

# Luft

Die gesamte Geschichte kennt Wendepunkte, Ereignisse, die der Zukunft die Richtung vorgeben. Während das Aussterben in der Geschichte des Lebens ein konstantes Phänomen ist, sind Massenaussterben die entscheidenden Knotenpunkte. Vier schicksalhafte Scheidepunkte der Erdgeschichte habe ich für diesen Teil ausgewählt.

Das allererste Massenaussterben hält noch immer an. Jeden Morgen, wenn wir aufstehen, stecken wir mittendrin und atmen den giftigen Stoff, der dafür verantwortlich ist. Das erste biologische Massaker auf globaler Ebene war auch die erste große Vergiftung der Welt, verübt von einem großen, blinden, gierigen Stamm, der die Erde durch seinen Energiehunger an den Rand des Abgrunds brachte, indem er die Atmosphäre für immer veränderte, ohne sich um die schrecklichen Folgen zu scheren. Ursache war ein unsichtbares, stilles, allgegenwärtiges und tödliches Gas: jener Sauerstoff, in dem wir (bzw. unsere Vorfahren) uns seit 2,33 Milliarden Jahren pudelwohl fühlen.<sup>50</sup>

Das Leben wurde nicht unter unserem blauen Himmel geboren, nicht in klaren, kühlen, süßen Gewässern: Geburten sind ein elendes, schmutziges Geschäft, und die Geburt des Lebens bildet da keine Ausnahme. Sie ereignete sich unter einem düsteren, von orangefarbenem Smog<sup>51</sup> durchzogenen Himmel, der sich über einige wenige, tiefgraue und von der ultravioletten Strahlung aufgeheizte Flächen spannte (da es keinen freien Sauerstoff gab, hatte sich auch noch keine schützende Ozonschicht gebildet). Die Ursonne strahlte viel schwächer als die heutige, und dennoch fror die Erde nicht ein. Während das Brodeln, das die Entstehung unseres Planeten begleitete, langsam nachließ, übernahm es der von Kohlendioxid und Wasserdampf verursachte Treibhauseffekt, die Welt aufzuheizen; später trug auch das von den ersten Mikroorganismen produzierte Methan dazu bei.

Dass sich ein Weg zur Nutzung des Sonnenlichts entwickeln würde, war unumgänglich. Das Leben hat einen unstillbaren Hunger nach Energie. Bei gleicher Massendichte gieren wir unendlich viel mehr nach

Energie, als der Stern, der uns ernährt, zu geben bereit ist: Ein Gramm Sonnenmaterie erzeugt weniger als ein Hunderttausendstel der Energie, die ein Gramm Zellen verbraucht.<sup>52</sup> Eine Zeit lang behalf sich das ursprüngliche Leben damit, die chemischen, organischen und anorganischen Verbindungen auf der Oberfläche zu verbrauchen. Solche chemischen Reaktionen sind jedoch nicht sehr energiereich und waren oft auf Nischen beschränkt wie die unmittelbare Umgebung von vulkanischen Fumarolen am Grund der Ozeane, wo sich nur eine nicht sehr dichte, weit verstreute Gemeinschaft von Mikroorganismen davon ernähren konnte.

Doch die Nutzung der Sonnenenergie war in gewisser Weise auch chemisch unausweichlich. Licht ist ein Synonym für elektromagnetische Wellen, und elektromagnetische Wellen bewegen elektrische Ladung in Molekülen hin und her, so wie die Meeresbrandung Sand bewegt. Allerdings nicht die schweren Protonen, die fest im Atomkern eingeschlossen sind, sondern die Elektronen, die leicht und schwach gebunden um diese herumschwirren und den Strom einer jeden chemischen Reaktion zur Verfügung stellen. Lädt das Licht sie – ähnlich einem Flipper, der eine Kugel wegschießt – mit Energie auf, können wir diese Energie nutzen, wenn das Elektron in seinen Ausgangszustand zurückkehrt. Wir nutzen die von den Elektronen eingefangene Energie des Lichts wie ein Wasserrad die Energie eines Bachs nutzt, der von der Quelle talwärts fließt.

Um Sonnenenergie zu absorbieren, bedarf es also dieser herumflipperten Elektronen. Aber woher bekommen wir derartige Elektronen? Elektronen schwirren normalerweise nicht frei in der Umwelt herum: Man muss sie von etwas losreißen. Die ersten Lebensformen, die Lichtenergie ernten konnten – also jene, die die Fotosynthese erfanden –, stahlen sie aus Verbindungen wie Schwefelwasserstoff oder von  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen und erzeugten daraus Schwefel oder  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen. Das ist einfacher und tut es auch. Noch heute gibt es Mikroorganismen, die so vorgehen. Aber Schwefel oder Eisen sind nicht überall verfügbar, und früher oder später sind die Vorräte erschöpft. Sonnenstrahlen hin oder her, es blieb ein

kümmertliches Dasein, stets begrenzt durch relativ knappe oder auf einige wenige spezifische Lebensräume konzentrierte Ressourcen.

