

# Die Gaia-Hypothese

Anhang zu einer Vorlesung Planetensysteme WS 2003 \*

Eugen Willerding

Oktober 2004

Quid non miracolo est, cum primum in notitiam venit? Quam multa fieri non posse, priusquam sint facta, indicantur? Naturae vero rerum vis atque maiestas in omnibus momentis fide caret, si quis modo partes eius ac non totam complectatur animo. Was gilt nicht als Wunder, wenn es das erstmal bekannt wird? Wieviel hält man, bevor es geschieht, für unmöglich? Der Gewalt und Majestät der Natur wird wahrlich in jedem Moment mißtraut, wenn man nur ihre Teile und nicht das Ganze mit dem Geiste umfaßt. Plinius, Naturgeschichte, 8. Buch, 1. Kap., 6 f.

## Abstract

*In den Geowissenschaften ist heute immer häufiger vom System Erde die Rede. Inzwischen fast schon selbstverständlich, geht dieser interdisziplinäre oder besser multidisziplinäre und ganzheitliche Ansatz unter anderem auf eine zunächst sehr umstrittene und als "esoterisch" verlachte Hypothese zurück - die Gaia-Hypothese von James Lovelock. Lovelock postulierte Anfang der 1970er Jahre erstmals die Hypothese, die Erde gleiche einem lebendigen Organismus, einem komplexen, sich selbstregulierenden System von Rückkopplungen. Revolutionär war diese Ansicht vor allem durch die Rolle, die dabei das Leben spielen sollte: Nicht mehr nur als passiv reagierender Teil der Regelkreise, sondern als formender, die abiotischen Faktoren entscheidend beeinflussender Bestandteil des Gesamtsystems. Die Gaia-Hypothese, benannt nach der griechischen Erdgöttin, wurde zunächst zwar von Esoterikern und Theologen begeistert angenommen, von der etablierten Wissenschaft jedoch abgelehnt und ignoriert. Sie widerspreche gängigen Lehren und sei darüberhinaus teleologisch, so der Vorwurf. Ende der 1980er Jahre änderte sich diese Haltung jedoch und viele - wenn auch längst nicht alle - Aspekte von Gaia wurden von der etablierten Geowissenschaft anerkannt, inkorporiert und erweitert.*

---

\*Teile des Textes basieren auf einem Artikel erschienen 2001 in *geo-science online*, Magazin für Geo- und Naturwissenschaften, stellt aber eine erweiterte Version desselben dar.

# 1 Organismus Erde?

**Von der Gaia-Hypothese zum System Erde** Was ist der Planet Erde? Nur die Summe vieler Teile oder doch mehr als das? Glaubt man James Lovelock, ist die Erde Gaia - eine Art lebendiger Organismus. Eine planetarische Einheit, die als Gesamtheit auf Außenreize reagiert und ihren Zustand durch komplexe Regelkreise stabil hält. Lovelocks



Abbildung 1: Der Planet Erde, der "blaue Diamant", vom Weltraum aus betrachtet. Das System Erde: Eine gigantische Symbiose aus biotischer Biosphäre und abiotischer Geosphäre.?

Gaia-Hypothese wurde erst verlacht und dann von der Esoterik vereinnahmt. Doch im Laufe der Zeit hat auch die etablierte Wissenschaft begonnen, sich mehr und mehr mit den einst so verfeimten Ideen auseinander zu setzen. Inzwischen sind viele Aspekte der Gaia-Hypothese sogar zu einem selbstverständlichen Teil der Geowissenschaften geworden.

Immer häufiger ist heute vom System Erde, von einem 'multidisziplinären und ganzheitlichen Ansatz die Rede. Wie kam dieser Sinneswandel zustande? Was ist überhaupt Gaia? Und warum stieß die Hypothese auf so viel Widerstand? Woran scheiden sich bis heute die Geister?

## 2 Vom passiven Spielball zum komplexen System

**Paradigmenwandel in den Geowissenschaften** Die Erde ist ein Spielball von kosmischen und anorganischen Einflüssen. Die Sonneneinstrahlung, Kollisionen mit kleineren Himmelskörpern, die Drift der Kontinente (Plattentektonik) oder Veränderungen der Umlaufbahn um die Sonne (Milankovitch-Zyklen) wirken auf den Planeten und beeinflussen sein Klima und seine Entwicklungsgeschichte bis heute. Bekannt ist ins-

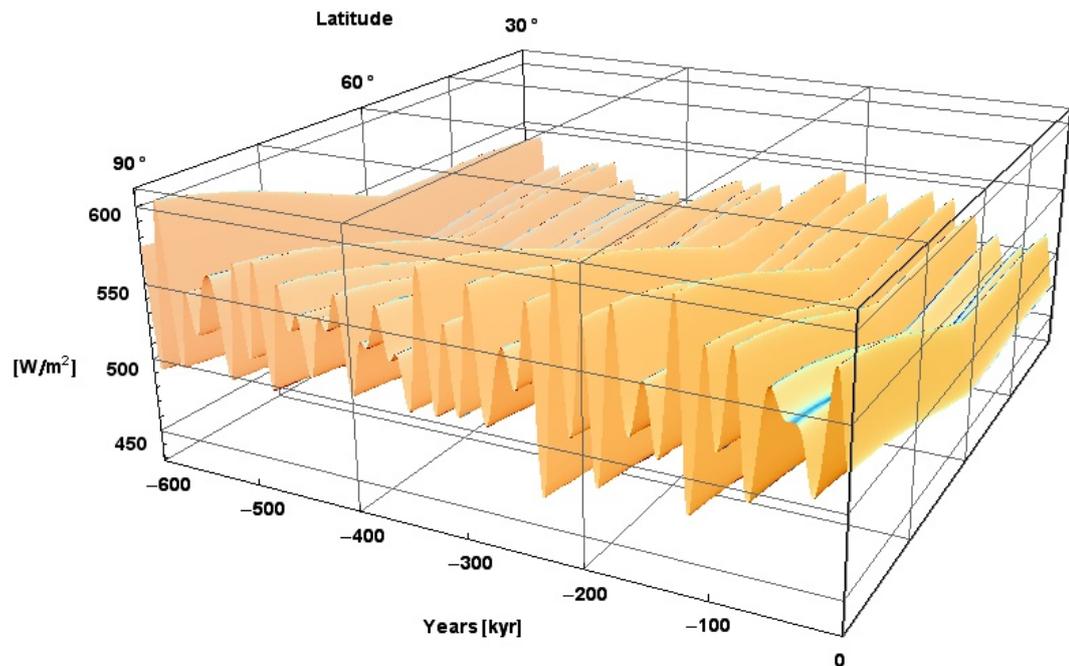


Abbildung 2: Die berühmte Milankovitch-Kurve - zuerst bekannt gemacht durch Köppen & Wegener in ihrem Buch: *Die Klimate der geologischen Vorzeit* im Jahr 1924. Hier nach modernen himmelsmechanischen Berechnungen als Fläche für die letzten 600 tausend Jahre und als Funktion der geographischen Breite (Laskar 1993). Die Einstrahlung ist für 24 Stunden gemittelt und gilt für den höchsten Sonnenstand auf der Nordhalbkugel. Für die polaren Breiten ( $\varphi > 90^\circ - \epsilon$ ) gilt dann für die gemittelte Einstrahlung  $S = S_0 \sin(\varphi) \sin(\epsilon) [W/m^2]$ .

besondere die Variation der Sonneneinstrahlung (insolation) durch Schwankungen der Erdachsenneigung  $\epsilon \approx 23^\circ$  und Bahnexzentrizitäten. In Abb. (2) sind diese Variationen für die letzten 600tausend Jahre dargestellt. Viele Eiszeiten können zum Teil auf diese Variationen zurückgeführt werden. Ohne den Erdmond wären die klimatischen Schwankungen noch erheblich größer gewesen.

Lange Zeit konzentrierten sich daher Geowissenschaftler vor allem auf diese Fakto-

ren, um die Erde und die Abläufe auf ihr zu erforschen. Dem vorherrschenden mechanistischen Weltbild folgend galt es, das große Ganze in möglichst kleine Einzelteile zu zerlegen, um ihre Funktionsweise zu ergründen.

Doch heute hat sich dieses Bild dramatisch gewandelt. Inzwischen sprechen Geowissenschaftler ganz selbstverständlich vom "System Erde" und Klimaforscher versuchen, mit immer aufwändigeren Computermodellen die komplexen Rückkopplungsmechanismen unseres Planeten zu ergründen und zu simulieren. Nicht mehr nur die Einzelkomponenten sind Gegenstand der Forschung, sondern das System Erde als Ganzes, die komplexen Wechselwirkungen, die unseren Planeten in der Balance halten.

Aber bis es zu dieser Sichtweise kam, war einiges an Umdenken nötig. Einen entscheidenden Beitrag dazu leistete der Physiker James Lovelock mit seiner provokanten Gaia-Hypothese - der Sicht der Erde als einem lebendigen Organismus.

Die Auffassung der Erde als ein belebtes Wesen mit einer Seele ist in der Spätantike bereits vorhanden : Schon der griechische Philosoph Plato hatte geschrieben: *Wir bekräftigen, dass der Kosmos, mehr als allem anderen, einem lebendem Wesen gleicht, von dem alle anderen lebenden Wesen ein Teil sind.*<sup>1</sup> Ähnliche Ideen vertrat viel später auch der Astronom Kepler. Kepler schreibt unter anderem: *Wie die belebten Körper Haare haben, so hat die Erde Gras und Bäume - wie Lebewesen in einer Blase Urin haben, so machen die Berge Quellen, den Exkrementen entspricht der Schwefel und vulkanische Produkte, dem Blut und Schweiß entsprechen Metalle und Regenwasser, die Nahrung der Erde ist das Meerwasser.* Zu viel Regen oder große Dürre bedeuten für Kepler eine "Krankheit" der Erde. Und auch James Hutton, einer der Väter der Geologie, beschrieb im 18. Jahrhundert die Erde als eine Art Superorganismus, als ein physiologisches System.

Ein Zeitgenosse von Hutton, der Mediziner Lewis Thomas, sah die Erde ebenfalls als Einheit, als ein zellähnliches System: *Vom Mond aus betrachtet ist das Atemberaubendste an der Erde, dass sie lebendig ist. Sie hat das organisierte, selbsterhaltende Aussehen einer lebendigen Kreatur, voller Information, unglaublich geschickt im Umgang mit der Sonne. Ich habe versucht, von der Erde als einem Organismus zu denken, aber das funktioniert nicht, es gleicht mehr einer lebenden Zelle.*

Und nicht zuletzt schrieb 1844 auch der Naturforscher Alexander von Humboldt, jemand, der schon im 19. Jahrhundert *multidisziplinär* dachte, in seinem Buch *KOSMOS* ähnliche ganzheitliche Ansichten: *Die Natur ist für die denkende Betrachtung Einheit in der Vielheit, Verbindung des Mannigfaltigen in Form und Mischung, Inbegriff der Naturdinge und Naturkräfte als ein lebendiges Ganzes.*

Doch ob Superorganismus, Organismus oder Zelle - vielfach galten diese Sichtweisen im 19. Jahrhundert als suspekt, unwissenschaftlich und romantisierend. Entsprechend umstritten war und ist teilweise heute noch die Vorstellung von *Gaia*

---

<sup>1</sup>Siehe auch: Cicero de natura deorum II 83. Ovid, metam. XV, 342. Seneca nat. quaest. VI 16,1. Plotin IV 4

### 3 Die Erde als lebendiges wechselwirkendes System

**Gaia - Wiedergeburt einer Idee** Es begann mit dem Mars. Genauer gesagt, mit der Suche nach Leben auf dem roten Planeten. Anfang der 1960er Jahre bereitete die NASA ihre Mars- Mission mit der Raumsonde Viking vor und engagierte dafür eine Reihe von Wissenschaftlern, die bei der Klärung von grundlegenden Fragen helfen sollten. Darunter auch James Lovelock. Seine Aufgabe war es, Instrumente zu entwickeln, die Spuren außerirdischen Lebens entdecken konnten.



