

Von Peter Ward

GAIAS BÖSE SCHWESTER

Die Erde gleicht nicht der mythischen Gaia, der behütenden Mutter allen Lebens, sondern vielmehr der mörderischen Medea.

Die beiden Viking-Raumsonden, die den zahlreichen Möglichkeiten des Scheiterns zum Trotz 1976 nach fast einjähriger Reise heil auf dem Mars landeten, hatten vor allem eine Aufgabe: Anzeichen für Leben zu finden. Die Daten, die sie zur Erde funkten, waren daraufhin für fast alle Beteiligten eine herbe Enttäuschung. Die Oberfläche des Mars erwies sich als äußerst rau und unwirtlich, es gab keinerlei Anzeichen für organisches Leben.

Für zwei NASA-Wissenschaftler jedoch, den Atmosphärenforscher James Lovelock und seine Fachkollegin Dian Hitchcock, war das keine wirkliche Überraschung. Bereits ein Jahrzehnt zuvor hatten sie aus Beobachtungen der Marsatmosphäre den Schluss gezogen, dass es auf dem Planeten kein Leben geben könne.

DEBUTART / SARAH HOWELL



Im Rahmen ihrer Forschungsarbeiten entwickelten sie eine der einflussreichsten und bahnbrechendsten wissenschaftlichen Theorien des 20. Jahrhunderts: die Gaia-Hypothese – benannt nach Gaia, der griechischen Göttin der Erde, die als Nährmutter allen Lebens gilt.

Neue wissenschaftliche Befunde deuten nun darauf hin, dass das Leben auf der Erde von völlig anderer Art ist, als dem romantischen Bild von Gaia entspricht. Wenn man eine mythologische Mutterfigur für die Biosphäre suchen wollte, wäre die treffendere Wahl Medea, die Gattin des Argonauten Jason. Sie war eine Zauberin und Prinzessin – und sie tötete ihre eigenen Kinder.

Die Geschichte der Gaia-Hypothese beginnt in den 1960er Jahren, als Lovelock und Hitchcock der Nachweis gelang, dass die Marsatmosphäre sich in einem chemischen Gleichgewicht befindet. Sie ist ein stabiles Gemisch aus Kohlendioxid (CO_2) mit etwas Stickstoff sowie Spuren von Sauerstoff, Me-

than und Wasserstoff. Unsere eigene Atmosphäre dagegen befindet sich in einem chemischen Ungleichgewicht. Sie ist in ihrer Zusammensetzung zwar auch einigermaßen konstant, aber nicht etwa, weil keine chemischen Reaktionen mehr in ihr stattfinden, sondern weil insbesondere der molekulare Sauerstoff sich zwar mit anderen Elementen, vor allem Kohlenstoff, verbindet, aber ständig nachgeliefert wird. Der wichtigste Lieferant ist das Leben: Die Fotosynthese wandelt CO_2 in Sauerstoff um, während der aerobe Stoffwechsel das Gegenteil bewirkt. Ohne Leben würde das sauerstoffreiche, lebensfördernde Gasgemisch, das wir atmen, auf die Dauer in einen lebensfeindlichen Gleichgewichtszustand übergehen, wie auf dem Mars.

Die Erdatmosphäre ist nicht nur im Fließgleichgewicht, sondern auch förderlich für das Leben, und dies seit Milliarden von Jahren. Auch die Oberflächentemperatur unseres Planeten sowie der Säuregehalt und die che-

Ist es die Selbsterhaltung oder die Selbsterstörung, die das irdische Leben charakterisiert? Romantiker neigen zur ersten Hypothese; Realisten, so scheint es, haben guten Grund, der zweiten anzuhängen.



DIE VIELEN GESICHTER VON GAIA

ES GIBT MINDESTENS DREI VARIANTEN DER GAIA-HYPOTHESE:

- **Die optimierende Gaia:** Diese frühe Fassung ist nach wie vor eine der »stärksten« Varianten. Demnach kontrolliert das Leben aktiv die Umweltbedingungen, darunter auch rein physikalische Parameter der Biosphäre wie die Temperatur, den Säuregehalt der Ozeane und die Zusammensetzung der Atmosphäre, so dass die Erde optimal bewohnbar bleibt.
- **Die selbstregulierende (oder homöostatische) Gaia:** eine neuere und leicht abgeschwächte Version der Theorie. Das Leben optimiert nicht aktiv die Lebensbedingungen auf dem Planeten, sondern erzeugt negative Rückkopplungssysteme, die lebenswichtige Faktoren wie die Temperatur – und in neuerer Fassung auch den Sauerstoff- und CO₂-Gehalt der Atmosphäre – in bestimmten Grenzen halten.
- **Gaia als Superorganismus:** Die Erde ist nicht einfach nur ein Planet, der Leben trägt, sondern selbst ein Lebewesen. Diese stärkste Auslegung der Theorie wird allgemein als unwissenschaftlich angesehen.

