durch solare Photonen.

*Die anoxygene Photosynthese:* In dieser anaerob von Purpurbakterien und Grünen Bakterien betriebenen Reaktion wird Kohlenstoffdioxid durch Sulfid-Ionen (aus Schwefelwasserstoff oder Thiosulfat S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>) reduziert, wobei Schwefel (und nicht Sauerstoff!) freigesetzt wird – in Form von Schwefellagern (z.B. in Texas) eine unverzichtbare Säule unserer Technik:



*Die oxygene Photosynthese:* Diese Reaktion entwickelt sich 1,7 Milliarden Jahre nach Erdentstehung und wird von einigen Bakterienstämmen, den Algen und den Pflanzen verwirklicht – erstmals wahrscheinlich durch Cyanobakterien:



In der Bilanz werden die Kohlenstoffatome des Kohlenstoffdioxids  $\text{CO}_2$  zu Glucose  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  reduziert und die Oxid-Ionen des Wasser zu Sauerstoff oxidiert, der die Zelle verläßt in Form zweiatomiger Moleküle  $\text{O}_2$  – zunächst ein starkes Zellgift für nahezu das gesamte damalige anaerobe Leben.

Diese summarische Darstellung läßt nicht erkennen, daß die Photosynthese ein hochkomplexes Reaktionsgeschehen darstellt, in das neben den Chlorophyllen mit ihrem Zentralatom Magnesium noch zahlreiche weitere Biomoleküle eingreifen. Diese enthalten neben den „typisch organischen“ Elementen C, O, H, N zudem häufig Phosphor, Mangan, Eisen, Schwefel, Kupfer, Calcium und Chlor.

Die oxygene Photosynthese der Bakterien, vor allem der dadurch entwickelte Sauerstoff, war eine weitere qualitative Stufe mit tiefgreifenden Folgen in der Ko-Evolution:

1. Die Phototrophen entwickeln sich sprunghaft, wodurch der  $\text{CO}_2$ -Anteil in der Atmosphäre weiter abnimmt und große Mengen Sauerstoff freigesetzt werden. Trotzdem verbleibt die  $\text{O}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre über 800 Millionen Jahre hinweg (bis 2 Milliarden Jahre nach Erdentstehung) unter 1 %, was auf den  $\text{O}_2$ -Verbrauch durch reduzierende Verbindungen in den Ozeanen und der Atmosphäre zurückgeht. Nahezu eine Milliarde Jahre lang enthält die Atmosphäre nur geringe Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff. Dessen Konzentration erreicht das heutige Niveau erst vor 1 Milliarde Jahre.
2. Ein Großteil der Anaerobier in der Nachbarschaft zu den Phototrophen stirbt aus. Diese Biomasse sinkt ab und wird vergoren – die Hauptquelle für die ansteigende atmosphärische Konzentration an Methan.
3. In den Ozeanen werden zahlreiche Verbindungen durch den Sauerstoff oxidiert, was neue Bedingungen für die Chemie des Lebens schafft. Z.B. entstehen Kupfer(II)- aus Kupfer(I)-Verbindungen, Sulfate aus Sulfiden (wie Pyrit), Nitrate, Nitrite und Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$  aus Ammoniak – überwiegend wasserlösliche Verbindungen, die von den Zellen leicht zu metabolisieren sind.
4. Weitreichende Folgen hat die biogene Oxidation der hochkonzentrierten, löslichen Eisen(II)-Verbindungen (mit bis zu  $10 \text{ g Fe/m}^3$  Meerwasser) zu den unlöslichen, über eine Milliarde Jahre hinweg sedimentierenden „Bändereisenerzen“ (im wesentlichen Hämatit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und Magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  enthaltend). Auf diese Weise entstehen in dieser Zeit etwa 90 % der irdischen Eisenerze.
5. In den Ozeanen hat sich neben einer hohen  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration das  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ -Gleichgewicht eingestellt:



Entnehmen CO<sub>2</sub>-assimilierende Organismen das Kohlenstoffdioxid, wächst die Carbonatkonzentration, und Calciumcarbonat fällt aus. So sind die Stromatolithen der Cyanobakterien wie auch die späteren biogenen Kalkvorkommen, z.B. Korallenriffe und Muschelkalke, entstanden.

6. Etwa 0,8 Milliarden Jahre nach Beginn der oxygenen Photosynthese tritt der Sauerstoff in die Atmosphäre ein und bewirkt:

- Die Bildung von Ozon und damit eines atmosphärischen Schirms gegen die energiereichen UV-Anteile der Sonnenstrahlung.
- Die Oxidation des atmosphärischen Methans zu Kohlenstoffdioxid und Wasser und damit den allmählichen Übergang von einem reduzierenden zu einem oxidierenden Milieu.
- Die Oxidation reduzierender anorganischer und organischer Stoffe nun auch auf den Kontinenten.

Zweifellos hatte die Oxidation anorganischer Verbindungen weitreichende Auswirkungen für die Geologie und das Leben. So wurden reduzierende Substanzen, wie Schwefel, Schwefelwasserstoff, Sulfide, Thiosulfat, oxidiert, wodurch den Chemoautotrophen die Elektronendonoren weitgehend entzogen wurden.

Als noch bedeutsamer jedoch ist die Oxidation organischer Verbindungen, abiogener und biogener, einzuschätzen. Organische Verbindungen, z. B. Kohlenwasserstoffe, wurden vom Sauerstoff oxidativ zu H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> abgebaut oder aber funktionalisiert, will heißen, mit funktionellen Gruppen versehen, wie mit =O, –OH, –O–, und –O–O–. Dadurch entstand eine viel größere Mannigfaltigkeit an organischen Verbindungen und Reaktionswegen, als sie davor existierte. Zu den neuen Umsetzungen gehörten solche mit O-Radikalen (Autoxidationen, Polymerisationen), katalytische, speziell enzymatische O-Übertragungen sowie die biochemischen Schutzreaktionen gegen hochreaktive Sauerstoffverbindungen, wie Singulett-Sauerstoff, das Hyperoxid-Radikal-Ion, das Hydroxyl-Radikal sowie organische Peroxide, Wasserstoffperoxid und Ozon – größtenteils photochemische Reaktionen, also eine weitere solare Strukturierung. In dieser Evolutionssphase wurde die „Sauerstoffwelt“ geschaffen – die Welt der biogenen Moleküle, die sich vor allem dadurch auszeichnen, daß sie gebundenen Sauerstoff enthalten. Infolge dieses Reaktionsgeschehens nahm das Oxidationspotential der Atmosphäre langsam zu.

Anregend ist es, die vier Basen der Desoxyribonucleinsäure (Adenin, Guanin, Cytosin, Thymin) diesbezüglich zu vergleichen: Adenin C<sub>5</sub>N<sub>5</sub>H<sub>5</sub> ist das einzige unter diesen Molekülen, das keine Sauerstoffatome enthält. Es ist wahrscheinlich direkt aus der „archaischen“ Verbindung Cyanwasserstoff HCN entstanden. Ist Adenin von den vier Basen eventuell die evolutiv älteste?

Nach der Ausbreitung der aeroben Phototrophen verschwanden die Anaerobier nicht vollständig. Vielmehr bildeten beide unter geeigneten Bedingungen Symbiosen, z.B. in den „Mikrobenmatten“ [40-479] – ein beeindruckendes Beispiel für biochemisches Recycling.

Die Chemie in den Organismen erreicht nun eine verwirrende Reichhaltigkeit: „Möglicherweise hat sich im Verlauf der Evolution für *alle* natürlich vorkommenden Elemente eine – wenn auch nicht immer essentielle – physiologische Funktion herausgebildet“ [51-8].

Es ist anzunehmen, daß schon in diesem frühen Stadium bakterielle Stoffwechselprodukte Calciumsilicate angriffen und dabei reaktionsfähige Calciumverbindungen („CaO“) freisetzten, die atmosphärisches CO<sub>2</sub> als Calciumcarbonat im Boden fixierten – neben dem Aufbau der bakteriellen Biomasse eine zweite Senke für atmosphärisches Kohlenstoffdioxid.

Die skizzierten Vorstellungen bleiben vermutlich weit hinter der wirklichen Vielgestaltigkeit zurück. Unser Wissen über den Bakterienmetabolismus steckt noch in den Anfängen, denn von dem geschätzten Gesamtumfang des Bakterienreiches ist der Forschung höchstens ein Prozent bekannt.

*Der Energieaspekt:* Verglichen mit dem ursprünglich leblosen Planeten, ist in der photosynthetisch entstandenen Biosphäre ein solarer Energiebetrag geologischer Größenordnung fixiert worden. Man schätzt die Masse der Biosphäre (Pflanzen und Tiere) auf  $2 \cdot 10^{16}$  kg. Seit langem schon entnimmt die Biosphäre in der Gesamtbilanz keine Energie mehr aus der Sonne, denn der Erdball strahlt nahezu genauso viel Energie in den Weltraum, wie er von der Sonne empfängt.