Es brauchte eine Milliarde Jahre der Evolution, das heißt fast doppelt so lange wie die Zeit, die uns heute von den ersten Tieren auf unserem Planeten trennt. Aber irgendwann kam eine Gruppe von Mikroorganismen auf eine Lösung, die das gesamte Leben auf dem Planeten verändern sollte: die Cyanobakterien, früher auch als *Blaualg*en bekannt, obwohl sie Bakterien und keine Algen sind und damit ebenso unterschiedlichen Welten entstammen wie Bakterien und Hunde – und blau sind sie auch nicht immer. Ausgerechnet diese winzigen Zellen hat die Evolution mit der Fähigkeit ausgestattet, zur Gewinnung von Elektronen Wassermoleküle aufzubrechen, und zwar aus ebendem Wasser, in das diese Zellen ständig eingetaucht sind. Auf diese Weise erreichten die Cyanobakterien zwei grundlegende Resultate: Erstens hatten sie nun Zugriff auf einen unerschöpflichen Vorrat an Elektronen, die Licht einfangen konnten. Zweitens konnten sie durch die Verwendung von Wasser viel mehr Energie aus dem Licht gewinnen, denn Cyanobakterien waren und sind eine außerordentlich effiziente fotochemische Zelle. Wie es dazu kam, wissen wir nicht genau. Die Cyanobakterien könnten die beiden grundlegenden Funktionsschritte des Systems der sauerstoffhaltigen Fotosynthese von anderen Bakterien übernommen und nach und nach zu einem funktionierenden System zusammengefügt haben.<sup>53</sup>

Wasser aufzubrechen bedeutet, es in seine Bestandteile zu zerlegen. Eines davon, der Wasserstoff, sammelt sich im Innern der Zelle in Form von  $H^+$ -Ionen an. Diese werden dann über einen Proteinkomplex nach außen abgegeben, der den  $H^+$ -Strom nutzt wie ein Wasserrad den Bach und so weitere Energie aus dem Fotosyntheseprozess gewinnt. Die andere Komponente ist Sauerstoff, der in Form von molekularem Sauerstoff ( $O_2$ ) entweicht.  $O_2$  jedoch ist unbezähmbar. Als marodierendes Molekül reagiert es rasend schnell und verbindet sich mit allem, worauf es trifft. Der Sauerstoff griff organische Moleküle an, die bis dahin in der fast inerten Atmosphäre der Urerde überlebt hatten, und zerstörte sie. Als die Cyanobakterien lernten, Sauerstoff zu erzeugen, lernten sie



**Abb. 6** Gebänderte Eisenformationen von den Fortescue Falls, Karijini-Nationalpark, Westaustralien. (Foto: Graeme Churchard)

auch, dieses tödliche Nebenprodukt loszuwerden und zu ertragen; viele andere Lebewesen aber wurden davon überrumpelt.

Die Katastrophe trat nicht sofort ein. Das Gift verbreitete sich lautlos und ungehindert über Dutzende, ja Hunderte Jahrmillionen. In dieser Zeit verhielten sich die Gesteine der Erde wie ein Schwamm, der sich mit dem Sauerstoff verband und ihn in Form von Mineralien zurückhielt. Von Zeit zu Zeit, in einem Zyklus, dessen Häufigkeit wir nicht kennen, gelangte etwas gasförmiger Sauerstoff in die Umwelt, wo er sich mit dem in den Ozeanen gelösten Eisen massenhaft zu Eisenoxid verband, das auf den Grund sank und sich dort als dunkelrotes Sediment ablagerte, das wir heute in Form von charakteristischen Felsen mit abwechselnd roten und hellen Schichten finden: das Bändererz. Dies waren die ersten Hinweise auf die sich vollziehende Revolution, aber solange die sauren, eisen- und nickelhaltigen Meere der frühen Erde den überschüssigen Sauerstoff aufnehmen konnten, mussten sich die Mikroorganismen keine allzu großen Sorgen machen.

Irgendwann jedoch hatte sich der Schwamm schlicht vollgesogen. Es war kein Platz für noch mehr Sauerstoff. Er begann, sich im Wasser zu lösen und anschließend in der Atmosphäre anzureichern und kam schließlich mit jenen Lebensformen in Kontakt, die sich eine Milliarde Jahre lang ohne diese Bedrohung entwickelt hatten. Es ist nicht bekannt, wie hoch die Sauerstoffkonzentration damals war – vielleicht nur ein Hundertstel der heutigen, vielleicht über einen kurzen Zeitraum auch genauso hoch –, ehe sie durch geochemische Zyklen wieder absank, ohne jedoch jemals wieder ganz zu verschwinden. Doch selbst im günstigsten Fall wäre es immer noch reichlich viel Sauerstoff für die meisten Mikroorganismen in den Ozeanen und an Land gewesen, und für manche auch zu viel.