mische Beschaffenheit der Ozeane sind offenbar seit Jahrmilliarden stabil; alle diese Parameter schwankten um Durchschnittswerte, welche die Erde durchgehend bewohnbar machten. Aus diesen Einzelbefunden schuf Lovelock eine neuartige Theorie über das Leben und dessen Wechselwirkungen mit dem Planeten, der es beherbergt. Sein Hauptaugenmerk galt der Erde; aber im Prinzip lässt sich die Theorie auf jeden bewohnbaren Planeten anwenden. Lovelock, der in diesem Sommer 90 Jahre alt geworden ist, widmete den Rest seines Berufslebens der Ausarbeitung seiner Theorie.

Kurz gefasst, besagt die Gaia-Hypothese, dass das Leben in seiner Gesamtheit mit seiner physischen Umgebung wechselwirkt, und zwar so, dass diese nicht nur bewohnbar bleibt, sondern dafür auch immer geeigneter wird. Dazu arbeitet es mit einer Anzahl von Rückkopplungsmechanismen, vergleichbar denen, die im Inneren eines Organismus die Temperatur oder den Salzgehalt des Bluts konstant halten. Die Größen, welche die Bewohnbarkeit unseres Planeten am stärksten

beeinflussen, nämlich die Temperatur, die chemische Zusammensetzung der Ozeane und der Süßwasservorkommen sowie die Beschaffenheit der Atmosphäre, werden vom Leben nicht nur beeinflusst, sondern sogar kontrolliert. Im Lauf der Zeit entwickelte Lovelock seine Ideen in unterschiedliche Richtungen weiter (Kasten links).

Ein Jahrzehnt nach der Erstveröffentlichung war seine Hypothese zu der wissenschaftlich profunderen Gaia-Theorie herangereift, die er Mitte der 1970er Jahre so zusammenfasste: »Die Gaia-Theorie besagt, dass die Temperatur, der Oxidationsgrad, der Säuregehalt und andere Parameter von Gesteinen und Gewässern konstant gehalten werden, und zwar durch aktive Rückkopplungsmechanismen, welche die Lebewesen automatisch und unbewusst betreiben.«

Am Ende betrachtete Lovelock den Planeten selbst als eine Art Superorganismus. »Das ganze Spektrum der Lebewesen ..., von Walen bis zu Viren und von Eichen bis zu Algen, kann als eine einzige lebende Einheit aufgefasst werden. Sie ist in der Lage, die Erdatmosphäre ihren Bedürfnissen anzupassen, und verfügt über Fähigkeiten und Kräfte, die weit über die ihrer Teile hinausgehen«, schrieb er 1979 in seinem Buch »Gaia. A New Look at Life on Earth«. Mit anderen Worten: Die Erde ist nicht nur ein Planet, der Leben beherbergt, sondern selbst lebendig.

Sturz einer romantischen Vorstellung

Die Idee war einfach und elegant. Sie fand rasch eine große Anhängerschaft, unter Wissenschaftlern wie unter Laien. Einige Forscher fanden in der Gaia-Theorie eine neue Interpretation für geologische Stoffkreisläufe. Andere suchten in Lovelocks Gefolge nach wissenschaftlichen Beweisen dafür, dass das Leben die Bedingungen auf unserem Planeten reguliert. Einige, hauptsächlich Laien, begründeten mit der Gaia-Hypothese eine besondere Ehrfurcht gegenüber der Erde und den übrigen Lebewesen. Manche betrachten sie sogar als ein göttliches Prinzip.

Noch immer stoßen die Gaia-Thesen bei Forschern auf Interesse und regen Debatten an. Drei internationale Tagungen waren ausschließlich diesem Thema gewidmet, die letzte fand 2006 statt.

In jüngster Zeit jedoch haben einige neuere Entdeckungen große Zweifel an der Richtigkeit der Gaia-Hypothese geweckt, darunter insbesondere Ergebnisse aus der Untersuchung sehr alter Gesteine einerseits und aus der Modellierung der Zukunft andererseits. Beide widersprechen zentralen Aussagen der Theorie. Die Erde sei keineswegs eine im We-



sentlichen konstant lebensfreundliche Umgebung gewesen; vielmehr hätten im Lauf der Erdgeschichte wiederholt »Medea-Ereignisse« stattgefunden: drastische Einbrüche in Artenvielfalt und Individuenanzahl, die das Leben selbst verursacht hat und auch in Zukunft verursachen wird.