*Der Entropieaspekt:* Die Entstehung des Lebens ist ein Prozeß der Strukturbildung, also der Entropieverminderung; anders ausgedrückt: Die Sonne hat neben der Energie noch negative Entropie, also Syntropie, auf den Erdball übertragen.

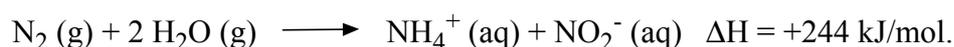
Grundsätzlich anders wird die Entstehung irdischen Lebens von der Panspermie-Hypothese gezeichnet. Derartige oder ähnliche Auffassungen wurden seit Anaxagoras immer wieder begründet und das selbst von weltberühmten Philosophen und Wissenschaftlern, wie Gottfried Wilhelm Leibniz, Giordano Bruno, Lord Kelvin, Hermann Helmholtz und, in besonders geschlossener Form, von Svante Arrhenius 1903-1908. Die Panspermie-Hypothese wird auch von Francis Crick vertreten, und Fred Hoyle modernisierte sie und gründete sogar ein „Zentrum für Astrobiologie“ [55].

Sollte die Entwicklung im Kosmos bis zu „Lebenskeimen“ (Bakterien, Sporen, Eiern) vorgedrungen sein, hätten diese auf der erkalteten Erdoberfläche mit ihren Flüssigwasser-Reservoirs günstige Bedingungen für ihre Entwicklung vorgefunden. Bis zum heutigen Tag gehen Meteoritenschauer auf die Erde nieder, die jährlich (11-16)  $10^6$  kg extraterrestrisches Material aufnimmt [56].

### *Die Stickstofffixierung*

Unter der natürlichen Stickstofffixierung versteht man die allein von Prokarioten beherrschte biochemische Umwandlung des atmosphärischen Stickstoffs in wasserlösliche Stickstoffverbindungen, nämlich Ammonium-, Nitrit- und Nitrat-Ionen. Daraus bauen die Organismen ihre Stickstoffverbindungen, z.B die Eiweiße, auf. Ohne die gleichzeitige Verfügbarkeit metabolisierbarer Stickstoffverbindungen wäre die Photosynthese biogenetisch ergebnislos geblieben.

Eine Bilanzgleichung der Stickstofffixierung läßt sich als Hydrolyse des Stickstoffmoleküls formulieren – eine endotherme Reaktion:



Ähnlich wie bei der Photosynthese sagt die obige Gleichung nur wenig über die real ablaufenden Reaktionen – auch hier ein komplexes System biochemischer Umsetzungen, die überwiegend in symbiotisch lebenden Rhizobien („Knöllchenbakterien“) ablaufen. Hierbei wird zunächst das N<sub>2</sub>-Molekül über Hydrazin N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> unter Freisetzung von Wasserstoff zum Ammonium-Ion NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hydriert.

Die Stickstofffixierung bedarf direkt nicht der Sonnenstrahlung. Die die wesentlichen Umsetzungen vollbringenden Bakterien entnehmen die dafür erforderliche Energie photosynthetisch entstandenen Stoffen und damit indirekt ebenfalls der Sonnenenergie [40-471]. Es gibt aber auch Cyanobakterien, also Photoautotrophe, die Stickstofffixierung betreiben.

Auch die in der Atmosphäre durch UV-Strahlung oder Gewitter bewirkte Bildung von Stickstoffmonoxid NO geht auf die Sonne zurück. Blitze sind über mehrere Stufen sich konzentrierende Sonnenenergie. Die Temperaturen im Blitzkanal betragen ca. 30.000 K. Würden Mikroorganismen nicht ständig molekularen Stickstoff der Atmosphäre wieder zuführen (Nitratatmung denitrifizierender Bakterien), gelangte allmählich der gesamte atmosphärische Stickstoff als Salpetersäure aus der Atmosphäre in die Ozeane und auf die Kontinente.

Überraschend ist eine weitere Wirkung von Blitzen: Sie stimulieren den horizontalen Gentransfer bei Bakterien – einen Mechanismus, der wahrscheinlich die Evolution beschleunigt hat [57].

### 3.2.2 Verwitterung

Mit Recht wird heute die strukturbildende Rolle der Sonne hervorgehoben. Es erhebt sich jedoch die Frage, ob damit schon der ganze Umfang der Sonnenwirkung auf den Erdball beschrieben ist. Es gibt einen weiteren, ebenso wichtigen und tiefgreifenden Prozeß, dessen Sonnenbedingtheit und energetische Dimension bisher aber nicht beschrieben wurden:

Seit der Existenz flüssigen Wassers betreibt die Sonne andauernd auch einen tiefgehend zerstörerischen, entropieerhöhenden Prozeß auf dem Globus: *Die Verwitterung – mit ihren physikalischen, glazialen, chemischen und biologischen Teilwirkungen sowie der Erosion.*

#### *Auswirkungen der Verwitterung*

Die Verwitterung hat Material in geologischem Ausmaß zerkleinert zu Geröll, Gebirgsschutt, Lockergesteinen, Löß, Sedimenten und Kolloiden. In einigen Fällen werden allein durch Sonnenwärme und Feuchtigkeit Gesteine zerstört, z.B. gewisse Basalte, deren Nephelin  $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$  dabei übergeht in Analcim  $\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]\cdot\text{H}_2\text{O}$ , wobei eine Volumenvergrößerung eintritt, die den Basalt vergrust, wodurch diese „Sonnenbrenner“ für den Straßenbau untauglich werden.

Der Verwitterungsschutt wird durch Wasser und Wind z.T. über tausende von Kilometern transportiert. Ein Teil dessen wird zu dem Sand der Wüsten und vieler Küstenregionen. Der Großteil jedoch liegt auf dem Meeresboden.

Große Mengen Wasser, ca.  $3,7\cdot 10^4 \text{ km}^3/\text{a}$  [37-275], fließen von den Kontinenten in die Ozeane. Dabei werden Gesteins- und Erdmassen in einem Umfang transportiert, daß alle Meeresbecken in 17 Millionen Jahren voller Verwitterungsschutt wären. Regen brauchte heutzutage 60.000 Jahre, um alle Ozeanbecken zu füllen. Zur Wirkung dieser Massen auf die Meeresböden stellten Anderson und Lovelock eine weitgehende Hypothese auf: Diese Ablagerungen könnten durch ihren Bodendruck sowie durch die von ihnen bewirkten Veränderungen der Temperatur- und der chemischen Verhältnisse die Plattentektonik erst ausgelöst haben [1-131]. Sollte sich diese Annahme bestätigen, würde das eine bisher nicht wahrgenommene Tiefe solarer Einwirkung enthüllen: Die Sonne wäre auch die Mutter der Plattentektonik.

### *Aspekte der Verwitterung*

*Der Energieaspekt:* Die energetischen Wechselwirkungen in dem einheitlichen Prozeß von Verwitterung und Erosion sind schwierig zu differenzieren, da für diesen sowohl die Sonnenenergie als auch die potentielle Energie der Gebirgsmassen zu berücksichtigen sind.

Die Abtragung der Gebirge – das ist eine Umwandlung potentieller Energie, die ursprünglich einmal aus dem Energievorrat des Erdinneren für die Gebirgsbildung (Orogenese) aufgewandt worden ist. Anders als die von außen kommende Sonnenenergie ist dieser Energiebetrag geogen.

Die Verwitterung, die auf der Erde solange abläuft, wie es hier flüssiges Wasser gibt, speichert ständig solare Energie auf dem Globus, denn dieser Prozeß wird ausgeübt durch Regen, Wasserströme, Wind, durch die Mechanik der Gletscher, durch chemische Reaktionen sowie durch die mechanische und biochemische Kraft des Lebens – alles solarogene Einflüsse. Diesbezüglich ist die Sonne als Quelle von Dispergierungsenergie aufzufassen.

*Die in diesem Falle gespeicherte Energie ist aber nichtthermischer Art, sie existiert als Oberflächenenergie (in  $\text{kJ/m}^2$ ) des Verwitterungsschutts und der Sedimente – Phasen, deren spezifische Oberfläche (in  $\text{m}^2/\text{g}$ ) groß ist gegenüber der des ursprünglichen Felsgesteins.*

Die Oberflächenenergie in den Verwitterungsprodukten kann über Milliarden Jahre stabil, genauer: „metastabil“, gespeichert bleiben.

Die Verwitterung hobelt die Erdoberfläche allmählich glatt, weil die seismisch bedingten Aktivitäten der Gebirgsbildung infolge der allmählichen Abkühlung des Erdinneren langsam abflauen. GAIA war in ihrer Jugend heiß, grob, schroff, kantig und faltig und wird in ihrem Alter kalt, glatt und faltenlos – ähnlich, aber auch umgekehrt wie beim Menschen.

