Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *90(2007), 51–83*

Gert Blumenthal

Die Sonne und GAIA[1]

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 RA, 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]. Dementsprechend will der vorliegende Text ergänzen. Außerdem sollen die vor zwei Jahren erschienenen Thesen „Zur ökologischen Transformation" [4] – seinerzeit mehrheitlich zustimmend aufgenommen – hier tiefer und umfassender begründet werden.

Will man das Wesen der solaren Einwirkung auf den Erdball verstehen, kann das nur auf der Grundlage der komplexen Systeme geschehen.

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, wenn die Anzahl der Ebenen

1 Erweiterte Fassung eines Vortrags auf der 3. Leibniz-Konferenz „Solarzeitalter 2006", Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien, Lichtenwalde, 11.–13. Mai 2006. Eine ausführlichere Darstellung dieser Thematik wurde veröffentlicht unter www.leibniz-institut.de. Für Hinweise und Diskussionen dankt der Autor den Herren Prof. Dr. Gerhard Öhlmann und Dr. Peter Starke.

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.“ [5]

Jean-Marie Lehn, Chemienobelpreisträger 1987, komprimiert seine Beschreibung komplexer Systeme zu einer Gleichung [6], die der folgenden Einführung zugrunde gelegt wird:

Complexity = (Multiplicity) (Interaction) (Integration)

2.1.1 Vielfalt

Unter „Vielfalt“ ist nicht die Vielfalt des Uniformen zu verstehen. Ein komplexes System muß eine Vielfalt der Variabilität aufweisen. Wesentlich für ein komplexes System ist also nicht vorrangig die Vielfalt der Objekte, sondern vielmehr die der Beziehungen zwischen diesen. Vielfalt ist als eine Ressource in der Entwicklungsgeschichte aufzufassen. Biodiversität trägt auch das menschliche Dasein. Wo Vielfalt vernichtet wird, werden Wege in die Zukunft versperrt. Vielfalt verleiht Flexibilität und dadurch Stabilität.

In der Realität jedoch geht ein katastrophales Artensterben vor sich. Von den 40.000 Tier- und Pflanzenarten der Roten Liste sind 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 [7]. Es ist das schnellste Artensterben, das auf dem Globus je stattgefunden hat, und es ist das erste in Anwesenheit des Menschen. Die Folgenschwere dieser sechsten Extinktion wird meist unterbewertet, weil sie nahezu unmerklich, meist nur von Fachleuten beobachtet, vor sich geht. Vielleicht jedoch ist diese durch den Menschen verursachte Extinktion überhaupt die gefährlichste Bedrohung der Gesellschaft.

2.1.2 Wechselwirkungen

Komplexe Systeme sind meist netzartig aufgebaut, und es scheint, daß das Netz das allgemeine und skaleninvariante Bauprinzip natürlicher Systeme ist. Vermutlich prägt das Netz des Universums seine Organisationsprinzipien allen anderen evolvierenden Systemen auf. „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“ [8]. Cyanobakterien, die Erbauer der Stromatolithen, sollen schon vor vier Milliarden Jahren derartige Netze

hervorgebracht haben. Diese Netze seien kommunikativ, adaptiv und kreativ und hätten das Potential eines kollektiven Gehirns [9]. „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.“ [10]

Die Betonung der Wechselwirkung verschiebt allgemein die Bedeutung vom einzelnen „*Objekt*“ zu den „*Zusammenhängen*“. Nach G. Bateson sollte jedes Ding nicht durch das definiert werden, was es an sich ist, sondern durch seine Zusammenhänge mit anderen Dingen – eine Denkweise, die ein neues wissenschaftliches Paradigma widerspiegelt.

Wechselwirkung in natürlichen Systemen heißt, daß sich in ihnen alles ständig verändert. Das ist das „panta rhei“ des Heraklit. Immerwährende Bewegung ist eine existentielle Bedingung für komplexe Systeme. 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 [11] – eine verblüffende Konvergenz von moderner Wissenschaft und alter östlicher Philosophie: Der ewige Kreislauf als die Grundanschauung des Buddhismus. 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 durch die Sonne. Dabei erscheint als vorherrschende Art der Bewegung das Pulsieren. Netze pulsieren in Rhythmen auf der ganzen Zeitskala von Millisekunden bis zu Äonen, von Herzschlägen bis zur Sternenbildung. Zu tieferen Einsichten hat die Chaosforschung verholfen, die viele derartiger Rhythmen als chaotisch erkannte, z.B. den Herzschlag, die Frequenz der Tropfen aus einem Wasserhahn u.a.m.

Komplexe Systeme, also auch solche der Technik, weisen als ein zentrales Charakteristikum Historizität auf. Das bedeutet, daß die Zukunft nicht nur mit der unmittelbaren, sondern auch mit der ferneren Vergangenheit korreliert ist. Damit ist die „Offenheit der Zukunft“ relativiert und die politische Zweckthese vom „Ende der Geschichte“ auch wissenschaftlich widerlegt.

Komplexe Systeme können in der Dynamik ihrer Selbstorganisation das qualitativ Neue hervorbringen – die sogenannte Emergenz. Emergenz ist ein weiterer für die Charakterisierung komplexer Systeme zentraler Begriff. Er taucht in Systemen unterschiedlichster Natur und Dimension auf, z.B. in den funktionalen Zusammenhängen von Lawinenabgängen, Erdbeben und Aktienmärkten, aber auch in der Informationstheorie und der Ästhetik – ein Be-

griff also von hoher Allgemeinheit, folgend aus einem noch nicht erkannten universellen Prinzip. Emergenz kann auch relativ sprunghaft auftauchen, wenn sich nämlich zwei Subsysteme vereinigen – so, wie es die Symbiogenese für die Entstehung einer neuen Art postuliert [21-18] [2].

Die Auffassungen zweier Physiker widerspiegeln die Dynamik in der Erforschung 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. Das ist die Tendenz der Selbstzerstörung.

Aus derartigen Feststellungen sollten Entscheidungskriterien für die Entwicklung jeglicher Großtechnik abgeleitet werden: Komplexe Systeme sind auf lange Sicht grundsätzlich nicht beherrschbar. Wenn ein Naturwissenschaftler angesichts dieser systemtheoretischen Erkenntnisse sowie der seit etwa einem halben Jahrhundert vorliegenden einschlägigen Negativerfahrungen eine Sicherheitsgarantie für die Kernenergietechnik von mindestens 1.500 Jahren ausstellt, verrät das eine statische Denkweise, die den Realitäten eines komplexen Systems nicht adäquat ist.

Ursache und Wirkung

Es gibt in Natur und Gesellschaft kaum eine einzelne Ursache, die, in klassischer Determiniertheit, nur eine einzige Wirkung zur Folge hat. Nachdem man eine Wirkung beobachtet hat, muß man nach den „Geschwisterwirkungen" suchen. Manche von denen können erst mit Verzögerung eintreten, so daß man den Zusammenhang gar nicht mehr erkennt.

Andererseits ist fast jede Wirkung in komplexen Systemen die Resultante mehrerer Ursachen. Derart vernetzte Ursachen können zeitlich weit auseinander liegen. Es entstehen dann gleichsam aufgeladene Spannungszustände, die sich zu einem unvorhersehbaren Zeitpunkt durch einen „Trigger", entladen können.

Die disziplinübergreifende Wirkmächtigkeit systemtheoretischen Denkens läßt sich in einer neueren Arbeit von Stiehler erkennen: „Eine gesellschaftliche Erscheinung, ein historisches Ereignis ist nie Resultat nur einer

2 Das bedeutet: [Nummer der Literaturstelle-Nummer der Seite in der Literaturstelle]

Ursache, sondern eines Komplexes bewirkender Faktoren, die ihrerseits einen Raum von Möglichkeiten bilden, innerhalb dessen Wechselwirkungen unterschiedlicher und gegensätzlicher Momente stattfinden.“ [12]

Komplexität und Entropie

Der Entropiebegriff hat längst seinen Ursprungsbereich, die Gleichgewichts-Thermodynamik, 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.