Jenen, die überlebten, gelang dieses Kunststück, wie so oft, durch Zufall. Einige fanden Zuflucht in Umgebungen, in die der Sauerstoff schlicht nicht vordringen konnte, und dort überleben sie bis heute: die Urbakterien (*Archaea*) oder *Obligaten Anaerobier*, also sauerstoffintolerante Bakterien. Obwohl sie an den Rand gedrängt wurden, existieren sie munter weiter, selbst in unserem Körper, wo sie entweder in Symbiose mit uns leben oder als Krankheitserreger. Die *Clostridien* zum Beispiel, die für lebensbedrohliche Erkrankungen wie Tetanus oder Botulismus verantwortlich sind, bleiben so lange unauffällig, bis sie sich in sauerstoffarmen Umgebungen – in den Vakuumverpackungen von Lebensmitteln oder in einer Wunde – vermehren und giftige Eigenschaften entwickeln können. Andere hingegen konnten vermutlich auf bestimmte Stoffe zurückgreifen, die ihnen eher zufällig dabei halfen, die toxischen Eigenschaften des Sauerstoffs zu neutralisieren, Manganionen zum Beispiel oder Eisen- und Schwefelkomplexe. Die Lebewesen, die das Glück hatten, an Orten mit einer hohen Konzentration dieser Mineralien zu leben, konnten so vielleicht genug Zeit gewinnen, bis sie effizientere Systeme entwickelt hatten. Die behelfsmäßigen Systeme wurden rasch übernommen und durch raffinierte Enzyme wie die Superoxid-Dismutase ersetzt, die die vom Sauerstoff erzeugten reaktiven Verbindungen zuverlässig abfangen.

Schon bald fanden einige dieser Organismen, vielleicht sogar die Cyanobakterien selbst, einen Weg, Sauerstoff nicht nur zu neutralisie-

ren, sondern auch zum eigenen Vorteil zu nutzen. Dieselbe Reaktivität, die das Gas so gefährlich macht, prädestiniert es auch für chemische Reaktionen, mit denen die Bakterien enorme Mengen Energie aus den vorhandenen organischen Molekülen gewinnen konnten. Es handelt sich um die gleiche Energie, die beim Verbrennen von Holz freigesetzt wird, nur dass sie nicht notwendigerweise einfach verfeuert werden muss, sondern mit Hilfe ausgeklügelter Prozesse auch dafür genutzt werden kann, große Energiereserven anzulegen.

So begannen einige Zellen *zu atmen*.

Und jene, die sich nicht angepasst haben? Von anderen Aussterbeereignissen auf unserem Planeten sind fossile Spuren in den Felsen erhalten geblieben. Wir kennen ihre Gestalt und können versuchen, ihr Werden und Vergehen zu interpretieren. Hier aber geht das nicht. Zu viel Zeit ist vergangen, zu anonym sind die fossilen Überreste von Mikroorganismen. Wir wissen, dass es einzellige, prokaryotische Organismen waren, aber welche evolutionären Linien verschwunden sind, welches ihre einzigartigen Lebensformen, ihre einzigartige Biochemie waren, wissen wir nicht und werden es wahrscheinlich nie erfahren. Mit ziemlicher Sicherheit lagern ihre Überreste in den Schubladen unserer Museen oder in freiliegenden Felsen, schlecht erhaltene, nicht entzifferbare Spuren von Bakterienzellen aus präkambrischer Zeit, die wir nicht von den Myriaden anderer bakterieller Überreste zu unterscheiden vermögen. Um Bakterien voneinander zu unterscheiden und ihre Funktionsweise zu verstehen, reicht es nicht, ihre Gestalt zu betrachten, wie wir es bei den Knochen eines prähistorischen Tieres oder versteinerten Baumstämmen tun: Wir müssten ihre Biochemie, ihr Genom, ihr Verhalten identifizieren, aber derlei Dinge sind in einem Fossil fast vollständig und unwiederbringlich verloren.

Der Sauerstoff richtete jedoch nicht nur Schaden an, weil er ein tödliches Gift ist. So wie er biologische Moleküle angriff, reagierte er auch mit einer anderen Kohlenstoffverbindung, nämlich dem in der Atmosphäre enthaltenen Methan. Die Anreicherung von Sauerstoff in der Atmosphäre führte dazu, dass Methan in Kohlendioxid umgewandelt wurde.

Die erste Folge war, dass der Himmel von fotochemischem Smog befreit wurde und sich blau färbte – insofern haben sich die Cyanobakterien ihren Namen redlich verdient. Aber Methan war und ist auch ein Treibhausgas, das 25-mal stärker wirkt als das Kohlendioxid, das wir heute zu Recht fürchten. Da die Sonne damals schwächer strahlte als heute, brauchte es das Methan, um die Temperatur auf der Erde hoch zu halten. Das Kohlendioxid war dazu nicht nur nicht ausreichend, die Bakterien entzogen es der Atmosphäre auch für die Fotosynthese, bei der Kohlendioxid aus der Umgebung angesaugt und in Zucker umgewandelt wird. Der dadurch ausgelöste Klimawandel war katastrophal: Mit ansteigender Sauerstoff- und abnehmender Kohlendioxidkonzentration geriet die Erde langsam aber sicher zum ersten Mal in den Klammergriff einer Vereisung, deren Ausmaß heute unvorstellbar ist: Sie wurde zur Schneeball-Erde. Fast der ganze Planet bis zum Äquator wurde zu einer weißen Gletscherwüste, in der nicht nur die Cyanobakterien zu verschwinden drohten, sondern auch alles andere Leben. Aber das ist wieder eine andere Geschichte.