Die Verwitterung könnte aber noch auf eine andere, indirekte Weise den geologischen Energiehaushalt beeinflussen: In den Subduktionszonen werden Randteile der Kontinentalplatten in den Erdmantel gedrückt und dort im Magma wieder aufgeschmolzen. Die in den feindispersen Gesteinen gespeicherte Oberflächenenergie wird beim Aufschmelzvorgang wieder abgegeben und vermindert dadurch den für das Schmelzen und die thermische Zersetzung der festen Phasen (vor allem Carbonate, Sulfate, Hydroxide) naturgemäß erforderlichen Energieaufwand. Dadurch sollte die ständig vor sich gehende Abkühlung des Magmareservoirs geringfügig verzögert werden. Treffen diese Annahmen zu, heißt das: Die eingestrahlte Sonnenenergie ist derart wirkmächtig, daß sie indirekt auch die thermischen Verhältnisse im Erdmantel beeinflusst.

*Der Entropieaspekt:* Beide solarogenen Prozesse – der aufbauende und der abbauende – sind eng miteinander gekoppelt. Der Verwitterungsprozeß, der die relativ hohe, meist sogar kristalline Ordnung des Felsgesteins zerstört und dieses umwandelt in weniger geordnete, feinteilige, z.T. amorphe Gesteinsphasen – ein enorm entropieerhöhender Vorgang. Dabei ist bemerkenswert: Das Leben erhöht die Verwitterungsgeschwindigkeit um Größenordnungen. Basaltgestein z. B. verwittert unter der Mitwirkung von Organismen tausendmal schneller als im sterilen Zustand [1-111]. Auch hier wieder sind zwei scheinbar gegensätzliche Prozesse dialektisch miteinander verflochten: Die hochorganisierten Lebewesen, deren Entstehung eine Strukturbildung, also eine starke Entropieabsenkung im Vergleich zum unbelebten Planeten, darstellte, begünstigen einen destruirenden, entropieerhöhenden Vorgang – eben die Verwitterung.

### *Bodenbildung*

Eine der für die Ausbreitung des irdischen Lebens wichtigsten Verwitterungsfolgen ist die Bildung der Böden. Sie sind die substantiellen Träger des Lebens. Einen besonderen Rang bei der Bodenbildung nehmen die Tonminerale ein – als feinteilige Substanzen Hauptkomponente vieler Böden. Die äußeren Oberflächen und die Schichtzwischenräume der Tonminerale sind auf Grund ihrer OH-Gruppen sowie der elektrischen Polaritäten chemisch reaktiv. Das läßt verstehen, daß eine Hypothese in den Tonen das anorganische Substrat für die Entstehung des Lebens auf der Erde sieht [58].

*Die zerstörerische, entropieerhöhende Wirkung der Sonne in Verbindung mit Wasser – nämlich der Verwitterungsprozeß – wirkte also begünstigend dafür, daß auf dem Erdball Leben sich ausbreiten konnte – ein strukturbildender, entropiesenkender Prozeß. Es scheint, als widerspiegeln diese Vernetzung von Destruktion und Konstruktion ein allgemeines Gesetz.*

*Auch an einem verstorbenen tierischen Organismus läßt sich beobachten, wie die Entropiezunahme infolge der Verwesung des Kadavers parallel läuft mit der Entropieabnahme durch Bildung neuer Strukturen in Form von Bakterienkolonien, Pilzen, Würmern, Insekten und Pflanzen.*

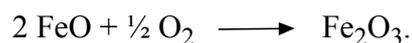
Prigogine habe beobachtet, daß der Zusammenbruch des Fortschritts oft nur eine Illusion sei. Unter den Fragmenten, meinte er, bildeten sich neue Strukturen und Prozesse [59].

In der Natur herrscht das ewige Stirb und Werde, chemisch formuliert: Das ewige Recycling der Elemente – kulturell ist das die Überzeugung von der Wiedergeburt – eine *östliche, buddhistische* Vorstellung zyklischen Charakters.

### *Chemie und Verwitterung*

Die Vorgänge der physikalischen und der chemischen Verwitterung verlaufen nahezu synchron und fördern einander. Hat die physikalische Verwitterung durch Gesteinsspaltung und Zerkleinerung erst einmal jungfräuliche, reduzierte Verbindungen aufweisende Gesteinsoberflächen bloßgelegt, können nun daran vielfältige, überwiegend exergonische chemische Umsetzungen ablaufen. Die chemischen Hauptvorgänge dabei sind:

- Bindung von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid durch das Calcium der Silicate, derzufolge einerseits Calciumcarbonat, andererseits calciumärmere Silicate und Siliciumdioxid entstehen.
- Bindung von Sauerstoff durch Verbindungen niederwertiger Metalle, wie von Eisen(II), Mangan(II) und Uran(IV), sowie durch Schwefel, Sulfide u.a.. Die Oxidationen niederer Oxide durch Sauerstoff sind entropieerniedrigende Reaktionen, weil dabei das Gasvolumen sich vermindert, z.B.



Auch hierbei sind ein entropieerhöhender Vorgang (die physikalisch-chemische Verwitterung) und ein entropiesenkender Vorgang (das „Verschwinden“ eines Gases) unlösbar miteinander verknüpft.

- Bindung von Sauerstoff durch organische Stoffe, wie Huminstoffe, Alkylsulfide u.a., infolgedessen vor allem Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid freigesetzt werden.
- Bindung von Wasser durch Löseprozesse, Hydratisierungen und Hydrolysen.

*Mechanochemie*<sup>10</sup> [60]: Der Einfluß der Mechanochemie auf Verwitterungsvorgänge ist bisher nicht beschrieben. Diese sollten aber durch mechanochemische Anregung beschleunigt werden. Unter den Bedingungen der Mechanochemie werden Reaktionen möglich, die thermodynamisch verboten sind, was durch die Theorie des Triboplasmas erklärt wird [61]. Auch infolge der stark reibenden Druckbelastungen durch Gletscher („Glazialerosion“) ist mit mechanochemischen Umsetzungen zu rechnen. Bekannt sind die stofflichen Produkte des Gletscherschliffs: Gletschertrübe und Gletschermilch.

Sand- und Staubstürme können über ihre direkt tribochemischen Beanspruchungen hinaus starke elektrostatische Felder erzeugen, die dann ihrerseits chemisch wirksam werden. Es wird für möglich gehalten, daß auf der Marsoberfläche derartige Prozesse in stark endergonischen Umsetzungen aus Kohlenstoffdioxid und Wasser neben Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid und OH-Radikalen größere Mengen festen Wasserstoffperoxids (eines bakteriziden Stoffes!) gebildet haben könnten [62], etwa gemäß der Bilanzgleichung (CH<sub>2</sub>O = Kohlenhydrat):



#### 4. Ökologische Wechselwirkungen

GAIA reagiert vielfältig, unvorhersehbar und zuweilen katastrophisch. Die Menschheit muß ihre immens gewachsene technische Macht äußerst behutsam handhaben, wenn sie in dieses Netz eingreifen gezwungen ist. Wir beginnen gerade erst, GAIA zu verstehen. Die Ökologie lenkt uns dabei auf überraschende, häufig lebenswichtige Zusammenhänge, die uns die Gesetze komplexer Systeme andeutungsweise erkennen lassen.

##### 4.1 Ökologische Überraschungen

*Kohlenstoffdioxid*: In der gegenwärtigen Klimadebatte erscheint Kohlenstoffdioxid fast ausschließlich als der Hauptverursacher des Treibhauseffekts. Allein schon der dadurch verursachte Klimawandel stellt ein hochkomplexes Geschehen dar, dessen Folgen noch nicht annähernd abzuschätzen sind [63].

Aber: Allein schon aus systemtheoretischen Erwägungen ist für ein derart komplexes System die Annahme einer eindimensionalen Ursache/Wirkungs-Beziehung (CO<sub>2</sub>-Emission ? Atmosphärenenerwärmung) untauglich. Weitere Auswirkungen der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf natürliche Systeme wurden beobachtet:

- Die Zersetzung von Calciumsilicaten durch die Einwirkung von CO<sub>2</sub> und Wasser unter Bildung von calciumärmeren Silicaten, Siliciumdioxid und Calciumcarbonat – eine Reaktion, deren Geschwindigkeit durch die erhöhten Temperaturen noch vergrößert wird. Allerdings ist dieser Prozeß langsam relativ zu der anthropogenen Emission von Kohlenstoffdioxid.
- Aufnahme größerer Mengen von CO<sub>2</sub> durch die Ozeane, was einerseits zu intensiverem Biomassewachstum, andererseits aber durch Bildung von Calciumhydrogencarbonat,

---

10 Unter einer mechanochemischen Reaktion versteht man eine chemische Umsetzung infolge mechanischer Einwirkung primär auf Festkörper, z.B. durch Stoß, Spaltung oder Reibung, wobei auch Komponenten der umgebenden fluiden Phasen einbezogen sein können.