Die statistische Entropie wird häufig als das Maß der Unordnung bezeichnet [5-16]. 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 schon, wenn ein Dichter bereits vor sechzig Jahren einen Schluß zog, der heutigen Erkenntnissen der Systemtheorie entnommen sein könnte: „Zwei Gefahren bedrohen beständig die Welt, die Ordnung und die Unordnung.“ [13]

Schon aus der oben erwähnten Beziehung zwischen Entropie und Komplexität wird ersichtlich, daß die Boltzmann-Entropie $S = k \cdot \ln W$ nicht direkt als Maß der Komplexität übernommen werden kann, sondern eine Verallgemeinerung des Entropiebegriffs vorzunehmen ist [14] [5-24]. Hatte Robert Havemann derartiges im Sinn, als er schrieb: „Ganz offensichtlich ist der Entropiesatz innerhalb einer noch allgemeineren Gesetzmäßigkeit der Natur – im dialektischen Sinne – aufgehoben,…“ [15]?

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 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 [5-21].

2.1.3 Integration

In dem Faktor „Integration“ kommt zunächst einmal die Ganzheit des Systems zum Ausdruck. Jedes Element beeinflußt alle anderen, wenn auch meist nur indirekt. Kein Bestandteil des Systems kann entfernt oder verändert

werden, ohne das System zu verändern. Für ein holistisches System gibt es kein „Außerhalb“.

Ein komplexes System ist mehr als die Summe seiner Elemente. Dieses „Mehr“ resultiert aus der Struktur, der Organisation sowie vor allem aus dem Netz der Wechselwirkungen. Einer der Gründe für die Schwierigkeiten im Umgang mit komplexen Systemen besteht darin, daß man sie nicht dadurch verstehen kann, daß man ihre Einzelteile studiert. Die Analyse ist untauglich für die Untersuchung komplexer Systeme. Die gesamte bisherige Naturwissenschaft aber beruht 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 zu Fehlaussagen. Es scheint, daß manche aktuellen Meinungsverschiedenheiten in der Wissenschaft auch aus Betrachtungsweisen unterschiedlichen Komplexitätsgrades herrühren.

Andererseits bezeichnet der Faktor „Integration“ die relativen Begrenzungen des Systems, die dessen Individualität ausmachen. 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. Es wurde von der „Janusköpfigkeit“ der Evolution gesprochen [16].

Gemäß den Gesetzen komplexer Systeme entwickelt sich die Struktur des Universums, das Netz der Galaxien von der Singularität bis in alle Zukunft, und ebenso die Selbstorganisation des Lebens im Universum.

Die Wahrnehmung der komplexen Systeme wird unser Verständnis der Wirklichkeit, der Wissenschaft, der Gesellschaft und insbesondere unsere Vorstellungen von der Zukunft umwälzend verändern. Die Theorie komplexer Systeme wird voraussichtlich einen mächtigen Impuls auch auf die Weiterentwicklung des Marxismus ausüben [17].

Das historische Gewicht der Theorie komplexer Systeme entspricht dem Wort Albert Einsteins: „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.“

2.2 Die systemische Ökologie

Als ein praxiswirksames Ergebnis systemtheoretischen Denkens entstand die systemische Ökologie. 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“ [18]. Die Wissenschaft hat sich in den letzten fünfzig Jahren der ökologischen Weltsicht stufenweise angenähert [19], deren Kern die Idee der allseitigen, universalen Vernetzung ist – die Idee der Ko-Evolution. Deren Wesen ist das Miteinander, die Kooperation, der Synergismus, die Symbiose – im 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 [20].

Daß die evolutive Kooperation nicht ein Traum von Romantikern, sondern naturwissenschaftlich fundiert ist – dafür steht vor allem die inzwischen akzeptierte „Serielle Endosymbiose-Theorie“ (SET) [21]. Sie sieht in der Symbiogenese nicht einen zufälligen, unikalen Schritt in der Entwicklung der Bakterien, sondern ein allgemeines, bisher vernachlässigtes Wirkprinzip für die Entstehung neuer Arten. Expressis verbis wird hier die Position eines Neo-Lamarckismus vertreten: „Symbiogenese ist entwicklungsgeschichtlicher Wandel durch die Vererbung erworbener Genausstattungen“[21-18].

Die systemische Ökologie beeinflußt alle Ebenen menschlichen Daseins durch neue Fragestellungen und Forderungen – widergespiegelt im tiefenökologischen Wertekanon, eine grundsätzliche Kritik an dem bestehenden Gesellschaftssytem [22].

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 „Energieversorgung 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 dauernd Stoff, Energie, Syntropie und Information austauschen in ihrem unaufhörlichen Prozeß der Selbstorganisation.

Es gibt auf der Erde nur drei voneinander unabhängige und damit wirklich *primäre* Energiequellen: Die *Sonnenstrahlung,* die *Geothermie* und die *Gra-*

vitation (einschließlich der von Sonne und Mond). Daneben gibt es fünf Sekundärenergien, die überwiegend von der Sonnenstrahlung herrühren: Wind, Wasserkraft, Umgebungswärme, Meeresenergien (thermisch und kinetisch) und Biomasse.

Zu der Größenordnung dieser Energien existieren die folgenden Abschätzungen:

„In einem Jahr verbraucht die Menschheit so viel Energie, wie in 20 min von der Sonne auf der Erde ankommt.“ [23]

„Das gesamte jemals vorhandene Weltvorkommen an fossilen Brennstoffen…entspricht energiemäßig nur der Sonneneinstrahlung von etwa zwei Wochen“ [24].

„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.“ [25]

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 – fundamentaler 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 [26], 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 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 (Polumkehr, Meteoritenimpacte, Vulkanismus, Kaltzeiten).

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 direkt determiniert, sondern es ko-evolviert ein einheitliches System mit höchster Wechselwirkung und großer Aktivität – das komplexe System ist kreativ.

Phase I: Oberflächentemperatur 1500 °C bis 300 °C

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

- Sonnenstrahlung, chemisch besonders wirksam deren noch ungefilterter UV-Anteil,
- elektrische Entladungen (Blitze), wesentlich häufiger und energiereicher als heute,
- Wärme vulkanischer Laven mit Temperaturen bis schätzungsweise 1500 °C,
- Meteoriten-Impacte, die die Erdkruste lokal immer wieder aufschmolzen [27] und dort Temperaturen noch über 1500 °C erzeugten.
- Radioaktivität, die in der Urzeit dreimal so viel Energie als Wärme sowie ionisierende Strahlung übertrug wie heute, darunter auch die atmosphärische Radioaktivität des Radons, sowie Herde von natürlichen Kernspaltungsreaktionen [28].

Die Gesteinsschmelzen bilden dynamische chemische Systeme, die im wesentlichen Minerale sowie leichtflüchtige, niedermolekulare Verbindungen entstehen lassen, die zu einem großen Teil die primordiale (erste stabile) Atmosphäre bildeten. Deren Hauptbestandteile waren wahrscheinlich: Wasserdampf (ca. 80%), Kohlenstoffdioxid (ca. 17%), Chlorwasserstoff HCl (um 1,5%), ihre Nebenbestandteile Stickstoff, Schwefelwasserstoff H_2S, Schwefeldioxid SO_2, Fluorwasserstoff HF, Kohlenstoffmonoxid CO, Methan CH_4, Ammoniak NH_3, Wasserstoff H_2 und Argon Ar. Vielfältig waren die Reaktionen zwischen Gasen und Schmelze, z.B. mit der 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 durch Reaktion mit Wasserdampf unter Freisetzung von Wasserstoff.

Diese Atmosphäre war reduzierend und hätte Spuren freien Sauerstoffs, gebildet durch die Photolyse und Radiolyse des Wassermoleküls, sofort gebunden. Unter diesen Bedingungen waren also thermisch, photo- und strahlenchemisch getriebene Oxidationsreaktionen, mit Wasser, CO_2 und Metalloxiden als Oxidatoren, über Jahrmillionen möglich, ohne daß freier Sauerstoff existierte. Der Urey-Effekt (die Abschirmung der solaren UV-Strahlung durch O_2-Moleküle) hätte in diesem Zeitabschnitt also gar nicht wirksam werden können.