Werfen wir zunächst einen Blick in die Vergangenheit. Eines der stärksten Argumente der Gaia-Forscher ist, dass die Temperatur des Planeten weit gehend unverändert und ausgeglichen blieb – dank Rückkopplungsprozessen, die durch das Leben verursacht oder zumindest begünstigt werden.

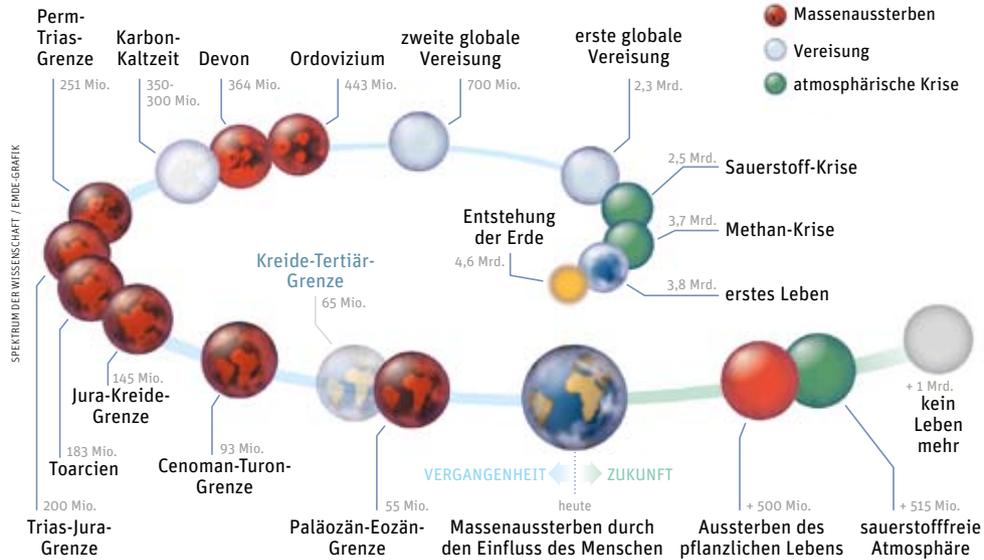
Der wichtigste dieser verschiedenen »Thermostaten« ist der Karbonat-Silikat-Zyklus. Wegen der vulkanischen Aktivität der Erde gelangt ständig, wenn auch in veränderlichen Mengen, Kohlendioxid in die Atmosphäre. CO₂ ist ein potenzielles Treibhausgas. Wenn es nicht auf irgendeine Weise entfernt wird, steigt seine Konzentration so stark an, dass sich die Erde beschleunigt aufheizt. Am Ende würden die Weltmeere verdampfen – ein Schicksal, das vor vier Milliarden Jahren die Venus ereilte.

Der Abbau des Kohlendioxids erfolgt im Wesentlichen durch die chemische Verwitterung silikatreicher Gesteine wie Granit. Bei dieser Reaktion wird das CO₂ aus der Atmosphäre als Kalkstein (Kalziumkarbonat) gebunden. Dieser Prozess wird von Landpflanzen verstärkt, deren Wurzeln Gesteine aufbrechen und das Eindringen von Wasser und CO₂ ermöglichen. Darüber hinaus bauen Pflanzen mittels Fotosynthese direkt Kohlendioxid aus der Atmosphäre ab.

So weit, so Gaia. Wissenschaftlern ist es jedoch gelungen, die Temperaturen aus der Frühzeit der Erde immer präziser abzuschätzen. Die Befunde widersprechen der von der Gaia-Theorie postulierten Konstanz. Tatsächlich war die Erdgeschichte ein wildes Wechselbad von heiß und kalt – hervorgerufen durch die Dynamik des Lebens selbst, und zwar die Evolution neuer Arten.

Vom Schneeball zum Treibhaus und zurück

So gab es vor rund 2,3 Milliarden Jahren eine Periode massiver Gletscherbildung, die etwa 100 Millionen Jahre andauerte. Sie war so intensiv, dass die Ozeane komplett zufroren – die Erde verwandelte sich in eine Art Schneeball. Ursache dafür war das Leben selbst. Ausgerechnet einer der vorgeblichen Rückkopplungsmechanismen war aus dem Ruder gelaufen. Mit der 200 Millionen Jahre zuvor entstandenen Fotosynthese hatten Mikroben der Atmosphäre so viel treibhauswirksames CO₂ entzogen,



dass die Erde in eine wahre Tiefkühltruhe verwandelt wurde.