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , zur Auflösung des Calciumcarbonats der Kalkschalen, Kalkskelette und Sedimente führen kann. Gegenläufig dazu wirkt die Erwärmung der Ozeane, weil damit die Gaslöslichkeit abnimmt.

- Verengung der Stomata (Spaltöffnungen der Blätter), wodurch diese nicht mehr die normalen Mengen Wasserdampf abgeben. Das dadurch im Boden zurückgehaltene Wasser führt zu einer vergrößerten Wasserführung der Flüsse, dadurch eventuell zu einer Veränderung von Meeresströmungen und, weil die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens vermindert ist, zu Überschwemmungen. Wird weniger Wasser verdunstet, geht auch die entsprechende Kühlwirkung zurück – eine der wichtigsten Leistungen der Wälder für das globale Ökosystem.
- Mit den Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre (nicht allein durch  $\text{CO}_2$ .) könnte auch die Chemie in diesem Kompartiment sich zu ändern beginnen. Denkbar erscheint, daß die Oxidation von Methan zurückgedrängt wird, dieses Gas aus Gärungsprozessen und Methanhydratzerfall zunehmend emittiert wird, die dadurch weiter erwärmte Atmosphäre noch größere Wasserdampfmengen aufnimmt und sich insgesamt eine positive Rückkopplung entwickelt – der Treibhauseffekt also verstärkt wird.

*Methan:* Kürzlich wurde entdeckt, daß lebende Pflanzen (Mais, Weidelgras) Methan emittieren, und zwar 10-100mal mehr als durch Gärungen entsteht. Sonnenbestrahlung verstärkte diese Emission. Die Physiochemie dieses Pfades ist noch unbekannt. Sollte dieser Befund auf alle Landpflanzen zutreffen, würden durch diese schätzungsweise (60-240)  $10^9$  kg/a Methan emittiert, das wären etwa 10-40% der Gesamt-Methanemission – eine Entdeckung von Gewicht für die Planung von Groß-Aufforstungen und Energieplantagen.

*Methylbromid:* Methylbromid,  $\text{CH}_3\text{Br}$ , ein Nervengift und Carcinogen, wird weltweit als Herbizid eingesetzt, soll aber gemäß dem Montreal-Protokoll wegen seiner ozonabbauenden Wirkung verboten werden. Etwa 80% des atmosphärischen Methylbromids stammt aus biogenen und geologischen, 20% aus anthropogenen Quellen. Große Mengen Methylbromid werden, neben Methylchlorid, bei Verbrennung von Biomasse freigesetzt, vor allem bei Wald- und Graslandbränden.

Vor einigen Jahren wurde festgestellt, daß lebende Pflanzen (Kohl, Broccoli, weiße Rüben, Raps) Methylbromid freisetzen. Allein die von Raps emittierte Menge soll etwa 15 % der industriellen Methylbromidproduktion betragen. Sollte dieser Befund sich als allgemeingültig erweisen, wäre er bei einer Ausweitung des Rapsanbaus für Motorentreibstoffe („Biodiesel“) zu berücksichtigen.

Methylbromid jedoch ist nicht die einzige natürliche halogenorganische Verbindung. Vielmehr wurden schon etwa 4.500 Vertreter dieser Verbindungsgruppe, meist marinen Ursprungs, gefunden [64]. Die Ökologie weist der Forschung in der Biochemie der Pflanzen dringliche Aufgaben zu.

*Erosion:* Der Wind transportiert Sand-Feinstkorn aus der Sahara in die Regenwälder Südamerikas. Dieser Sand mit seinem Eisenoxidgehalt sei als Mineraldünger für den Regenwald unverzichtbar. Würde nun die Sahara aufgeforstet – die Sand-Injektionen blieben dann aus – verkümmerte dann der Regenwald? Selbst vor großflächigen Aufforstungen also sind die ökologischen Netze aufmerksam zu studieren.

China ist das Land mit den größten Aufforstungsleistungen der letzten zwanzig Jahre im Weltmaßstab. Trotzdem müssen in den nordwestlichen Wüstengebieten immer mehr Dörfer vor den andrängenden Sandmassen geräumt werden. Der Grundwasserspiegel in China, wie auch in Indi-

en, ist in den letzten Jahren weit abgesunken. Dazu trug bei, daß immer leistungsfähigere Wasserpumpen verfügbar wurden. Ein chinesischer Ökologe bezweifelte, daß die Schutzwaldstreifen den Sand stoppen würden. Die neu gepflanzten Bäume könnten auch den Grundwasserspiegel weiter absenken.

Kommen wir schon zu spät mit unseren Reparaturversuchen? In seinem neuen Buch [65] kommt James Lovelock gerade zu diesem Ergebnis. Es ist jedoch traurig, wenn er durch die von ihm angepriesene Rettungsstrategie, nämlich unter Mißachtung der Sonne die Kernenergietechnik über den Erdball zu verbreiten, seine einmal errungene Autorität als „Planetenarzt“ beschädigt [66] und darüber hinaus sich nun von den Kernenergiekonzernen als deren Protagonist feiern lassen muß.

## 4.2 Grenzen

Die ökologische Denkweise bereitet die Menschheit auf eine Zukunft vor, in der sie, wie nie zuvor im Industriezeitalter, mit den Grenzen ihres Handelns konfrontiert wird. Sie muß lernen, diese Grenzen anzuerkennen und sich innerhalb ihrer nachhaltig einzurichten. Systemgrenzen sollten nicht als Einengung, sondern vielmehr als Provokation von Kreativität und als Erkenntnisquell aufgefaßt werden. Dieser Hinweis müßte dem Naturwissenschaftler leicht einsichtig sein, denn die Naturkonstanten sind quasi „Grenzsteine“. „Mit der Perspektive der Komplexität wird die Grenze an sich zum Phänomen und gerät in den Mittelpunkt der Betrachtung“ [20-120].

In einem komplexen System sind, wie all dessen Komponenten, auch die Grenzen in ständiger Veränderung begriffen. Diese allgemeine Betrachtung der Eigenschaften komplexer Systeme führt direkt zu dem Schluß, daß es auch eine ewige Konstanz der Naturkonstanten nicht geben kann. Die Invarianten kommen in die Diskussion.

Vielleicht ist das Gewährwerden und Respektieren von Endlichkeiten erst die Voraussetzung dafür, daß die Menschheit befähigt wird, andererseits die echten Unendlichkeiten zu erkennen, wie etwa das Potential brüderlicher Kooperation, den Reichtum an neuen Gedichten, Symphonien, Gemälden sowie an neuen chemischen Verbindungen – die Unendlichkeit in der Evolution des Geistes.

Wir sind heute dabei, einige existentielle Grenzen zu erkennen: Die Grenzen des Wachstums allgemein, konkreter, die Grenzen der Quellen und der Senken [67].

Eine Begrenzung jedoch, sie ist die wichtigste, akzeptieren wir am schwersten: Wir dürfen in Forschung und Technik nicht mehr alles tun, was wir können. Was für jeden normal veranlagten Menschen im Alltag selbstverständlich ist, muß gerade in diesen Bereichen für die „scientific community“ zu strenger Gültigkeit gebracht werden.

Aus diesen übergeordneten ökologischen Prinzipien läßt sich eine weitere allgemeine Schlußfolgerung ableiten: Jegliche Produktion von Überfluß widerspricht diesen Prinzipien, weil sie bedeutet, Systemgrenzen zu überschreiten. Folglich ist in der Installierung einer Kernfusionsenergetik, neben all ihren schon heute absehbaren technischen und volkswirtschaftlichen Nachteilen, eine eventuell gefährliche Verletzung ökologischer Grundsätze zu sehen. Das ist keine „ideologische“ Prinzipienreiterei, sondern die neuere Erkenntnis, daß die Biosphäre nur eine bestimmte Maximalgröße eines anthropogenen Energiestroms schadlos ertragen kann (s. 4.3.4). John Desmond Bernal, der große britische Physiker – zutiefst überzeugt von der Zukunft der Kernfusionsenergetik – erstrebte die Versorgung der Menschheit mit 10-20 Kernfusions-Großkraftwerken. Trotzdem bewahrte er sich den kritischen Blick für Grenzen und schrieb 1958 hinsichtlich der Kernfusion [68]:

*„Nur eine Überlegung wird den Umfang ihrer Anwendung beschränken, und zwar die Gefahr, daß die Oberfläche der Erde zu sehr erwärmt wird. Eine jährliche Steigerung der Energieerzeugung um 5 Prozent – ein keineswegs schwer erreichbares Ziel – hätte nach etwas mehr als zwei Jahrhunderten zur Folge, daß fast genau so viel Wärme erzeugt wird, wie die Erdatmosphäre durch das auf die Erde fallende Sonnenlicht erhält. Die entstehende Wärme würde schon lange vorher unerträglich werden, wenn die Erde nicht mit einer Kühlvorrichtung ausgestattet werden könnte, die die Wärme ableitet.“*