Eine analoge Annahme liegt auch den vor etwa fünfzig Jahren durchgeführten Versuchen von Stanley L. Miller zugrunde, in denen ein gasförmiges Ausgangsgemisch von Wasser, Ammoniak NH_3, Methan CH_4 und Wasserstoff H_2 elektrischen Entladungen ausgesetzt wurde [23-23]. In derartigen Versuchen mehrerer Autoren wurde eine beträchtliche Anzahl auch komplizierter organischer Moleküle nachgewiesen – möglicherweise 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 dieser ersten, abiotischen Periode mit ihren unphysiologischen Verhältnissen (z.B. den sehr hohen Temperaturen, der Abwesenheit von freiem Sauerstoff und flüssigem Wasser, der hochenergetischen Strahlung) eine Vielfalt auch organischer Verbindungen entstanden ist, zu denen primär die einfachen Moleküle Formaldehyd HCHO und Cyanwasserstoff HCN zählten. Die Bedeutung des Cyanwasserstoffs zeigt eventuell die stöchiometrische Entsprechung 5 HCN = Adenin $C_5N_5H_5$ – selbstverständlich nicht beweisend für diese Genese.

Dieser primären chemischen Welt haftet hinsichtlich ihrer Entwicklungspotenz allerdings ein Nachteil an: All diese Moleküle liegen verdünnt in der Gasphase vor, eine wässrig-flüssige Phase existiert noch nicht, und die Festkörpergrenzflächen sind noch so heiß, daß sie nur wenige Umsetzungen robuster Moleküle katalysieren können. In den oberen, kälteren „Stockwerken“ der Atmosphäre werden photochemische Umsetzungen zu endothermen Reaktionsprodukten überwiegen. 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. Mit zahlreichen chemischen Reaktionen in dem Tempe-

raturgefälle 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 eine Tatsache unabweisbar: Diese Atmosphäre enthält 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 den beiden Phasen sind fließend und umfassen riesige Zeiträume. Die lokale Temperaturverteilung auf der Erdoberfläche ist ungleichmäßig, weil schon abgekühlte Regionen, aktive Vulkanzonen und partielle impactbedingte Auf-schmelzungen über lange Zeiten koexistieren.

Bestimmend für diese Phase ist ein lokaler, intermittierender Ur-Regen. Aus massiven Wolkenschichten fällt CO_2-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 Ur-Regen sollte schon eine erste Auflockerung der ansonsten reaktionsträgen Mineraloberflächen bewirkt haben – erste Verwitterungsfolgen durch korrosive Einwirkungen von z.T. überhitztem Wasserdampf, Halogenwasserstoffen und Kohlenstoffdioxid.

An den immer noch oberhalb 100 °C befindlichen Gesteinen der Oberfläche laufen chemische Reaktionen unter annähernden Hydrothermalbedingungen ab, z.B. Pyrohydrolysen (an Si–O–Si-, Al–O–Al- und Si–O–Al-Gruppen), Umsetzungen des CO_2 mit Calciumsilicaten unter Bildung von Calciumcarbonat sowie metasomatische Umwandlungen (z.B. Kaolinitisierungen) bis hin zur Hydrothermalsynthese sowie zur partiellen Amorphisierung von Mineralen.

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

Das ist der Zeitraum bis zur dauerhaften Existenz flüssigen Wassers. Kontinente und Ozeane existieren bereits 100-200 Millionen Jahre nach Formierung des Erdballs [29].

In dieser Phase III werden in den oberflächennahen Bereichen Temperaturen um 100 °C immer häufiger und schließlich endgültig unterschritten, so

daß der Niederschlag nicht mehr vollständig verdampft. Langsam kühlt die Atmosphäre ab, und über zehntausende von Jahren geht ein Dauerregen nieder. Unter den heutigen meteorologischen Bedingungen brauchte der Regen 60.000 Jahre, um alle Ozeanbecken zu füllen (s. 3.2.2). Seinerzeit aber bestand die Atmosphäre anfänglich zu 80% aus Wasserdampf.

Der Regen und das sich ansammelnde Wasser bewirkten zumindest folgendes:

- Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre ändert sich durchgreifend: Zur Hauptkomponente wird Kohlenstoffdioxid (etwa 75–80%). Die wasserlöslichen Verbindungen, wie Halogenwasserstoffe, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Schwefeldioxid, sind mit dem Regen aus der Atmosphäre entfernt worden, die Gehalte an Methan, Stickstoff und Kohlenstoffmonoxid entsprechend angestiegen. Die so entstandene Atmosphäre enthält nun kaum mehr Wasserdampf – der Treibhauseffekt und damit die Temperatur der Atmosphäre gehen weiter zurück.
- Geologische Mengen lockeren Gesteins werden 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 auch die in der Atmosphäre entstandenen chemischen Verbindungen hauptsächlich in die Ozeane. Deren Wasser ist reduzierend und sauer.
- Der Säuregrad wird durch Umsetzungen mit Metalloxiden sowie durch unterseeische alkalische Quellen vulkanischen Charakters allmählich verringert bis zur schwachen Alkalität der Lösung. Nun setzt ein Vorgang von geologischer Bedeutung ein: Atmosphärisches Kohlenstoffdioxid wird von der wäßrigen Phase absorbiert und reagiert teilweise zu Hydrogencarbonat- und Carbonat-Ionen, HCO_3^- bzw. 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 siedeheiß und kühlten nur allmählich ab – günstig für relativ hohe Reaktionsgeschwindigkeiten, insbesondere von Redoxreaktionen und organischen Umsetzungen.

Nun steht ein neues Reaktionsmedium zur Verfügung: Die „Wunderphase“ Wasser mit ihrer einmaligen Kombination physikalischer und chemischer Eigenschaften. Sie ermöglicht in der Geschichte des Erdballs eine neue Art von Chemie – weitaus komplexer und, infolge der nun höheren Konzentrationen, umsatzstärker als in den vorangegangenen Gasreaktionen der Atmosphäre.

Eine Mannigfaltigkeit neuer Reaktionswege öffnet sich: Hydratisierungs- und Hydrolysereaktionen erzeugen reaktive OH-Gruppen an Molekülen wie auch als Liganden von Metallkationen, Säure-Base-, Redox-, Komplexbildungs- und Fällungsreaktionen, Homogenkatalysen sowie heterogenkatalytische Umsetzungen an den Grenzflächen verschiedener Festkörper, z.B. von Oxiden, Sulfiden (Pyrit) und Tonmineralen (Montmorillonit, Kaolinit). Die chemische Reaktivität erobert über die homogene Phase des Ozeans hinaus neue Kompartimente: Feuchtgebiete, Küstenstreifen und die Meeresböden.

Die Sonne rückt an die erste Stelle als Spender für Wärme und Photonen. Gegenwärtig beträgt die Energie des geothermischen Stroms nur noch ein Hundertstel der Sonnenenergie. Die strukturbildende Rolle der Sonne tritt immer deutlicher hervor. Seit der Entstehung der Erde bis heute ist die von der alternden Sonne abgestrahlte Energie um 25% angewachsen. Die neugebildeten chemischen Verbindungen werden immer energiereicher und komplizierter, sie entfernen sich immer weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht und enthalten zunehmend kinetische Hemmungen, sie werden metastabil. Der wachsende Energieinhalt der photochemisch entstandenen Verbindungen geht ausschließlich auf die Sonne zurück.

Über hunderte von Millionen Jahren nähert sich diese chemische Welt allmählich einer Produktivitätsgrenze, die ein Fortschreiten zu einem höheren Komplexitätsniveau behindert. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich darin, daß der Stoffnachschub nicht gesteigert werden kann und sich ein bestimmtes Gleichgewicht zwischen Bildung und Zerfall einstellt. 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 stark adsorbiert, daß sie den Katalysator blockieren.

Phase IV: Die Membran

Da beschreitet die Evolution einen anderen Weg, um die Stoffkonzentration zu erhöhen 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 [21-99], Koazervattropfen [30]). Leichter verständlich wird die Bildung 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 „Mikrore-

aktoren“ bieten, verglichen mit dem membranlosen Zustand, den chemischen Umsetzungen für die Selbstorganisation eine Vielfalt neuer Möglichkeiten:

- Die chemischen Bedingungen (Reaktionsvolumen, pH-Wert) bleiben über längere Zeit nahezu unverändert und die Konzentrationen können sich auf eine nicht zu niedrige Größe einpegeln.
- Homogenkatalysen unter Beteiligung von Wasserstoff- und Schwermetall-Ionen kommen ins Spiel, was zu höheren Reaktionsgeschwindigkeiten und zu einer größeren Vielfalt an Reaktionswegen führt.
- Höhermolekulare Verbindungen in größeren Konzentrationen können entstehen; eventuell schon Supramoleküle[3].