<b>Venus</b>		<b>Erde</b> heute		ohne Leben	<b>Mars</b>	
Temp.	459°C	Temp.	15°C	240-340°C	Temp.	-53°C
CO <sub>2</sub>	96,5%	CO <sub>2</sub>	0,035%	98%	CO <sub>2</sub>	96,2%
N <sub>2</sub>	2%	N <sub>2</sub>	78,08%	1,9%	N <sub>2</sub>	2,5%
CH <sub>4</sub>	0,0%	CH <sub>4</sub>	1,7 ppm	0,0%	CH <sub>4</sub>	0,0%
O <sub>2</sub>	0,006%	O <sub>2</sub>	20,95%	0,0%	O <sub>2</sub>	0,15%

Abbildung 3: Die drei großen Terrestrischen Planeten im Vergleich. Deutlich weicht die Erdatmosphäre in ihrer chemischen Zusammensetzung von den anderen Planeten ab. Dieses chemische Ungleichgewicht ist ein starkes Indiz für biochemische Prozesse.

Doch woran sollte man ein solches Leben, besonders wenn es in jeder nur erdenklichen Form vorliegen konnte, identifizieren? An der Atmosphäre des Planeten - zu diesem Schluss kam zumindestens Lovelock. Leben bedeutete für ihn in erster Linie die Umwandlung und Aufnahme von Energie und die Abgabe von Stoffwechselprodukten. Und diese Aktionen mussten, so glaubte er, *Fingerabdrücke* in einer gasförmigen Atmosphäre hinterlassen.

Und tatsächlich enthüllten vergleichende Analysen der Atmosphären von Erde und

Mars entscheidende Unterschiede: Während die fast vollständig aus CO<sub>2</sub> bestehende Marsatmosphäre sich als enttäuschend nichtreaktiv und damit *tot* erwies, war die Erde weit von einem chemischen Gleichgewicht entfernt. Im Gegenteil: Die *wilde Mischung* hochreaktiver Gase konnte nur damit erklärt werden, dass sich die Gase ständig erneuerten und regulierten - und die Pumpe für diese Zirkulation musste das Leben selbst sein.

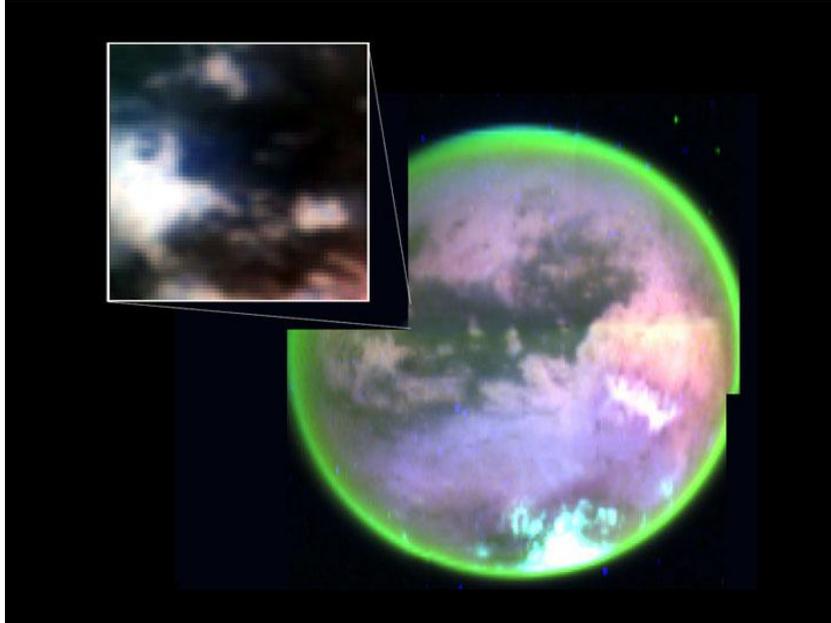


Abbildung 4: Der Saturnmond Titan mit einer Atmosphäre aus hauptsächlich Methan. Zusammengesetzte Aufnahme im Infraroten. Am Südpol zeigen sich Methanwolken. Der Bildausschnitt zeigt die Landestelle der Hygens-Sonde. Ist auch hier die Entwicklung von Leben möglich?

Und nicht nur das: Rückkopplungsprozesse zwischen den lebendigen und den anorganischen Komponenten der Erde hatten offensichtlich dafür gesorgt, dass diese hochreaktive Mischung über Jahrtausende stabil geblieben war. Die Erde verfügte demnach über eine Art planetarischer Selbstregulation - ähnlich wie ein lebender Organismus.

Die Idee von Gaia - der Erde als lebendigem System war geboren: *Gaia ist eine komplexe Einheit, die die irdische Biosphäre, Atmosphäre, Ozeane und den Boden umfasst. Ihre Gesamtheit bildet ein Feedback- oder kybernetisches System, das nach einer optimalen physikalischen und chemischen Umwelt auf diesem Planeten strebt*, so Lovelock in seinem 1979 veröffentlichtem Buch: *Gaia: Eine neue Sicht auf das Leben auf der Erde*. Den Namen Gaia wählte er in Anlehnung an die griechische Erdgöttin Ge oder Gaia.

## 4 Tabubruch oder Pioniertat?

**Gaia im Kreuzfeuer der Kritik** Die Gaia-Hypothese wurde mit offenen Armen aufgenommen - allerdings leider nicht von denen, die Lovelock erreichen wollte, seine Wissenschaftlerkollegen. Stattdessen vereinnahmten zunächst Theologen und diverse esoterische *Mutter-Erde*-Gruppierungen die neue Idee einer ganzheitlichen Erde. Damit verhalfen sie Lovelocks Hypothese zwar zu schneller Bekanntheit, verfrachteten sie aber gleichzeitig in die diskreditierte Eso-Ecke und hielten damit die Geowissenschaftler effektiv davon ab, sich intensiver mit ihr auseinander zu setzen.

Erst in den 1980er Jahren setzte auch in der wissenschaftlichen Welt langsam eine Reaktion ein - vorwiegend negativ. Das war wenig verwunderlich, stand doch Lovelocks Sichtweise einer sich selbst regulierenden Erde in krassem Widerspruch zu bisher geltenden Paradigmen.

Nicht nur, dass Gaia in revolutionärer Weise die strenge Trennung in der Betrachtung von anorganischen Einflüssen auf die Erde und dem Leben darauf durchbrach, das Ganze klang auch verdächtig nach einer teleologischen Betrachtungsweise. Einige Forscher warfen Lovelock vor, der Erde mit der Selbstregulation auch eine Absicht, eine zielgerichtete Entwicklung zu unterstellen - eine scharfe Kritik, die fast das AUS der Hypothese war, galt doch diese Sichtweise als esoterisch religiös und somit unwissenschaftlich.

Doch Lovelock und seine Mitstreiterin, die Mikrobiologin Lynn Margulis, wehrten sich vehement gegen diese Anschuldigung. Für ihn war Gaia zwar ein reagierendes System, verfügte aber weder über Bewusstsein, Voraussicht noch Intention: *Weder ich noch Lynn Margulis haben jemals behauptet, das die planetarische Selbstregulation zielgerichtet ist.*

## 5 Daisyworld

**Gänseblümchen erklären die Welt - und das Gaia-Prinzip** Als Reaktion auf die nicht enden wollende Kritik entwickelte Lovelock die "Daisyworld". Ein einfaches Computermodell, mit dessen Hilfe er beweisen wollte, dass seine Gaia-Hypothese nicht nur keinen Widerspruch zu den grundlegenden Mechanismen der Evolution darstellte, sondern auch keinerlei teleologischer Absichten bedurfte.

Grundlage des Modells ist ein hypothetischer, erdähnlicher Planet, der nur zwei Lebensformen beherbergt: eine weiße und eine schwarze Gänseblümchenart. Beide gedeihen in einem Temperaturbereich von 5 C und 40C mit einem Optimum bei rund 22C. Am Anfang der Simulation sind ihre Samen gleichmäßig auf der Oberfläche von Daisyworld verteilt. Energie- und damit Wärmelieferant für Daisyworld ist die Sonne. In dem Modell ist die Sonneneinstrahlung nicht konstant, sondern nimmt im Laufe der Zeit langsam zu - ähnlich wie dies auch für die Erde der Fall ist.

Zu Beginn von Daisyworld ist es eher kühl auf dem Planeten, die schwarzen Gänseblümchen können wegen ihrer dunklen Färbung mehr Wärme absorbieren und haben daher einen Selektionsvorteil gegenüber den weißen. Sie breiten sich stark aus und färben damit langsam den gesamten Planeten dunkel. Mit zunehmender solarer Ein-

strahlung steigt die planetarische Temperatur jedoch so weit an, dass die dunklen Gänseblümchen an Überhitzung leiden und sich nur noch in Polnähe halten können. Die weißen Gänseblümchen dagegen reflektieren die Sonneneinstrahlung und sind da-

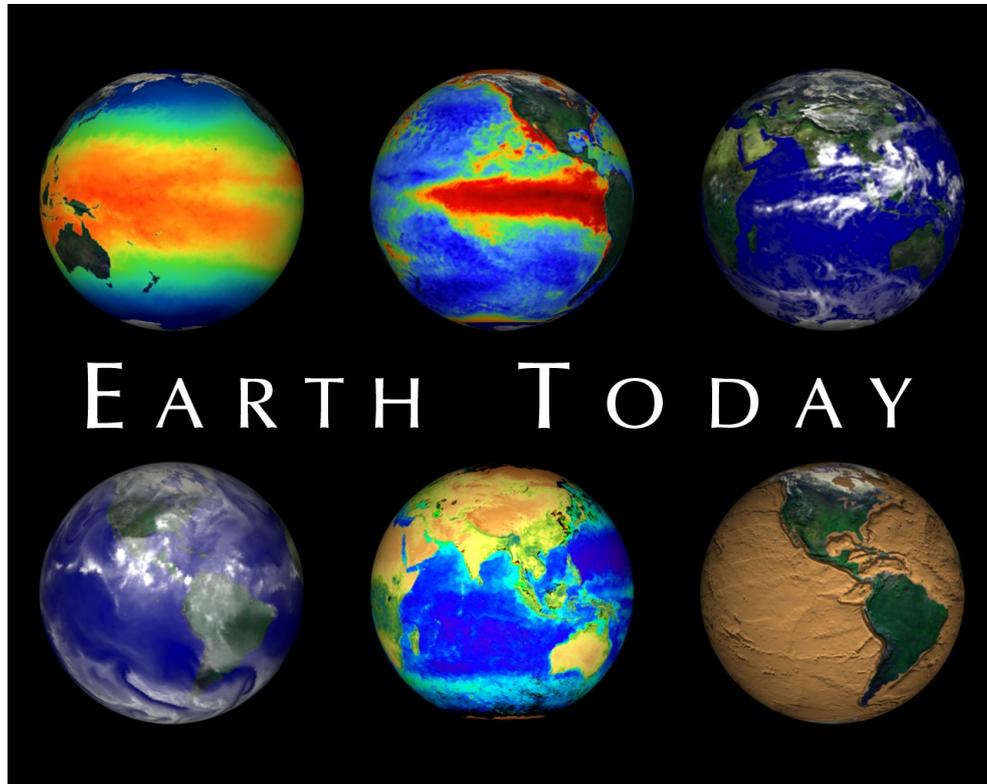


Abbildung 5: Die Erde, bis heute einzigartig im Kosmos, gesehen mit unterschiedlichen modernen Satellitensonden. (Bild NASA)

durch an die höheren Temperaturen besser angepasst. Langsam bekommen sie die Oberhand. Gleichzeitig führen die sich ausbreitenden weißen Flächen jedoch zu einer erhöhten Albedo des Gesamtplaneten. Er gibt dadurch einen immer größeren Anteil der Wärmeeinstrahlung in den Weltraum ab - als Folge bleibt die globale Temperatur trotz zunehmender Sonnenwärme lange Zeit bei etwa  $22^{\circ}\text{C}$  konstant.

Und genau dies wollte Lovelock mit seiner Daisyworld beweisen: Die stabile Regulation der Temperatur in diesem System erfolgt allein über positive und negative Rückkopplungen zwischen Sonneneinstrahlung, Gänseblümchen und Albedo. Teleologie oder gar eine fürsorgende, "altruistische" Einstellung der Gänseblümchen zugunsten des Planeten gibt es nicht.

