

LYNN MARGULIS

**DER
SYMBIOTISCHE
PLANET** ODER
WIE DIE EVOLUTION
WIRKLICH VERLIEF

WESTEND

7 An Land

*Superfluous were the Sun
When Excellence be dead*

*(Überflüssig wird die Sonne
Ist Vortrefflichkeit erst tot)*

Kürzlich war ich in der »Star-Trek«-Gedächtnisausstellung des Smithsonian-Museums für Luft- und Raumfahrt in Washington. Bis dahin hatte ich noch keine einzige Folge der ursprünglichen Serie (1966–1969) gesehen.

Jetzt aber waren harmlose Neugier, Siebziger-Jahre-Nostalgie und die Menschenmenge hinter mir Grund genug, sie mir anzusehen – für zehn Minuten: sehr USA-lastig und sehr veraltet. Dass sie so albern war, verblüffte mich. Die Kulisse mit ihren Maschinen und das völlige Fehlen von Pflanzen und allen anderen nicht-menschlichen Lebensformen im Raumschiff erschienen mir bizarr. Wenn Menschen tatsächlich eines Tages in riesigen Raumschiffen zu anderen Planeten reisen, werden sie nicht allein sein. Im Weltall wie auf der Erde müssen die Elemente des Lebens – Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor und einige andere – der Wiederverwertung zugeführt werden. Dieses Recycling ist kein Luxus der Wohlstandsgesellschaft, sondern ein Prinzip des Lebens, von dem uns auch noch so viel

Technologie nicht befreien kann. Eine Reise von Menschen in die Tiefen des Weltraums erfordert Ökosysteme aus vielen nicht-menschlichen Lebewesen, die Abfälle in Nahrung umsetzen. Ohne solche »Versorgungs-Ökosysteme« sind nur sehr kurze Ausflüge in ständigem Kontakt mit Mutter Erde möglich.

Ein Ökosystem ist die kleinste Einheit, die biologisch notwendige Elemente wiederverwertet. Kohlendioxid wird »fixiert«, das heißt chemisch in Nahrungs- und Körpersubstanz (organische Kohlenstoffverbindungen) verwandelt. Organische Kohlenstoffverbindungen werden aufgenommen, reagieren chemisch, werden abgebaut oder zu verschiedenen anderen Formen organischer Materie umgesetzt. Letztlich sorgen die Enzyme eines Lebewesens oder ein tiefer Atemzug dafür, dass aus dem organischen Kohlenstoff CO_2 freigesetzt wird. Der Kohlenstoff durchläuft also einen Kreislauf. Das Gleiche gilt für den Stickstoff: Er geht den Weg vom trägen N_2 der Atmosphäre über die »Stickstofffixierer« zu nützlichen Aminosäuren. Werden die aus Proteinen freigesetzten Aminosäuren dann wieder in Stickstoffabfall und nach weiteren Reaktionen in das gasförmige N_2 der Luft umgewandelt, ist auch der Kreislauf des Stickstoffs vollendet. Der Kreislauf der Elemente läuft innerhalb eines einzelnen Ökosystems schneller als zwischen ihnen, aber keine Substanz ist völlig isoliert. Mir ist die Vorstellung, dass die Erde ein Geflecht von »Ökosystemen« ist, lieber als jede Personifizierung einer Mutter Gaia. Mein Kollege Daniel Botkin würde ein Ökosystem wahrscheinlich als Gruppe von Lebensgemeinschaften verschiedener biologischer Arten definieren, die zur gleichen Zeit am gleichen Ort leben und sich eines Zustroms an Energie und Materie von außen erfreuen. Er würde behaupten – und ich stimme ihm zu –, ein Ökosystem sei ein Ausschnitt der Erdoberfläche, in dessen Innerem Energie und Materie durch die Tätigkeit der Lebewesen einen schnelleren Kreislauf durchlaufen als zwischen diesem Sys-

