

## **Das Phänomen Leben**

### **Woher kommen wir – wohin gehen wir?**

Diese beiden Fragen beschäftigen nicht nur seit jeher das menschliche Denken, sondern beschreiben auch vollständig das Themenfeld der modernen Astrophysik. Der einzige Unterschied liegt darin, auf welchen Zeitskalen man sie betrachtet. Meine naturwissenschaftliche Antwort wäre folgende:

#### **Woher kommen wir?**

Immer sind es die kleinen Abweichungen im nicht ganz perfekten Kosmos, die die Dinge ins Rollen bringen. Am Anfang war alles, was sich im Universum befand, sehr heiß und gleichmäßig im Raum verteilt. Das Universum expandierte und kühlte sich dabei ab. Aus den Saatkörnern kleinster Unregelmäßigkeiten bildeten sich schließlich Materiekumpen – Galaxien, Sterne und endlich auch Planeten. An manchen Stellen erhöhte sich durch kleinste Verdichtungen die Schwerkraft, die weitere Materie anzog und das Universum entleerte. An den Rändern dieser Leerräume entstanden Galaxien, die sich ihrerseits anzogen und durch ihre gegenseitige Schwerkraft zu Haufen von Galaxien versammelten. Innerhalb der Galaxien spielte sich in kleineren Dimensionen das gleiche Spiel ab: Gasverdichtungen verstärkten sich immer mehr, bis sie schließlich unter ihrem eigenen Gewicht kollabierten und so Sterne entstanden. Die wiederum brachten einen völlig neuen Mechanismus in Gang. Durch die Verschmelzung von leichten zu größeren Atomkernen wurde Energie frei. Es wurde Licht und die schweren Elemente entstanden. Diese neu erzeugten Elemente wurden durch Sternexplosionen ins Weltall befördert. Es setzte ein Materiekreislauf ein, der ständig neue Sterne erzeugte und mit ihnen immer mehr schwere Elemente. Daraus entstand unser Planetensystem mit unserem blau schimmernden Heimatplaneten, der Erde. Was für ein wunderbarer Heimatplanet! Leibniz hatte eben doch recht: Wir leben in der besten aller möglichen Welten – zumindest aus Sicht eines Lebewesens. Denn dieser Planet ermöglichte die gewaltigste Metamorphose, die Materie je vollzogen hat: Die Selbstorganisation von toter Materie zu lebenden Organismen. Damit sind wir bei uns angekommen – aber machen wir einen Schritt nach dem anderen.

So wie wir von der Evolution der Organismen sprechen, müssten wir auch von der Evolution der Erde als Ganzes sprechen. Sie schuf erst die Voraussetzung für die Entwicklung des Lebens. Die Uratmosphäre bestand aus Stickstoff, Ammoniak, Methan, Kohlendioxid und Wasserdampf und – wohl gemerkt – es gab keinen freien Sauerstoff. Woher wir das wissen? Es gibt einen Zeitzeugen, den wir "befragen" können: die Venus. Ihre Atmosphäre ist noch heute der Uratmosphäre der Erde sehr ähnlich. Sie bedingt eine mittlere Oberflächentemperatur von 460 Grad Celsius, was der Temperatur im Brennraum eines Kachelofens entspricht. Ohne diesen gewaltigen Treibhauseffekt wäre die theoretische Oberflächentemperatur etwa minus 40 Grad Celsius. Bei uns ist es anders

gekommen und der wesentliche Grund dafür ist - der Regen. Ja, es hat gegossen, sintflutartig! Der 10-fache Monsun reinigte unsere Atmosphäre; über einen Zeitraum von mindestens 40.000 Jahren. Kenntnisse über die weiteren Schritte auf dem Weg zum Leben verdanken wir einem interessanten Experiment, das schon 1953 durchgeführt wurde, dem *Urey-Miller-Experiment*. Stanley Miller und Harald Urey haben in einem Labor in Chicago eine bestimmte – wie sie damals glaubten, richtige - Zusammensetzung von Gasen gewählt, haben elektrische Blitze durch Energieentladungen simuliert und – jetzt kommt es! – tatsächlich sind in ihren Glaskolben organische Moleküle entstanden. Heute wissen wir, dass die Kombination der Gase nicht ganz optimal getroffen war. Trotzdem war das Experiment bahnbrechend. Für die Entstehung von Leben sind zwei der entstandenen Molekülverbindungen von besonderer Bedeutung: die einfachsten Aminosäuren Glycin und Alanin. Nur der guten Ordnung halber: Aminosäuren sind organische Verbindungen aus 10 bis 30 Atomen mit mindestens einer *Amin-* ( $\text{NH}_2$ ) oder *Carboxygruppe* ( $\text{COOH}$ ). Zwei Aminosäuren können miteinander verknüpft werden, wobei sie ein Wassermolekül abscheiden. Mit Hilfe dieser sogenannten *Peptidbindung* können lange Aminosäureketten zu Proteinen verbunden werden. Letztere sind wiederum wichtige Bestandteile des Lebens

Leben ist generell eine sehr komplexe Angelegenheit – allein schon die notwendige Kodierung des Bauplans für die Reproduktion. Der Kode entspricht dabei einer Art Morsealphabet. Allerdings kommt das Leben nicht mit Punkt und Strich aus, sondern es benutzt vier "Zeichen", die sogenannten *Basen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin*. Zu Paaren aneinandergereiht ergeben sie die Doppelhelix der DNA. Jeweils drei Basen kodieren dabei eine Aminosäure.