## 6 Mathematische Gaia-Daisy-Modelle

**Das Ringmodell** Das klassische Modell von Watson und Lovelock zur Veranschaulichung der *Homöostase* beschränkte sich auf ein null-dimensionales Modell. Das heißt, es wurden keine wirklichen räumlichen Ausbreitungsphänomene beschrieben. Das Modell ist auch auf nur zwei Vegetationsarten – schwarze und weiße Gänseblümchen – beschränkt.

Ein etwas realistischeres Modell, was natürlich gegenüber den realen Verhältnissen auch eine *Karikatur* ist, läßt sich beschreiben, indem man auch räumliche Ausbreitung in einer oder zwei Dimensionen zuläßt. In zwei räumlichen Dimensionen formuliert man das Problem am besten schon in der Form eines Zellulären Automaten (z.B. die Software *Mathematica 5.0* Wolfram Research). Ein Kompromiß wäre ein eindimensionales Modell, welches sich auch noch in partiellen Differentialgleichungen ( nichtlineare Diffusionsgleichungen) formulieren läßt.

Um die Daisyworld in einfachster Weise mathematisch zu formulieren, führen wir eine Wahrscheinlichkeitsdichte  $P(A, x, t)$  ein, welche beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Vegetation oder Biotop mit der Eigenschaft  $A$  am Ort  $x$  zur Zeit  $t$  anzutreffen ist. Das Merkmal  $A$  spielt dabei eine zweifache Rolle: *Einerseits* charakterisiert  $A$  die biologische Art, *andererseits* beschreibt  $A$  die thermische Bilanz der Spezies im Sonnenlicht. Die Albedo  $A$  ist definiert als der Quotient aus *nach allen Seiten gestreuten Lichtes* und dem *einfallenden Sonnenlicht*. Der Rest  $1 - A$  wird absorbiert und als Wärme wieder abgestrahlt. Die Albedo ist somit ein reiner Zahlenwert und liegt zwischen 0 und 1 [ $A \in [0, 1]$ ]. Für diese Wahrscheinlichkeitsdichte  $P(A, x, t)$  von unendlich zahlreichen konkurrierenden Bioarten wird nun eine verallgemeinerte *Lotka-Volterra* Reaktions-Diffusionsgleichung der Form

$$\frac{\partial P(A, x, t)}{\partial t} = D(T) \frac{\partial^2 P(A, x, t)}{\partial x^2} + \left[ \beta(T) \left( 1 - \int_0^1 P(A', x, t) dA' \right) - \gamma \right] P(A, x, t) \quad (1)$$

formuliert. Die Gleichung ist eine Integrodifferentialgleichung, da sie für ein Kontinuum von  $A$ -Werten gilt. Dabei bedeutet  $\gamma$  die hier als konstant angenommene Sterberate und  $\beta(T)$  die Wachstumsrate der Spezies, abhängig von der Umgebungstemperatur. Der Parameter  $D(T)$  ist die Diffusionskonstante der Migration des Biotops und ist ebenfalls temperaturabhängig. Beide sind nur in einem bestimmten Bereich ungleich Null. Der Term

$$\left( 1 - \int_0^1 P(A', x, t) dA' \right) \quad (2)$$

ist zudem die Wahrscheinlichkeit, daß *keine* Vegetation am Ort  $x$  zur Zeit  $t$  ist. Der Faktor ist null, wenn alles mit Vegetation besetzt ist. Weiteres Wachstum ist dann nicht mehr möglich.

Gleichungen vom Typ (1) ohne den räumlichen Diffusionsanteil wurden wohl zum erstenmal von Lotka (1925) und Volterra (1926) und mit Diffusionsteil von Kolmogoroff

et al. (1937) diskutiert. Kolmogoroff behandelte die Gleichung

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \nabla^2 n + f(n) n, \quad (3)$$

in der  $n$  eine Populationsdichte und  $D$  eine Diffusionskonstante darstellt. Die Funktion  $f(n)$  beschreibt die Wachstumsrate der Population als Funktion der Dichte. Es ging hier insbesondere um das Problem, mit welcher Geschwindigkeit eine Population in noch unbesetzte Gebiete vordringt (Invasion und Migration). Ein einfaches eindimensionales Lotka-Volterra Diffusionssystem lautet (Räuber-Beute System)

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a(1 - U)U \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - b(1 - U)V. \end{aligned} \quad (4)$$

Die Größe  $U$  beschreibt dabei die ‘‘Beute-Dichte‘‘,  $V$  die ‘‘Räuber-Dichte‘‘ des Systems. Das Produkt  $UV$  ist dann proportional der *Begegnungswahrscheinlichkeit* der Spezies pro Zeiteinheit.  $a$  und  $b$  sind hier zweckmäßig dimensionierte Konstanten. Gekoppelte Gleichungen dieser Art haben ‘‘gepulste‘‘ Wellenlösungen.

Doch es gibt eine weitere berühmte Ideenverbindung. 1952 veröffentlichte der Mathematiker Alan Turing einen bahnbrechenden und weitreichenden Artikel: *The Chemical Basis of Morphogenesis*. In diesem Artikel postulierte er einen Mechanismus für die Generation von Mustern in der embryonischen Haut der Tiere und in anderen generativen Prozessen. Dieser Mechanismus basiert auf *Reaktion-Diffusion* beschrieben durch zwei gekoppelte nichtlineare partielle Differentialgleichungen der Form

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} &= D_1 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + F(U, V) \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= D_2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + G(U, V), \end{aligned} \quad (5)$$

in der  $F(U, V)$  und  $G(U, V)$  kubische Polynome mit konstanten Parametern darstellen. Wichtig ist auch, dass die Diffusionskonstanten  $D_1$  und  $D_2$  unterschiedliche Werte haben (*Aktivator-Inhibitor-Systeme*). Turing postulierte abstrakte chemische Reaktanten, die *Morphogene* heißen, die durch ein Medium bei verschiedenen Geschwindigkeiten diffundieren und miteinander interagieren, und er zeigte, wie ein solches mathematische Modell bei bestimmten Parametern die in der Natur gefundenen Muster reproduzieren könnte. (*Turing-Hopf-Instabilität*; Muster beim Leopardenfell, Zebra, und Schmetterlingsflügeln). Bis heute ist diese Idee zumindest in der Biologie umstritten geblieben. Doch Turing versuchte schon 1952, die Entstehung der in den Meeren lebenden *Radiolarien* mit ihren pittoresken Strukturen durch Reaktions-Diffusionsgleichungen auf einer Kugeloberfläche zu erklären.

Doch im Gaia-Daisy Modell liegen die Verhältnisse einfacher, denn das ‘‘karikaturhafte‘‘ eindimensionale Gaia-Daisy-Modell soll nur die Wechselwirkung Biosphäre-Planetosphäre - Lithosphäre eines Planeten darstellen. Räumliche Instabilitäten sind nur in Sonderfällen möglich.

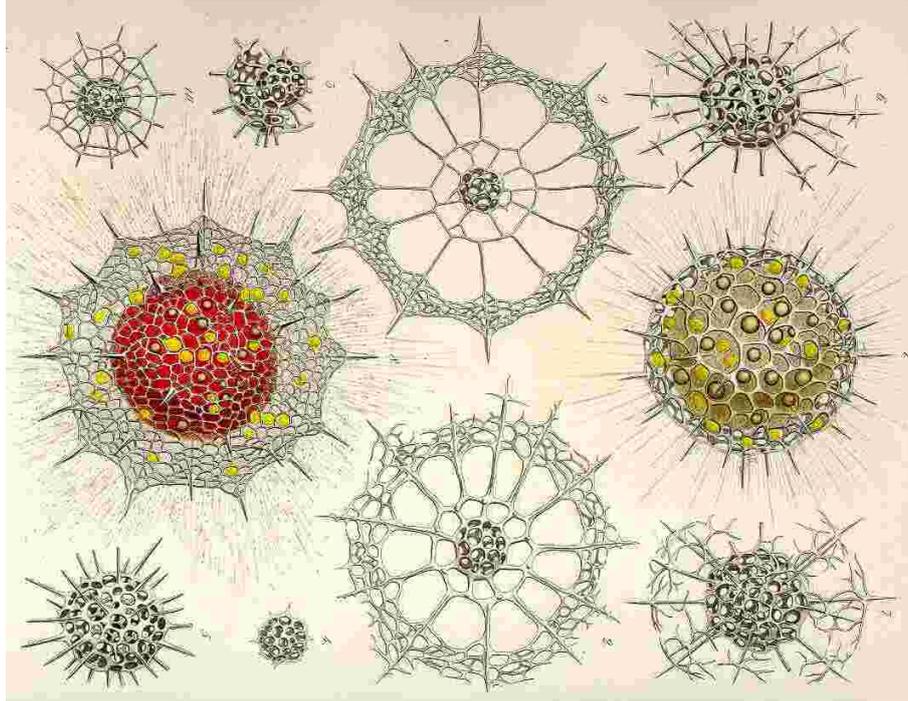


Abbildung 6: Der Mathematiker Alan Turing spekulierte schon 1952 darüber, ob man die Strukturbildung von Radiolarien durch spezielle Reaktions-Diffusionsgleichungen beschreiben kann. Die Tafel stammt aus dem berühmten selbstgezeichneten Atlas von Ernst Haeckel aus dem Jahre 1862.

Neben der Populationsdynamik unseres Gaia-Planeten müssen nun die thermische Bilanz des Planeten betrachten. Wie sieht die Temperaturverteilung aus und welcher Gleichung folgt sie? Ohne Betrachtung der Winde und meteorologischen Prozesse nehmen wir hier einfach an, daß für den Wärmetransport zwischen unterschiedlichen Spezies eine Wärmeleitungsgleichung gültig ist. In der berühmten klassischen Arbeit von Watson & Lovelock von 1983 wurde noch eine *ad hoc* Gleichung für die Temperatur der unterschiedlichen Spezies benutzt – eine problematische und letztendlich unphysikalische Betrachtung. Die einfachste Fouriersche Wärmeleitungsgleichung für die globale Temperatur des Daisy- Problems lautet

$$C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - \sigma_B T^4(x, t) + S(x, t) (1 - A_{eff}(x, t)), \quad (6)$$

wo  $C_p$  die spezifische Wärmekapazität,  $\kappa$  eine Diffusionskonstante und  $\sigma_B$  die Stefan-Boltzmann Konstante bedeutet.  $S(x, t)$  ist die Solarkonstante als Funktion von  $x$  ("geo-

graphische Breite“) und der Zeit  $t$ . Die Albedofunktion  $A_{eff}(x, t)$  ist definiert durch

$$A_{eff}(x, t) = A_g \left( 1 - \int_0^1 P(A', x, t) dA' \right) + \int_0^1 A' P(A', x, t) dA'. \quad (7)$$

$A_g$  ist dabei der Albedowert des “abiotischen“ Planeten oder der unbewachsenen Planetenoberfläche.

Die Gleichgewichtstemperatur des Gaia-Planeten ist, wenn die effektive Albedo örtlich konstant ist, gegeben durch die Formel

$$\sigma_B T_{eff}^4 = S_0 (1 - A_{eff}). \quad (8)$$

Diese Gleichung ist schon eine gute Näherung an reale Verhältnisse. Für einen rotierenden Planeten mit Atmosphäre gilt nämlich etwas genauer

$$4\pi R^2 \sigma_B T_{eff}^4 = \pi R^2 S_0 (1 - A_{eff}) \left( 1 + \frac{3}{4}\theta \right), \quad (9)$$

da über die ganze Oberfläche mit Radius  $R$  wieder abgestrahlt wird. Der Faktor mit  $\theta$  beschreibt den Einfluß der Atmosphäre (Strahlungstransport in der Näherung grauer Atmosphären) und beschreibt somit den *Treibhauseffekt* (*green house factor*). Mit  $S_0 = 1365 \text{ W/m}^2$ ,  $A_{eff} = 0.3$  und  $\theta = 0.8$  erhält man  $T_{eff} \approx 288 \text{ K}$  als mittlere Temperatur für die Erde.