### 4.3 Anthropogene Entropie

#### 4.3.1 Allgemeines

Vor etwa dreihundert Jahren begann der Mensch durch die industrielle Revolution in einem vorher noch nie dagewesenen Tempo, die Entropie auf dem Erdball zu erhöhen, was sich in mehrfacher Hinsicht bedrohlich auswirkte:

- Durch die Technik wurde bis in die Gegenwart hinein eine wachsende Anzahl von Xenobiotika freigesetzt, wie z.B. Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) und chemisch verwandte persistente Substanzen, Schwermetallverbindungen (z.T. mit hormonartigen Wirkungen), Pestizide.
- Objekte unterschiedlichster Art werden gewollt oder unbeabsichtigt von ihren angestammten Lokalitäten hinwegtransportiert und über den Globus verteilt. Dabei gelangen sie auch dorthin, wo sie natürlicherweise nicht, zumindest nicht in den neuen Konzentrationen, hingehören. Das betrifft Kohlenstoffdioxid, Methan, Abwärme, Wasserdampf in der oberen Stratosphäre, Radioaktivität, ortsfremde Lebewesen (Bioinvasion), Mikroorganismen u.a..
- Systeme der Technik verdrängen zunehmend solche der Natur, die man dadurch meist irreversibel schädigt oder beseitigt. So werden Mangroven ersetzt durch Fischzuchtstationen, Regenwälder durch Sojafelder und Palmölplantagen, natürliche Flußläufe werden begradigt, Flußbauen bebaut mit Deichsystemen, natürlicher Boden wird durch Bautätigkeit versiegelt usw.

Die Folgen derartiger Denaturierungen werden meist erst nach längerer Zeit und andernorts spürbar, so daß dann die Ursachen nicht mehr sicher auszumachen sind. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der thermodynamischen Entropie des Erdballs, die als Abwärme in den Kosmos gestrahlt wird, und der statistischen Entropie, der Unordnung durch Dissipation, die auf der Erde verbleibt.

Der Mensch ist zwiefach tätig: Die Schaffung einer Zivilisation ist ein strukturbildender, entropie-senkender Prozeß, aber die dafür erforderlichen technischen Vorarbeiten sowie die unvermeidbaren Folgen (u.a. moderne Kriege) erzeugen wesentlich mehr an Entropie, so daß im Endeffekt die anthropogene Gesamtentropie ständig wächst. Es scheint so, als ob infolge der zunehmenden Wirkmächtigkeit menschlich-technischen Handelns das Verhältnis „*Entropieerhöhung: Entropieabsenkung*“ im Verlaufe der gesellschaftlichen Entwicklung zunimmt. Ergo: Alle anthropogenen Eingriffe in die natürliche Ordnung, also auch jede beliebige Technik, in dem von uns fälschlich als geschlossen behandelten System GAIA sind entropieerhöhend, also letzten Endes zerstörerisch [9-153]. Die Gesellschaft dürfte darum zukünftig stets nur so viel an Technik aufwenden, wie für ihre Selbsterhaltung unumgänglich erforderlich. Bei dieser bewußt global gehaltenen Forderung darf nicht übersehen werden, daß in den industriell noch wenig entwickelten Ländern ein großer Nachholebedarf an Technik zu unterstützen ist.

Die Warnung vor den zerstörerischen Folgen der Technik gilt selbstverständlich auch für jede Ökoenergietechnik. Das zu betonen ist notwendig, denn manche „Solarier“ unterliegen dem Irrtum, daß angesichts des nahezu unendlich großen solaren Energievorrats der technische Wirkungsgrad für die Solartechnik sekundär geworden sei. Könnte man jedoch den Wirkungsgrad der Solarzellen verdoppeln, wäre nur noch die halbe Zellenfläche erforderlich, und die gesamte Produktion, d.h. aber auch die mit ihr zwangsläufig verbundene Entropieproduktion, könnte verringert werden.

Um die fossilen Brennstoffe hervorzubringen, hat die Natur über Millionen Jahre die Konzentrierung vorgenommen, im Ökozeitalter, nach Auslaufen der fossilen Energieressourcen, ist aber die konzentrierende Gewinnung von Energie und Stoffen die ständige Aufgabe der Gesellschaft. Das Fossilzeitalter war hinsichtlich der Energie- und Rohstofftechnik die Epoche der *Dispergierung*, das Ökozeitalter muß die Epoche der *Konzentrierung* werden.

#### 4.3.2 Verletzungen der Erdkruste

Ein fruchtbarer Boden enthält als wesentlichen Bestandteil Tonmineral-Huminstoff-Komplexe. Huminstoffe wirken chemisch vorwiegend über aromatische Radikale, Carboxylgruppen sowie OH-Gruppen. Bei natürlichen anaeroben Prozessen entstehen u.a. flüchtige Schwefelverbindungen, wie Kohlenstoffdisulfid  $CS_2$ , Kohlenstoffoxidsulfid  $COS$ , Schwefelwasserstoff  $H_2S$ , Methylhydrogensulfid  $CH_3SH$  und Dimethylsulfid  $(CH_3)_2S$ .

All diese Verbindungen sind leicht oxidierbar. Wird nun die Erdkruste verletzt, z.B. durch den Aufschluß von Erzgruben, beim Abteufen von Bergwerken, durch Tiefbauarbeiten, Straßenbau oder Pflügen, so dringt freier Sauerstoff in diese bisher anaeroben Bereiche und oxidiert die reduzierenden Substanzen. Werden aber Huminstoffe chemisch abgebaut, verlieren sie ihr Wasserspeichervermögen, und die von ihnen vorher gebundenen Kationen, vor allem des Kaliums, werden ausgewaschen und stehen der Pflanzenernährung nicht mehr zur Verfügung. Insgesamt wird der Boden geschädigt, für den Ackerbau unbrauchbar und ist zudem nun der Verwitterung und Erosion ausgesetzt. Boden aber ist eine nichtregenerierbare Ressource. „Als durchschnittliche rechnerische Bodenbildungsrate wird 0,1...0,5 mm/a angegeben...“ [37-339] – eine Zuwachsrate, die die Erosionsverluste nicht annähernd wettzumachen vermag.

Als weitere Folge des oxidierenden Abbaus werden gasförmige Oxidationsprodukte freigesetzt, vor allem Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid. Dadurch gelangen u. a. große Mengen  $SO_2$  in die Atmosphäre. Diese  $SO_2$ -Emissionen seien in unseren Breiten größer als die aller *industriellen* Verbrennungsprozesse zusammengenommen, und es wiegt schwer, daß seit etwa zwanzig Jahren mehr Erdmassen von der Technik bewegt werden als durch Vulkanausbrüche oder klimabedingte Erosion [69].

#### 4.3.3 Sonne und Mensch

Der Mensch kann jede der beiden Wirkungen der Sonne verstärken – die aufbauenden und die zerstörenden, das Leben oder die Verwüstung. Wo Leben sich entfalten kann, vielleicht sogar durch menschliche Unterstützung, werden Verwitterung und Erosion verlangsamt oder gestoppt. Wo Natur geschädigt, Leben vernichtet wird infolge Profitgier, Arroganz, Armut oder Unwissen, gewinnt die Verwüstung. Seit Jahren überwiegt die Wüstenbildung. Nach einer Schätzung der FAO werden jährlich weltweit 150.000 km<sup>2</sup> Wald illegal gerodet [70].

Besonders bedrohlich für die Gesellschaft ist, daß die Regenwälder in steigendem Tempo vernichtet werden. Diese beherbergen nicht nur den größten Teil der irdischen Pflanzen- und Tierarten, sondern kühlen die Biosphäre durch Wolkenbildung, Bodenabschattung und Entzug von Verdunstungswärme [1-181].

Diese Eingriffstiefe erhöht die Verantwortung des Menschen für die Bewohnbarkeit des Erdballs. Offensichtlich ist der Natur eine Tendenz immanent, überall und immer – trotz aller Naturkatastrophen – die Komplexität ihrer Systeme zu erhöhen, d.h. Leben zu schaffen, Leben gedeihen zu lassen und zu verbreiten. Sich in diesen planetaren Strom bewußt einzuordnen, für diese Aufgabe tätig zu sein, das ist der Sinn menschlichen Lebens. „Das Wesen des Guten ist: Leben erhalten, Leben fördern, Leben auf seinen höchsten Weg bringen... Das Grundprinzip der Ethik ist also Ehrfurcht vor dem Leben“ [71].

#### 4.3.4 Der anthropogene Energiestrom

Alle fossil-nuclearen Energieflüsse führen direkt oder indirekt, also nicht allein infolge der CO<sub>2</sub>-Emissionen, zu mehr oder weniger großen Störungen des irdischen Ökosystems.