Nach demselben Muster versetzte noch zweimal eine ungeheuer erfolgreiche evolutionäre Neuerung der Erde einen nahezu tödlichen Kälteschock: die Entstehung der ersten mehrzelligen Pflanzen vor rund 700 Millionen Jahren sowie weit später die Entwicklung der Landpflanzen. Letztere bauten nicht nur mittels Fotosynthese CO₂ ab, sondern bildeten auch tief reichende Wurzeln, die die Verwitterungsrate stark erhöhten. Daraufhin setzte gegen Ende des Devon-Zeitalters (vor 416 bis 360 Millionen Jahren), als die ersten Wälder entstanden, eine 50 Millionen Jahre währende Eiszeit ein. Der warme, grünende Planet kühlte rapide ab, und viele Arten starben aus – keine sehr gaaigerechte Entwicklung.

Seit das Leben existiert, ist es in der Lage, sich selbst zu zerstören. Charles Darwin verglich eine neu entstehende Lebensform mit einem Keil, der in eine enge freie Nische gehämmert wird und diese ganz allmählich erweitert. Das kommt vor. Doch bei anderen Lebensformen ist es an Stelle des kleinen Keils ein Presslufthammer, der ganze Äste vom Baum des Lebens abschlägt.

Das geschieht schon seit der Frühzeit des Lebens. Vor etwa 3,7 Milliarden Jahren fand vermutlich eine »Methan-Krise« statt, die das kaum entstandene irdische Leben um ein Haar wieder ausgelöscht hätte. Methan erzeugende Mikroben füllten die Atmosphäre mit einem dunstigen Nebel, der das Sonnenlicht fast vollständig blockierte.

Das wohl schlimmste Medea-Ereignis wurde durch dieselbe biologische Innovation ausgelöst, die zur ersten Schneeball-Erde führte: die Evolution der Fotosynthese. Bis zu diesem Zeitpunkt vertrugen Lebewesen keinen Sauerstoff; für Mikroben, die bis vor 2,5 Milliarden

Das Leben zerstört sich selbst: Alle großen Aussterbewellen (die für die Paläontologen die Grenze zwischen verschiedenen Erdzeitaltern markieren) sind darauf zurückzuführen, dass eine Lebensform einer anderen das Leben unmöglich macht. Das große Sterben an der Grenze zwischen Kreide und Tertiär, das vermutlich durch einen Meteoriteneinschlag ausgelöst wurde, ist eine bemerkenswerte Ausnahme.

Jahren einzige Lebensform, war er ein tödliches Gift. So entstand als Nebeneffekt der Fotosynthese eine Massenvernichtungswaffe, die alles bisherige Leben zerstörte. Die einzigen Überlebenden waren die fotosynthesefähigen Organismen selbst und die sich rasch entwickelnden sauerstofftoleranten Mikroben.

All das will nicht zu dem anheimelnden Gaia-Bild passen. Aber es kommt noch schlimmer. Seit der Entstehung der Tiere vor 565 Millionen Jahren geriet das Leben mehrfach an den Rand des Abgrunds. Nach neueren Forschungen gab es fünf große und rund zehn kleinere Massensterbungen, katastrophale Ereignisse, bei denen jedes Mal der größte Teil aller Tier- und Pflanzenarten ausstarb (Bild S. 87).

Nach der bahnbrechenden Entdeckung von 1980, dass das Massensterben beim Übergang von der Kreidezeit zum Tertiär vor rund 65 Millionen Jahren durch einen Meteoriteneinschlag ausgelöst wurde, bildete sich die Lehrmeinung, dass alle Massensterbungen außerirdische Ursachen hätten: entweder einen Einschlag oder – wie im Ordovizium vor 443 Millionen Jahren – einen Gammastrahlungsausbruch. Derartige Vorgänge werden als »gaianeutral« bezeichnet, weil sie die Gaia-Hypothese weder stützen noch entkräften. Auch unter den Annahmen der Hypothese hätte das Leben nicht die geringste Chance gehabt, sich auf eine derartige Katastrophe einzustellen.

Wärmetod der Erde

Als bald machten Forscher Einschlagkrater auffindig, die zu gewissen Massensterbungen zu passen schienen, etwa zu der großen Sterbewelle beim Übergang vom Perm zur Trias vor 251 Millionen Jahren und derjenigen zwischen Trias und Jura vor 200 Millionen Jahren. Doch die These, dass diese Einschläge Ursachen der Massensterbungen waren, hielt genaueren Untersuchungen nicht stand. Heute gelten die meisten als durch Mikroben verursacht – durch riesige Mengen von Bakterien, die giftiges Schwefelwasserstoffgas freisetzen (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2007, S. 26). Diese »Blüten« gedeihen in den unbewegten, sauerstofffreien Ozeanen, die in Phasen intensiver globaler Erwärmung entstehen, etwa am Ende des Perms, als über längere Zeit aktive Vulkane große Mengen CO₂ in die Atmosphäre bliesen. Der Gaia-Theorie zufolge hätte das Leben diese Prozesse abfedern sollen. Das war jedoch nicht der Fall – ein weiteres starkes Indiz für die Medea-These.

Viele weitere Vorgänge der Erdgeschichte sprechen weniger dafür, dass das Leben sich

selbst erhält, als vielmehr dafür, dass es sich selbst zerstört. Dazu zählt insbesondere das gegenwärtige, vom Menschen verursachte Massensterben.

Was bringt die Zukunft? Auch für kommende Zeiten können wir die Gaia-Hypothese zurückweisen, und das ist die vielleicht interessanteste – und schockierendste – Offenbarung: Das Leben scheint aktiv seinen eigenen Untergang anzustreben, wobei sich die Erde unausweichlich dem Tag nähert, an dem sie wieder – wie am Anfang – steril sein wird.

Wie das? Es beginnt damit, dass die Sonne immer heißer wird. In den letzten 4,5 Milliarden Jahren hat sich ihre Energieeinstrahlung um 30 Prozent erhöht, und dies wird in Zukunft so weitergehen. Dennoch erwärmt sich die Erde, woraufhin das Silikatgestein schneller verwittert, da die Verwitterungsrate mit der Temperatur steigt. Entsprechend rascher wird der Atmosphäre das CO₂ entzogen. Die Fotosynthese und die Aktivität der Pflanzenwurzeln verschärfen diesen Effekt.

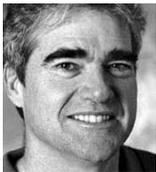
Zunächst wird dadurch, in Übereinstimmung mit der Gaia-Hypothese, der Temperaturanstieg infolge stärkerer Sonnenstrahlung abgemildert. Doch die Zeit wird kommen – womöglich schon in 500 Millionen Jahren –, zu der die Atmosphäre nicht mehr genügend CO₂ für die Aufrechterhaltung der Fotosynthese enthält.

Mit jenem schicksalhaften Tag beginnt das Ende der Welt, wie wir sie kennen. Die Pflanzen verwelken und sterben. Damit entfällt die Hauptquelle für den Luftsauerstoff und die Produktion von Biomasse. Die Tiere werden ihnen bald nachsterben. Sowie die letzten Pflanzen verschwunden sind, wird der CO₂-Gehalt der Atmosphäre wieder ansteigen, was einen verschärften Treibhauseffekt zur Folge hat. Wenn dann die Erdoberfläche heißer ist als kochendes Wasser, werden die letzten Mikroben verenden.

Dieses Szenario steht in klarem Widerspruch zur Gaia-Hypothese, der zufolge die Existenz von Leben auf einem Planeten dessen Bewohnbarkeit verlängert. Tatsächlich trifft das Gegenteil zu.

Wenn die Modelle korrekt sind, befindet sich das Leben auf der Erde schon in seiner Spätphase. Gaia hat vielleicht noch eine weitere Milliarde Jahre zu leben. Der langfristige – und finale – Rückgang an atmosphärischem CO₂ hat bereits begonnen. Der gegenwärtige Anstieg durch das Verheizen fossiler Brennstoffe ist ein bedeutungsloser Zacken in einer Kurve, die gnadenlos abwärts verläuft.

Gaia liegt im Sterben. Lang lebe Medea. Vorläufig. <



Peter Ward ist Professor für Paläontologie an der University of Washington in Seattle.

© New Scientist
www.newscientist.com

Lovelock, J.: Das Gaia-Prinzip: die Biographie unseres Planeten. Artemis & Winkler, Zürich/München 1991.

Lovelock, J.: Gaias Rache. Warum die Erde sich wehrt. List, Berlin 2007.

Ward, P.: Precambrian Strikes Back. In: New Scientist, S. 40–43, 9. Februar 2008.

Ward, P.: The Medea Hypothesis: Is Life on Earth Ultimately Self-Destructive? Princeton University Press, Princeton 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006323.