Neben der globalen Gleichung (6) benötigt man noch eine mikroskopische Temperaturgleichung, welche das Mikroklima der einzelnen Biotope beschreibt. In Anlehnung an Lovelock könnte man hier setzen

$$\sigma_B T_n(x, t)^4 = \sigma_B T(x, t)^4 + q S(x, t) (A_{eff}(x, t) - A_n) \quad (10)$$

wo  $q$  ein Diffusionsparameter zwischen 0 und 1 darstellt. Nur diese Temperatur ist für das Wachstum einzelner Biotope maßgebend.

Die Gleichungen (1) und (6) stellen ein nichtlinear gekoppeltes System von positiver und negativer Rückkopplung dar, welches die Temperatur des “Gaia-Planeten“ in einem für die Vegetation optimalen Bereich stabilisiert, auch wenn die Solarkonstante  $S(x, t)$  sich zeitlich oder örtlich um beträchtliche Werte ändert. Erst wenn die Solarkonstante einen kritischen Wert überschreitet, bricht die Vegetation auf dem Gaia-Planet *vollständig* zusammen. Dies entspricht einem *Phasenübergang erster Ordnung* in thermodynamischen Systemen. Eine Wiederherstellung der ursprünglichen Artenvielfalt ist dann nur noch durch vollständiges Zurückfahren der Solarkonstante auf den anfänglichen Wert möglich. Die Dynamik des Ökosystems zeigt somit *HYS-TERESE*-Eigenschaften. Das Verhalten des Gaia-Planeten ist von seiner Geschichte abhängig.

Um mit den Integrodiffusionsgleichung numerisch “zu spielen“, benutzt man am besten die Gausschen Quadraturformeln zur Aufspaltung in ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem. So gilt approximativ in  $N$ -ter Ordnung

$$\int_0^1 P(A', x, t) dA' \approx \sum_{n=1}^{n=N} w_n P(A_n, x, t), \quad (11)$$

in der  $w_n$  Gaussche Gewichte und die  $A_n$  Gaussche Stützstellen im Intervall 0 und 1 darstellen. Mit der Abkürzung

$$P(A_n, x, t) = P_n(x, t) \quad (12)$$

gelten dann anstatt (1) die N gekoppelten Gleichungen

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_n(x, t)}{\partial t} &= D(T) \frac{\partial^2 P_n(x, t)}{\partial x^2} + \\ &\left[ \beta(T_n) \left( 1 - \sum_{n=1}^{n=N} w_n P_n(x, t) \right) - \gamma \right] P_n(x, t) \quad \{n = 1, \dots, N\} \end{aligned} \quad (13)$$

und anstatt (7)

$$A_{eff}(x, t) = A_g \left( 1 - \sum_{n=1}^{n=N} w_n P_n(x, t) \right) + \sum_{n=1}^{n=N} w_n A_n P_n(x, t). \quad (14)$$

Damit erhält man ein System von  $N+1$  gekoppelten nichtlinearen Reaktions-Diffusionsgleichungen, bei der die Solarkonstante  $S(x, t)$  die treibende Kraft darstellt. Für  $N=2$  ergibt sich dann der schon von Lovelock behandelte Fall von genau zwei Vegetationsarten mit spezifischen Albedowerten  $A_1$  und  $A_2$  ( die eine Art mehr schwarz und die andere Art mehr weiß), allerdings hier erweitert durch eine räumliche Diffusion der Spezies.

Wie schon häufiger betont, stellt das so formulierte mathematische Modell nur eine Karikatur der wirklichen Wechselwirkungsprozesse dar. Doch es kann mit dieser Idealisierung gezeigt werden, dass es einen negativen Rückkopplungsmechanismus tatsächlich geben kann.

Mit modernen Algorithmen wie zellulären Automaten lassen sich noch wesentlich komplexere und auch realistischere Systeme simulieren. Diese werden in dem neusten Buch über Gaia von 2004 diskutiert, welches im Anhang erwähnt wird.

## 7 Von Gaia zum System Erde

**Die heutige Situation** Unter anderem als Reaktion auf Lovelocks Daisyworld-Modell, begannen sich die harten Fronten in der wissenschaftlichen Gaia-Debatte langsam aufzuweichen: 1988 sponsorte die amerikanische Geophysikalische Union eine erste große internationale Konferenz zur Gaia-Hypothese und setzte damit ein entscheidendes Zeichen: Gaia durfte nun auch in der wissenschaftlichen Welt offiziell diskutiert und zur Kenntnis genommen werden.

Obwohl die Diskussionen höchst kontrovers verliefen, und die Gaia- Hypothese keineswegs in Gänze anerkannt wurde, führten sie doch zu einem allmählichen Paradigmenwechsel in den Geowissenschaften: Erstmals unterstützte nun auch die etablierte Geowissenschaft die Vorstellung, dass wohl tatsächlich auch die Lebenswelt des Planeten entscheidenden Einfluss auf bestimmte Aspekte der abiotischen Welt haben musste.

Diese Entscheidung glich einem Dambruch: Eine wahre Flut von Projekten, die die Interaktionen zwischen belebter und unbelebter Welt untersuchten, ging an den Start und zahlreiche Veröffentlichungen in Science, Nature und weiteren renommierten wissenschaftlichen Journalen folgten.

Andere Aspekte der Gaia-Hypothese allerdings blieben und bleiben bis heute weiter umstritten, so beispielsweise die Vorstellung einer echten Ko-Evolution zwischen biologischen und nicht-biologischen Systemen. Aber auch die homöostatische Regelung der abiotischen Faktoren durch direkte negative Rückkopplungen von seiten der Lebenswelt sorgen weiterhin für Diskussionsstoff.

Dennoch: Trotz seiner bis heute umstrittenen und nicht anerkannten "organismischen" Aspekte hat Gaia in der Forschungslandschaft deutliche Spuren hinterlassen - nicht von ungefähr ist "System Erde" inzwischen einer der Kernbegriffe der Geowissenschaften. Auch im System Erde steht die Erforschung der Austauschprozesse von Masse und Energie zwischen den interagierenden Sphären Biosphäre, Atmosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre im Vordergrund. Allerdings wird dabei - in Abgrenzung zu Gaia - die Erde "nur" als System, nicht aber als ein lebendiger Organismus betrachtet.

Doch der mittlerweile über 80-jährige Lovelock ist nach wie vor optimistisch, auch die noch umstrittenen Aspekte seiner Theorie eines Tages vollständig anerkannt zu sehen: *Es war ein schmerzhafter Kampf. Aber das ist keine Überraschung. Wenn Sie eine große Theorie beginnen, wie die Quantenmechanik, die Plattentektonik, die Evolution, dauert es im allgemeinen rund 40 Jahre für die Mainstream-Wissenschaft, um sie anzuerkennen. Gaia existiert erst seit etwa 30 Jahren...*

Das Daisyworld-Modell und seine Varianten werden heute in der Kybernetik, komplexen System Theorie, Physiologie, Evolution, Ökologie, System-Erde Forschung und in der Informationstheorie angewendet. Entstanden aus dem Problem, die Wechselwirkung zwischen Leben und seiner materiellen Umwelt in einfachster Weise mathematisch zu beschreiben, werden heute *Daisy-Modelle* als Plattform benutzt, wenn es um die Selbstregulierung in irgendeinem komplexen System mit zahlreichen Rückkopplungsschleifen geht.

## 8 Das Leben spielt immer mit

**Die Selbstregulation irdischer Stellgrößen** Wesentliche Beispiele für die Selbstregulationsmechanismen der Erde sind die globale Temperatur, die Zusammensetzung der Atmosphäre und die Salinität der Weltmeere. In allen diesen Prozessen spielt auch das Leben eine wichtige Rolle. Erst durch die Interaktion von belebten und unbelebten Komponenten scheinen sich die Rückkopplungsschleifen vieler Systeme zu schließen.

Eine solche aktive Beteiligung des Lebens galt noch vor 30 Jahren als Widerspruch gegen alle gängigen Vorstellungen. Inzwischen jedoch hat die Biosphäre als zentraler Bestandteil des Systems Erde - neben Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre - längst ihren festen Platz im neuen Weltbild der Geowissenschaften gefunden - nicht zuletzt dank der Debatten um Lovelock und seiner Gaia-Hypothese. Wie prägend allerdings biologische Einflüsse tatsächlich auf die Regulation des Gesamtsystems sind, ist in vielen Bereichen noch umstritten oder ungenügend erforscht.

## 9 Thermostat Erde

Seit der Entstehung der Erde hat die Sonneneinstrahlung um rund 25 Prozent zugenommen, dennoch sind die globalen Durchschnittstemperaturen nicht in gleichem Maße gestiegen, sondern schwankten im Laufe der Erdgeschichte mehr oder weniger stark um einen Mittelwert. Diese Regulation folgt im Grunde dem gleichen Prinzip wie das einfache Modell der Daisyworld. Auch für die Erde spielt beispielsweise die Albedo eine wichtige Rolle. Diese setzt sich jedoch aus mehreren Größen wie Eisbedeckung der Pole oder Wolkendichte und -art zusammen und wird ihrerseits von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst.

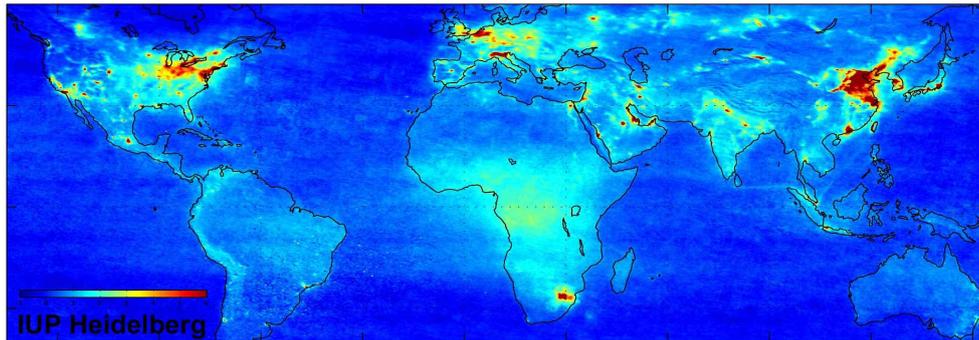


Abbildung 7: Die  $\text{NO}_2$  Konzentration auf der Erde, ein Maß für industrielle Ausgasungen. Deutlich ist zu erkennen, dass heutzutage besonders China durch seinen enormen Energiebedarf einen sicherlich *negativen* Einfluß auf die Biosphäre/Geosphäre hat. (Bild: ESA Satellit Envisat)

Untersuchungen zeigen jedoch auch hier - entgegen früheren Annahmen - eine wichtige Funktion von Organismen in diesem System. Vor allem das Phytoplankton der Meere wirkt nicht nur als Kohlendioxidsenke, die winzigen Algen produzieren auch Dimethylsulfid (DMS), eine Substanz, die an die Atmosphäre abgegeben wird und dort als Kondensationskeim zur Wolkenbildung beiträgt. Wird es wärmer, nimmt das Algenwachstum in bestimmten Regionen zu und mehr DMS wird frei. Dadurch können vermehrt Wolken entstehen, diese reflektieren einen größeren Anteil der Sonneneinstrahlung und die Temperatur sinkt wieder.

Diese - vereinfacht dargestellte - Rückkopplungsschleife ist jedoch nur eine von vielen, die das irdische Thermostat in seiner Gesamtheit ausmachen. Sie wird zur Zeit unter anderem von Forschern der Max-Planck Gesellschaft untersucht. Bis heute gelingt es Klimawissenschaftlern jedoch noch nicht, die volle Komplexität dieses Systems zu erfassen oder gar in Computermodellen nachzubilden.