Cyanobakterien existieren auch heute noch in zwei Formen. Vor mehr als einer Milliarde Jahren begannen eukaryotische Zellen, sich Cyanobakterien einzuverleiben und die Nährstoffe zu nutzen, die diese mit Hilfe der Sonnenenergie synthetisierten. Den Cyanobakterien wiederum schadete die Gefangenschaft nicht, denn die große eukaryotische Zelle bot andere Nahrung und Schutz. Diese Symbiose wurde irgendwann so innig, dass die beiden Organismen zu einem verschmolzen. Das Cyanobakterium verlor allmählich seine Identität und wurde zu jenem Organ in der Pflanzenzelle, in dem die Fotosynthese stattfindet. Spuren seiner Herkunft als freier Organismus sind in der Struktur des Chloroplasten und vor allem in einem kreisförmigen DNA-Molekül erhalten geblieben: dem Überbleibsel des ursprünglichen Cyanobakterien-Genoms.

Daneben gibt es aber auch noch frei lebende Cyanobakterien. Wie in den Ozeanen des Präkambriums leben sie vor unseren Augen in allen Gewässern der Erde. Meist führen sie eine bescheidene Existenz

und bleiben unsichtbar, aber manchmal, wenn die Umstände günstig sind, vermehren sie sich überproportional und werden dann ziemlich aufdringlich, als wollten sie die Herrlichkeit vergangener Tage zurückgewinnen. Wenn dies geschieht, schwimmt auf den Oberflächen von Meeren oder Seen ein grünlicher Schaum, ähnlich einer dicken Schicht Ölfarbe, so giftig, dass Tiere, die davon trinken, in qualvollen Krämpfen sterben.<sup>54</sup> Die giftigen Substanzen in den Cyanobakterien sind vermutlich nur zufällig giftig, haben sich also nicht entwickelt, um aktiv zu töten, wie andere Toxine, sondern dienen zur Anhäufung von Nährstoffreserven und spielen der Biochemie »höherer« Tiere nur zufällig derart übel mit. Aber vielleicht wollen uns diese bescheidenen, essenziellen Geschöpfe daran erinnern, dass das Leben kein harmonisches Miteinander ist, sondern ein Taumel, wo keiner zögert, die Welt zu verwüsten, wenn er dadurch einen Tag länger leben kann. Wer sich heute fragt, wie es möglich ist, dass die Menschheit den Abgrund, in den zu stürzen sie im Begriff ist, nicht sieht, der erinnere sich an die Cyanobakterien. Sie und wir folgen demselben darwinistischen Algorithmus, der Milliarden Jahre alt ist und doch auch heute noch aktuell.

# Wasser

So sehr sich das Vorher und das Nachher unterscheiden – immer gibt es einen Faden, der beide miteinander verbindet.<sup>55</sup> Geologische Zeiten kommen und gehen, Arten entstehen und verschwinden. Doch auch nach den dunkelsten Nächten gibt es Überlebende, Zeugen, die Erinnerungen bewahren und von einer Ära zur nächsten weitergeben. Die größte Ausnahme von dieser Regel, einen echten Neuanfang im Cuvier'schen Sinne, stellt das Ende der Ediacara-Ära dar. Es mag nicht das größte Artensterben der Geschichte gewesen sein (wir haben keine Möglichkeit, es zu quantifizieren), dafür war es das Einzige, bei dem nicht nur einzelne Tier- und Pflanzenarten oder -familien verschwunden sind, sondern eine ganze Lebensform.

An einem Maitag im Jahr 1957 entdecken drei Teenager aus Leicester eine versteinerte »Leiche«, die die Geschichte des Lebens auf dieser Erde umschreiben sollte. An jenem heiteren Nachmittag schwingen die drei sich auf den Sattel und radeln in den nahegelegenen Wald von Charnwood, wo sie an den dortigen, mehrere Meter senkrecht aufragenden Felswänden klettern wollen. Und wie sie da schwitzend herumkraxeln, entdeckt plötzlich einer einen Abdruck im Gestein: ein gut zehn Zentimeter langes Fossil, symmetrisch und hervorragend erhalten, das aussieht wie der traumhafte Nachhall eines Blattes, einer Feder, einer Pflanze. Doch es ist nichts von alledem, denn es muss einst mit dem Meeresboden verwachsen gewesen sein.

Wie es der Zufall will, begeistert sich einer der Teenager, Roger Mason, für Geologie. Mason ist kaum den Kinderschuhen entwachsen, aber er weiß bereits, dass die Felsen im Charnwood Forrest sehr alt sind, wobei sehr alt noch untertrieben ist. Das Flachrelief musste aus einer Zeit stammen, die mehrere Hundert Millionen Jahre zurücklag, einer Zeit lange vor den Dinosauriern. Deutlich älter noch als jene Epoche, die der berühmte Paläontologieprofessor Sedgewick aus Cambridge *Kambrium* getauft, sodann mit dem Meißel eine Linie gezogen und mit biblischer Strenge verfügt hatte: Fossilien komplexer Lebewesen existieren erst seit dem Kambrium, mithin seit etwa 545 Millionen Jah-

ren, Punktum. Nun hatten die britischen Geologen in der Gegend um Leicester aber sehr gründlich gearbeitet, und es bestand kein Zweifel am Alter der Charnwood-Felsen: Das Flachrelief, das Mason gefunden hatte, musste deshalb fast 600 Millionen Jahre alt sein.