*Die anthropogene Verminderung biologischer Arten scheint sich als ein wichtiger Hinweis für die technisch-zivilisatorische Überbelastung der natürlichen Systeme herauszustellen.*

Der anthropogene durchschnittliche Wärmeenergiefluß<sup>11</sup> scheint sich als Kausal- und Kenngröße für das Ausmaß der Biosphärenbelastung zu eignen. Für Mitteleuropa wurde eine diesbezügliche Grenzbelastung von 0,16 W/m<sup>2</sup> empirisch ermittelt – ein erstaunlich niedriger Wert, denn die in Deutschland im Mittel am Boden auftreffende Sonnenstrahlung entspricht 116 W/m<sup>2</sup>, und die in Biomasse fixierte Sonnenenergie beträgt 0,65 W/m<sup>2</sup>. Der anthropogene, ökologisch maximal verträgliche Wärmestrom darf also schätzungsweise ein Viertel der in der Biomasse fixierten Sonnenenergie nicht übersteigen. Daraus läßt sich eine Grenzbelastung für die globale anthropogene Energieemission von 8 TW extrapolieren [9-161]. Der Welt-Primärenergieverbrauch betrug 2002 aber bereits 13,6 TW [72]. Wie erwähnt, hatte Bernal schon 1958 die Existenz einer derartigen Grenzgröße vermutet.

#### 4.3.5 Die Technik des Ökozeitalters

Zwischen der Energietechnik des Ökozeitalters und der fossil-nuclearen Epoche besteht ein Wesensunterschied, und dieser ist essentiell für das Überleben der Menschheit:

- Die Nutzung der fließenden Naturenergien verändert an der Energiebilanz des Erdballs nichts. Langfristig und global betrachtet, wird den natürlichen Kreisläufen weder etwas entnommen noch hinzugefügt.
- Die Nutzung fossil-nuclearer Energien dagegen ist naturgesetzlich damit verbunden, daß den natürlichen Strömen anthropogene Energie- und Stoffströme *hinzugefügt* werden – Belastungen des komplexen Systems Geosphäre, deren Folgen nicht abzuschätzen sind.

Der Mensch braucht eine Technik, die so weit wie möglich nach den Prinzipien der Natur aufgebaut und menschengemäß ist. Heute aber wird er immer häufiger Opfer seiner Eingriffe. Die Forderungen an die chemischen Verfahren der Zukunft verdeutlichen, was gemeint ist: Die Arbeitstemperatur sollte nahe der Umgebungstemperatur liegen, organische Lösungsmittel sollten

---

11 Energie/(Zeit·Fläche) = Leistung/Fläche

durch wäßrige Reaktionsmedien ersetzt werden, die Prozesse sollten drucklos, frei von stofflichem und energetischem Abfall, ungefährlich, geräuscharm, fehlertolerant und resilient sein.

Unter Resilienz wird in der Systemtheorie die robuste Flexibilität gegen Störungen verstanden. Als Metapher dafür wird das Stehaufmännchen bemüht, das nach einem äußeren Anstoß die Störung auspendelt und dann seine Ausgangslage wieder einnimmt. Ein Kernkraftwerk mit seinen latenten Verstärkungsfaktoren jedoch verhält sich ähnlich einem mit „Nitroglycerin“ gefüllten Stehaufmännchen.

Die obigen Richtlinien sind sinngemäß auf die *gesamte* Technik anzuwenden. Manches spricht dafür, daß in der Stoffproduktion des Ökozeitalters die harte Chemie der Gegenwart durch eine solargestützte, intelligente Bionik und Biotechnologie abgelöst sein wird, die dann von sich aus weitgehend ökologischen Vorgaben entsprechen. „Aktuell erfährt die Nutzung moderner biotechnologischer Methoden für industrielle Produktionsprozesse unter dem Begriff „Weisse Biotechnologie“ einen enormen Schub“ [73].

Nach derartigen Vorgaben hat sich selbstverständlich auch jegliche Ökotechnik zu richten. Es ist ein Hohn, „Bio“-Kraftstoffe zu feiern, wenn für die Produktion ihrer Rohstoffe (Palmöl, Sojaöl) Regenwald vernichtet wird – ein international expandierendes Geschäft – und die steigenden Preise für das Hauptnahrungsmittel Lateinamerikas, den Mais<sup>12</sup>, die Armen in den Hunger treiben [74].

## 5. Gegenwartsaufgaben

„In der Zeit der industriellen Revolution war die vielleicht wichtigste Katastrophe die enorme Zunahme an wissenschaftlicher Arroganz.“ (Gregory Bateson)

Die Fossil-Ära, die Zeit von der ersten Industriellen Revolution bis heute, war eine Ära, in der sich die Menschheit, hauptsächlich unter dem Einfluß der modernen Naturwissenschaft, aus dem universalen Zusammenhang zu lösen suchte. Die Hauptvoraussetzung des Übergangs zum ökologischen Zeitalter ist eine „Horizontenerweiterung“ unseres Denkens auf kosmische Dimensionen. „Die Lehre... lautet, daß es uns gelungen ist, eine derart astronomische Distanz zwischen dem, was wir tun, und den Konsequenzen unseres Tuns zu legen, daß die Verbindung einfach verlorenging. Konkretes Beispiel sind Bomberpiloten...“ [75].

Selbstverständlich ist es Aufgabe der Bürgergesellschaft, energisch Gesetze zu fordern, die möglichst schnell und weitgehend Voraussetzungen für das Ökozeitalter schaffen. Jedoch wird es ohne eine ökologische Welt-Ethik auf Dauer keine Weltökologie geben. Gelingt es andererseits, diese Ethik zu verinnerlichen, wird von ihr ein „freiwilliger Zwang“ zum ökologischen Denken und Handeln ausgehen, der strenger und damit wirksamer sein wird als alle gutgemeinten Appelle. Es ist hohe Zeit zu erkennen, daß die Philosophie und Praxis des autarken Erdballs, daß die Überheblichkeit gegenüber der Natur und die aus dieser Geisteshaltung resultierende Technik in eine Sackgasse geführt haben. Dieser Weg muß verlassen werden, anstatt sich an dessen Auswirkungen zu gewöhnen oder gar zu begeistern. Die aus dem alten Paradigma geborenen großtechnischen Vorhaben, wie vor allem die jeglicher Kernenergietechnik, sind aufzugeben.

Die gesellschaftliche Schöpferkraft ist auf den Aufbau eines ökologischen Sozialismus zu konzentrieren. Nur wenn wir ernsthaft und aktiv anstreben, Sonne und Erde für uns wirken zu lassen,

---

12 Rohstoff für Bioethanol, hauptsächlich gefragt von den USA für die dortigen Kraftfahrzeuge.

wenn wir erreichen, daß Ehrfurcht vor dem Leben die denk- und verhaltens-bestimmende Maxime wird, eröffnet sich eventuell die Aussicht, die Geschwindigkeit der anthropogenen Entropieerhöhung auf das unvermeidliche Mindestmaß zu drosseln.

Die wissenschaftliche Ausbildung muß auf folgendem Leitbild beruhen: Die Verantwortung des Wissenschaftlers für die Gesellschaft als Gebot einer globalen ökologischen Ethik hat absoluten Vorrang vor der „göttlichen Neugier“, dem „Elitebewußtsein“ und dem „Korpsgeist“.

Die künftige Gesellschaft der Freiheit, Gleichheit und Brüderlichkeit wird ein Sozialismus selbstorganisierter, föderaler und regionalisierter Gemeinschaften sein, die sich in jeder Hinsicht von dem kapitalistischen Gesellschaftssystem unterscheiden, in dem aber auch heutige Sozialisten nicht ohne weiteres bereit wären, Sozialismus zu erkennen.

Gegenwärtig ist nötig, eine Denkarbeit zu organisieren, um die nicht länger zu ignorierenden Geistesströme in Richtung Basisdemokratie, Anarchie, Absterben des Staates, Gewaltfreiheit, Regionalisierung und Aufbau einer ökologischen Energiebasis zusammenzuschauen und kritisch zu integrieren, wobei die Erkenntnisse der Theorie komplexer Systeme zugrunde zu legen sind. Das Ziel dieser kollektiven Anstrengung muß darin bestehen, umsichtig und schrittweise eine Theorie der künftigen Gesellschaft wie auch der Mechanismen des Übergangs zu dieser herauszuarbeiten.

Das gegenwärtige Gesellschaftssystem ist erwiesenermaßen nicht in der Lage, die sich verschärfenden ökologischen Gefahren zu bannen, vielmehr produziert es zusätzliche. Der Weg aus dem kapitalistischen Jetzt in das nichtkapitalistische Übermorgen ist selbst bei denen, die eine andere Welt wollen, umstritten – aber in einem sollte unter ihnen Einvernehmen herrschen: Nur die fließenden Quellen der Natur können der Menschheit eine nachhaltige Energieversorgung gewährleisten, weil allein sie unerschöpflich und menschengemäß sind. Die dementsprechende Forderung von Wilhelm Ostwald von 1906 ist heute Tagesaufgabe, und die Tätigkeit auf diesem Feld ist Arbeit an der Zukunft. Der Ökoenergietechnik entspricht in der Gesellschaftsorganisation die dezentral strukturierte Basisdemokratie.