tem und anderen. Der Materie- und Energiebedarf der Lebewesen in einem Ökosystem wird durch Recycling der vielen chemischen Verbindungen gedeckt, die zur Aufrechterhaltung des Lebens notwendig sind. Den Mars zu »begrünen«, andere Planeten zu kolonisieren oder längere Zeit im Weltraum zu leben erfordert natürlich viel mehr als nur menschliche Siedler und Maschinen. Dazu sind organisierte, funktionierende Lebensgemeinschaften notwendig. Das Zusammenleben verschiedener biologischer Arten wird für die Kolonisierung des Weltraums ebenso unverzichtbar sein, wie es Symbiose und biologische Vielfalt im Paläozoikum für die Kolonisierung des Festlandes waren. Wenn es jemals ein Leben im Weltraum geben sollte, wird es die Verbindung unterschiedlicher Lebensformen und auch neue Symbiosen erfordern.

Neue Symbiosen, die zu einem neuen Geflecht von Wechselwirkungen führten, waren für die Besiedlung großer Teile der Erde von entscheidender Bedeutung. Dass die landlebenden Arten auf dem Trockenen Fuß fassen konnten, dürften sie besonderen Formen der Symbiose zwischen Pflanzen und Pilzen verdankt haben.

Pflanzenwurzeln und Pilze können zu Wurzelknollen zusammenwachsen, die man Mycorrhiza nennt. Solche Komplexe aus Pilz und Pflanze besiedelten den unwirtlich trockenen Untergrund: Sand, Erde und Kies.

Das Leben entstand in den Meeren, und stichhaltigen Argumenten zufolge machte erst die Gemeinschaft – die Symbiogenese – das trockene Land für Lebewesen bewohnbar. Die ultraviolette Strahlung der Sonne, nicht enden wollende Trockenheit und Nährstoffknappheit waren vor 500 Millionen Jahren an Land ein viel ernsteres Problem als heute.

Durch die Symbiogenese entwickelte sich die *terra firma* der Erde zu einem bewohnbaren Gebiet. An den ersten Symbiosen auf dem Trockenen waren vermutlich keine Bakterien beteiligt. Bei

den ersten großen Landlebewesen, die fossile Spuren hinterließen, handelte es sich wahrscheinlich um Komplexe aus Pflanzen und Pilzen. Die ältesten pflanzlichen Fossilien der Welt fand man im Hornstein, den man als Feuerstein kennt. Und die besten derartigen Gesteine mit Pflanzenfossilien findet man in einem Steinbruch in der Nähe von Rhynie in Schottland. Die Fossilien von Rhynie sind in allen Einzelheiten erhalten geblieben, weil – nach heutiger Kenntnis – das siliciumhaltige Wasser einer nahegelegenen heißen Quelle durch sie hindurchsickerte. Unter den Schätzen aus dem Hornstein von Rhynie findet man fossile Chytriden, eine Art von Protoctisten, die im Inneren fossiler Algen liegen. Und die Algen befinden sich ihrerseits in den Stängeln 400 Millionen Jahre alter Pflanzen! Solche Versteinerungen liefern uns erstaunlich genaue Momentaufnahmen vom frühesten Leben auf dem Land. Ein Insekt, das in Rhynie erhalten blieb, trug in seinem Darm die Chlamydospore eines Pilzes. (Dieser hübsche Name bezeichnet ein Gebilde, das gegen Kälte und Austrocknung unempfindlich ist. Chlamydosporen sind Fortpflanzungszellen, die sich ohne Sexualität durch Abspaltung vom Pilzfaden bilden.)

Die kanadischen Botaniker K. A. Pirozynski und D. W. Malloch wollen mit der Vorstellung von einer »Pilzverschmelzung« die Entstehung der Pflanzen vor etwa 450 Millionen Jahren erklären. Nach ihrer Hypothese machten Pilze und Algen eine gemeinsame Evolution durch, in deren Verlauf sich die Partner in einer Symbiose verbanden. Schließlich lieferten die Pflanzen nährstoffreichen Saft für die Pilze in ihrem Inneren, deren Pilzfäden widerstandsfähige Äste und Wurzeln bildeten. Peter R. Astatt von der University of California in Irvine erweitert die Hypothese von Pirozynski und Malloch: Er weist darauf hin, dass Pflanzen ihre cellulosehaltigen Zellwände mit den Abbau- und Absorptionstricks der Pilze zerlegen. Sowohl Pilze als auch Pflanzen geben zum Beispiel Chitinase-Enzyme an den Boden ab. Astatt vertritt die An-

sicht, die Pflanzen hätten den Pilzen während ihrer langen Verbindung einige Gene gestohlen und behalten.