Der erst 16-jährige Roger Mason weiß nicht recht, was er davon halten soll. Ein solches Fossil dürfte es an dieser Stelle eigentlich nicht geben. Er nimmt ein Stück Papier, legt es auf den Felsen und schraffiert mit seinem Bleistift über das Papier. Den Abdruck zeigt er abends seinem Vater, der weitsichtig genug ist, um dessen Bedeutung zu erkennen. Rogers Vater lehrt an der Universität Leicester und befragt einen Kollegen, den Geologen Trevor Ford. Ford weist höflich darauf hin, dass da wohl die Fantasie mit Vater und Sohn Mason durchgegangen sein müsse, aber als Freund der Familie tut er ihnen natürlich den Gefallen und nimmt den Ort persönlich in Augenschein. Als er das Fossil lebhaftig erblickt, ruft Trevor Ford – so die Überlieferung – sein persönliches Heureka aus: »Mein Gott, es existiert tatsächlich!«<sup>56</sup> Vermutlich, um seine anfängliche Borniertheit wiedergutzumachen, nennt er das erste präkambrische Fossil, das als solches erkannt wurde, nach seinem Finder *Charnia masoni*.<sup>57</sup>

Mason hatte das Glück, dass seine glückliche Entdeckung anerkannt und bestätigt wurde, aber er war beileibe nicht der Erste, der eine jener Kreaturen zu Gesicht bekam. Schon 1872 war Elkanah Billings, der Begründer der kanadischen Paläontologie, in den präkambrischen Felsformationen Neufundlands auf kreisförmige Abdrücke gestoßen, nicht größer als eine Münze. Er taufte sie *Aspidella terranovica* und postulierte, es handele sich um eine Frühform der Qualle. Die Fachwelt machte sich über Billings lustig, *Aspidella* wurde als Laune der Natur (ein weiteres Beispiel für das Fossil als *Lusus Naturae*) abgestempelt und vergessen.

Ein anderes Jahrhundert, ein anderer Kontinent. Australien, 1946. In den staubtrockenen Ediacara-Hügeln<sup>58</sup>, rund 400 Kilometer nördlich von Adelaide, führt der junge Geologe Reginald Claude Sprigg im Regierungsauftrag eine Erkundung verlassener Uranminen durch; Uran



**Abb. 7** Das von Mason entdeckte *Charnia*-Fossil, das heute im New Walk Museum in Leicester ausgestellt ist. (Foto: Ashley Grace)

ist in den Jahren des Kalten Krieges plötzlich zum wertvollen Schlüsselement geworden. Als er eines Tages einen Stein umdreht, bemerkt er kleine Abdrücke: zarte Ornamente, gleich einem Siegel. Sprigg weiß sofort, dass sie uralte sein müssen. Mindestens so alt wie jene sanften Hügel, die über Hunderte Jahrmillionen von den Elementen geformt worden waren. Einst, vor 555 Millionen Jahren, war dieser Stein Sand auf dem Grund eines flachen, warmen Meeres gewesen – und damit vermeintlich zu alt: Auch dieses Mal schrieb die Fachwelt die Fossilien fälschlicherweise dem Kambrium zu und verpasste ihnen den Status von Kuriositäten.

Als dann die Entdeckung von *Charnia* bekannt wurde, stellte ein anderer Geologe, Martin Glaessner, endlich den Zusammenhang her. Glaessner, der regelmäßig mit Ford korrespondierte, hatte seinerzeit auch Spriggs Fossilien gesehen. Ihm fiel auf, dass sich einige der in Charnwood und Ediacara gefundenen Fossilien ähnelten, und er erkannte, dass seine Vorgänger richtig gelegen hatten. Andere »unmögliche« Fossilien, die in Namibia, an den Küsten des Weißen Meeres, in Nordrussland, im Ural und in Indien gefunden und in Museumsschubladen vergessen worden waren, wurden wieder hervorgekramt. Und was

bis dato als marginale Kuriositäten abgetan worden war, brachte nun ein ganz und gar unbekanntes, fruchtbares Zeitalter des Lebens ans Licht. *Charnia* war kein einsamer Vorläufer, der einfach nur irgendwie zu früh dran war, sondern der Bannerträger einer völlig neuen, glorreichen Epoche des Lebens. Nach den roten Hügeln Australiens wird diese Entwicklungsstufe des Lebens *Ediacara-Fauna* genannt – wenn es sich denn um eine Fauna handelte.

Die Ediacara-Fauna ist das erste komplexe mehrzellige Leben, die Morgendämmerung des gesamten Bestiariums dieser Erde. Dabei ist ihre Fremdartigkeit kaum zu fassen. Stellen Sie sich vor, Sie betreten einen Planeten in einer anderen Galaxie und wollen nun das dortige Leben beschreiben. Könnten Sie das? Mythologien und Science-Fiction haben kein Problem damit, imaginäre Monster zu erschaffen. Nur, dass es sich dabei fast immer um eine Mischung von uns bekannten Organen und Formen handelt, Abwandlungen eines eng umgrenzten morphologischen Alphabets aus Flügeln, Flossen, Augen, Beinen, Klauen, Fühlern, Flügeldecken, Mandibeln. Gewiss, viele der Kreaturen der frühen, auf Ediacara folgenden Fauna gleich zu Beginn des Kambriums muten auch an, als wären sie einem Gemälde von Hieronymus Bosch entsprungen. Aber immerhin haben sie Köpfe, Schwänze und Rücken. Wir können uns vorstellen, wie sie funktionierten: eine andere Sprache als unsere, aber interpretierbar.