Das klingt so, als hätten wir das Phänomen Leben verstanden – tatsächlich sind wir weit davon entfernt. Die Komplexität wird uns zum Verhängnis. Selbst einfachste Zellen sind bereits sehr komplexe Strukturen. Das Erfolgsrezept der Physik besteht darin, ein Problem immer weiter zu reduzieren, bis fundamentale, einfachste Zusammenhänge erkennbar werden. Diese Herangehensweise ist uns hier versperrt. Wenn man zum Beispiel ein Wassermolekül zu genau betrachtet, dann verliert man die wesentliche Eigenschaft von Wasser, nämlich dass es unter normalen Bedingungen flüssig ist. Die Eigenschaft "flüssig" entspricht nicht einem einzigen Wassermolekül, sondern erst der Verbindung von vielen. Reduzieren wir das Phänomen Leben auf seine molekularen Bestandteile, so verschwinden die wesentlichen Eigenschaften, die seine „Lebendigkeit“ ausmachen. Auf die Fragen, warum Materie zum ersten Mal launisch wurde oder sich verliebt hat, werden wir auf diese Weise keine Antworten finden. Gehen wir den umgekehrten Weg und bauen das Leben aus seinen Einzelteilen zusammen, so bleibt das Rätsel ungelöst, wie etwas derartig Komplexes von selbst entstehen konnte. Fred Hoyle hat das sehr treffend formuliert: "Stellen wir uns einen Schrottplatz vor, auf dem die zahllosen Bestandteile eines Jumbojets fein säuberlich getrennt aufbewahrt werden. Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein natürliches Phänomen - beispielsweise ein Wirbelsturm - die Teile derart zusammenführt, dass

am Ende ein startbereiter Jumbojet vor uns steht?" Deshalb bleiben bei einem Experiment wie dem von Urey und Miller zwangsläufig Fragezeichen. Bestenfalls weist es einen Weg. Da gibt es übrigens eine interessante Geschichte. Auf die Frage: „Wie könnt Ihr Euch so sicher sein?“ hat Stanley Miller bei der Pressekonferenz schlagfertig geantwortet: „Wenn Gott es nicht so gemacht hat, dann hat er eine sehr gute Gelegenheit verpasst.“

Und dann kommt erschwerend hinzu, dass die Voraussetzungen auf der Erde damals so anders waren als heute, dass das Leben auf natürliche Weise heute nicht mehr entstehen könnte. Der entscheidende Unterschied liegt im extremen Vulkanismus, in der Zusammensetzung der Meere und der Atmosphäre. Ohne freien Sauerstoff gab es keine Ozonschicht, also kaum Schutz vor ultravioletter Strahlung. All diese Gegebenheiten von damals waren wesentliche Voraussetzungen. Als das Leben jedoch einmal Fuß gefasst hatte, begann es die Bedingungen auf unserem Planeten zu verändern, sie praktisch für sich selbst immer besser und besser und besser zu machen bis heute. Die Krux besteht aber genau darin, die planetaren Voraussetzungen für Leben nicht zu zerstören, während man als Spezies für sich selbst die Bedingungen immer weiter verbessert. Blaugrüne Algen haben beispielsweise die *oxygene Photosynthese* erfunden und über Jahrmilliarden so viel Sauerstoff freigesetzt, dass der Treibhauseffekt in der Atmosphäre zum Erliegen kam. Eine globale Eisdecke überzog den Planeten, die sogenannte *Schneeball-Erde*. Damit hatten sie ihre eigene Lebensgrundlage zerstört. Glücklicherweise hat nach ihrem Aussterben der natürliche Vulkanismus langsam aber sicher wieder Kohlendioxid in die Atmosphäre eingetragen und den Treibhauseffekt neu belebt. Der Temperaturunterschied ist beträchtlich. Ohne Treibhauseffekt beträgt die mittlere Oberflächentemperatur auf der Erde minus 15 Grad Celsius, mit Treibhauseffekt plus 15 Grad Celsius.

Die ersten Vertreter der *oxygenen Photosynthese* waren generell „Hasardeure“. Sauerstoff ist nämlich in entsprechenden Konzentrationen ein effektives Zellgift. Sie haben ihre Energie auf Kosten dieses Abfallproduktes gewonnen, das auf Dauer ihren Lebensraum bedrohte. Gleichzeitig haben sie damit den Grundstein für andere Lebensformen gelegt. Die Einzeller selbst mussten sich allerdings schrittweise an die von ihnen verursachten neuen Lebensbedingungen anpassen. Das ist vielen nicht gelungen.

Ich erzähle Ihnen den Beginn der Evolution auf unserem Planeten, als wäre jemand dabei gewesen, der alles für die Nachwelt dokumentiert hätte. Tatsächlich gibt es diese Chronik und zwar in Form der sogenannten *BIFs*. In diesen *banded iron formations*, den gebänderten Kieseisenerzen, wechseln sich eisenhaltige Lagen und Hornsteinlagen mit jeweils einigen Millimetern bis Zentimetern Schichtdicke ab. Fundstellen dieser Bändererze können mehrere hundert Meter tief sein und gestatten es, die Sauerstoffkonzentration der Ozeane und der jeweiligen Atmosphäre Schicht für Schicht zu rekonstruieren. In den Urozeanen war Eisen gelöst, das durch Kontakt mit Sauerstoff zu schwer löslichem Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) umgewandelt wurde und als Schlamm auf den Meeresgrund sank. Die älteste Ausgabe dieser Chronik reicht bis 3,8

Milliarden Jahre zurück. Demnach gab es nennenswerten freien Sauerstoff in der Atmosphäre erst vor 2,5 Milliarden Jahren. Vorher war  $O_2$  nur ein seltener Gast, der bei der Spaltung von  $H_2O$  durch UV-Strahlung entstand.