Die ökologisch bestimmten „Solarier“ versprechen damit nicht das Paradies. Unter den Bedingungen einer weiter wachsender Erdbevölkerung eine grundsätzlich neuartige und nachhaltige Energie- und Produktionstechnologie einzuführen – das läßt auch neue große Probleme und scharfe Widersprüche erwarten, die in zukunftsfähiger Weise nur durch die kooperative Konstruktivität der ganzen Menschheit zu lösen sind. Eine Jahrhundertaufgabe (Hermann Scheer) – integrierend, mobilisierend und human, aber, und das darf nicht verschwiegen werden: Es „...ist das Einfache, das schwer zu machen ist“ [76]. Die Komplexität der gesellschaftlichen Systeme verbietet, diese Aufgabe „Experten“ zu überlassen. Der unerschöpfliche geistige Reichtum der Gesellschaft, ihre „kollektive Weisheit“, muß zum Zuge kommen.

Voraussetzung allerdings für den Erfolg einer Weltökologie ist Weltfrieden. Der ökonomische, politische, militärische und psychologische Krieg des Nordens gegen den Süden ist zu beenden, und den Menschen in der „Dritten Welt“ sind ihre sozialökonomischen Menschenrechte zu garantieren. Eine Politik gemäß einer Strategie „Ökologie für den Norden – Cruise missiles, Abu Ghraib und Guantánamo für den Süden“ ist unmoralisch und darf nicht länger geduldet werden. Sie würde „Ökologie“ als ein feindliches Projekt des reichen Westens in Verruf bringen. Ökologie und globale soziale Gerechtigkeit können nur unauflösbar verbunden miteinander zur Wirkung gebracht werden – wie es in einem holonischen Netz auch anders nicht sein kann. „Ökologie“ bleibt ein nichtssagender, eventuell als neokolonialistisch verstandener Begriff für Menschen, denen die Kinder Jahr für Jahr an Hunger und Armutskrankheiten wegsterben.

Die seit Jahrzehnten wachsende Spaltung der Menschheit muß aufgehalten und Solidarität der Leitfaden internationaler Politik werden. Dabei stehen die reichen Industriestaaten unter dem moralischen Druck einer jahrhundertalten Bringschuld. Allerdings bewegt sich die Politik der großen Machtblöcke in die entgegengesetzte Richtung, was von kompetenten Autoren in bedrückender Weise beschrieben worden ist [77].

1999 verhungerten 36 Millionen Menschen, etwa 100.000 pro Tag. „Kaum jemand spricht über diesen Völkermord“ [78].

Abschließend zwei Einschätzungen zu der historischen Stellung der behandelten Frage:

„Ein Regime erneuerbarer Ressourcen mit den dazu passenden sozialen Formen bedeutet auf jeden Fall das Ende des Kapitalismus wie wir ihn kennen“ [79]. „Daher geht es um eine Radikalisierung der Fragestellung, die schon Rosa Luxemburg aufgeworfen hatte: Sozialismus oder Barbarei. ... Das ist kein einmaliges Ereignis der Machtergreifung (des „Sturms auf das Winterpalais“), sondern eine langfristig angelegte Veränderung aller Arbeits- und Lebensformen im Zusammenhang mit der Nutzung erneuerbarer Energien...Eine „solare Revolution“...ist eine Kulturrevolution und die solare Weltwirtschaft wird nur entstehen, wenn ihr eine solare Kultur zuwächst“ [80].

„Insgesamt ergibt sich aus dem entfesselten globalen Kapitalismus, daß bei ungebrochener Fortführung der gegenwärtig dominierenden Tendenzen die für die Zukunft der Menschheit wichtigsten Probleme und Herausforderungen ungelöst bleiben, sich noch mehr zuspitzen und letztlich die Zukunft der Menschheit gefährden. Damit erhalten Alternativen zu den gegenwärtig dominierenden Entwicklungstendenzen eine wachsende Bedeutung“ [81].

## Literatur

- [1] James Lovelock, „GAIA: Die Erde ist ein Lebewesen“, Wilhelm Heyne Verlag, München 1996, 191 S.
- [2] Plinius der Ältere (24-79)
- [3] Friedrich Engels, „Dialektik der Natur“, Dietz Verlag, Berlin 1952, S. 264
- [4] Gert Blumenthal, Dietrich Spänkuch, Stellungnahme „Zur ökologischen Transformation“, Solarzeitalter 16, 3 (2004), 6-9 und Thesen „Zur ökologischen Transformation“, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 68 (2004) 165-173
- [5] James Frazer Kasting, „Finale für das Leben“, Bild der Wissenschaft, 11 / 2000, S. 48
- [6] Werner Ebeling, Jan Freund, Frank Schweitzer, „Komplexe Strukturen: Entropie und Information“, B. G. Teubner, Stuttgart/Leipzig 1998, S. 18/19
- [7] Jean-Marie Lehn, „Supramolecular Chemistry – Concepts and Perspectives“, VCH, Weinheim 1995, S. 202
- [8] Peter Kafka, <http://www.peterkafka.de/loader.php?pid=8>
- [9] Hans-Peter Dürr, „Die Zukunft ist ein unbetretener Pfad“, Verlag Herder, Freiburg im Breisgau 1995, S. 105
- [10] Gerhard Neuweiler, „Die dynamische Synapse“, Naturwissenschaftliche Rundschau 59, 12 (2006), 641-650
- [11] DIE WELT.de, 2. Mai 2006
- [12] John Briggs, F. David Peat, „Die Entdeckung des Chaos“, Deutscher Taschenbuch Verlag, München 1997, S. 211
- [13] Gerd Lassner, „Gott würfelt nicht“, Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e. V., Schloß Augustusburg, September 2003, S.8

- [14] Colin C. Adams, „Das Knotenbuch – Einführung in die mathematische Theorie der Knoten“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford 1995; Louis Kauffman, „Knots and Physics“, World Scientific Singapore 1991
- [15] Eshel Ben-Jacob, „Die Klugheit der Bakterien, Gödels Theorem und kreative genomische Netze“, 01.06.1998; <http://www.telepolis.de/r4/artikel/2/2364/1.html> , 12 S.
- [16] Howard Bloom, „Bakterienkolonien und kollektives Gehirn“, 04.03.1997; <http://www.telepolis.de/r4/artikel/2/2115/1.html>, 4 S.
- [17] Humberto R. Maturana und Bernhard Poerksen, „The second creation“, 24.10.2004; <http://www.telepolis.de/english/inhalt/co/18611/1.html>
- [18] Franz Halberg et al., „Cross-spectrally coherent ~10,5- and 21-year biological and physical cycles, magnetic storms and myocardial infarctions“, *Neuroendocrinology Letters* 2000, 21, 233-258; Franz Halberg et. al., Messung und chronobiologische Auswertung der Variabilitäten von Blutdruck und Herzfrequenz zur Prophylaxe schwerwiegender Krankheiten, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 54, 2002, 3, 127-156
- [19] Per Bak, K. Chen, „Self-organized criticality“, *Scientific American*, January 1991, S. 26
- [20] Klaus Richter, Jan-Michael Rost, „Komplexe Systeme“, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main 2002, S. 56
- [21] H. O. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe, E. Maletsky, T. Perciante, L. Yunker, „CHAOS“, Springer-Verlag und Ernst Klett Schulbuchverlag 1992, S. 54
- [22] Gottfried Stiehler, „Felder von Möglichkeiten“, *junge Welt* 20./21. Mai 2006, S. 10
- [23] Paul Ambroise Valéry, zitiert in [20], Umschlagseite
- [24] Robert Havemann, „Einführung in die chemische Thermodynamik“, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957, S. 164
- [25] Hubert Laitko, „Theoria cum praxi – Anspruch und Wirklichkeit der Akademie“, Leibniz-Tag 2000 der Leibniz-Sozietät am 29.06.2000
- [26] Arthur Koestler, „Janus“, Pergamon, Oxford 1978.
- [27] Gottfried Stiehler, „Macht und Grenzen des Subjekts. Politisch-philosophische Essays“, PapyRossa Hochschulschriften 65, Köln 2006, 153 S.
- [28] Eugen Peter Odum, „Ökologie – Grundlagen, Standorte, Anwendung“, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1999, S.1
- [29] Geseko von Lüpke, „Das systemische Weltbild“, in: „Tiefenökologie“, Eugen Diederichs Verlag, München 1995, 85-95
- [30] Francis Heylighen, „Vom World Wide Web zum globalen Gehirn“, 12.08.1996; <http://www.telepolis.de/r4/artikel/6/6060/1.html>
- [31] Lynn Margulis, „Die andere Evolution“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/ Berlin 1999, 180 S. Die Autorin war an der Ausarbeitung der GAIA-Hypothese von James Lovelock maßgeblich beteiligt.
- [32] Reinhard Piechocki, „Biologie“, *Naturwissenschaftliche Rundschau* 60, 1 (2007) 53-54
- [33] Franz-Theo Gottwald, „Zur Geschichte der Tiefenökologie“ in „Tiefenökologie“, Eugen Diederichs Verlag, München 1995, S. 22
- [34] „Ökologie“, „Der Brockhaus Naturwissenschaft und Technik“, Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim/Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2003
- [35] Rudolf Sizmann, „Solarchemisches Potential der Sonnenstrahlung“, in: „Solarchemische Technik“, Bd. 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg u. a. 1989, S. 47-94
- [36] Detlev Möller, „Luft“, Walter de Gruyter, Berlin/New York 2003, S. 125 ff.
- [37] Claus Bliefert, „Umweltchemie“, Wiley-VCH, Weinheim 2002, S. 132
- [38] „Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrg.), Berlin 2006, S. 24