Mycorrhiza sind heute knollenförmige, eindeutig erkennbare symbiontische Strukturen. Oft sind sie farbenprächtig und entstehen durch symbiogenetische Wechselwirkungen zwischen Pilzen und dem Gewebe der Pflanzenwurzeln. Mycorrhiza liefern dem pflanzlichen Partner Mineralstoffe wie Phosphor und Stickstoff aus dem Boden. Umgekehrt versorgt die Pflanze den Pilz mit Nährstoffen, die sie durch Photosynthese hergestellt hat. Die Pilze in den heutigen Mycorrhiza bringen Chlamydosporen hervor, die denen der fossilen Formen verblüffend ähneln. Schon die 450 Millionen Jahre alten Pflanzenreste im Hornstein von Rhynie, darunter die Gattung *Rhynia* selbst, haben Wurzelknollen. Demnach waren Pilze und Pflanzen bereits in der allerfrühesten Zeit ihres Landlebens in einer produktiven Symbiose verbunden.

Die Übersiedlung an Land war gleichbedeutend mit der Evolution der Pflanzen aus wasserbewohnenden Algen. Das Überleben auf dem Trockenen erforderte Hartnäckigkeit: Stärke, Widerstandskraft gegen Austrocknung und ausreichende Ernährung. Nach Feststellungen von Astat – der seine Kollegen allerdings noch nicht überzeugen konnte – war dieser Bruch mit dem Lebensraum der Algen nur durch eine Symbiose zwischen Algen und Pilzen zu bewerkstelligen. Die grünen Algen, die im Ozean trieben, waren nicht einfach größer geworden und hatten sich eines Tages in eine Pflanze verwandelt.

Die trockenen Täler in Victorialand in der Antarktis sind eine eisige Hölle. In regelmäßigen Abständen fegen Windböen über die Felsen und lassen das schmelzende Eis des Sommers sofort wieder gefrieren. Und dennoch gedeihen hier, zwei oder drei Millimeter unter der Felsoberfläche verborgen, die Lebensgemeinschaften der Flechten, ein Gemisch aus Pilzen, Algen und Bakterien, das sogar porösen Sandstein besiedelt. Solange diese Lebensgemein-

schaft durch die Kristallkörner des Quarzes mit Sonnenlicht versorgt wird, bleibt sie erhalten. Die Gesamtmasse der felsbewohnenden Flechten auf der Erde wird auf 13×10^{13} Tonnen geschätzt, eine Biomasse, die größer ist als die aller Lebewesen in den Ozeanen! Algen, die unter einer Schutzschicht aus Pilzen wachsen, klammern sich an den nackten Fels, breiten sich auf seiner Oberfläche aus und bauen ihn letztlich zu Boden ab, in den Pflanzenwurzeln und das Geflecht der Pilzfäden eindringen können. Seit Hunderten von Jahrillionen zersetzen die Gemeinschaften aus Pilzen und Algen das harte Gestein unseres rotierenden Planeten zu reichhaltiger, fruchtbarer Erde. Auch in gemäßigten Klimazonen sind Flechten entscheidend dafür verantwortlich, dass das Land für Lebewesen bewohnbar wird.