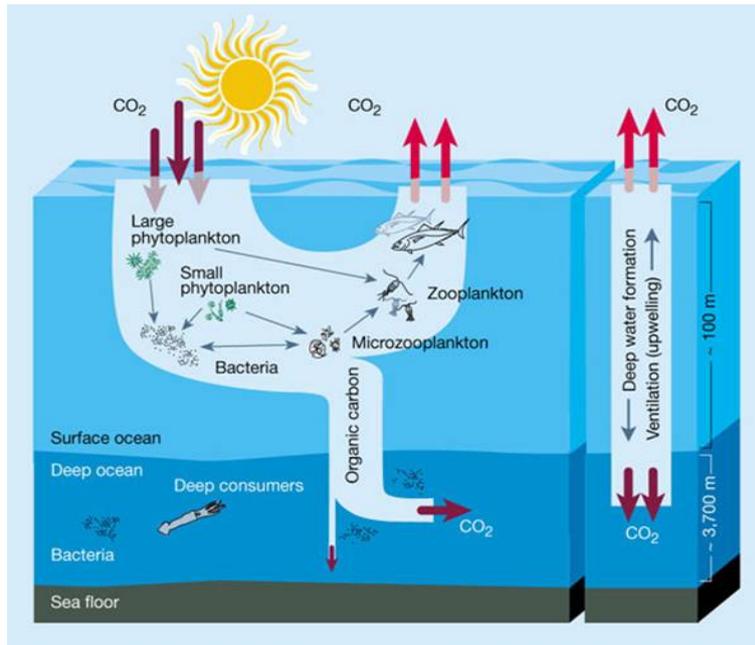


Abbildung 8: Biologische Kohlenstoffpumpen: Komplexe Prozesse in den Ozeanen, in die auch Phytoplankton involviert ist. (©J.H. Sharp, University of Delaware)

## 10 Das Rätsel des Meersalzes

**Mikroorganismen als Regulatoren der marinen Salinität?** Wieso versalzen die Meere nicht? Diese Frage erscheint trivialer, als sie ist. Der Salzgehalt der Meere liegt heute bei durchschnittlich 3,4 Prozent - einem für das marine Leben optimalen Wert: Läge er nur wenig höher als vier Prozent, würde er grundlegende Zellfunktionen der Organismen blockieren, die Folge wären Massenaussterben unter den Meeresbewohnern. Die Entwicklung des marinen Lebens deutet darauf hin, dass der Salzgehalt des Meerwassers über Millionen, wenn nicht sogar Milliarden von Jahren relativ gleich geblieben sein muss.

Aber warum? Immerhin transportieren Regen und Flüsse 2,75 Milliarden Tonnen Salze pro Jahr ins Meer. Sie werden aus Gesteinen ausgewaschen oder von anderen natürlichen und heute auch zunehmend anthropogenen Prozessen freigesetzt. Dennoch bleibt der Salzgehalt des Meerwassers konstant - weit unterhalb des möglichen Sättigungspunktes. Und auch katastrophale Ereignisse wie Meteoriteneinschläge oder ausgedehnte Vereisungen scheinen zumindest keine längerfristigen "Entgleisungen" zur Folge gehabt zu haben.

Offensichtlich existieren Regulationsmechanismen, die dafür sorgen, dass sich die Salinität innerhalb bestimmter Grenzen bewegt. Seit längerem bekannt sind abiotische



Abbildung 9: Phytoplankton im Atlantik vom Weltraum aus gesehen.

Prozesse, die dem Meerwasser kontinuierlich Salze entziehen: Die Ablagerung von Salzen bei Verdunstung und Verlandung, Salzlager unter den Kontinentalschelfen oder die Bindung und Sedimentation von Salzen durch Tone und anorganische Verbindungen. Doch Versuche, die Salzregulation allein durch diese rein chemischen oder physikalischen Prozesse nachzubilden, misslingen.

Erst wenn auch die Meeresbewohner selbst - in Analogie zum Daisyworld-Modell - mit einbezogen werden, kommt man der Lösung näher: Es hat sich gezeigt, dass Mikroorganismen wie Kieselalgen oder Coccolithophoriden als Entsalzer eine wichtige Rolle spielen. Sie lagern Silikatsalze oder Kalzium in ihre Schalen ein, diese sinken beim Absterben der Organismen zu Boden und sind dadurch als Sediment dem freien Wasser entzogen.

Liegt hier ein weiteres Beispiel für das prägende Einwirken der Biosphäre auf abiotische Faktoren des Systems Erde vor? Wenn es nach Lovelock geht, lautet die Antwort eindeutig ja. Die etablierte Ozeanographie ist zwar vorsichtiger in ihrer Einschätzung, sieht aber durchaus starke Argumente für die Existenz einer biologischen Kontrolle der Salinität.

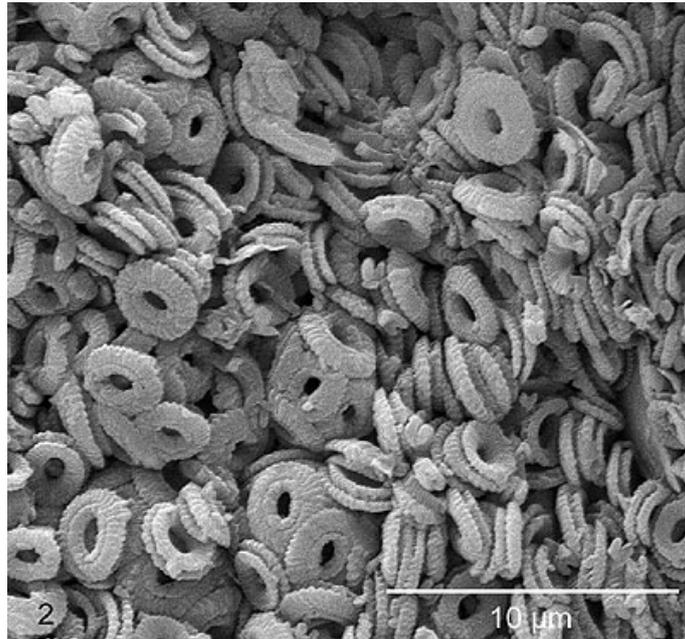


Abbildung 10: Kalknanoplankton aus dem Tertiär (Coccolithe)

## 11 Es gibt keine zielgerichtete Evolution

Ein Argument gegen die Gaia-Hypothese – nämlich dass dann Evolution zielgerichtet sei – ist nicht richtig und wurde auch nicht behauptet. Der Paläontologe, Geologe und Evolutionsforscher Stephen Jay Gould (1941-2002) wandte sich vielfach gegen den Gedanken, dass Evolution mit Fortschritt gleich zu setzen sei. Er führte 7 Punkte dazu an:

- Das Leben entspringt aus Bereichen geringer Komplexität, Gould spricht hier von einer “linken Wand“: unter einer gewissen Einfachheit existiert kein Leben und dem Ursprung des Lebens liegt eine gewisse Einfachheit zu Grunde: “Aus der Ursuppe kann kein Löwe entspringen“
- Stabilität der ursprünglichen Bakterien als Lebensform: Auch wenn die “mittlere Komplexität des Lebens“ größer geworden ist, so haben die so genannten einfachen Lebensformen (Bakterien) bis heute erfolgreich überlebt.
- Damit sich Lebensformen ausbreiten konnten, mussten sie immer komplexer werden da unter einer gewissen Einfachheit kein Leben existiert. Gould spricht von einer “immer stärkeren rechtschiefen Verteilung“ weg von der “linken Wand geringster Komplexität“

- die Gesamtverteilung nur durch ihren komplexen Anteil zu beurteilen ist kurz-sichtig
- der angebliche Fortschritt ist nicht gerichtet, sondern zufällig und ungerichtet. Als Metapher führte er an: der ungerichtete Weg des Betrunkenen zwischen dem Gasthaus links und der Straße rechts führt früher oder später ins Rinnsal. Weiters betrachtet er die komplexen Lebewesen als ein "Stolpern" von sehr unterschiedlicher Formen: Bakterium, Eukaryontenzelle, Meeresalgen, Qualle, Trilobit, Nautiloid, Panzerfisch, Dinosaurier, Säbelzahniger und Homo sapiens
- eine Kombination von zufälliger Bewegung und einer Tendenz nach rechts weg von der "linken Wand" erscheint ihm möglich, aber unwahrscheinlich: er kennt keinen Nachweis für eine bevorzugte Bewegung in Richtung größerer Komplexität
- Ist der Mensch (durch seine Existenz schon) die Krönung der Schöpfung? Gould meint dazu, dass wenn wir das Spiel des Lebens noch einmal spielen könnten, es völlig unvorhersehbar wäre, welche Lebensformen am komplexesten wäre; es wäre unwahrscheinlich, dass ein Geschöpf mit einem Bewußtsein (so wie wir) entstände.

Die Gaia-Hypothese, von Lynn Margulis auch schon Gaia-Theorie genannt, wirft auch ein neues Licht auf die *Darwinsche Evolution*. Nicht der "Stärkste" überlebt auf dem Planeten, sondern nur gemeinsam in komplexen *Symbiosen* von "Starken" und "Schwachen" mit biologischer Vielfalt kann der Planet durch selbstregulative Wechselwirkungen von biotischer und abiotischer Materie Leben auf seiner Oberfläche erhalten. Biologische Diversifikation und Symbiosen sind daher die Zauberwörter für das SYSTEM Erde.

## Anhang

Das neueste multidisziplinäre Buch über GAIA ist im September 2004 bei MIT-Press erschienen. Im Vorwort kommen die beiden Hauptvertreter der Hypothese – James Lovelock und Lynn Margulis – zu Wort. Diese Beiträge sind diesem Skript am Ende im Original anhängt.

Aus dem Originaltext von MIT-Press: **Scientists Debate Gaia: The Next Century**. MIT-Press 2004. Edited by Stephen H. Schneider, James R. Miller, Eileen Crist and Penelope J. Boston. Foreword by Pedro Ruiz Torres. Introduction by James Lovelock and Lynn Margulis. *Scientists Debate Gaia is a multidisciplinary reexamination of the Gaia hypothesis, which was introduced by James Lovelock and Lynn Margulis in the early 1970s. The Gaia hypothesis holds that Earth's physical and biological processes are linked to form a complex, self-regulating system and that life has affected this system over time. Until a few decades ago, most of the earth sciences viewed the planet through disciplinary lenses: biology, chemistry, geology, atmospheric and ocean studies. The Gaia hypothesis, on the other hand, takes a very broad interdisciplinary approach. Its most controversial aspect suggests that life actively participates in shaping the physical and chemical environment on which it depends in a way that optimizes the conditions*

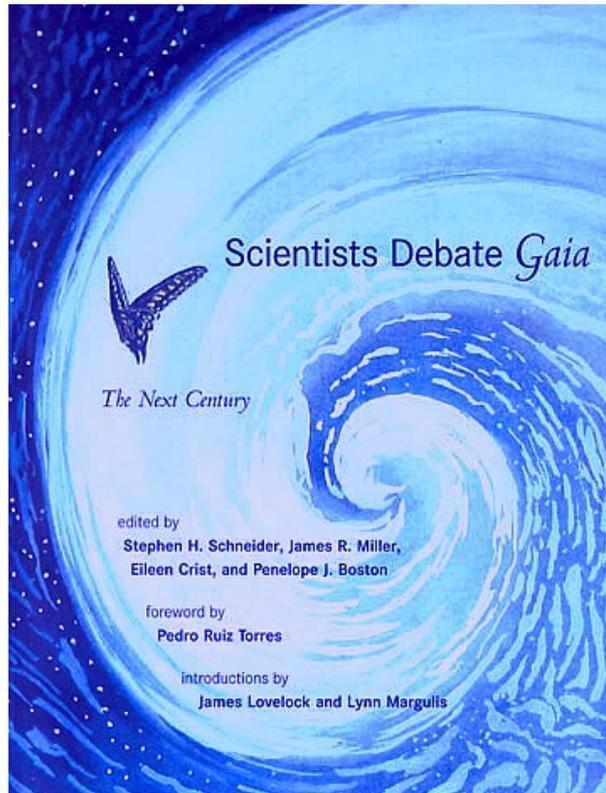


Abbildung 11: Das neueste Konferenzbuch zur Gaia-Hypothese aus dem Jahre 2004 (MIT-Press).