Die Ediacara-Fossilien hingegen ähneln *nichts*. Wenn wir nicht wüssten, dass sie einst gelebt haben, würden wir sie für abstrakte Ideogramme halten. Da ist nicht ein Körperteil, dem man einen Namen geben oder eine Funktion zuordnen könnte. Unser Vokabular, die Konzepte, mit denen wir an lebende Formen denken, verlieren hier ihre Bedeutung. Zum Beispiel *Charnia*: Was mag das gewesen sein, ein starres Fraktal auf einem Stiel, der auf dem Meeresgrund verankert war? Oder *Pteridinium*, eine Reihe von mit Sand gefüllten Hohlräumen? Was war *Tribrachidium*, ein kreisförmiges Emblem, in das eine dreiarmige Spirale geprägt war? Und was mag *Parvancorina* gewesen sein, ein kleines, flaches Dreieck mit einer T-förmigen Verzierung? Mit viel Wohlwollen

erinnert Letztere entfernt ein wenig an die Schale eines Krustentiers. Doch es gibt weder Beine noch Fühler oder Augen, nur eine Form, organisch und gleichzeitig leer. Ebenso unverständlich ist die Lebensweise dieser Wesen. *Yorgia*, eine flache, segmentierte Scheibe, muss in der Lage gewesen sein, sich aus dem Sand zu erheben und ein Stück weiter wieder fallen zu lassen – oft finden sich ganze Reihen von Abdrücken, mit dem Fossil des Tieres ganz am Anfang der Strecke. Wie es sich ohne auch nur einen Anflug von Beinen, Flossen oder Muskeln bewegen konnte, entzieht sich unserer Kenntnis. Die offenen Fragen in Bezug auf die Ediacara-Fauna sind so grundlegend, dass manchmal sogar die Unterscheidung zwischen real und unreal verschwimmt. In *Arumberia* zum Beispiel erkannten manche Forscher einen kegelförmigen Organismus, der auf dem Meeresgrund lebte. Andere sahen darin nur eine *Fata Morgana*, in den Sand gezeichnet von der Strömung.

Das Verrückte ist, dass unter all diesen Ediacara-Fossilien auch die Vorfahren der Fauna gelebt haben müssen, wie wir sie kennen, die Vorfahren der Trilobiten, Seesterne und Wirbeltiere, die nur wenige Millionen Jahre später auf der Bildfläche erschienen. Eine einzige Ausnahme gibt es, einen einzigen Faden, der die Ediacara-Fauna eindeutig mit unserer Welt verbindet. *Kimberella*, eine kleine ovale Kreatur, die – wie auch immer – über den Meeresboden kroch und womöglich eines der ältesten Weichtiere war, die je existierten. Ansonsten ist die Suche nach bekannten Formen in Ediacara-Fossilien vollkommen vergeblich. Ja, manchmal scheinen sie uns absichtlich ärgern zu wollen. *Spriggina* mit seiner bilateralen Symmetrie, seinen Segmenten und seiner Form, die an einen Kopf und einen Schwanz erinnern, scheint durchaus einem gesunden, normalen Wurm zu ähneln, wie er auch heute in den Meeren vorkommt. Aber ein Blick genügt, um festzustellen, dass die Segmente links und rechts tatsächlich gegeneinander verschoben sind, eine Geometrie, die bei modernen Tieren völlig fehlt.<sup>59</sup> Die Enttäuschung war so groß, dass einige Autoren wie Adolf Seilacher spekulierten, die Ediacara-Fauna sei ein uraltes evolutionäres Experiment gewesen und mittlerweile in Gänze verschwunden – eine alternative Richtung der



**Abb. 8** Ediacara-Fossilien. Von oben rechts, gegen den Uhrzeigersinn: *Dickinsonia*, *Tribrachidium*, *Parvancorina*, *Arumberia*, *Spriggina*.

Evolution, die keine Nachkommen hinterlassen habe, Vielzeller, die unabhängig von den Tieren entstanden seien.

Inzwischen wissen wir, dass mindestens eine weitere ikonische Ediacara-Kreatur, *Dickinsonia*, zu unserem Reich, dem der Tiere, gehörte: Es ist sogar das älteste Tier, das wir mit Sicherheit als solches bezeichnen können. Gewissheit haben wir dank der Analyse der chemischen Biomarker in dem Fossil. So unglaublich es erscheint, einige Ediacara-Fossilien sind nicht nur als bloße Abdrücke im umgebenden Gestein überliefert: In seltenen Fällen ist auch eine dünne, unmerkliche Schicht

organischer Abfallprodukte erhalten, die wahren sterblichen Überreste eines Tiers, das vor über 550 Millionen Jahren das Zeitliche segnete. Überreste, die mit größtem Respekt behandelt werden müssen: Die geringste Verschmutzung aus der Umgebung könnte ihre chemische Identität zerstören. Mit ihrer Hilfe ließ sich nachweisen, dass diese Überreste Cholesterin enthalten – ein Molekül, das in solchen Mengen nur in den Zellmembranen von Tieren vorkommt.<sup>60</sup>