Im Laufe der Jahrilliarden erweiterte das Leben seinen Lebensraum von seiner wässrigen Heimat auf das trockene Land – das Ehepaar McMenamin spricht von einem »Hypermeer«.¹ Mit Eleganz, Neuerungsbereitschaft und erschreckender Fruchtbarkeit setzte das Leben sich an Orten fest, an denen es zuvor nie gewesen war. Heute sind Zahl, Vielfalt und Wechselbeziehungen der Arten an Land größer als im Meer, dem ursprünglichen Lebensraum. Die Biomasse an Land übersteigt die in den Ozeanen um das Vielhundert- oder sogar Vieltausendfache. Einen großen Teil dieser gewaltigen Masse, schätzungsweise 84 Prozent, machen Bäume aus. Das Wachstum der Wälder auf der Erde, diese dramatische Ausbreitung des Lebens über seinen Ursprung in den Meeren hinaus, brachte eine tiefgreifende Neuordnung der Umwelt an Land mit sich. Nährstoffe wie Sulfat und Phosphor, die im äußeren Kreislauf der Ozeane frei verfügbar waren, fanden photosynthetisch aktive Lebewesen an Land nur in geringen Mengen vor. Solche Substanzen musste das Hypermeer-System selbst beschaffen. Der Umzug an Land musste neue Bauprinzipien und Infrastrukturen mit sich bringen.

Wo Leben gedieh, war es von Wasser durchtränkt. Zytoplasma besteht zu über 80 Prozent aus Wasser. Mark McMenamin und seine Frau, die Paläontologin Dianna McMenamin, machen auf die weitreichenden Auswirkungen jener symbiogenetischen Wechselbeziehungen aufmerksam, denen sie den griffigen Namen »Hypermeer« gegeben haben. Was die McMenamins als Hypermeer bezeichnen, ist im Wesentlichen das Wurzelsystem der Pflanzen, das auf die Mycorrhiza-Pilze angewiesen ist. Über 5 000 Arten von Mycorrhiza-Symbionten – Pilzen, die mit den Wurzelhaaren der Pflanzen verwoben sind –, hat man bis heute unterschieden und mit Namen versehen. Zu den Gefäßpflanzen – eines der ältesten Beispiele ist *Rhynia* – gehören alle Pflanzen mit Ausnahme der Moose und einiger anderer Bewohner feuchter Böden. Alle Gefäßpflanzen besitzen ein Kreislaufsystem. Sie können Wasser aus dem Boden durch ihre Stängel in die Blätter pumpen und photosynthetisch hergestellte Nährstoffe nach unten befördern. Ihre Verbindungen zu den mikroskopisch kleinen, unterirdischen Mycorrhiza ist unauffällig und unterschätzt: Diese buchstäblich unsichtbare Partnerschaft ist der Grund für den gewaltigen Erfolg der Pflanzen, den wir sehen können.

Trotz ihrer großen weltweiten Bedeutung erregen die Pilze der Mycorrhiza kaum einmal Aufmerksamkeit, es sei denn, sie bilden Trüffel aus. Diese Delikatesse aus Frankreich und Italien ist der sporenbildende, der Fortpflanzung dienende Teil bestimmter Mycorrhiza-Pilze; ihr Duft zieht Schweine und Hunde an, die sie an den Wurzeln von Laubbäumen erschnuppern können. Pflanzen mit Mycorrhiza an den Wurzeln werden von der natürlichen Selektion begünstigt: In nährstoffarmen Böden bringen sie schwerere Keimlinge mit größeren Stickstoff- und Phosphatvorräten hervor als ihre Vettern, die nicht mit Pilzen zusammenleben. Und tatsächlich besitzen 90 Prozent aller Pflanzen symbiotische My-

corrhiza; 80 Prozent gehen zugrunde, wenn man sie dieser mitbewohnenden Pilze beraubt. Hypermeer allerorten.

Die Vorstellungen des Ehepaars McMenamin bedürfen der kritischen Bewertung und des kritischen Beifalls. Schon der russische Mineraloge Vladimir Vernadsky (1863–1945) erkannte im Leben eine wichtige geologische Kraft. Er nahm das Hypermeer vorweg und bezeichnete die lebende Materie als »belebtes Wasser« – ein ausgezeichnete Begriff für das Leben.²