- [39] Gerd Stadermann (Hrg.), „Wärme und Kälte – Energie aus Sonne und Erde“, Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie, 22.-23.09.2005 in Köln, 167 S. Einen stets aktuellen Überblick gewährt [www.FV-Sonnenenergie.de](http://www.FV-Sonnenenergie.de)
- [40] Wolfgang Fritsche, „Mikrobiologie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/ Berlin 1999, S. 78
- [41] Felix R. Paturi, „Die Chronik der Erde“, Chronik Verlag, Gütersloh 1996, S. 16
- [42] N. N. Greenwood, A. Earnshaw, „Chemie der Elemente“, VCH, Weinheim 1990: „Das Oklo-Phänomen“, S. 1609
- [43] Nach einer neueren Hypothese ist die Formierung des Erdballs mit der Bildung des Mondes abgeschlossen. Dessen Alter wurde in der bisher genauesten Messung zu  $(4.527 \pm 10) 10^6$  Jahre bestimmt:  
Thorsten Kleine, Herbert Palme, Klaus Mezger, Alex N. Halliday, „Hf-W Chronometry of Lunar Metals and the Age and Early Differentiation of the Moon“; <http://dx.DOI.org/10.1126/science.1118842>, 09.12.2005, zitiert in Neues Deutschland, 03./04.12.05, S.23
- [44] A. J. Oparin, „Die Entstehung des Lebens auf der Erde“, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957, S. 256 ff.
- [45] Jean-Marie Lehn, „Supramolecular Chemistry: from molecular information towards self-organisation and complex matter“, Reports on Progress in Physics 67 (2004) 249-265
- [46] Gottfried Anger, Helmut Moritz, „Inverse Problems and Uncertainties in Science and Medicine“, schriftliche Privatmitteilung 2003
- [47] Manfred Eigen, „Charles Darwin und die moderne Biologie“, Meyers Grosses Universallexikon, Bd. 2, Bibliographisches Institut, Mannheim 1981, S. 456
- [48] Zitiert in: David J. Chalmers, „Das Rätsel des bewußten Erlebens“, Spektrum der Wissenschaft, Digest Rätsel Gehirn, 3/2002, 19
- [49] Gustav Kortüm, „Einführung in die Chemische Thermodynamik“, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1949, S. 3
- [50] Kurt Schwabe, Physikalische Chemie, Bd. 1, Akademie-Verlag, Berlin 1975, S. 487
- [51] Wolfgang Kaim, Brigitte Schwederski, „Bioanorganische Chemie - Zur Funktion chemischer Elemente in Lebensprozessen“, 4. Auflage, B. G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage, Wiesbaden 2005, S. 10
- [52] Michael Russell, „Der heiße Ursprung des Lebens“, Spektrum der Wissenschaft, Januar 2007, 74-81
- [53] Thomas Gold, „Das Jahrtausend des Methans“, ECON Verlag, Düsseldorf 1988, S. 33, 193, 205
- [54] Günter Wächtershäuser, „Evolution of the first metabolic cycles“, Proc. Natl. Academy Sci. USA 87, Jan 1990, 200-204 und „Life as We Don't Know It“, Origin of Life 289, Nr. 5483, 25 Aug 2000, 1307-1308
- [55] The Cardiff Centre for Astrobiology; <http://www.astrobiology.cf.ac.uk> Florian Rötzer, „Die Ausbreitung des Lebens im Weltraum“; <http://www.telepolis.de/r4/artikel/16/16726/1.html>
- [56] Jürgen Oberst, DLR, mündliche Mitteilung 2006
- [57] Timothy Vogel, Pascal Simonet, „New Scientist“, (2004) Nr. 2469, S. 17; Susanne Härpfer, „Blitze schaffen neues Leben“, Neues Deutschland, 23./24. September 2006, S. 23
- [58] „Aus Lehm geformt...“, Nachrichten aus der Chemie, 51, Dezember 2003
- [59] Howard Bloom; „Vernetzung im ‚finsternen Mittelalter‘ der Paläontologie“; 14.04.1997, S. 5; <http://www.heise.de/tp/r4/html/result.xhtml?url=/tp/r4/artikel/2/2126/1.html&words=Howard%20Bloom>
- [60] Klaus Meyer, „Physikalisch-chemische Kristallographie“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1977, 324-345

- [61] Peter-Adolf Thiessen, Klaus Meyer, Gerhard Heinicke, „Grundlagen der Tribochemie“, Abhandl. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Akademie-Verlag, Berlin 1967
- [62] Harald Zaun, „Mars – Planet des Todes“, 14.08.2006; <http://www.telepolis.de/r4/artikel/23/23321/1.html>
- [63] Stefan Rahmstorf, Hans Joachim Schellnhuber, „Der Klimawandel“, Verlag C. H. Beck München 2007, 144 S.
- [64] Gordon W. Gribble, „Umweltgifte vom Gabentisch der Natur“, Spektrum der Wissenschaft Juni 2005, 38-45
- [65] James Lovelock, „Gaias Rache. Warum die Erde sich wehrt“, List-Verlag 2007
- [66] Hermann Scheer, „Atomenergie oder Erneuerbare Energien? Oder: Wer ist Godot?“, Solarzeitalter 4/2006, 3-8
- [67] Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, „Die neuen Grenzen des Wachstums“, Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart 1992, 319 S.
- [68] John Desmond Bernal, „Welt ohne Krieg“, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960, S. 86
- [69] Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amory B. Lovins, L. Hunter Lovins, „FAKTOR VIER“, Droemersch Verlag Th. Knauer Nachf., München 1997, S. 263, 267
- [70] „Isotopenanalyse erkennt illegal gerodetes Holz“, [www.News-Report.de](http://www.news-report.de), 24.03.06; [http://www.news-report.de/nachricht/Umwelt/1143215483/Isotopenanalyse\\_erkennt\\_illegal\\_gerodetes\\_Holz.html](http://www.news-report.de/nachricht/Umwelt/1143215483/Isotopenanalyse_erkennt_illegal_gerodetes_Holz.html)
- [71] Albert Schweitzer, „Die Lehre der Ehrfurcht vor dem Leben“, Union Verlag Berlin 1963, S. 30
- [72] BMU „Umweltpolitik“ Juni 2005, S. 33 und 43
- [73] Weiße Biotechnologie – Erfolgsstrategie für eine nachhaltige Chemieindustrie, Kongreß 21./22. Februar 2005, Berlin; <http://www.weisse-biotechnologie.net/>
- [74] Ralf Streck, „Tortilla-Krise in Mexiko“, 29.01.2007; <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/24/24543/1.html>
- [75] Joseph Weizenbaum, „Kritisches Denken ist das Gegenteil von Internetsurfen“, junge Welt 23./24. September 2006, S. 1
- [76] Bertolt Brecht, „Lob des Kommunismus“ in „Hundert Gedichte 1918–1950“, Aufbau-Verlag Berlin 1958, S. 251
- [77] William Blum, „Schurkenstaat“, Kai Homilius Verlag Berlin 2006, 367 S.
- [78] Jean Ziegler, Berliner Urania, Neues Deutschland 26. Oktober 2000
- [79] Elmar Altvater, „Ende des Kapitalismus, wie wir ihn kennen“, Verlag Westfälisches Dampfboot, Münster 2006
- [80] Elmar Altvater, „Aufstieg und Niedergang des fossilen Energie-Regimes“, Solarzeitalter 3/2004, S. 19
- [81] Klaus Steinitz, „Chancen für eine alternative Entwicklung“, VSA-Verlag Hamburg 2005, S. 82

1. Fassung [19.03.07]

hier: 2., aktualisierte Fassung [12.05.07]

Anschrift des Autors:

Dr. sc. nat. Gert Blumenthal  
Salzmannstr. 31  
D – 10319 Berlin