Wie lässt sich die Fremdartigkeit der Ediacara-Fauna erklären? Vielleicht so: Es war das Zeitalter der Unschuld. Von jener grausamen Natur, die uns so vertraut und natürlich erscheint, fehlt in der Ediacara-Welt fast bis zum Ende dieser Welt jede Spur. Räuber und Beute gab es nicht. Die damaligen Wesen hatten weder Münder noch Fortsätze, weil sie sich gar nicht die Mühe machen mussten, etwas zu fangen und zu schlucken: Eine Hypothese besagt, dass sie sich mit Hilfe von Osmose ernährten und die Nahrung direkt aus ihrer Umgebung aufnahmen – als lebten sie buchstäblich in einer Suppe aus Essen. In den präkambrischen Ozeanen wimmelte es von Bakterien und Mikroorganismen, und da nichts und niemand sie darin störte, bildeten sie auf dem Meeresboden Teppiche, die mehrere Zentimeter dick sein konnten. So mussten die Ediacara-Wesen sich einfach nur auf den Meeresboden legen und aufnehmen, was unter ihnen und um sie herum fleuchte. Die hohlen, sich wiederholenden Segmente und abgeflachten Körper hatten nur den einen Zweck, die Körperoberfläche zur Außenwelt zu maximieren. Wie Stephen Jay Gould 1984 schrieb:

*Die Ediacara-Fossilien stellen eine von zwei Lösungen für das strukturelle Problem der Größe – das heißt die zwangsläufige Verringerung der Oberfläche im Verhältnis zum Volumen bei zunehmender Größe – dar, und zwar jene, der moderne Tiere nicht gefolgt sind. Da zahlreiche biologische Funktionen wie zum Beispiel die Atmung oder die Nährstoffaufnahme von der Oberfläche abhängen, dabei aber das gesamte Körpervolumen versorgen müssen, wird die Situation mit zunehmender Größe schnell unhaltbar. Moderne Tiere haben ihre grob kugelförmige Form beibehalten, zugleich aber Or-*

*gane wie Lunge und Darm entwickelt, um die Oberfläche innerhalb des Körpers zu vergrößern. Die andere Lösung, die heutzutage selten geworden ist und sich noch bei einigen großen Parasiten wie den Bandwürmern findet, ermöglicht trotz geringer innerer Komplexität eine große Oberfläche durch Körper, die bandförmig oder platt wie Pfannkuchen sind, wodurch das Körperinnere stets nahe an der äußeren Oberfläche liegt, wo Atmung und Nährstoffaufnahme stattfinden. Die Ediacara-Tiere scheinen diesen zweiten Weg eingeschlagen zu haben.<sup>61</sup>*

Diese beinahe unerträglich friedfertige Fauna ist, soweit wir wissen, in Wirklichkeit der gestählte Abkömmling eines der tiefgreifendsten Krisenereignisse der Geschichte. Das Auseinanderbrechen eines uralten Superkontinents, einer grauen, heute Rodinia genannten Ödnis, verursachte eine Klimakrise, die den Globus in die drei tiefsten bekannten Eiszeiten stürzte. Wie bereits erwähnt, erstreckte sich die Vergletscherung während der ersten beiden, der Sturtischen (vor 725–710 Millionen Jahren) und der Marinoischen (vor 635–600 Millionen Jahren), bis zum Äquator. Die dritte, Gaskiers-Eiszeit genannt, war kaum weniger grausam. Aus einem blauen Planeten verwandelte sich die Erde in eine weiße, von einer kilometerdicken Schneedecke bedeckte Kugel. Diese drei Eiszeiten läuteten den Beginn des komplexen Lebens ein. In den beinahe drei Milliarden Jahren zwischen Erscheinen der ersten irdischen Lebensformen und der Ediacara-Epoche gedieh auf der Erde allem Anschein nach nichts Komplexeres als Algen. Doch von der Vereisung bedrängt und ständig Gefahr laufend, zu erfrieren und auszustarben, war das Leben gezwungen, neue Strategien zu entwickeln, um zu überleben. Bereits nach dem Ende der Sturtischen Eiszeit machten sich eukaryotische Zellen – komplexe Zellen mit Zellkernen und Organellen – daran, die einfacheren, bis dahin in den marinen Ökosystemen vorherrschenden prokaryotischen Zellen zu verdrängen. Irgendwann begannen einige dieser eukaryotischen Zellen, zusammenzuarbeiten und Kolonien zu bilden, Aufgaben zu teilen und Strukturen auszubilden, und schließlich entwickelten sich aus diesen Kolonien Organismen.

Als sich das Meer wieder erwärmte, vergaß diese Form von Leben die eingebläute Lektion nicht, sondern nutzte sie, um sich zu Herren im Ozean aufzuschwingen. Nur fünf Millionen Jahre nach dem Rückzug der Gletscher herrschten auf dem Meeresgrund bereits still und unbeschwert die Geschöpfe von Ediacara.

Nach geologischen Maßstäben währt diese Herrschaft nur kurz, rund 30 Millionen Jahre. Vor 545 bis 540 Millionen Jahren verschwinden praktisch alle Ediacara-Wesen. An ihre Stelle treten die ersten Vertreter der Lebensformen, die wir heute kennen: eine Palette, die mal mehr, mal weniger vertraut erscheint, aber stets irgendwie wiedererkennbar ist. Die großen Dynastien der Tierwelt entstehen: Nesseltiere, Gliederfüßer, Chordatiere, Weichtiere, Stachelhäuter und wie sie alle heißen. Keinem der nachfolgenden Aussterbeereignisse wird es gelingen, sie vollständig auszurotten, sonst wären wir nicht hier und könnten über sie sprechen. Wir haben keinen Schimmer, was am Ende des Ediacariums passiert sein mag. Es gibt geologische Hinweise auf Umwälzungen in der Umwelt zwischen dem Ende der Ediacara-Ära und dem Beginn des Kambriums, aber derlei hat es auch in der Mitte der Ediacara-Ära gegeben, ohne dass die damaligen Lebewesen ernsthaft Schaden genommen hätten. Wir wissen immerhin, dass in der zweiten Hälfte der Ediacara-Periode einige sehr kleine, muschelähnliche Fossilien auftauchen, *Cloudina* etwa oder *Namacalathus*. Welche Tiere in diesen Schalen gelebt haben, ist nicht bekannt, aber die Tatsache, dass einige Exemplare durchlöchert sind, zeugt davon, dass ein anderes Tier den Bewohner verschlungen haben muss. Man darf diese Löcher auf keinen Fall unterschätzen – sie sind das Kainsmal, mit dem eingeläutet wird, was heute normal ist: Man frisst oder wird gefressen. Aus der gleichen Zeit finden sich in den Felsen der Dengying-Formation in der Drei-Schluchten-Region des Gelben Flusses in China die ersten Abdrücke von Tieren, die vor 551 bis 541 Millionen Jahren über den Meeresboden liefen.<sup>62</sup> Eines dieser Tiere, *Yilingia spiciformis*, ähnelte vage einem Tausendfüßler, auch wenn es – in bester Ediacara-Tradition – schwierig ist, eine engere Verwandtschaft mit modernen Tieren herzustellen.<sup>63</sup> Dennoch: Die *Beine* waren geboren.

Vielleicht waren es ja die Pforten, die Ediacara zerstört haben. Es fällt nicht schwer, sich vorzustellen, wie unsere Urahnen die immobilen, unschuldigen Ediacara-Wesen eins nach dem anderen verschlungen haben. Gut möglich aber auch, dass sie ihnen buchstäblich den Boden unter den Füßen weggezogen haben.<sup>64</sup> Der bereits erwähnte dicke Mikrobenteppich konnte sich nicht halten, als Lebewesen auftauchten, die darüberlaufen, hindurchschwimmen oder ihn abgrasen konnten, und in der Tat verschwanden jene mikrobiellen Schichten zusammen mit den Lebewesen, die auf ihnen lebten – und genauso plötzlich. Innerhalb weniger Millionen Jahre veränderte sich das Erscheinungsbild des Meeresbodens von Grund auf.

Musste es so kommen? Stephen Jay Gould hat am Ende seines Meisterwerks »Zufall Mensch: Das Wunder des Lebens als Spiel der Natur« in bewundernswerter Weise dargelegt, welche entscheidende Rolle die Massenaussterben in der Geschichte des Lebens gespielt haben, in der wenig aus Notwendigkeit geschieht und vieles aus Zufall.<sup>65</sup> Wenn die Erde drei Milliarden Jahre lang nur einzellige Wesen beherbergt hat, dann schlicht deshalb, weil es keinen herausragenden Grund dafür gab, dass sich Tiere aus Fleisch und Blut im Schatten von Baumkronen entwickelten. Es gibt kein »großartiges, fortschrittliches Schicksal« und auch keine Lamarck'schen Vitalkräfte, durch die Leben sich stets hin zum Gipfel einer hypothetischen natürlichen Hierarchie formen würde. Die Erfindung der Vielzeller ist nicht der unvermeidliche Schritt auf dem Weg zu immer raffinierteren Lebensformen, sondern das glückliche Relikt einer Notstrategie, die unter dem Druck dreier schrecklicher Eiszeiten entwickelt wurde. Es ist also durchaus nicht klar, ob die modernen Tiere zwangsläufig die Ediacara-Fauna entthront haben. Die Ediacara-Wesen waren keineswegs ein »gescheitertes Experiment«, wie manchmal voreilig geschrieben wird,<sup>66</sup> sondern bildeten über Jahrmillionen ein robustes und erfolgreiches Ökosystem. Vielleicht haben klimatische Bedingungen oder eine andere Krise zu Umwälzungen geführt, die mobile und räuberisch lebende Organismen begünstigten. Es bedurfte schon eines unglücklichen Unfalls, damit in einer Welt, in der es möglich ist, sein Leben auf dem Meeresboden liegend zu fris-

ten und Nahrung aus einem Teppich von Mikroben aufzunehmen, ein Wesen geboren wird, das gezwungen ist, *zu fressen* und um sein Leben zu kämpfen. Und ein Unglück zur falschen Zeit am richtigen Ort – ein Meteor, ein Vulkanausbruch, selbst ein Erdbeben unter Wasser – hätte die ersten zarten Vorfahren dieser modernen Tiere durchaus jederzeit leicht wieder auslöschen können. Wäre das passiert, wäre die Erde heute ein stiller, langweiliger Ort, wo Ozeane voller Mikroben, die von blinden, immobilen Säcken aus Gallertmasse träge eingesogen werden, an die Ufer lautloser Kontinente branden. Ediacara war eins der möglichen Schicksale unseres Planeten. Ein Schicksal, das sich nicht erfüllt hat.