*for life. Despite initial dismissal of the Gaian approach as New Age philosophy, it has today been incorporated into mainstream interdisciplinary scientific theory, as seen in its strong influence on the field of Earth System Science. Scientists Debate Gaia provides a fascinating, multi-faceted examination of Gaia as science and addresses significant criticism of, and changes in, the hypothesis since its introduction.*

*In the book, 53 contributors explore the scientific, philosophical, and theoretical foundations of Gaia. They address such topics as the compatibility of natural selection and Gaian processes, Gaia and the “thermodynamics of life,” the role of computer models in Gaian science (from James Lovelock’s famous but controversial “Daisyworld” to more sophisticated models that use the techniques of artificial life), pre-Socratic precedents for the idea of a “Living Earth,” and the climate of the Amazon Basin as a Gaian system.*

## Literatur

- [1] Lovelock, J.E.: Gaia - A New Look at Life on Earth ( Revised) von James Lovelock, Taschenbuch, Oxford Paperbacks, 2000; *Das Buch, mit dem James Lovelock erstmals seine Gaia- Hypothese veröffentlichte in einer neu aufgelegten und überarbeiteten Form.*
- [2] Lovelock, J.E.: The Ages of Gaia - A Biography of Our Living Earth; Taschenbuch, Oxford University Press, 2004; *In seinem ersten Buch stellte Lovelock die Gaia-Hypothese vor, hier nun geht er in die Tiefe: Er untersucht und diskutiert ausführlich aktuelle ökologische Phänomene wie den Treibhauseffekt, den sauren Regen, das Schrumpfen der Ozonschicht oder die Zerstörung der Regenwälder und warnt vor dem Schaden, den der Mensch der Gesundheit unseres Planeten zufügt.*
- [3] Margulis, L. : Die andere Evolution. Spektrum Verlag 1999. *Die amerikanische Biologin Lynn Margulis hat den Mut bewiesen, gegen den wissenschaftlichen Strom zu schwimmen. Ihre 'Endosymbiontentheorie' - derzufolge die Zellen aller tierischen und pflanzlichen Organismen einst aus dem Zusammenschluß verschiedener Bakterienarten hervorgegangen sind - stieß lange Jahre auf heftige Ablehnung, zählt jedoch heute zum Lehrbuchwissen, und auch ihr überzeugter Eintritt für die 'Gaia-Theorie' - in der die Erde als ein umfassendes selbstregulierendes Ökosystem angesehen wird - hat ihr keineswegs nur Freunde verschafft. Vom Bakterium bis zur Biosphäre erstreckt sich der Wirkungsbereich der 'symbiontischen Evolution', und in eben dieser Bandbreite bewegt sich auch das wissenschaftliche Schaffen von Lynn Margulis. Ihr Buch ist ein kurzer Erfahrungsbericht vom Leben - von der Evolution des Lebendigen sowie von den Wegen und Irrwegen der Wissenschaft.*
- [4] Margulis, L. & Sagan, D.: Leben. Spektrum Verlag 1999. *Zwei sachkundige Führer begleiten den Leser auf dem langen Weg von den ersten vermehrungsfähigen Molekülen bis zur selbsterhaltenden Biosphäre, vom Bakterium bis zum Menschen und öffnen ihm Etappe für Etappe die Augen für die unbändige Innovationskraft der Evolution.*
- [5] Humboldt, A. **KOSMOS.** *Entwurf einer physischen Weltbeschreibung.* Vollständige Neu-Edition von Ottmar Ette und Oliver Lubrich mit allen späteren Zusätzen und Korrekturen von Humboldt. Eichborn-Verlag 2004.  
*Der große Naturforscher und Universalgelehrte läßt Muschelverkalkungen und Sternschnuppen vom Ursprung der Welt erzählen, berichtet von Schwarzen Löchern, fernen Kometen, der Schönheit der Natur der Tropen und des Eismeers. Er lehrt uns das Staunen und weckt in uns die Lust, weiter zu fragen: Wie schön wäre es doch, wenn man mehr wüßte. Alexander von Humboldts populärwissenschaftlichen Kosmos-Vorlesungen, die die Keimzelle seines großen Werkes bilden, lauschte einst halb Berlin vom Arbeiter bis zur Hofgesellschaft. Die Erstausgabe des Kosmos ist 1845 bis 1865 in fünf Bänden bei Cotta in Tübingen erschienen. Sie erreichte eine Auflage von 80000, für damalige Verhältnisse ein enormer Erfolg.*

- [6] Kolmogorov, A., N. Petrovsky, and N. S. Piscounov. 1937. *Étude de l'équations de la diffusion avec croissance de la quantité de matière et son application a un problème biologique*. Moscow University Bulletin of Mathematics **1**:1-25.
- [7] Lotka, A.J. 1925. *Elements of physical biology*. Baltimore; Williams & Wilkens Co.
- [8] Pauli, W. 1957: *Der Einfluß archetypischer Vorstellungen auf die Bildung naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler*. Erschienen in *Natureklärung und Psyche Studien aus dem C.G.Jung Institut Zürich IV*. Rascher Verlag Zürich 1957.
- [9] Turing, A.M., 1952. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **237**, 37 (1952)
- [10] Volterra, V. 1926. *Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi*. Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei. ser. **VI**, Vol 2
- [11] Watson, A.J. & J.E. Lovelock, 1983: *Biological homeostasis of the global environment: the parabel of Daisyworld*, *Tellus* **35B**, 286-289

# Reflections on Gaia

James Lovelock

In November 1987, the Dahlem Conference in Berlin had the title “The Changing Atmosphere.” Just before we started our discussions, a delegate asked me what part Gaia theory had played in the paper by Robert Charlson and his friends on dimethyl sulfide, clouds, and climate. Before I could reply, another delegate interrupted. “Gentlemen,” he said forcefully, “we are here to discuss serious science, not fairy stories about a Greek Goddess.” I was not amused by his ill-mannered protest, but looking back, I see that there was some sense in it. He was expressing the frustration felt at the time by many scientists who wanted to believe that their science, whether geophysics, chemistry, geology, or biology, said all that there was to say about the Earth. I also felt that we were spending far too much time at meetings arguing about the metaphor and ignoring Gaia science. What we do not seem to have noticed is that the science of Gaia is now part of conventional wisdom and is called Earth system science; only the name Gaia is controversial. The most recent acknowledgment of this was the Amsterdam Declaration, issued by a joint meeting of the International Geosphere Biosphere Programme, the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, the World Climate Research Programme, and the International Biodiversity Programme on July 13, 2001. The declaration had as its first bullet point: “The Earth System behaves as a single, self-regulating system comprised of physical, chemical, biological and human components.” I wonder how many of those who signed the declaration knew that they were putting their names to a statement of Gaia theory.

Let us go back to the 1960s and remind ourselves how separated and reductionist the Earth and life sciences were. In the splendid and authoritative book *Earth*, published in 1974 by Frank Press and Raymond Siever, they shared the general view and stated: “Life depends on the environments in which it evolved and to which it has adapted” (p. 489). In the same period, John Maynard Smith published an equally authoritative book on evolutionary biology, *The Theory of Evolution*. In it he said: “The study of evolution is concerned with how, during the long history of life on this planet, different animals and plants have become adapted to different conditions, and to different ways of life in those conditions” (p. 15). Neither of these eminent representatives of the Earth and life sciences thought it necessary to acknowledge that organisms alter their environment as well as adapt to it. I do not think they realized that the evolution of the organisms and of their environment was a single, coupled process.

It is true that the biogeochemists A. C. Redfield, V. I. Vernadsky, and G. E. Hutchinson had already shown that organisms were more than mere passengers on the planet, and geochemists were aware that organisms in the soil accelerated rock weathering and that weathering was faster in hot climates, but no one saw that these were parts of a global system able to regulate climate and chemistry. Even the clear concise writings of Alfred Lotka, who recognized the Earth as a system in the modern sense as far back as 1925, were ignored.

Since the 1970s, our view of the Earth has changed profoundly, and it is reasonable to ask what caused the change and how much of it is due to Gaia theory. My first thoughts about the Earth as a self-regulating system that sustained a habitable surface came from space research. When NASA set up its planetary exploration program in the 1960s, it forced on all of us a new way of looking at life and the Earth. By far the greatest gift of space research was the view it provided from above—for the first time in human history, we had a God's-eye view of our planet and saw the Earth as it was. To see the Earth this way corrected the myopic distortion inherent in reductionist science. We need reduction in science, but it is not the whole story.

The idea that life, the biosphere, regulated the Earth's surface environment to sustain habitability came to me at the Jet Propulsion Laboratory (JPL) in 1965. It arose from a life detection experiment that sought the presence of life on a planetary scale instead of looking at the details visible on the surface. In particular, NASA's quest to find life on Mars provided me with the opportunity to ask the question Can the existence of life be recognized from knowledge of the chemical composition of a planet's atmosphere? The answer was a resounding yes. This way of thinking predicted in 1965 that Mars and Venus were lifeless long before the Viking landers failed to find life on Mars in the 1970s, but it also drew attention to the extraordinary degree of chemical disequilibrium in the Earth's atmosphere, which led me to think that some means for its regulation was needed. Although they disliked my conclusions about life on Mars, JPL actively supported the early development of Earth system science. In 1968 they invited me to present a paper that included for the first time the notion of the Earth as a self-regulating system at a meeting of the American Astronautical Society. NASA now recognizes the validity of atmospheric analysis as a life detection experiment. Without realizing it, they have taken the science that led to Gaia and made it their new science, astrobiology. By doing this they have brought together under one theoretical view life on Earth and life on other planets.

The next important step was in 1971, when Lynn Margulis and I began our collaboration. Lynn brought her deep understanding of microbiology to what until then had been mainly a system science theory that saw a self-regulating Earth through the eyes of a physical chemist. By stressing the importance of the Earth's bacterial ecosystem and its being the fundamental infrastructure of the planet, Lynn put flesh on the skeleton of Gaia. Selling a new theory is a lonely business, and it was wonderful to have Lynn as a friend who stood by me in the fierce arguments with the neo-Darwinists who were so sure that they were right and we were wrong. And they were right to say that there was no way for organisms to evolve global scale self-regulation by natural selection, because the unit of selection is the individual organism, not the planet. It was not until I made the model Daisyworld that I recognized that what evolved was not the organisms or even the biosphere, but the whole system, organisms and their material environment coupled together. The unit of evolution is the Earth system, and self-regulation is an emergent property of that system.

I was not trying to be perverse when I introduced the metaphor of a living Earth. Self-regulating systems are notoriously difficult to explain, and it was natural to use the metaphor of a living Earth. I saw its apparent capacity to sustain a steady temperature and composition, in spite of solar warming and planetesimal impacts and other catastrophes, like the homeostasis of an animal. This was too much for biologists, and they pounced. Here was the fallacy of Gaia: Lovelock was claiming that the Earth was alive. The idea of the Earth as alive in a biological sense became the strong Gaia hypothesis, and the Earth as a self-regulating system became the weak Gaia hypothesis. By setting up these two straw hypotheses, it was easy for them to demolish the strong, which I had never claimed, and leave me with the weak Gaia hypothesis, doomed to ignominy by the adjective "weak."

There is an intriguing irony here, for it was about this time that the great evolutionary biologist William Hamilton coined the powerful metaphors of the selfish and spiteful genes, which did so much to establish the power of the neo-Darwinism perspective among the public. We all know that the selfish gene is a metaphor as prone to misinterpretation as any in science. But it was introduced in a world where, at least in scientific circles, it faced paltry opposition, and so its proponents were spared endless debates on whether or not a gene could be truly selfish, whether strong selfishness was more coherent than weak selfishness, and so on. Gaia was not so lucky. Call Gaia weak if you will, but let us see which predictions of this weak little theory have been confirmed.

1. That the Earth was, and largely still is, managed by its bacterial ecosystem
2. That the atmosphere of the Archean period was chemically dominated by methane
3. That rock weathering is part of a self-regulating system involving the biota that serves to regulate carbon dioxide in the atmosphere and keep an equable temperature
4. That oxygen levels need regulation within a mixing ratio of 15 to 25 percent
5. That the natural cycles of the elements sulfur and iodine take place via the biological products dimethyl sulfide and methyl iodide
6. That dimethyl sulfide emission from the ocean is linked with algae living on the surface, clouds, and climate regulation
7. That regional climate on the land is coupled with the growth of trees in both the tropical and the boreal regions
8. That biodiversity is a necessary part of planetary self-regulation
9. That mathematical procedures for modeling these systems originated with Daisyworld
10. That life on other planets can be detected by chemical compositional analysis of the planets' atmospheres.