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 zu intensiver Sonnenstrahlung (mutagene Strahlenschäden) wie auch vor Austrocknung schützen. Die Membran schirmte auch die harte UV-Strahlung ab – und das schon Milliarden Jahre vor der Existenz der Ozonschicht. Dadurch konnten innerhalb der Vesikeln wesentlich empfindlichere Moleküle entstehen als im membranlosen Zustand.

Möglicherweise waren es autokatalytische Umsetzungen, eventuell vom Typ der oszillierenden 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.

Es könnte sein, daß auf diesem Niveau das „Supermolekül“ Ribonucleinsäure (RNA) abiotisch entsteht und damit die „RNA-Welt“ vorbereitet wird. [21-104]

Hilfreich für das Verständnis dieser Vorgänge ist die Emergenz einer abiotisch-chemischen Selbstorganisation, einer adaptiv-evolutionären Chemie, ein Bild, gewonnen aus der Forschung zur Supramolekularen Chemie. [31]

---

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

Das Leben

Die leistungsfähiger gewordenen chemischen Umsetzungen beanspruchen nun immer mehr Kohlenstoffdioxid, wodurch dessen atmosphärische Komzentration weiter absinkt.

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 Bakteria und Archaea (Carl Woese [32]) – um Prokarioten mit vermutlich chemoheterotrophem Metabolismus, die ihre Energie durch Gärung gewinnen und 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. Entropieexport und Informationsaustausch sind weitere existentielle Eigenschaften des Lebens. Dieses erzwingt eine durchgreifende Reorganisierung aller Verhältnisse in der Geosphäre.

Die Übertragung des Informationsbegriffs auf die Naturwissenschaft und auf das Leben eröffnet unserem Verständnis neue Räume. Information sei das Typische des Lebens [33]:

Leben = Materie + Information.

Und: „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.“ [6-199].

John A. Wheeler prognostizierte, daß Information die Grundlage einer universellen Physik bilden werde [34]. Ob die Informationstheorie zu einer neuen integrierenden, übergeordneten Wissenschaftstheorie wird, die die hemmende Fragmentierung der gegenwärtigen Wissenschaft aufheben könnte?

Charakteristisch für hochorganisierte, offene Systeme (komplexe Fließgleichgewichte) ist der Trend zur Minimierung ihrer Entropie, im Gegensatz zum abgeschlossenen System mit seinem Trend zur Maximierung der Entropie. Auch für die in der Zelle ablaufenden Reaktionen sind die Gesetze der Gleichgewichts-Thermodynamik zwar notwendig, aber nicht hinreichend.

Deren Aussagen sind zeitinvariant [35] [36]. Die chemischen Umsetzungen sind im wesentlichen nun nicht mehr thermodynamisch, sondern kinetisch kontrolliert. „Die Ergebnisse thermodynamischer Betrachtungen nützen in der chemischen Kinetik nicht viel.“ [35-487]. Die Reaktionsrichtung wird nicht mehr diktiert durch die Abgabe freier Energie, also durch die Bildung energieärmerer Verbindungen, sondern durch die Tendenz zu energiereicheren Verbindungen und zu einer damit verbundenen höheren Komplexität der Chemie.

Schon die ersten Zellen müssen viel Energie dafür aufwenden, einen Konzentrations-gradienten zwischen den membranseparierten Bereichen von Innen- und Außenwelt aufrechtzuerhalten [37]. Bemerkenswert ist, daß schon die Archaea Reparaturenzyme für die von der harten UV-Strahlung an der DNA verursachten Strahlenschäden entwickelten.

Die Hauptquelle von Energie und Syntropie für das gesamte irdische Leben im oberflächennahen Bereich ist die Sonne. An unterseeischen Hydrothermalquellen allerdings entdeckte man 1985 eine neue Lebensform: Röhrenwürmer und Muscheln in Endosymbiose mit chemoautotrophen Bakterien, die ihre Energie für die Reduktion des Kohlenstoffdioxids aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff oder Methan – letztlich also nicht aus solaren, sondern aus geothermischen Quellen – gewinnen [32-462].

Als ein weiteres Feld der Lebensentstehung wurden abiogene Kohlenwasserstoffvorkommen angenommen [38]. Dabei kam wahrscheinlich auch eine der „anaeroben Atmung“ ähnliche Umsetzung geologische Bedeutung zu [(CH_2) = Kohlenwasserstoffe]:

$$CaSO_4 + (CH_2) \longrightarrow S + CaCO_3 + H_2O.$$

Es scheint, als trage die Evolution fraktale Züge, denn Selbstähnlichkeit fällt auf: Die ersten Einzeller, Heterotrophe, verbrauchten die ihnen zugänglichen Kohlenstoffreservoire. Deren Erschöpfung erzwang vor etwa 3,5 Milliarden Jahren die Entstehung der Autotrophen, die später die benötigten Kohlenstoffverbindungen photoautotroph aus CO_2, H_2O und Sonnenlicht aufbauten. In ähnlicher Weise ist die Menschheit heute dabei, die Kohlenstoffressourcen des Globus, die fossilen Vorkommen und die Wälder, aufzubrauchen und steht nun vor derselben Aufgabe wie seinerzeit die Photoautotrophen: Sie muß Energie und Stoff aus Kohlenstoffdioxid, Wasser und Sonnenenergie gewinnen.

Die Photosynthese

Mit der Photosynthese „explodiert“ das Leben. Mit ihr wurde, nachdem sich zunächst die porphinoiden Metallkomplexe gebildet hatten („Katalysatoren der ersten Stunde“ [37-27]) und dadurch die verschiedenen Chlorophylle verfügbar waren, eine entscheidende Stufe erreicht – eine hochendotherme biochemische Redoxreaktion, getrieben durch die Energie der Sonne.

Die anoxygene Photosynthese. In dieser Reaktion wird CO_2 (meist) durch Schwefel-wasserstoff reduziert, wobei Schwefel freigesetzt wird, der in Form von Schwefellagern (z. B. in Texas) eine unverzichtbare Säule unserer Technik darstellt.

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

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow 1/n\,(CH_2O)_n + O_2 \qquad \Delta H = +470\ \text{kJ/mol}$$

In der Bilanz werden die Kohlenstoffatome des Kohlenstoffdioxids CO_2 zu Glucose $C_6H_{12}O_6$ reduziert und die Oxid-Ionen des Wasser zu Sauerstoff oxidiert, der die Zelle verläßt in Form zweiatomiger Moleküle O_2 – zunächst eine starkes Zellgift für nahezu das gesamte damalige Leben. In Wirklichkeit ist die Photosynthese ein hochkomplexes Reaktionsgeschehen unter Beteiligung auch zahlreicher anorganischer Komponenten.

Die oxygene Photosynthese der Bakterien bedeutet einen weiteren qualitativen Sprung mit tiefgreifenden Folgen in der Ko-Evolution:

- Die Phototrophen entwickeln sich sprunghaft, wodurch der CO_2-Anteil in der Atmosphäre weiter abnimmt und große Mengen Sauerstoff freigesetzt werden. Trotzdem verbleibt die atmosphärische O_2-Konzentration über 800 Millionen Jahre hinweg (bis 2 Milliarden Jahre nach Erdentstehung) unter 1%, was auf den O_2-Verbrauch durch das reduzierende Milieu in den Ozeanen und der Atmosphäre zurückgeht. Nahezu eine Milliarde Jahre lang enthält die Atmosphäre nur sehr geringe Konzentrationen an CO_2 und Sauerstoff. Dessen Konzentration erreicht das heutige Niveau erst vor 1 Milliarde Jahre.
- Ein Großteil der Anaerobier in der Nachbarschaft zu den Phototrophen stirbt aus durch Vergiftung mit Sauerstoff. Die Biomasse sinkt ab und wird vergoren – die Hauptquelle für die ansteigende atmosphärische Methankonzentration.
- In den Ozeanen werden zahlreiche Verbindungen durch den Sauerstoff oxidiert, was neue Randbedingungen für die Chemie des Lebens schafft.

So entstehen Kupfer(II)-Verbindungen aus Kupfer(I), Sulfate aus Sulfiden (wie Pyrit) und Nitrate, Nitrite und NO aus Ammoniak – überwiegend wasserlöslich Verbindungen, die von den Zellen leicht aufgenommen werden können. Weitreichende Folgen hat die (überwiegend biogene) Oxidation hochkonzentrierter, löslicher Eisen(II)-Verbindungen (mit bis zu 10 g Fe/m³ Meerwasser) zu den unlöslichen, über eine Milliarde Jahre hinweg sedimentierenden „Bändereisenerzen", im wesentlichen Hämatit Fe_2O_3 und Magnetit Fe_3O_4. Auf diese Weise entstehen in dieser Zeit etwa 90% der irdischen Eisenerze.

In den Ozeanen hat sich neben einer hohen Ca^{2+}-Konzentration das CO_2/HCO_{3-}-Gleichgewicht eingestellt:

$$2\ HCO_{3-} \rightleftharpoons CO_2 + CO_3^{2-} + H_2O$$

Entnehmen nun CO_2-assimilierende Organismen 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.

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

- Die Bildung von Ozon und damit eines atmosphärischen Schirms gegen die energiereichen UV-Anteilen 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.

Nach der Ausbreitung der aeroben Phototrophen verschwanden die Anaerobier nicht vollständig. Vielmehr bildeten beide unter geeigneten Bedingungen Symbiosen, z.B. in den „Mikrobenmatten" [32-479] – ein beeindruckendes Beispiel für ein biochemisches Recycling.

Die Chemie in den Organismen erreicht eine verwirrende Vielfalt: „Möglicherweise hat sich im Verlauf der Evolution für *alle* natürlich vorkommenden Elemente eine – wenn auch nicht immer essentielle – physiologische Funktion herausgebildet" [37-8].

Die skizzierten Vorstellungen bleiben vermutlich weit hinter der realen Vielfalt zurück, denn unser Wissen über den Bakterien-Metabolismus steckt noch in den Anfängen, weil von dem geschätzten Gesamtumfang des Bakterienreiches höchstens ein Prozent bekannt ist.

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. Heute entnimmt die Biosphäre in der Gesamtbilanz keine Energie mehr aus der Sonne, denn es herrscht nahezu energetisches Gleichgewicht zwischen Einstrahlung und Ausstrahlung.

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

Grundsätzlich anders sieht die Panspermie-Hypothese von Svante Arrhenius die Entstehung irdischen Lebens. Sie wird heute auch von Francis Crick vertreten, und Fred Hoyle schuf eine moderne Version und gründete ein „Zentrum für Astrobiologie“ [39]. Sollte die extraterrestrische Evolution bis zu „Lebenskeimen“, wie Bakterien, Sporen und Eiern, vorgedrungen sein, hätten diese auf der erkalteten Erdoberfläche mit ihren Flüssigwasser-Reservoiren günstige Bedingungen vorgefunden. Bis zum heutigen Tag nimmt die Erde jährlich 11.000–16.000 t extraterrestrisches Material aus Meteoritenschauern auf [40].

Stickstoffixierung

Unter der natürlichen Stickstoffixierung versteht man die biochemische Umwandlung des atmosphärischen Stickstoffs N_2 in wasserlösliche Stickstoffverbindungen, nämlich Ammonium-, Nitrit- und Nitrat-Ionen. Daraus bauen die stickstoffixierenden Organismen ihre Stickstoffverbindungen, z.B. die Eiweiße, auf.

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

$$N_2\,(g) + 2\,H_2O\,(g) \longrightarrow NH_4^+\,(aq) + NO_2^-\,(aq) \quad \Delta H = +244\ \text{kJ/mol}$$

Ähnlich wie bei der Photosynthese sagt diese Gleichung nur wenig über die real ablaufenden Reaktionen aus.

Die Stickstoffixierung bedarf direkt nicht der Sonnenstrahlung. Die die Umsetzungen vollbringenden Bakterien entnehmen die dafür erforderliche Energie photosynthetisch entstandenen Energieträgern und damit indirekt ebenfalls der Sonnenenergie [32-471].

Auch die in „Blitzen“ bewirkte Oxidation des Luftstickstoffs zu Stickstoffmonoxid NO geht letztlich auf die Sonne zurück, denn Blitze sind über mehrere Stufen sich konzentrierende Sonnenenergie. Die Temperaturen im Blitzkanal betragen ca. 30.000 K.

Überraschend wurde gefunden, daß Blitze den horizontalen Gentransfer von Bakterien stimulieren – wahrscheinlich ein die Evolution beschleunigender Mechanismus [41].

3.2.2 Verwitterung

Mit Recht wird heute die strukturbildende Rolle der Sonne betont. Jedoch, ist damit schon die solare Einwirkung auf den Erdball vollständig erfaßt? Es gibt einen weiteren, ebenso wichtigen und tiefgreifenden Prozeß, dessen Sonnenbedingtheit und energetische Dimension bisher aber nicht beschrieben wurden**:** Seit der Existenz flüssigen Wassers auf der Erde betreibt hier die Sonne andauernd auch einen tiefgehend zerstörerischen, entropieerhöhenden Prozeß: *Die Verwitterung – mit ihren physikalischen, glazialen, chemischen und biologischen Teilwirkungen sowie der Erosion.*

Auswirkungen der Verwitterung

Die Verwitterung hat Gestein in geologischem Ausmaß zerkleinert. Dieses Material wird durch Wasser und Wind weithin transportiert. Ein Teil dieses Verwitterungsprodukts bildet den Sand der Wüsten und vieler Küstenregionen. Große Mengen Wasser, ca. $3{,}7 \cdot 10^4$ km³/Jahr [23-275], fließen von den Kontinenten in die Ozeane und bewegen dabei Gesteins- und Erdmassen in einem Umfang, daß alle Meeresbecken in 17 Millionen Jahren voller Verwitterungsschutt wären. Regen brauchte heutzutage 60.000 Jahre, um alle Ozeanbecken zu füllen.

Nach einer weitgehenden Hypothese könnten diese Ablagerungen durch ihren Bodendruck, durch die von ihnen bewirkten Veränderungen der Temperaturverhältnisse sowie durch chemische Wechselwirkungen die Plattentektonik 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 Abtragung der Gebirge – das ist eine Umwandlung potentieller Energie, die ursprünglich einmal aus dem Energievorrat des Erdinneren für die Gebirgsbildung aufgewandt worden ist. Anders als die von außen kommende Sonnenenergie ist dieser Energiebetrag quasi geo-immanent.

Die Verwitterung übt auf der Erde ihre Wirkungen solange aus, wie es hier flüssiges Wasser gibt. Dabei wird ständig solare Energie auf dem Globus gespeichert, denn der Verwitterungsprozeß wirkt durch Regen, Wasserströ-

me, Wind, durch die Mechanik der Gletscher, durch chemische Reaktionen sowie durch die mechanische und biochemische Kraft des Lebens – alles solarogene, dispergierende Einflüsse.

Die durch die Verwitterung gespeicherte Energie ist aber nichtthermischer Art, sie existiert als Oberflächenenergie (in kJ/m²) der feinteiligen Verwitterungsprodukte – Phasen, deren spezifische Oberfläche (in m²/g) groß ist gegenüber der des ursprünglichen Gesteins.

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 auf eine noch 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 der festen Phase naturgemäß erforderlichen Energieaufwand. Dadurch sollte die ständig vor sich gehende Abkühlung des Magmareservoirs geringfügig verlangsamt werden. Treffen diese Annahmen zu, heißt das: Die eingestrahlte Sonnenenergie ist derart wirkmächtig, daß sie indirekt auch die energetischen Verhältnisse im Erdmantel beeinflußt.

Der Entropieaspekt. Beide solarogenen Prozesse – der aufbauende und der abbauende – sind eng miteinander gekoppelt. Der Verwitterungprozeß, der die hohe, meist sogar kristalline Ordnung des Felsgesteins zerstört und dieses umwandelt in weniger geordnete, feinteilige, z.T. amorphe Gesteinsphasen, ist ein enorm entropieerhöhender Vorgang. Dabei ist bemerkenswert: Das Leben erhöht die Verwitterungsgeschwindigkeit um Größenordnungen. Beispielsweise verwittert Basaltgestein 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 Entropieabsenkung relativ zum unbelebten Planeten darstellte, begünstigen einen destruierenden, 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. Eine besondere Stellung bei der Bodenbildung kommt den Tonmineralen zu – als feinteilige Substanzen Hauptbestandteil vieler Böden. Die äußeren Oberflächen und die Schichtzwischenräume der Tonminerale sind chemisch reaktiv. Das läßt verstehen, warum eine Hypothese in den Tonen das anorganische Substrat für die Entstehung des Lebens auf der Erde sieht. [42]

Die zerstörerische, entropieerhöhende Wirkung der Sonne in Verbindung mit Wasser – nämlich der Verwitterungsprozeß – war die Voraussetzung dafür, daß auf dem Erdball Leben entstehen konnte – ein strukturbildender, entropiesenkender Prozeß. Es scheint so, als sei diese Vernetzung von Destruktion und Konstruktion ein allgemeines Gesetz.

Ilya Prigogine habe beobachtet, daß der Zusammenbruch des Fortschritts oft nur eine Illusion sei. Unter den Fragmenten, meinte er, bildeten sich neue Strukturen und Prozesse [43]. 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 synergistisch. Hat die physikalische Verwitterung durch Gesteinsspaltung und Zerkleinerung erst einmal reduzierte Verbindungen enthaltende jungfräuliche Oberflächen geschaffen, können daran chemische Umsetzungen besonders schnell ablaufen. Beispiele: Bindung von Kohlenstoffdioxid durch das Calcium der Silicate, Bindung von Sauerstoff durch reduzierende Verbindungen sowie Bindung von Wasser durch Löseprozesse, Hydratisierungen und Hydrolysen.

Mechanochemie [44][4]. Der Einfluß der Mechanochemie auf Verwitterungsvorgänge ist bisher nicht beschrieben. Diese sollten aber durch mechanochemische Anregung beschleunigt werden. Unter derartigen Bedingungen werden sogar thermodynamisch verbotene Reaktionen möglich, was durch die Theorie des Triboplasmas verständlich wird [45]. Sand- und Staubstürme können infolge tribochemischer Beanspruchungen starke elektrische Felder

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

erzeugen, die dann ihrerseits chemisch wirksam werden. Derartige Prozesse könnten auf der Marsoberfläche, ausgehend von Kohlenstoffdioxid und Wasser, zu größeren Ansammlungen festen Wasserstoffperoxids H_2O_2 geführt haben [46].

4. Ökologische Wechselwirkungen

GAIA reagiert vielfältig, unvorhersehbar und zuweilen katastrophisch. Die Menschheit sollte eine zu schaffende Welt-Ethik verinnerlichen und demgemäß ihre immens gewachsene technische Macht äußerst behutsam handhaben, wenn sie in dieses Netz einzugreifen 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. Schon allein aus systemtheoretischen Erwägungen ist aber für ein derart hochkomplexes System die Annahme einer eindimensionalen Ursache/Wirkungs-Beziehung untauglich. Weitere Auswirkungen der erhöhten CO_2-Konzentration wurden beobachtet:

- Beschleunigung der Zersetzung von Calciumsilicaten durch die Einwirkung von CO_2 und Wasser unter Bildung von Calciumcarbonat sowie calciumärmeren Silicaten und SiO_2 – eine Reaktion, deren Geschwindigkeit durch die erhöhten Temperaturen noch vergrößert wird.
- Aufnahme größerer Mengen von CO_2 durch die Ozeane, was einerseits zu intensiverem Biomassewachstum, andererseits aber durch Bildung von Calciumhydrogencarbonat $Ca(HCO_3)_2$ zur Auflösung von Calciumcarbonat 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 irdische Ökosystem.

Es ist damit zu rechnen, daß mit der zunehmenden CO_2-Konzentration auch die Chemie der Atmosphäre sich zu ändern beginnt. Denkbar erscheint, daß die Oxidation von Methan zurückgedrängt wird, Methanemissionen aus Gärungsprozessen und Methanhydratzerfall zunehmen, die dadurch weiter erwärmte Atmosphäre noch größere Wasserdampfmengen aufnimmt und sich 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 natürliche Gärungen entsteht. Sonnenbestrahlung verstärke diese Emission. Die Physiochemie dieses Pfades ist unbekannt. Sollte dieser Befund auf alle Landpflanzen zutreffen, würden durch diese schätzungsweise 60–240 Mt Methan pro Jahr emittiert, das wären etwa 10–40% der Gesamt-Methanemission – eine Entdeckung von Gewicht für die Planung von Groß-Aufforstungen und Energieplantagen.

Methylbromid: Methylbromid, CH_3Br, ein Nervengift und Carcinogen, wird weltweit als Herbizid eingesetzt, soll aber wegen seiner ozonschädigenden 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 von Kohl, Broccoli, weißen Rüben und Raps Methylbromid freisetzen. Allein die von Raps emittierte Menge soll etwa 15% der industriellen Methylbromidproduktion betragen. Sollte dieses Ergebnis sich verallgemeinern lassen, wäre es bei einer eventuellen Ausweitung des Rapsanbaus für Motorentreibstoffe zu berücksichtigen.

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 – könnte der Regenwald Schaden nehmen. Also: Selbst vor großflächigen Aufforstungen sind die ökologischen Netze aufmerksam zu studieren.

China ist weltweit das Land mit den größten Aufforstungsleistungen. Trotzdem werden in den nordwestlichen Wüstengebieten immer mehr Dörfer vor den andrängenden Sandmassen geräumt. Der Grundwasserspiegel in Chi-

na, wie auch in Indien, 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 und befürchtete, daß die neu gepflanzten Bäume den Grundwasserspiegel eher weiter absenken könnten. Kommen wir schon zu spät mit unseren Reparaturversuchen?

In seinem neuen Buch [47] kommt Lovelock 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 [48] 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 als Provokation von Kreativität und als Erkenntnisquell aufgefaßt werden. Dieser Zusammenhang müßte dem Naturwissenschaftler besonders 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" [14-120]. In einem komplexen System verändern sich, wie all dessen Komponenten, auch die Grenzen ständig. Das wirft die Frage auf, ob es eine ewige Unveränderlichkeit der Naturkonstanten überhaupt geben kann.

Vielleicht ist das 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 und 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, konkret die Grenzen der Quellen und der Senken [49].

Eine Begrenzung 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 gesellschaftlichen Bereichen zu strenger Gültigkeit gebracht werden.

Aus diesen übergeordneten Prinzipien läßt sich eine weitere allgemeine Schlußfolgerung ableiten: Jegliche Produktion von Überfluß widerspricht diesen Prinzipien, weil es bedeutet, Systemgrenzen zu überschreiten. Folglich ist in der Installierung einer Kernfusions-Energetik, neben all ihren schon heute absehbaren technischen und volkswirtschaftlichen Nachteilen, eine eventuell gefährliche Verletzung ökologischer Grundsätze zu sehen. Das ist keine Prinzipienreiterei, sondern die Schlußfolgerung aus der Erkenntnis, daß die Biosphäre nur eine bestimmte Maximalgröße eines anthropogenen Energiestroms ertragen kann (s. 4.3.3). Bernal, der große britische Physiker – überzeugt von der Zukunftsbedeutung der Kernfusion – propagierte die Energieversorgung der Menschheit mit 10–20 Kernfusions-Großkraftwerken. Trotzdem bewahrte er sich den kritischen Blick für Grenzen und schrieb 1958 hinsichtlich der Kernfusion [50]:

„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 Entropieerhöhung

Vor etwa 300 Jahren begann der Mensch in einem vorher noch nie dagewesenen Tempo, die Entropie auf dem Erdball zu erhöhen. Die nachteiligen Folgen derartiger Denaturierungen werden meist erst nach längerer Zeit spürbar, so daß dann die Ursachen gar nicht mehr auszumachen sind. Ergo: Jeder Eingriff in die natürliche Ordnung, also auch jede beliebige Technik, erhöht die Entropie. Es ist darum stets nur so viel an Technik aufzuwenden, wie unumgänglich notwendig. Das gilt selbstverständlich auch für jede Ökoenergietechnik. Das ist notwendig zu betonen, denn manche „Solarier“ unterliegen dem Irrtum, daß angesichts des praktisch unendlich großen solaren Energievorrats der technische Wirkungsgrad für die Solartechnik sekundär geworden sei. Würde jedoch der Wirkungsgrad der Solarzellen verdoppelt, könnte die erforderliche Zellenfläche halbiert und damit die gesamte Produktion verringert werden.

Um die fossilen Brennstoffe hervorzubringen, hat die Natur über Millionen Jahre die Konzentrierung vorgenommen, in der solaren Ära ist das aber

die ständige Aufgabe der Gesellschaft. Das Fossil-Zeitalter war hinsichtlich der Energie- und Rohstofftechnik die Epoche der *Dispergierung*, das Ökozeitalter wird die Epoche der *Konzentrierung*.

4.3.1 Verletzungen der Erdkruste

Ein fruchtbarer Boden enthält als wesentlichen Bestandteil Tonmineral-Huminstoff-Komplexe. Huminstoffe üben ihre Wirkung vorwiegend über aromatische Radikale, Carboxyl- sowie OH-Gruppen aus. Anaerobier im Erdreich und in den Ozeanen sondern u.a. flüchtige Schwefelverbindungen ab, 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. bei Aufschluß von Erzgruben, beim Abteufen von Bergwerken, durch Tiefbauarbeiten, Straßenbau oder Pflügen, so dringt freier Sauerstoff in diese bisher weitgehend 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, als Ackerboden unbrauchbar und ist zudem nun der Verwitterung und Erosion ausgesetzt. Boden ist aber eine nichtregenierbare Ressource. „Als durchschnittliche rechnerische Bodenbildungsrate wird 0,1...0,5 mm/a angegeben…“ [23-339] – eine Größe, 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 [51].

4.3.2 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 mit menschlicher Unterstützung, werden Verwitterung und Erosion verlangsamt oder gestoppt. Wo Natur geschädigt,

Leben vernichtet wird, gewinnt die Verwüstung. Seit Jahren überwiegt die Wüstenbildung. Nach einer Schätzung der FAO werden jährlich weltweit 150.000 km² Wald illegal gerodet [52].

Offensichtlich ist der Natur eine Tendenz immanent, trotz aller Naturkatastrophen die Komplexität zu erhöhen, d.h. Leben zu schaffen, gedeihen zu lassen und zu verbreiten. Sich darin bewußt einzuordnen, 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.“ [53]

4.3.3 Der anthropogene Energiestrom

Alle fossil-nuklearen Energieflüsse führen direkt oder indirekt, also nicht allein infolge der CO_2-Emissionen, zu mehr oder weniger großen Störungen des irdischen Ökosystems.

Der anthropogene durchschnittliche Wärmeenergiefluß[5] scheint sich als Kausal- und Kenngröße für die technisch-zivilisatorische Überbelastung der natürlichen Systeme herauszustellen. Für Mitteleuropa wurde eine diesbezügliche Grenzbelastung von 0,16 W/m² empirisch ermittelt – ein erstaunlich niedriger Wert, denn die in Deutschland im Mittel am Boden auftreffende Sonnenstrahlung entspricht 116 W/m², und die in Biomasse fixierte Sonnenenergie beträgt 0,65 W/m². 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 Energieeinspeisung von 8 TW extrapolieren [54]. Der Welt-Primärenergieverbrauch betrug 2002 aber bereits 13,6 TW [55].

4.4 Die Technik des Ökozeitalters

Die Menschheit braucht eine Technik, die weitgehend nach den Prinzipien der Natur aufgebaut und menschengemäß ist. Heute wird der Mensch immer häufiger ungewollt und unvorhersehbar zum Opfer seiner Eingriffe.

Die Forderungen an die chemische Industrie der Zukunft verdeutlichen, was gemeint ist: Die Arbeitstemperatur sollte nahe der Umgebungstemperatur liegen, organische Lösungsmittel wären zu ersetzen durch wäßrige Reaktionsmedien, die Verfahren sollten drucklos, geräuscharm, frei von stofflichem

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

und energetischem Abfall, fehlertolerant, ungefährlich 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. Die Stoffproduktion des Ökozeitalters wird durch eine solargestützte, intelligente Biotechnologie charakterisiert sein, die dann von sich aus weitgehend ökologischen Vorgaben entspricht [56].

Vorgaben dieser Art gelten selbstverständlich auch für jegliche Ökotechnik. Es ist ein Hohn, „Bio“-Kraftstoffe zu feiern, wenn für die Produktion ihrer Rohstoffe (Palmöl, Sojaöl) Regenwald vernichtet wird – ein international expandierendes Geschäft – und steigende Preise für das Hauptnahrungsmittel Lateinamerikas, Mais[6], die Armen in den Hunger treiben [57].

5. Gegenwartsaufgaben

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

Es ist hohe Zeit zu erkennen, daß die Philosophie des autarken Erdballs, daß die Überheblichkeit gegenüber der Natur und die daraus resultierende Technik in eine Sackgasse geführt haben. Dieser Weg muß verlassen werden, anstatt sich an ihn zu gewöhnen. Die gesellschaftliche Schöpferkraft ist auf den Aufbau eines ökologischen Sozialismus zu konzentrieren. Nur dann, wenn wir bewußt Sonne und Erde für uns wirken lassen, wenn alle Menschen dieser Welt sich Brüder und Schwestern sind und Ehrfurcht vor dem Leben die denk- und verhaltensbestimmende Maxime ist, haben wir die Aussicht, die Geschwindigkeit der anthropogenen Entropieerhöhung auf das unvermeidliche Mindestmaß zu drosseln.

Was tun?

Das gegenwärtige Gesellschaftssystem ist erwiesenermaßen nicht in der Lage, die sich verschärfenden ökologischen Gefahren zu bannen. Der Weg in

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

das nichtkapitalistische Übermorgen ist selbst bei denen, die eine andere Welt wollen, umstritten – aber in einem sollte Einvernehmen herrschen: Nur die fließenden Quellen der Natur können der Menschheit eine nachhaltige Energieversorgung gewährleisten, weil allein sie unerschöpflich und menschengemäß sind und zugleich die Grundlagen für ein dezentral-demokratisches Leben mitbringen. Die dementsprechende Forderung von Wilhelm Ostwald von 1906 ist heute Tagesaufgabe, und die Tätigkeit auf diesem Feld ist Arbeit an der Zukunft.

Die „Solarier" versprechen damit nicht das Paradies. Unter den Bedingungen einer weiter wachsender Erdbevölkerung eine grundsätzlich neuartige, nachhaltige Energie- und Produktionstechnologie einzuführen – das läßt auch neue Widersprüche erwarten, die nur durch die kooperative Konstruktivität der Menschheit zu lösen sind. Eine Jahrhundertaufgabe (H. Scheer) – integrierend, mobilisierend und human, aber, und das darf nicht verschwiegen werden: Es „…ist das Einfache, das schwer zu machen ist" (Bertolt Brecht). Gerade die Komplexität der gesellschaftlichen Systeme verbietet, diese Aufgabe allein „Experten" zu überlassen. Die Vielfalt der Gesellschaft, ihre „kollektive Weisheit", muß zum Zuge kommen.

Voraussetzung allerdings für den Erfolg einer Weltökologie ist Weltfrieden. Der verdeckte und der offene Krieg des Nordens gegen den Süden ist zu beenden, und den Menschen in der „Dritten Welt" sind ihre sozialökonomischen Menschenrechte zu garantieren. Eine Politik „Ökologie für den Norden – irakische Verhältnisse für den Süden" ist unmoralisch. Sie würde „Ökologie" als ein neokolonialistisches Projekt in Verruf bringen. Die seit Jahrzehnten wachsende Spaltung der Menschheit muß gestoppt und Solidarität der Leitfaden internationaler Politik werden. Dabei stehen die reichen Industriestaaten unter dem moralischen Druck einer jahrhundertealten Bringeschuld. Die Politik der großen Machtblöcke bewegt sich allerdings in die entgegengesetzte Richtung. 1999 verhungerten 36 Millionen Menschen, etwa 100.000 pro Tag. „Kaum jemand spricht über diesen Völkermord" [58].

Abschließend zwei Versuche einer Antwort auf die oben gestellte Frage:
„Ein Regime erneuerbarer Ressourcen mit den dazu passenden sozialen Formen bedeutet auf jeden Fall das Ende des Kapitalismus wie wir ihn kennen." [59]
„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.“ [60]

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] Werner Ebeling, Jan Freund und Frank Schweitzer, „Komplexe Strukturen: Entropie und Information“, B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig 1998, S. 18/19.
[6] Jean-Marie Lehn, „Supramolecular Chemistry – Concepts and Perspectives“, VCH Weinheim 1995, S. 202.
[7] DIE WELT.de, 2. Mai 2006.
[8] Gerd Lassner, „Gott würfelt nicht“, Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e. V., Schloß Augustusburg, September 2003, S.8.
[9] 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.
[10] Howard Bloom, „Bakterienkolonien und kollektives Gehirn“, 04.03.1997, http://www.telepolis.de/r4/artikel/2/2115/1.html, 4 S.
[11] Humberto R. Maturana und Bernhard Poerksen, „The second creation“, 24.10.2004, http://www.telepolis.de/english/inhalt/co/18611/1.html
[12] Gottfried Stiehler, „Felder von Möglichkeiten“, junge Welt 20./21. Mai 2006, S. 10.
[13] Paul Ambroise Valéry, zitiert in [14], Umschlagseite.
[14] Klaus Richter und Jan-Michael Rost, „Komplexe Systeme“, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main 2002, S. 27.
[15] Robert Havemann, „Einführung in die chemische Thermodynamik“, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957, S. 164.
[16] Arthur Koestler, „Janus“, Pergamon, Oxford 1978.
[17] Gottfried Stiehler, „Macht und Grenzen des Subjekts. Politisch-philosophische Essays“, PapyRossa Hochschulschriften 65, Köln 2006, 153 S.
[18] Eugen Peter Odum, „Ökologie – Grundlagen, Standorte, Anwendung“, Georg Thieme Verlag Stuttgart-New York 1999, S.1.
[19] Geseko von Lüpke, „Das systemische Weltbild“, in: „Tiefenökologie“, Eugen Diederichs Verlag, München 1995, 85-95.
[20] Francis Heylighen, „Vom World Wide Web zum globalen Gehirn“, 12.08.1996, http://www.telepolis.de/r4/artikel/6/6060/1.html

[21]Lynn Margulis, „Die andere Evolution“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin 1999, 180 S.
Die Autorin war an der Ausarbeitung der GAIA-Hypothese maßgeblich beteiligt.
[22]Franz-Theo Gottwald, „Zur Geschichte der Tiefenökologie“ in „Tiefenökologie“, Eugen Diederichs Verlag, München 1995, S. 22.
[23]Claus Bliefert, „Umweltchemie“, Wiley-VCH, Weinheim 2002, S. 132.
[24]Hans-Peter Dürr, „Die Zukunft ist ein unbetretener Pfad“, Verlag Herder, Freiburg im Breisgau 1995, S. 160.
[25]„Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrg.), Berlin 2006, S. 24.
[26]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 http://www.FV-Sonnenenergie.de .
[27]Felix R. Paturi, „Die Chronik der Erde“, Chronik Verlag, Gütersloh 1996, S. 16.
[28]N. N. Greenwood, A. Earnshaw, „Chemie der Elemente“, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim 1990, „Das Oklo-Phänomen“, S. 1609.
[29]Nach einer neueren Hypothese ist diese Formierung mit der Bildung des Mondes abgeschlossen. Dessen Alter wurde in der bisher genauesten Messung zu (4.527 ± 10) 106 Jahre bestimmt. Thorsten Kleine et al., Science, doi 10.1126/science.1118842; zitiert in Neues Deutschland, 03./04.12.05, S.23.
[30]A. J. Oparin, „Die Entstehung des Lebens auf der Erde“, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957, S. 256 ff.
[31]Jean-Marie Lehn, „Supramolecular Chemistry: from molecular information towards self-organisation and complex matter“, Reports on Progress in Physics 67 (2004) 249-265.
[32]Wolfgang Fritsche, „Mikrobiologie“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin 1999, S. 81.
[33]Gottfried Anger und Helmut Moritz, „Inverse Problems and Uncertainties in Science and Medicine“, schriftliche Privatmitteilung 2003.
[34]Zitiert in: David J. Chalmers, „Das Rätsel des bewußten Erlebens“, Spektrum der Wissenschaft, Digest „Rätsel Gehirn“, 3/2002, 19.
[35]Kurt Schwabe, Physikalische Chemie, Bd. 1, Akademie-Verlag, Berlin 1975, S. 427.
[36]Gustav Kortüm, „Einführung in die Chemische Thermodynamik“, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1949, S. 3.
[37]Wolfgang Kaim, „Bioanorganische Chemie“, B. G. Teubner Stuttgart 1995, S. 10.
[38]Thomas Gold, „Das Jahrtausend des Methans“, ECON Verlag, Düsseldorf 1988, S. 33, 193, 205.
[39]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
[40]Jürgen Oberst, DLR, mündliche Mitteilung 2006.

[41]Timothy Vogel und Pascal Simonet, „New Scientist“, (2004) Nr. 2469, S. 17; Susanne Härpfer, „Blitze schaffen neues Leben“, Neues Deutschland, 23./24. September 2006, S. 23.
[42]„Aus Lehm geformt…“, Nachrichten aus der Chemie 51, Dezember 2003.
[43]Howard Bloom, „Vernetzung im ‚finsteren 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
[44]Klaus Meyer, „Physikalisch-chemische Kristallographie“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1977, 324-345.
[45]Peter-Adolf Thiessen, Klaus Meyer und Gerhard Heinicke, „Grundlagen der Tribochemie“, Abhandl. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Akademie-Verlag Berlin 1967.
[46]Harald Zaun, „Mars – Planet des Todes“, 14.08.2006, http://www.telepolis.de/r4/artikel/23/23321/1.html
[47]James Lovelock, „Gaias Rache. Warum die Erde sich wehrt“, List-Verlag 2007.
[48]Hermann Scheer, „Atomenergie oder Erneuerbare Energien? Oder: Wer ist Godot?“, Solarzeitalter 4/2006, 3-8.
[49]Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, „Die neuen Grenzen des Wachstums“, Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart 1992, 319 S.
[50]John Desmond Bernal, „Welt ohne Krieg“, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960, S. 86.
[51]Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amory B. Lovins und L. Hunter Lovins, „FAKTOR VIER“, Droemersche Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf., München 1997, S. 267 und 263.
[52]„Isotopenanalyse erkennt illegal gerodetes Holz“, www.News-Report.de, 24.03.06. http://www.news-report.de/nachricht/Umwelt/1143215483/Isotopenanalyse_erkennt_illegal_gerodetes_Holz.html
[53]Albert Schweitzer, „Die Lehre der Ehrfurcht vor dem Leben“, Union Verlag Berlin 1963, S. 30.
[54]Wolfram Ziegler, zitiert in: Hans-Peter Dürr, S. 161.
[55]BMU „Umweltpolitik“ Juni 2005, S. 33 und 43.
[56] http://www.weisse-biotechnologie.net
[57]Ralf Streck, „Tortilla-Krise in Mexiko“, 29.01.2007, http://www.heise.de/tp/r4/artikel/24/24543/1.html
[58]Jean Ziegler, Berliner Urania, Neues Deutschland 26. Oktober 2000.
[59]Elmar Altvater, „Ende des Kapitalismus, wie wir ihn kennen“, Verlag Westfälisches Dampfboot, Münster 2006.
[60]Klaus Steinitz, „Chancen für eine alternative Entwicklung“, VSA-Verlag Hamburg 2005, 82.