Den Pflanzen gelang der Übergang aufs Trockene, indem sie ihre nasse Umwelt neu schufen und in ihrem Inneren einschlossen. Bäume eignen sich besonders gut dazu, Wasser in sich aufzunehmen und an Land zu bringen, um dann seine Verdunstung zu kontrollieren. Mit ihrem verzweigten, durch Cellulose und Lignin verstärkten Gewebe sind sie natürlich Gefäßpflanzen. Lignin ist eine komplexe Substanz aus Polyphenolen, organischen Verbindungen, die dem Holz seine Härte verleihen. Das Auftauchen der Bäume vor über 400 Millionen Jahren trieb die gesamte Biosphäre nach oben und außen. Die enorme Ausweitung an Land, aufwärts und weg von Meer und Süßwasser, gründete sich auf die enge Verbindung von Pflanzen und Pilzen, und so ist es bis heute geblieben. Pilze nehmen unter den Landbewohnern eine beherrschende Stellung ein. Sie betreiben keine Photosynthese, sondern beschaffen sich ihre Nährstoffe durch Absorption. Undulipodien fehlen ihnen, das heißt, ihre Zellen können nicht schwimmen. Aber dafür überleben sie vorübergehende Austrocknung! Pilze haben eine Geduld, weit größer als die jedes Heiligen. Sie liegen da und warten, aber wenn es wieder feucht wird, übernehmen sie das Ruder. Die meisten Pilze bilden raffinierte Mycelien, Geflechte aus zytoplasmagefüllten Nährstoffkanälen. Allein, in Verbindung mit Algen als Flechte oder mit Pflanzen als Mycorrhiza eroberten sie das Land und vermehrten sich.

Die Symbiogenese war der Mond, der die Flut des Lebens aus den Tiefen der Ozeane auf das trockene Land und hinauf in die Lüfte zog. Das Geflecht des Wassers an Land, das belebte Wasser der Pilze in den Pflanzen, ist das Hypermeer der McMenamins. Wenn Menschen jemals längere Reisen in den Weltraum unternehmen, wird das kein nacktes, technisiertes Unternehmen wie »Star Trek« sein. Das Bild von der sterilen Technik, die uns von den Mitbewohnern auf unserem Planeten befreit, ist nicht nur geschmacklos und langweilig, sondern grenzt an Scheußlichkeit. Ganz gleich, wie sehr wir als Spezies von uns selbst eingenommen sind – Leben ist etwas viel Umfassenderes: ein unglaublich kompliziertes Wechselspiel zwischen Materie und Energie der vielen Millionen Arten außerhalb (und innerhalb) unserer eigenen Haut. Diese fremden Wesen auf der Erde sind unsere Vettern, unsere Ahnen und ein Teil unserer selbst. Sie verwerten unsere Stoffe und liefern uns Wasser und Nahrung. Ohne »die anderen« können wir nicht überleben. Unsere symbiontische, verwobene Vergangenheit ist von einem Geflecht belebten Wassers durchzogen.

DIE ANDERE SEITE DER EVOLUTION

Darwins »Survival of the Fittest«, das Überleben des Stärkeren, ist nur die halbe Wahrheit. Die Symbiose, die Verbindung verschiedener Organismen zu neuen Lebensformen, hat einen mindestens ebenso großen Anteil an der Evolution. Nicht Egoismus, sondern die Kooperation, die Vereinigung, haben den Menschen erst möglich gemacht. Für die Anerkennung ihrer Erkenntnisse musste die Wissenschaftlerin Lynn Margulis in einem durch Männer dominierten Umfeld ein Leben lang kämpfen – und hatte Erfolg: 1999 bekam sie für ihre Arbeit die »National Medal of Science« von Bill Clinton überreicht und gilt heute als eine der wichtigsten Forscherinnen des 20. Jahrhunderts.

»**MARGULIS GREIFT IN DIESEM KLEINEN, VIELSEITIGEN UND INFORMELLEN BÄNDCHEN ZAHLREICHE DER GROSSEN FRAGEN DER BIOLOGIE AUF. (...) SIE VERMITTELT EIN GEFÜHL FÜR DEN ERSTAUNLICHEN UND VERWICKELTEN URSPRUNG DES LEBENS.**« **Publishers Weekly**