My recollections, looking back on the years since the word *Gaia* was introduced, are not of heated argument and hostility but of friendly disagreement. Even those who most deeply disagreed did so courteously. I am especially grateful to Stephen Schneider and Penelope Boston, who put together the first Chapman Conference in 1988, a time when few saw merit in Gaia theory.

Gaia is a new way of organizing the facts about life on Earth, not just a hypothesis waiting to be tested. To illustrate the use of the theory in this way, let us go back to the origins of life some 3.5 to 4 billion years ago. At that time and before life appeared, the Earth was evolving as terrestrial planets do, toward a state that ultimately would be like that of Mars and Venus—an arid planet with an atmosphere mainly of carbon dioxide. Early in its history the Earth was well watered, and somewhere on it there was an equable climate, so that life, once begun, could flourish. When it did begin, the first organisms must have used the raw materials of the Earth's crust, oceans, and air to make their cells. They also returned to their environment their wastes and dead bodies. As they grew abundant, this action would have changed the composition of the air, oceans, and crust into an oxygen-free world dominated chemically by methane. This means that soon after its origin, life was adapting not to the geological world of its birth but to an environment of its own making. There was no purpose in this, but those organisms which made their environment more comfortable for life left a better world for their progeny, and those which worsened their environment spoiled the survival chances of theirs. Natural selection then tended to

favor the improvers. If this view of evolution is correct, it is an extension of Darwin's great vision and makes neo-Darwinism a part of Gaia theory and Earth system science. And for these reasons I do not think that the Earth's environment is comfortable for life merely because by good fortune our planet sits exactly at the right place in the solar system. Euan Nisbet's book *The Young Earth* is a fine introduction to this interesting period of Gaian history.

We have some distance still to travel because a proper understanding of the Earth requires the abolition of disciplinary boundaries. It is no use for scientists with an Earth science background to expect to achieve grace simply by including the biota in their models as another compartment. They have to include a biota that lives and dies and evolves by natural selection and interacts fully with its material environment. It is no use for biologists to continue to model the evolution of organisms on an imaginary planet with an intangible environment. In the real world the evolution of life and the evolution of the rocks, the oceans, and the air are tightly coupled.

Neo-Darwinist biologists were the strongest critics of Gaia theory, and for twenty years they rejected the idea of any regulation beyond the phenotype as impossible. In the past few years they have softened, and now are prepared to accept that there is evidence for self-regulation on a global scale, but still can see no way for it to happen by means of Darwinian natural selection. It took William Hamilton to see this as a challenge, not an objection. With my friend Tim Lenton he produced a paper titled "Spora and Gaia" in which they argue that perhaps the selective advantage for algae in producing dimethyl sulfide clouds and wind is to spread their spores more efficiently. This open-mindedness makes his untimely death so sad. Bill Hamilton changed from being a strong opponent to seeing Gaia theory as a new Copernican revolution. Without his wisdom, I think it will take many years to disentangle the links between organisms, their ecosystems, and large-scale climate and chemistry. I see it as rather like the problem faced by supporters of natural selection in the last century when they were asked, "How could anything so perfect as the eye evolve by a series of random steps?"

## References

- The Amsterdam Declaration on Global Change*. Issued at a joint meeting of the International Geosphere Biosphere Programme, the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, the World Climate Research Programme, and the International Biodiversity Programme. Amsterdam, 2001.
- Betts, R. A. 1999. Self-beneficial effects of vegetation on climate in an ocean-atmosphere general circulation model. *Geophysical Research Letters*, 26, 1457-1460.
- Charlson, R. J., J. E. Lovelock, M. O. Andreae, and S. G. Warren. 1987. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326(6114), 655-661.
- Hamilton, W. D. 1996. *Narrow Roads of Gene Land*. New York: W. H. Freeman.
- Hamilton, W. D., and T. M. Lenton. 1998. Spora and Gaia. *Ethology, Ecology and Evolution*, 10, 1-16.
- Harding, S. P. 1999. Food web complexity enhances community stability and climate regulation in a geophysiological model. *Tellus*, 51B, 815-829.
- Hutchinson, G. E. 1954. Biochemistry of the terrestrial atmosphere. In *The Solar System*, G. P. Kuiper, ed. Chicago: University of Chicago Press.
- Lenton, T. 1998. Gaia and natural selection. *Nature*, 394, 439-447.
- Lotka, A. 1924 [1956]. *Elements of Mathematical Biology*. Reprinted New York: Dover.
- Lovelock, J. E. 1965. A physical basis for life detection experiments. *Nature*, 207(4997), 568-570.

- Lovelock, J. E. 1969. Planetary atmospheres: Compositional and other changes associated with the presence of life. In *Advances in the Astronautical Sciences*, O. L. Tiffany and E. Zaitzeff, eds., pp. 179–193. Tarzana, CA: AAS Publications Office.
- Lovelock, J. E. 1988. *The Ages of Gaia*. New York: W. W. Norton.
- Lovelock, J. E. 1992. A numerical model for biodiversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 338, 383–391.
- Lovelock, J. E., and M. Margulis. 1974. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis. *Tellus*, 26, 2–10.
- Lovelock, J. E., and A. J. Watson. 1982. The regulation of carbon dioxide and climate: Gaia or geochemistry. *Planetary Space Science*, 30(8), 795–802.
- Margulis, L., and J. E. Lovelock. 1974. Biological modulation of the Earth's atmosphere. *Icarus*, 21, 471–489.
- Maynard Smith, J. 1958. *The Evolution of Life*. London: Penguin Books.
- Nisbet, E. G. 1987. *The Young Earth*. Boston: Allen and Unwin.
- Pimm, S. L. 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 307, 321–326.
- Press, Frank, and Raymond Siever. 1974. *Earth*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Redfield, A. C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46, 205–221.
- Vernadsky, V. I. 1945. The biosphere and the noosphere. *American Scientist*, 33, 1–12.
- Watson, A. J., and J. E. Lovelock. 1983. Biological homeostasis of the global environment: The parable of Daisyworld. *Tellus*, 35B, 284–289.

## Gaia by Any Other Name

Lynn Margulis

We upright, nearly hairless, chatty chimps owe our burgeoning population numbers to our flexible brains and our intense social behavior. All of us can attest to the strength of cultural and linguistic influences between birth and say, twenty years of age; words and symbols are powerfully evocative and may even stimulate violent activity (Morrison, 1999). Examples of symbolic emotion-charged phrases abound. In today's political realm they include "evil Middle East dictator," "HIV-AIDS victim," "neo-Nazi," "genetically manipulated crops," "dirty nigger," "one nation under God," "drug addicts," "white supremacist," "sexual abuser," and many far more subtle others.

Science, ostensibly objective and free of such name-calling, is not immune. Although to most of the contributors to this book, "science" simply refers to an open, successful, international, and cooperative means of acquiring new knowledge by observation, measurement, and analysis, to many outsiders "science" is an emotion-charged term. To some it implies atheism, triviality, lack of patriotism, or willingness to collaborate with huge corporations against their workers. To others a scientist is someone deficient in empathy or lacking in emotional expression or, worse, a supplier of technical know-how complicit in the development of weapons of mass destruction.

Here, following James E. Lovelock's lead in his accompanying piece "Reflections on Gaia," as someone proud to participate in the international scientific effort, I mention the impetus to new investigations. The "Gaia hypothesis" has now become the "Gaia theory" and has given voice to disparately trained researchers over the last few decades.

The very beginning of the Gaia debate, I submit, was marked by a little-known *Nature* paper (Lovelock, 1965). Gaia's middle age, her 40th birthday, ought to be celebrated with appropriate fanfare in or near the year 2005. Such recognition would mark the anniversary of the widespread dissemination of her gorgeous dynamic image. Photographed and made well known by Russell (Rusty) Schweikart and especially as the "blue marble" (the living Earth seen from space) taken by the 1968 circumlunar Apollo 8 team (Frank Borman, Jim Lovell, and Edward Anders), the image generated a gaggle of Gaia enthusiasts. From the beginning Gaia's intimate portrait has been delivered to us by these and lesser fans of outer space, most of whom were interviewed by Frank White (1998). Indeed, close-ups of her green and mottled countenance are newly available in the spectacular full-color, oversized book that reveals Gaia from above (Arthus-Bertrand, 1999).

To me, the Gaia hypothesis, or theory as some would have it, owes its origin to a dual set of sources: the immense success of the international space program that began with the launch of *Sputnik* by the Soviet Union in 1957 and the lively but lonely scientific imagination, inspiration, and persistence of Jim Lovelock. Part of the contentiousness and ambiguity attendant on most current descriptions of the Gaia hypothesis stems from confused definitions, incompatible belief systems of the scientific authors, and inconsistent terminology across the many affected disciplines (for example, atmospheric chemistry, environmental studies, geology, microbiology,

planetary astronomy, space science, zoology). Anger, dismissive attitude, and miscomprehension also come from the tendency of the human mind toward dichotomization. In this limited summary whose purpose is to draw attention to several recent, excellent books on Gaia science and correlated research trends, I list the major postulates of the original Gaia statement and point to recent avenues of investigation into the verification and extension of Lovelock's original ideas. I try to minimize emotionally charged rhetoric aptly indulged in and recently reviewed by Kirchner (2002) and to maximize the proximity of the entries on my list to directly observable, rather than computable, natural phenomena. I self-consciously align this contribution to a field ignored by most of today's scientific establishment and their funding agencies, one considered obsolete, anachronistic, dispensable, and atavistic. To me this field in its original form, "natural theology" that became "natural history," should be revived with the same enthusiasm with which it thrived in the 18th and early 19th centuries.

That age of exploration of the seas and lands generated natural history in the same way that satellite technology and the penetration of space brought forth Gaia theory. In fact when Lovelock said, "People untrained . . . do not revere . . . Geosphere Biosphere System, but they can . . . see the word Gaia embracing both the intuitive side of science and the wholly rational understanding that comes from Earth System Science" he makes a modern plan for the return to the respected natural history, the enterprise from which biology, geology, atmospheric science, and meteorology had not yet irreversibly divorced themselves. Is he not explicit when he writes, "We have some distance still to travel because a proper understanding of the Earth requires the abolition of disciplinary boundaries"? For the science itself, although precluded today by administrative and budgetary constraints, the advisable action would be a return to natural history, the status quo ante, before those disciplines were even established. As Lovelock says, and I agree, "We need reduction in science, but it is not the whole story." My point is that yes, I agree, reductive simplification to control one variable at a time is indispensable to scientific inquiry. Yet no reason exists for us not to continue reductionist practices in the context of Gaian natural history. Indeed, the name changes ought not to deceive us about the true identities of our friends. "Astrobiology" is the field of natural history reinvented to be fundable for a wide variety of scientists, whereas "Earth system science" is none other than Gaia herself decked in futuristic garb and made palatable to the "hard rock" scientists, especially geophysicists.

The original Gaia hypothesis primarily involved biotic regulation of three aspects of the surface of the Earth: the temperature, the acidity-alkalinity, and the composition of the reactive atmospheric gases, especially oxygen. Accordingly I tentatively offer an adequate working definition of the Gaia hypothesis that can serve to organize an enormous, unwieldy scientific literature. Gaia, a name that makes our third planet, as Lovelock likes to say, "a personal presence for all of us" refers to the science of the living Earth as seen from space. My definition for the Gaia hypothesis is as follows:

Some 30 million types of extant organisms [strains of bacteria and species of eukaryotes; Sonea and Mathieu, 2000] have descended with modification from common ancestors; that is, all have evolved. All of them—ultimately bacteria or products of symbioses of bacteria (Margulis and Sagan, 2002)—produce reactive gases to and remove them from the atmosphere, the soil, and the fresh and saline waters. All directly or indirectly interact with each other and with the chemical constituents of their environment, including organic compounds, metal ions, salts, gases, and water. Taken together, the flora, fauna, and the microbiota (microbial biomass), confined to the lower troposphere and the upper lithosphere, is called the biota. The metabolism, growth, and multiple interactions of the biota modulate the temperature, acidity-

alkalinity, and, with respect to chemically reactive gases, atmospheric composition at the Earth's surface.