Wie kam das Eisen überhaupt in die Meere? Durch Vulkanismus. Die Urozeane hatten generell eine andere Zusammensetzung. Das Wasser war stark basisch - eine richtige Lauge. So wie das Leben damals entstanden ist, würde das allein deshalb heute nicht mehr funktionieren. Heute sind die Meere nur noch leicht basisch und salzig obendrein. Die Lauge entstand durch  $H_2O$ , etwas Natriumcarbonat und Calciumchlorid. Letzteres wurde und wird auch noch heute durch Vulkanasche in die Atmosphäre eingetragen. Der Regen wusch das Calciumchlorid in die Ozeane. Dort verwandelten sich die beiden Stoffe in Natriumchlorid und die Meere wurden nach zwei Milliarden Jahren salzige Ozeane.

Schauen wir uns das Periodensystem der Elemente an. Darin ist kein exklusives Element für Leben enthalten, so dass man sagen könnte: „Wenn das Element X enthalten ist, spricht man von lebender Materie, wenn es fehlt, ist die Materie tot.“ Das Leben muss mit denselben elementaren Bausteinen zurechtkommen wie alles andere auf dieser Welt auch – das Geheimnis muss also in der Organisation liegen. In puncto Organisationstalent ist hier der Kohlenstoff mit seinen vier *Valenzelektronen* der klare Spitzenreiter im Periodensystem. Vier Elektronen in der äußersten Schale, die als Andockstellen für Molekülbindungen zur Verfügung stehen, kann sonst nur noch Silizium vorweisen. Diesen Mitbewerber sticht der Kohlenstoff jedoch spielend durch weitere biologische Vorteile aus. So hat er die schöne Eigenschaft, Doppelbindungen eingehen zu können wie etwa mit den zwei Valenzelektronen des Sauerstoffs. Dadurch kann er als Kohlendioxid ( $CO_2$ ) problemlos auch einen gasförmigen Aggregatzustand annehmen. Silizium hingegen geht keine Doppelbindungen ein. Bis auf wenige Ausnahmen bildet es also Gitterstrukturen, in aller Regel Festkörper. Zudem ist die Bindung von Kohlenstoff an Kohlenstoff im Vergleich zu Silizium an Silizium nahezu doppelt so stark. Das ist eine wichtige Voraussetzung, um lange und gleichzeitig stabile Molekülketten bilden zu können. Kein Wunder also, dass Kohlenstoff das Rückgrat des Lebens auf unserem Planeten darstellt. Wenn ich aber ein Stück Brikett neben eine Pflanze aus genauso vielen Kohlenstoff-Atomen stelle und beide mit Sonnenlicht bestrahle, dann werden sie sich völlig unterschiedlich entwickeln. Kohlenstoff allein scheint es nicht auszumachen.

Maßgebliche Unterstützung erhält er von der einzigen Molekülverbindung zweier Gase, die bei Normalbedingungen flüssig wird. Zwei Wasserstoff-Atome und ein Sauerstoff-Atom bilden  $H_2O$ , unser lebensspendendes Wasser. Es dient als Lösungsmittel, UV-Schutz, Stabilisator fragiler Strukturen gegenüber der Erdanziehung, Reaktionspartner bei der Photosynthese und es verfügt über eine weitere Eigenschaft, die vielleicht entscheidend bei der Entstehung des Lebens war: Manche Molekülverbindungen fühlen sich von Wasser angezogen – deshalb nennt man sie *hydrophil*, während sich *hydrophobe* davon abwenden.

Die Materie ist also aus Atomen aufgebaut, unabhängig davon, ob sie lebt oder nicht. Die Atome verbinden sich wiederum zu Molekülen. Lebewesen setzen sich aus sehr großen Kettenmolekülen zusammen, die überwiegend aus Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff bestehen. Andere Atomsorten wie Phosphor, Calcium, Eisen usw. sind in den langen Kohlenstoffketten eingebaut.

Das Leben auf der Erde wird sicher zunächst mit ganz einfachen, relativ kurzen Kohlenstoffverbindungen begonnen haben, sogenannten *Monomeren*, und sich im Laufe der Zeit zu immer komplizierteren und größeren Molekülverbänden zusammengeschlossen haben, den *Polymeren*. Diese Entwicklung setzte bestimmte äußere Bedingungen voraus, die den Auf- und Abbau von Molekülen ebenso gefördert haben wie die Entwicklung neuer Verbindungen. In der Frühphase der Erde gab es eine sehr dichte Atmosphäre aus Kohlendioxid und Wasser, die durch die vulkanische Aktivität der Erdoberfläche immer wieder mit anderen Verbindungen angereichert wurde. Glutflüssige Magmaströme quollen an die Erdoberfläche. Die Gezeitenkraft des damals noch sehr nahen Mondes knetete das Erdinnere durch. In der Atmosphäre kam es ständig zu Gewittern und Blitzentladungen. Es war heiß. Die ultraviolette Strahlung der Sonne wurde noch nicht durch eine Ozonschicht absorbiert. Ungefiltert erreichte sie die noch sehr warme Erdoberfläche. Die Hölle ist dagegen geradezu wohnlich. Summa summarum gab es aber zahlreiche Energiequellen für die Entwicklung organischer Verbindungen. Flüssiges Wasser als Lösungsmittel, Ultraviolettstrahlung und Blitze trennten Verbindungen teilweise oder zerstörten sie ganz. Die dramatischen atmosphärischen, vulkanischen und kosmischen Bedingungen ermöglichten ständig neue chemische Versuche. Der Beginn des Lebens entsprach einem planetaren Ausprobieren verschiedenster Kombinationen innerhalb der organischen Chemie. Währenddessen hielt eine ständige Energiezufuhr von außen „den Kessel unter Feuer“. Ein riesiges Labor, in dem es blitzte, zischte und dampfte. Allerdings muss es auch „Nischen“ in der Umwelt der frühen Erdgeschichte gegeben haben, in denen sich besonders stabile Moleküle ungestört langsam, also schrittweise weiterentwickeln konnten, ohne einem ständigen Zerstörungsdruck ausgeliefert zu sein. Wenn alle Moleküle sich immer wieder in Wasser aufgelöst hätten oder durch zu viel UV-Strahlung zerstört worden wären, dann wäre es nie zu den ersten Zellen gekommen. Man darf nicht vergessen: Selbst die denkbar einfachsten Zellen sind schon recht komplizierte chemische Einheiten. Sie können sich immerhin selbst stabilisieren und vor den zerstörerischen Einflüssen der Umwelt durch eine sie umhüllende Molekülschicht, die Membran, zumindest teilweise schützen. Zusätzlich begünstigten zerklüftete Oberflächen von Gesteinen den Zusammenbau der Moleküle. Auch der immer wiederkehrende vulkanische Eintrag an besonders mineralreichen, warmen, wässrigen Salzlösungen und deren Einbau in bereits vorhandene Moleküle hat erheblich zu deren Stabilität und damit Überlebensfähigkeit beigetragen. Entscheidend war aber die Entstehung von membranartigen Kettenmolekülen, die in dem von ihnen umschlossenen Bereich einer wässrigen Lösung die Konzentration von Salzen oder Mineralien erhöhen konnten, indem sie Wassermoleküle am Eindringen hinderten. Diese

hydrophoben Moleküle erzeugten durch den Konzentrationsunterschied innerhalb der Membran neue physikalische Bedingungen, insbesondere Druck und Dichte, die wiederum den Aufbau und den Erhalt von Molekülstrukturen begünstigten. Die Moleküle innerhalb der Membran konnten viel intensiver miteinander in Wechselwirkung treten, da sie nicht ständig vom Wasser wieder aufgelöst wurden. Die Membranen ließen nur bestimmte Atom- und Molekülarten in den von ihnen umhüllten Bezirk eindringen. Chemischen Abfallprodukten erlaubten sie, den geschützten Bereich zu verlassen. Voilà: der Anfang des Stoffwechsels!

So konnten sich die inneren Moleküle genau die Stoffe verschaffen, die sie für ihre Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung benötigten. In membrangeschützten Bezirken war möglicherweise schon sehr früh eine Arbeitsteilung unter den Molekülen am Werk, die zur Stabilisierung der Einheit beitrug und letztlich zum Aufbau einer einfachen Zelle führte, die sich sogar vermehren konnte. Wo dieses Erfolgsmodell erfunden wurde, darüber streiten sich die Geister. Die etablierte Theorie hält sogenannte *hydrothermale Schlote* auf dem Meeresgrund für die Erfinder, die durch vulkanische Aktivität gespeist wurden. Dort sorgten schon damals hohe Temperaturunterschiede und Drücke sowie ein ausreichender UV-Schutz für die notwendigen Bedingungen.

Kurz noch einmal ergänzend daneben gestellt: Alle Lebewesen auf der Erde bestehen zu 92 Prozent aus Sternenstaub und zu acht Prozent aus Wasserstoff, dessen Kerne in den ersten Sekunden nach dem Urknall entstanden. Alle Lebensformen verarbeiten auf die eine oder andere Art das Licht der Sonne. Und schließlich hat der Mond dazu beigetragen, dass die Erde nicht um die eigene Achse rast oder sogar umkippt. Sonne, Mond und Sterne, alle waren und sind sie beteiligt – unglaublich, aber wahr!

An dieser Stelle ist für den Physiker die Frage nach dem Ursprung des Lebens beantwortet. Die verschiedenen physikalischen Disziplinen, Thermodynamik, Atom- und Molekularphysik und die Physik der Wechselwirkung von Strahlung und Materie erklären die Grund- und Anfangsbedingungen für die Entstehung und Entwicklung großer organischer Ketten- und Ringmoleküle, die als Ausgangsprodukte zur Verfügung stehen mussten, damit sich einfache Zellen bilden konnten. Diese Moleküle bildeten Bezirke, die mittels Membranen eine erste Form des Stoffwechsels durchführten. Schrecklich unromantisch, oder?

Das Leben ist aus physikalischer Sicht ein selbstorganisierendes, selbstreproduzierendes, dissipatives Nichtgleichgewichtsphänomen. Ohne äußeres Zutun strebt jeder physikalische Prozess ein Gleichgewicht an. Leben muss sich allerdings organisieren und gegenüber seiner Umwelt abgrenzen. Es gilt: „Hier bin ich und dort bin ich nicht.“ Deshalb diese unromantische Definition als „Nichtgleichgewichtsphänomen“. Das fortwährende Ankämpfen gegen den allgemeinen Trend der Zerstörung und des Zerfalls erfordert Energie. Dies gilt für jede denkbare Lebensform. Wer sich also bislang insgeheim dachte: „Mag ja sein, dass hier auf unserem Planeten Kohlenstoff, H<sub>2</sub>O und Sonnenlicht die ausschlaggebenden Protagonisten waren. Aber

irgendwo im Universum könnte es ja auch ganz anders gewesen sein“, der muss sich in jedem Falle um eine Energiequelle kümmern und mit demselben Periodensystem der Elemente auskommen. Da dünnen Sciencefiction-Phantasien schnell etwas aus.

Ohne die Sonne, die Erdwärme und die chemische Energie, die in den Molekülverbindungen steckt, gäbe es kein Leben auf der Erde. Lebewesen sind kosmische Durchlauferhitzer, die wie Forellen im Bach in einem kosmischen Energiefluss stehen, der von der Sonnenwärme angetrieben wird. Die Energie muss aber in der richtigen Form vorliegen. Wenn wir Menschen Hunger verspüren, bringt es nichts, in die Sauna zu gehen. Dort bekommen wir zwar jede Menge Wärmeenergie ab, aber satt macht uns das nicht. Auch Pflanzen benötigen für die Photosynthese ein schmales Band des elektromagnetischen Spektrums und die Atmosphäre muss dafür durchlässig sein. Mikrowellenstrahlung ist beispielsweise ungeeignet. Stellt man eine Topfpflanze in die Mikrowelle, beweist das keinen grünen Daumen.

Alles greift eng verzahnt ineinander und die Sonne treibt mit ihrer Energie den Motor dieses evolutionären Systems stetig an. Die Erde würde sich allerdings immer weiter aufheizen, wenn sie nicht während der Nacht den allergrößten Teil der aufgenommenen Sonnenenergie wieder ans Weltall zurückgeben könnte. Da draußen herrscht heute die sehr niedrige Temperatur von minus 271 Grad Celsius. Das frostige Resultat von 13,7 Mrd. Jahren, in denen sich das Universum stetig weiter ausgedehnt und dabei abgekühlt hat. Der Potentialunterschied - in diesem Fall der Temperaturunterschied - ist die Triebfeder des Lebens. Dadurch wird die Selbstorganisation komplexer Strukturen erst möglich. Das ist wie bei einem gemächlich dahin stömenden Fluss. Seine Bestandteile fließen gleichmäßig verteilt dahin. An einem Potentialunterschied - beispielsweise einem Wasserfall - ändert sich die Situation dramatisch. Das Wasser organisiert sich in einer völlig neuen Form. Es schäumt, strudelt, gischt und spritzt. Möglich macht dies der Höhenunterschied.

Einmal in Gang gesetzt, benötigt das Leben zur Selbstreproduktion einen Kopiermechanismus. Diese Vervielfältigung ist mit einem replikativen Schwund verbunden, kleinen Abweichungen im genetischen Pool, die zu Mutationen führen, welche sich in der Umwelt mehr oder weniger gut behaupten. Von hier ab bestimmen die beiden treibenden Kräfte der Evolution die unzähligen Gesichter des Lebens: Mutation und Selektion.

Wer ist nun der Meister dieses Spiels – der Herrscher auf unserem Planeten? Der Mensch? Weit gefehlt, es sind die Einzeller. Sie sind uns zahlen- und massenmäßig weit überlegen. Darunter die *Prokaryonten*. Das sind die Einzeller, die noch keinen Zellkern haben. Und davon gibt es jetzt wirklich mehrere Billionen Tonnen. Die Prokaryonten existieren schon seit Milliarden von Jahren auf diesem Planeten. Anfangs hatten sie gewissermaßen sturmfreie Bude, Mikrobe allein zu Haus! Für den überwiegenden Teil der Erdgeschichte waren sie die absoluten Alleinherrscher. Ein Gramm Ackerboden bevölkern 100.000 dieser Lebewesen. Genauso viele tummeln sich auch auf

einem Quadratcentimeter Ihrer Haut. Insgesamt tragen wir mehr Prokaryonten mit uns herum, als körpereigene Zellen. Wir sind gewissermaßen Luxusdampfer für Prokaryonten - mehr als ein Kilo davon schleppt jeder von uns herum, die meisten davon im Verdauungstrakt. Wenn Sie also das nächste Mal jemand fragt, wie viel Sie wiegen, dann ziehen Sie ruhig mal ein bis zwei Kilo ab. Die menschlichen Zellen sind um Größenordnungen komplexer und schwerer als Zellen ohne Zellkern. Der Evolutionsschritt hin zu Eukaryonten - also Zellen mit Zellkern - war beträchtlich. Mehrzellige Eukaryonten gab es erst zwei Milliarden Jahre nach der Entstehung der Prokaryonten. Gemäß der *Endosymbionten-Theorie* hat dabei eine Sorte von Prokaryonten eine andere in sich aufgenommen und nicht verdaut. Die beiden konnten nun zusammen Ressourcen besser aufspalten als jeder für sich allein. Später haben sich diese Endosymbionten innerhalb ihres Wirtes zu sogenannten *Organellen*, also komplexen Zellbestandteilen entwickelt. So können schwerverdauliche Zeitgenossen doch etwas Gutes haben.

Übrigens verdanken wir den Prokaryonten auch den größten Teil des Sauerstoffs in der Uratmosphäre. Durch ihre Photosynthese liegt der Eintrag an freiem Sauerstoff heute noch bei über 50 Prozent. Sie produzieren mehr als alle Pflanzen auf diesem Planeten. Man könnte sagen, die Prokaryonten kümmern sich um die Luft, die Eukaryonten um Luft und Liebe. Prokaryonten vermehren sich nämlich gleichgeschlechtlich, Eukaryonten haben dafür den Sex erfunden. Dann hätten wir das auch geklärt. Vor 450 Millionen Jahren ist es schließlich dem Leben im Wasser zu langweilig geworden, beziehungsweise zu gefährlich. Auf der Flucht vor dem ewigen Gefressenwerden hat es sich in einen neuen Lebensraum vorgewagt. Das war die erste "Occupy-the-land-Bewegung". Der Rest ist Geschichte - vom ersten Schritt auf das Festland der Erde bis zum ersten Schritt auf dem Mond. Heute gibt es weltweit geschätzte 8,7 Millionen Arten von eukaryontischen Organismen. 6,5 Millionen davon an Land und 2,2 Millionen in den Ozeanen. Lediglich 14 Prozent davon gelten als bislang erforscht.

Und wie geht's jetzt weiter? Ist Leben ein ewiges Erfolgsmodell oder nur eine kurze Episode im Universum?

### **Wohin gehen wir?**

Die gute Nachricht vorweg: Wir Menschen werden das Leben in all seinen Facetten nicht auslöschen, egal was wir auf diesem Planeten anstellen. Verschiedene Prokaryonten würden selbst einen Atomkrieg überstehen und das Rad der Evolution von neuem drehen. Allerdings könnten wir eine große Anzahl an Spezies mit in den Abgrund reißen.

Unser Planet wird also belebt bleiben, solange unsere Sonne friedlich scheint. Zwischendurch kommt es allerdings immer wieder zu starken Verwerfungen. Der Lebensraum Erde unterliegt ständigen Veränderungen, die teilweise ungeheure Massensterben zur Folge hatten. Der berühmteste Fall betrifft das Aussterben der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren, das wahrscheinlich durch den Einschlag eines großen Asteroiden ausgelöst, zumindest mit gefördert wurde. Nach einer solchen Katastrophe hat die biologische Evolution immer sehr schnell die



freigewordenen Nischen in der Umwelt mit den noch verbliebenen Lebewesen beziehungsweise deren Weiterentwicklungen besetzt. Nicht zuletzt durch den Niedergang der Saurier kam es zum Siegeszug der Säugetiere und damit auch letztlich zur Gattung Homo, von der der heutige Mensch abstammt. Mit veränderten Lebensbedingungen kommen kleinere Organismen in der Regel besser zurecht. Es gelingt ihnen leichter, sich einzuschränken und sie reproduzieren sich schneller. Das sieht man auch an Massenaussterben, die noch weiter zurückliegen. Beispielsweise brach auf Sumatra vor 74.000 Jahren der Supervulkan *Toba* aus. Die Bezeichnung „Supervulkan“ lässt schon erahnen, dass seine Auswirkungen verheerend waren. Seine Asche blockierte für sehr lange Zeit den Zugang zur wichtigsten Quelle des Lebens – dem Sonnenlicht. Das hat die Flora dezimiert. Damit war die Nahrungskette durchtrennt und die Fauna folgte unweigerlich in den Untergang. Damals gab es unterschiedlichste Formen der Hominiden (in Afrika den *Homo sapiens*, in Europa die Neandertaler und in Asien den *Homo erectus* beziehungsweise den *Homo floresiensis*), während die heutige Menschheit eine verblüffend enge genetische Verwandtschaft aufweist. *Toba* liefert nun das fehlende Puzzlestück. Diese Naturkatastrophe hat einen sogenannten *genetischen Flaschenhals* verursacht. Nur wenige tausend *Homo sapiens* haben überlebt. Sie sind im weiteren Verlauf von Ostafrika ausgehend nach Europa und Asien vorgedrungen und haben die restlichen, dort ansässigen Gattungen verdrängt. Deshalb sind wir Erdenbürger so nahe verwandt. Zumindest legen die Berechnungen zur Mutationsrate und die Nachverfolgung der *mitochondrialen DNA* nahe. So gesehen sind wir alle Brüder und Schwestern – zudem mit Migrationshintergrund!

Massensterben dieser Art gab es auf unserem Planeten eine ganze Reihe. Der verheerendste Fall wurde vor 252 Millionen Jahren vermutlich ebenfalls von Vulkanen ausgelöst. 96 Prozent der Meeresbewohner und 70 Prozent der Landlebewesen wurden ausgelöscht. Die Datierungsverfahren mittels Uran-Blei-Zerfallsketten und Argon-Isotopen werden laufend verbessert. Seit dem Frühjahr 2014 wissen wir, dass diese Epoche lediglich 60.000 Jahre andauerte – ein geologischer Wimpernschlag. Mehrere Forschungsergebnisse laufen hier zusammen. Erstens ein plötzlicher Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in den Ozeanen bei gleichzeitiger Erwärmung um zehn Grad Celsius. Berechnungen zufolge könnten 170 Billionen Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt worden sein. Zweitens riesige Lavafelder mit zwei Millionen Quadratkilometern Ausdehnung, die zeitgleich entstanden sind: das sogenannte *sibirische Trapp*. Drittens Mikroben in den Sedimenten des südchinesischen Meeres – Bakterien aus der Gruppe der *Methanosarcina*, deren Stoffwechsel das fatale Treibhausgas Methan freisetzt. Den limitierenden Faktor für die Vermehrung dieser Treibhauskiller bildet das Ausgangsprodukt Nickel, das in den Sedimenten zwischen zweifach und siebenfach erhöht war. Starker Vulkanismus könnte diese Mengen freigesetzt haben, wodurch das Mikrobewachstum expodierte. Eine verhängnisvolle Kette an Ereignissen. Vulkanfelder ähnlichen Ausmaßes wurden im Juni 2014 im australischen *Kalkarindji* auf 510 Millionen Jahre datiert. Das deckt sich mit einem Massenaussterben, bei dem etwa die Hälfte des Lebens vernichtet wurde. Vermutlich gelangten große Mengen Schwefeldioxid und

Methan direkt in die Stratosphäre. Auch heute gibt es noch derartige Supervulkane – beispielsweise schlummert unter dem Yellowstone Nationalpark einer.

Wie sieht es aus mit Bedrohungen aus dem All? Da hätten wir beispielsweise Supernovae anzubieten. Wenn sie nah genug sind – innerhalb von 150 Lichtjahren -, würde die Gammastrahlung, die mit ihnen einhergeht, unsere Atmosphäre auf alle Fälle nachhaltig beschädigen. Gibt es einen Kandidaten? Ja, *IK-Pegasi*, ein Doppelstern gerade noch am Rand. Zum Glück bewegt er sich mit 20 Kilometern pro Sekunde von uns weg, das heißt, bis es soweit kommt – bis zur Supernovaexplosion kann es ja noch ein Weilchen dauern – wäre unsere Erde wohl aus der Gefahrenzone raus.

Vermutlich hat vor drei Millionen Jahren tatsächlich eine Supernova vor unserer Haustüre stattgefunden. Die Auswirkungen auf unseren Planeten weist man durch Manganablagerungen in der Tiefsee nach. Darin ist <sup>60</sup>Eisen eingeschlossen, ein radioaktives Eisenisotop, das bei Supernovae freigesetzt wird und ansonsten in unserem Sonnensystem nicht vorkommt. <sup>60</sup> Eisen ist ein ideales Chronometer, weil seine Halbwertszeit etwa 2,6 Millionen Jahre beträgt. Auf dem pazifischen Meeresgrund, in einer Tiefe von 5.000 Metern, wurden <sup>60</sup> Eisen-Atome nachgewiesen, die etwa drei Millionen Jahre alt sind und auf eine Supernova hin-deuten, die lediglich 100 Lichtjahre von uns entfernt war. Die Steigerung der Supernova ist die Hypernova. Das ist eine Supernova, die unter ganz bestimmten Bedingungen abläuft, noch mehr Energie und Gammastrahlen freisetzt und deshalb einen entsprechend größeren Sicherheitsabstand einfordert – ca. 6.500 Lichtjahre. Der gefährlichste Kandidat ist demnach *WR 104*, ein Doppelsternsystem in etwa 8.000 Lichtjahren Entfernung. Die Sonnenwinde der beiden massereichen Sterne bilden eine Staubschneise, aus deren Form man die Rotationsachse und damit die vermutliche Richtung des finalen Gammastrahlen-Ausbruches ermitteln kann. Die einen gehen von 16 Grad Abweichung zur Erde aus, die anderen von 30 Grad. Das Tückische an einer Hypernova ist nämlich, dass ihre Energie nicht isotrop freigesetzt wird, sondern mit einer klaren Vorzugsrichtung. Das ist, als würde sie mit einer Kanonenkugel schießen und wenn du genau im Lauf stehst, dann hast du ein Problem. In ein paar Millionen Jahren wird einer der Sterne in *WR 104* zur Hypernova, dann wissen wir mehr.

Zum Glück sind diese äußerst gefährlichen Strahlungsquellen alle sehr weit weg. Wie ist es mit Sternen, die an uns vorbeilaufen und die Planetenbahnen in Unordnung, um nicht zu sagen in ein totales Chaos versetzen könnten? Es gibt ungefähr ein Dutzend davon – wir nennen sie *Passanten* – pro eine Milliarde Jahre, die innerhalb einer Entfernung von drei Lichtjahren an der Sonne vorbeifliegen. Um uns wirklich nachhaltig zu stören und so zu gefährden, dass wir die Bahn verändern und vielleicht sogar in die Sonne stürzen, da müssten die schon innerhalb von Lichtmonaten auftauchen. Selbst dann wäre sehr viel Masse notwendig, aber derartige Objekte begegnen uns aller Wahrscheinlichkeit nach nicht. Anders sieht es aus mit Asteroiden. Ab 50 Metern Durchmesser stellen sie eine wirkliche Bedrohung dar. Es treten zwar täglich mehrere

tennisballgroße Stücke mit einigen Kilogramm Masse in unsere Atmosphäre ein, die 50-Meter-Klasse lässt sich hier allerdings nur alle tausend Jahre mal blicken. Von allen kosmischen Bedrohungen geht die größte Gefahr tatsächlich von diesen vagabundierenden kosmischen Schneebällen aus. Immerhin kennen wir im Sonnensystem über 600.000 Asteroiden und 90 Prozent davon kreisen auch noch gleich hier um die Ecke, zwischen Mars und Jupiter. Mit *2004BL86* ist Ende Januar 2015 gerade erst ein 330-Meter-Brocken an uns vorbei gesegelt. Zum Glück mit dem nötigen Sicherheitsabstand von 1,2 Millionen Kilometern Entfernung (zum Vergleich: der Mond ist im Mittel 385.000 km entfernt). Erst 2027 wird mit *1999AN10* ein noch massiverer Brummer erwartet - ungefähr im Mondabstand. Irgendwann wird ein gefährlicher Brocken hier einschlagen, es ist keine Frage ob, sondern wann. Statistisch trifft uns alle 50 Millionen Jahre ein Brocken bedrohlicher Größe. Klingt gut, aber wie gesagt: der letzte Einschläger dieser Art ist schon 65 Millionen Jahre her.

Die Kollegen von der Stanford University haben im April 2014 eine Modellsimulation vorgestellt, nach der vor 3,26 Milliarden Jahren ein Kaliber eingeschlagen haben soll, das alles bisher Vorstellbare in den Schatten stellt: 37 bis 58 Kilometer groß. Ein Brocken, der den Mount Everest wie ein Spielzeug aussehen lässt. Rund um den geschätzt 500 Kilometer großen Einschlagskrater verdampfte das Gestein und regnete weltweit in Form glutflüssiger Silikate vom Himmel. Die Oberflächen der Ozeane kochten. Analysen des *Barberton-Grünsteingürtels* östlich von Johannesburg (Südafrika) legen nahe, dass der Einschlag in der Erdoberfläche zahlreiche Krustenbrüche verursachte und in Folge mitverantwortlich für die Plattentektonik ist.

Was könnte uns sonst noch auf den Kopf fallen, außer Asteroiden? Die traurige Antwort lautet: eine ganze Galaxie. Um präzise zu sein: die Andromeda-Galaxie. Sie befindet sich mit ca. 410.000 Kilometern pro Stunde auf Kollisionskurs. Diesen Crash sollten wir allerdings weitgehend unbeschadet überstehen. Die Kollision zweier Galaxien ist vergleichbar mit dem Zusammenstoß zweier Mückenschwärme. Zunächst fallen sie durcheinander, anschließend schwirren sie um den gemeinsamen Schwerpunkt. Die Gravitation lässt die Sternensysteme in ähnlicher Weise „tanzen“ und das wird unseren Nachthimmel dereinst drastisch verändern. Kurzfristig würden Druckwellen in Gasnebeln ein regelrechtes Feuerwerk an Sternentstehung zünden – allerdings auf langen Skalen wäre es nur ein Strohfeder. Der große Materiekreislauf im Universum, der über viele Milliarden Jahre in unzähligen Sternen die Elemente geschmiedet hat, aus denen wir bestehen, kommt langsam aber sicher zum Erliegen. Allein in den letzten zwei Milliarden Jahren hat das Universum bereits die Hälfte seiner Helligkeit eingebüßt. Sterne werden in ferner Zukunft Mangelware und mit ihnen die lebensfreundlichen Nischen in den Weiten des Alls. Der Letzte macht das Licht aus.

Zum Glück werden wir Erdenbürger diese trostlose Phase nicht miterleben. Unsere Sonne wird in spätestens fünf Milliarden Jahren zum Roten Riesen, d. h. sie wird ihre äußere Hülle über unsere Umlaufbahn hinaus ausdehnen. Dann ist kein Leben mehr auf der Erde denkbar. Damit wären wir

erdgeschichtlich etwa bei der Hälfte angelangt. Im September 2013 haben allerdings britische Kollegen Modellrechnungen vorgelegt, wonach uns nurmehr 1,75 Milliarden Jahre verbleiben. Die Sonne wird uns zwar noch nicht verschluckt haben, aber Ausbrüche auf ihrer nähergekommenen Oberfläche werden ein tödliches Ausmaß erreicht haben. Da bleibt nur Kurt Tucholsky: „Lasst uns das Leben genießen, solange wir es nicht verstehen!“

Eigentlich ein schönes Schlußwort, aber wir sollten noch kurz auf die Frage eingehen „Ist noch Platz für Gott in unserem modernen Weltbild?“.

Vielen Menschen erscheint die Theologie nur dort zuständig, wohin die Naturwissenschaft noch nicht vorgedrungen ist. Dadurch sind die Theologen seit jeher in einem unsäglichen Rückzugsgefecht verstrickt. Tatsächlich bewegen sie sich aber gar nicht auf demselben Spielfeld wie die Naturwissenschaftler, beziehungsweise wenn doch, dann spielen die einen auf dem Rasen Fußball und die anderen pflücken Gänseblümchen. Daraus einen Verdrängungswettbewerb zu konstruieren, ist falsch. Das möchte ich unbedingt noch einmal ganz klar herausstellen: Naturwissenschaftler haben nicht die Kompetenz, über Glaubensfragen zu urteilen, auch wenn sich in jüngerer Zeit immer mehr dazu berufen fühlen. Naturwissenschaftler sind Innenarchitekten im Kosmos. Wir beobachten, vermessen und erforschen das Mobiliar. Über einen möglichen Erbauer des Gebäudes oder gar dessen Intentionen wissen wir nichts. Die Physik ist sinnfrei und gottfrei. Nirgendwo in unseren Gleichungen taucht ein Gottes-Term auf. Deshalb ist die Physik aber nicht sinnlos noch gottlos. Damit möchte ich es bewenden lassen. Wer hätte das Dilemma passender ausdrücken können als Robert Jastrow: "Es scheint, als ob die Naturwissenschaft niemals in der Lage sein wird, den Vorhang vor dem Geheimnis der Schöpfung zu lüften. Für den Wissenschaftler, der im Glauben an die Macht der Vernunft gelebt hat, endet die Geschichte wie ein schlechter Traum. Er hat die Berge der Unwissenheit erklommen; er ist dabei, den höchsten Gipfel zu bezwingen; und als er sich über die letzte Felskante emporzieht, wird er von einer Schar Theologen begrüßt, die schon seit Jahrhunderten dort sitzen."

Josef M. Gaßner (gekürzter Auszug aus dem Buch „Urknall, Weltall und das Leben“)