A good hypothesis, as Lovelock has noted, whether or not eventually proved right or wrong, generates new experimental and theoretical work. Gaia, defined this way, undoubtedly has been a good hypothesis. Gaian concepts, especially in the 1980s and early 1990s, generated an environmental literature (Lapo, 1987; Lovelock, 1979, 1988; Sagan, 1990; Westbroek, 1991) that extends far beyond the bounds of the traditional relevant subfield of biology: "ecology." Ecology as taught in academic circles has become more Gaian or has faded away.

Of particular interest to me is "new Gaia," newly generated scientific ideas beyond the original statement of the theory. Several are worthy of closer scrutiny by observation, experimentation, and model calculation. New books to which I refer (Lowman, 2002; Morrison, 1999; Smil, 2002; Sonea and Mathieu, 2000; Thomashow, 1996; Volk, 1998) have done us a great service by review and interpretation of jargon-filled incommensurate scientific articles. These authors provide an essential prerequisite for future investigation. In the case of Thomashow (1996), the review is less of the science and more of the history and emotional importance of Gaian concepts in the context of environmental education and ecological understanding.

In this necessarily brief contribution to what Lovelock sarcastically refers to as his "weak little theory," some predictions have been confirmed. Thus, I concur with the ten items on Lovelock's list, but I concentrate on other "new Gaia" aspects of the science. For discussion I especially question the Earth's relation to the phenomenon of continental drift and plate tectonics.

"Surface conditions on Earth," NASA geologist Lowman (2002) writes, "have been for most of geological time regulated by life." Lowman identifies this statement as Lovelock's Gaia hypothesis and claims, "This new link between Geology and Biology originated in the Gaia hypothesis" (p. 272). The Gaia concept leads Lowman to a new perspective on the evolution of the crust of the Earth and to his "unified biogenic theory of the Earth's crustal evolution," which will be defined here.

Lowman's synthesis derives the earliest events in our planet's evolution from those which surely occurred on our lifeless solar system neighbors: the Moon, Mercury, and Venus. The new science of comparative planetology is generated by many studies, especially the use of the superb new tools of space geodesy, satellite measurements of geomagnetism, remote sensing across the electromagnetic spectrum, and analyses of impact craters. This new work leads Lowman to a radically different view of Earth's tectonic history. He posits that the Earth's major concentric layers—the liquid core, the convecting plume-laden mantle, and the cooler, more rigid outer crust—were formed by the same processes that occurred on our neighboring silicate-rich planets. Such planetary and petrologic processes preceded Gaia. The main crustal dichotomy of an Earth divisible into the two regions (generally granitic continental masses and basaltic ocean basins), he argues, was initiated by the great early bombardment scenario of the inner solar system. The Earth, like its neighbors, was so beset by bolides that the crust was punctured and heated time and again. Incessant volcanism was intense on an Earth far hotter and tectonically more active than today. Two-thirds of the primordial global crust may have been removed by the giant impact of a Mars-sized bolide that ejected the debris from which our huge satellite, the Moon, accreted. The so-called lunar birth explosion, he thinks, may have triggered mantle upwelling, basaltic magmatism, and tectonic activities similar to "those of the Moon, Mercury, Mars, and possibly Venus" (p. 279). However, "the broad aspects of the Earth's geology as it is now—continents, ocean basins, the oceans themselves, sea floor spreading and related processes—are the product of fundamentally biogenic

processes, acting on a crustal dichotomy formed by several enormous impacts on the primordial Earth.”

Lowman goes on to claim, “The fundamental structure of the Earth, not just its exterior and outer layers, thus appears to have been dominated by water-dependent—and thus life-dependent—plate tectonic processes.” Life has actively retained water and moderate surface temperatures, not just passively “adapted” to them. In summary of many detailed investigations and their interpretations, Lowman writes:

The most striking characteristic of the Earth is its abundant water: colloidally suspended in the atmosphere; covering two-thirds of its surface; coating, falling on, and flowing over the remaining one-third; and infiltrating the crust and mantle. It retains this water partly because of the planet’s surface temperature but also because the Earth behaves like a living organism that maintains this temperature by a wide variety of feedback mechanisms, many of which are caused by life itself. (p. 280)

Presenting an integrated view of energy flow, oceanography, and climatology with the physics, chemistry and biology of the biosphere we all call home, Vaclav Smil, a distinguished professor at the University of Manitoba in Winnipeg, has written a book that might as well be called *Gaia: The Living Earth from Space*. His immensely learned, highly accessible narrative is that of the true environmentalist. From these new books, coupled with earlier works by Lovelock himself (1979), Morrison (1999), Volk (1998), Westbroek (1991), and Bunyard (1996), enough responsible scientific literature on Gaia exists to fuel college/university-level curricula.

Other new comprehensive and comprehensible contributions to the Gaia debate include the incredibly detailed 400,000-year-old annual ice core record of climatic change and atmospheric CO<sub>2</sub> rise. The story of how international science obtained this fund of Pleistocene data from the central Greenland ice sheet reads like a novel (Mayewski and White, 2002). Another fascinating book, an integration of modern ecological processes and other complex systems determined by the second law of thermodynamics, is in the works for 2004 (Schneider and Sagan, forthcoming). This treatise on energy sees Gaia, even its origin over 3.5 billion years ago, as a part of the tendency of the universe to increase in complexity as energetic gradients are broken down. The sun inexorably loses its heat and light into the cold blackness of space. This temperature and other gradient imperatives generate and sustain organized systems that seem to appear from nothing. These “other-organized” systems, however, enhance thermodynamic, informational, pressure, and other gradient reduction. “Nature,” write Schneider and Sagan, “abhors [not just a vacuum] but all gradients.” Gaia can be understood as a peculiar, long-lived, expanding, and complexifying “planetary-scale gradient reducer.” The history of thermodynamics and this arcane science’s ability to describe all manner of energy flow phenomena sheds light on the intimate connection between the physical-chemical sciences and the evolution of life. Furthermore, since the 1970s Gaia theory has continued to draw attention to the mighty microbe, the diverse set of bacterial cells, their communities, and their larger protocist descendants (Margolis, McKhann, and Olendzenski, 1992). How microbes metabolize and organize into effective, functional communities forms a crucial component of Gaian research.

Gaia theory’s original postulates were limited to global temperature, acidity-alkalinity, and the composition of reactive gases of the air. The new Gaia, whatever her name, becomes respectable because postulated explanations for Earth’s surface activity require living beings and interrelations between them and the rest of the lithosphere.

Here are just a few scientific queries stimulated by the wily ways of the ancient Earth goddess in elegant modern dress. Without inquisitive prodding, as Jim Lovelock has noted, such questions of the coy Gaian goddess would never have been raised by polite scientific society.

1. Are plate tectonics (i.e., the deep, lateral movements of the lithosphere apparently limited in the solar system to the Earth) a Gaian phenomenon?
2. Is the remarkable abundance of aluminosilicate-rich granite, a crustal rock type unknown elsewhere in the solar system and one that comprises 0.1 percent of the Earth's volume, directly related to the presence of life? Did water flow and oxygen release, so strongly influenced by life over 3 billion years, generate the granitic raised portions of the plates?
3. Is the Earth's distribution of certain metals and other elements, those known to strongly interact with life (e.g., phosphorus, phosphorites, banded iron formation, marine and freshwater iron-manganese nodules), a Gaian phenomenon? Are Archean conglomeratic, organic-rich sedimentary gold deposits related to life?
4. Is the rate of dissolution of vast quantities of salt (sodium chloride) retarded by biological activity (e.g., in the M-layer beneath the Mediterranean sea, the Hormuz basin of Iran, the Texas Permian Basin deposits, and the great German and North Sea Permian zechstein deposits)? In other words, are the worldwide evaporite deposit patterns a Gaian phenomenon?
5. Can long-lasting thermodynamic disequilibria and reactive gaseous chemical anomalies in a planetary atmosphere be taken as a presumptive sign of life?
6. If life is primarily responsible for the enormous differences in the meters (m) of precipitable water on the surfaces of the three silica-rich inner planets (Venus, 0.01 m; Earth, 3000 m; Mars, 0.0001 m), what have been the biological modes of water retention on Earth since the Archean eon?
7. If Earth's surface temperature has been modulated mainly by carbon dioxide, other carbonates, and organic compounds being removed from the atmosphere into limestone, to what extent have chemoautotrophic, anoxygenic phototrophic, and other metabolic pathways of CO<sub>2</sub> reduction supplemented the oxygenic photoautotrophy of cyanobacteria, algae, and plants?
8. Can environmental regulation studies be valid and representational in "mini-Gaia" contained systems that are closed to matter but open to sunlight or other electromagnetic energy fluxes?

No doubt many more such questions might be raised. Indeed, they are raised in several contributions to this book. Let it suffice here for me to claim that the heuristic value of this global concept is unprecedented in modern times. All of us as readers and contributors to *Scientists on Gaia: The Next Century* are profoundly indebted to Jim Lovelock for his intellectual leadership and healthy disdain of "academic apartheid." We cannot be fooled: Gaia's core identity and liveliness will survive her many fancy guises, bold dance steps, cruel deceptions, and name changes. Our Earth by any other name will smell and look and feel as sweet.

## References

- Arthus-Bertrand, Y. 1999. *Earth from Above*. Harry N. Abrams, New York.
- Bunyard, P., ed. 1996. *Gaia in Action: Science of the Living Earth*. Floris Books, Edinburgh.

- Kirchner, J. W. 2002. The Gaia Hypothesis: Fact, theory, and wishful thinking. *Climatic Change*, 52, 391–408.
- Lapo, A. 1987. *Traces of Bygone Biospheres*. Mir Publishers, Moscow.
- Lovelock, J. E. 1965. A physical basis for life detection experiments. *Nature* 207:568–570.
- Lovelock, J. E. 1979. *Gaia: A New Look at the Life on Earth*. Oxford University Press, New York.
- Lovelock, J. E. 1988. *The Ages of Gaia*. W. W. Norton, New York.
- Lovelock, J. E. 2002. Reflections on Gaia. Introduction to the present volume.
- Lowman, P. 2002. *Exploring Space, Exploring Earth: New Understanding of the Earth from Space Research*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Margulis, L., H. I. McKhann, and L. Olendzenski. 1992. *Illustrated Glossary of Protoctista*. Jones and Bartlett, Boston.
- Margulis, L., and D. Sagan. 2002. *Acquiring Genomes: A Theory of the Origins of Species*. Basic Books, New York.
- Mayewski, P., and F. White. 2002. *The Ice Chronicles; The Quest to Understand Global Climate Change*. University of New England Press, Hanover, NH.
- Morrison, R. 1999. *The Spirit in the Gene: Humanity's Proud Illusion and the Laws of Nature*. Cornell University Press, Ithaca, NY.
- Sagan, D. 1990. *Biospheres: Metamorphosis of Planet Earth*. McGraw-Hill, New York.
- Schneider, E. R., and D. Sagan. Forthcoming. *Energy Flow: Thermodynamics and the Purpose of Life*. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Schneider, S. H., and P. Boston, eds. 1991. *Scientists on Gaia*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Skoyles, J., and D. Sagan. 2002. *Up from Dragons: On the Evolution of Human Intelligence*. McGraw-Hill, New York.
- Smil, V. 2002. *The Earth's Biosphere: Evolution, Dynamics and Change*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Sonea, S., and L. Mathieu. 2000. *Prokaryotology: A Coherent View*. University of Montreal Press, Montreal.
- Thomashow, M. 1996. *Ecological Identity: Becoming a Reflective Environmentalist*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Volk, T. 1998. *Gaia's Body: Toward a Physiology of Earth*. Springer-Verlag, New York.
- Westbroek, P. 1991. *Life as a Geological Force*. W. W. Norton, New York.
- White, F. 1998. *The Overview Effect: Space Exploration and Human Evolution*, 2nd ed., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA.