

Dirk Schulze-Makuch · William Bains

Das lebendige Universum



Komplexes Leben
auf vielen
Planeten?

 Springer

Das lebendige Universum

Dirk Schulze-Makuch · William Bains

Das lebendige Universum

Komplexes Leben auf vielen Planeten?

 Springer

Dirk Schulze-Makuch
Center for Astronomy and Astrophysics (ZAA)
Technical University Berlin
Berlin, Deutschland

William Bains
Rufus Scientific Ltd.
Melbourn, Royston, Großbritannien

Übersetzt von Bernhard Gerl

ISBN 978-3-662-58429-3 ISBN 978-3-662-58430-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58430-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: deblik Berlin unter Verwendung eines Motivs von © sdcoret/stock.adobe.com
Planung: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Eine der Fragen, die uns seit Langem beschäftigt, ist, ob wir allein im Universum sind. Wir wissen heute, dass der Himmel voller Planeten ist, aber sind das leere, sterile Welten, Welten auf denen es nur einfaches, primitives Leben gibt, oder ist es tatsächlich möglich, dass dort irgendwo Wesen sind, die denken, sprechen, Maschinen bauen und mit denen wir in Kontakt treten könnten? Die Wissenschaft stellt uns allmählich die Werkzeuge zur Verfügung, mit denen wir diese Fragen beantworten können. In diesem Buch werden wir darüber sprechen, was wir über die Schritte wissen, die vom Ursprung des Lebens auf der Erde zu uns selbst geführt haben, und wir werden dabei eine Methode verwenden, die es uns ermöglicht, die Frage zu beantworten, ob die Menschheit eine galaktische Kuriosität ist, oder ob es sogar sehr wahrscheinlich ist, dass sich in den 10 Mrd. Jahren zwischen der Kondensation der Ozeane auf einer erdähnlichen Planetenoberfläche und ihrer Verdampfung aufgrund der intensiver werdenden Strahlung ihrer Sonnen komplexe, intelligente Wesen entwickeln können, die vielleicht sogar Technologie nutzen.

Wahrscheinlich gibt es bei diesem Thema so viele Meinungen wie Wissenschaftler. In diesem Buch haben wir die Fakten zusammengetragen, die wir für entscheidend halten, und erklären, warum wir es für wahrscheinlich halten, dass komplexes Leben weitverbreitet ist. Wir stellen hier dar, wie wir die evolutionäre Entwicklung vom Ursprung des Lebens zu uns Menschen sehen und was das für das Leben bedeutet, das unserer Meinung nach im Universum existiert. Wir glauben, dass es auf anderen Planeten intelligente Wesen geben muss, die Werkzeuge herstellen, vielleicht sogar auf vielen. Es

gibt auf der Leiter der Komplexität einige Stufen, bei denen wir zuversichtlicher sind als bei anderen. Auf die unsichereren Stufen werden wir explizit hinweisen, wenn wir auf sie zu sprechen kommen, doch insgesamt halten wir unsere Überlegungen für sehr überzeugend.

Wir danken Frances Westall, Charles Cockell und einen anonymen Rezensenten für ihre konstruktiven Hinweise und Louis Irwin für die ergiebigen Diskussionen, die dieses Buch deutlich besser gemacht haben, und unserem Herausgeber Christian Caron, der uns durch dieses Projekt geführt hat. Wir sind auch unseren Familien sehr dankbar, vor allem unseren Frauen Joanna Schulze-Makuch und Jane Bains, für die wir während des Schreibens an diesem Buch noch weniger Zeit hatten als gewöhnlich.

Berlin
Melbourn, Royston, GB

Dirk Schulze-Makuch
William Bains

Inhaltsverzeichnis

Teil I Die Hypothese vom lebendigen Universum

1 Die Hypothese vom lebendigen Universum und der Werkzeugkasten der Evolution	3
Weiterführende Literatur	13
2 Voraussetzungen für komplexes Leben	15
2.1 Eine sehr kurze Geschichte der Erde und des Lebens	15
2.2 Astronomische Randbedingungen für die Bewohnbarkeit	20
2.3 Wann ist ein Planet bewohnbar?	25
2.4 Anforderungen für komplexes makroskopisches Leben	31
2.5 Wie oft treten die Voraussetzungen für komplexes makroskopisches Leben im Universum auf?	34
Weiterführende Literatur	38

**Teil II Die wichtigsten Entwicklungssprünge in der
Geschichte des Lebens auf der Erde ?**

3	Die erste Zelle und das Problem vom Ursprung des Lebens	41
3.1	Erste Versuche, den Beginn des Lebens auf der Erde zu verstehen	41
3.2	Wann ist das Leben auf der Erde entstanden?	42
3.3	Wie entstand das Leben?	43
3.4	Der rätselhafte Weg zum Ursprung des Lebens	45
3.5	In welcher Umgebung ist das Leben entstanden?	49
3.6	Kommt das Leben von anderen Planeten?	56
3.7	Die Suche nach Leben	57
3.8	Leben wir in einem einsamen Universum?	59
	Weiterführende Literatur	61
4	Licht als Beute: Die Erfindung der Photosynthese	63
4.1	Die Suche nach Lebensenergie	63
4.2	Welche Energieformen kann das Leben nutzen?	64
4.3	Die Verwendung von Licht	68
4.4	Andere Wege, Licht zu nutzen	73
4.5	Energienutzung	78
	Weiterführende Literatur	80
5	Sauerstoff – vom Gift zum Photosystem II	83
5.1	All I Need Is the Air That I Breathe ...	83
5.2	Warum sollte man Sauerstoff erzeugen?	84
5.3	Die Große Sauerstoffkatastrophe	85
5.4	Wie stellt man Sauerstoff her?	86
	Weiterführende Literatur	90
6	Endosymbiose und die ersten Eukaryoten	93
6.1	Was ist ein Eukaryot?	93
6.2	Der Ursprung der eukaryotischen Zelle	96
6.3	Endosymbiose und der Ursprung der Eukaryoten	98
6.4	Der Ursprung der Mitochondrien	98
6.5	Der Ursprung der Chloroplasten	101
6.6	Der Ursprung des Zellkerns	102
6.7	Endosymbiose ist ein verbreitetes Phänomen	103

6.8	Der nächste Schritt	108
6.9	Eukaryotische Organismen auf anderen Welten?	111
	Weiterführende Literatur	111
7	Sex: Eine neue Art, sich zu vermehren	113
7.1	Die Geografie der Gene	113
7.2	Der Generationenwechsel	115
7.3	Warum sollte man also Sex haben?	116
7.4	Enthaltssame Komplexität	120
7.5	Partnersuche	122
7.6	Ist groß sexy?	123
	Weiterführende Literatur	124
8	Die ersten Vielzeller	127
8.1	Mehrzelligkeit: Eine neue Strategie des Lebens	127
8.2	Mehrzelligkeit und die verschiedenen Lebensformen	131
8.3	Welchen Weg nahm die Evolution der Mehrzelligkeit?	135
8.4	Mehrzelligkeit auf der Erde und anderen Planeten	139
	Weiterführende Literatur	141
9	Der Aufstieg komplexer Tiere und Pflanzen	143
9.1	Die Steigerung von Größe und Komplexität	143
9.2	Die (langsam ablaufende) kambrische Explosion	145
9.3	Wie konstruiert man ein Tier (oder eine Pflanze)?	147
9.4	Die genetische Blaupause von Evo-Devo	150
9.5	Genregulation in Eukaryoten	151
9.6	Sauerstoff und das aktive Tier	154
9.7	Rosten in Richtung tierisches Leben	157
9.8	Kopf, Schultern, Knie und Zehen	158
	Weiterführende Literatur	160
10	Intelligenz – ein neues Konzept?	163
10.1	Was ist Intelligenz?	163
10.2	Intelligenz feststellen	164

X Inhaltsverzeichnis

10.3	Intelligenz messen	166
10.4	Kluge Tiere und die Verteilung von Intelligenz	168
10.5	Staatenbildende Insekten – ein anderer Ansatz für Intelligenz?	173
10.6	Das Spiegelspiel	177
10.7	Wann hilft Intelligenz?	180
10.8	Entstehung von Intelligenz	184
	Weiterführende Literatur	191
11	Technologisch fortgeschrittene Intelligenz	193
11.1	Was ist eine technologisch fortgeschrittene Intelligenz?	194
11.2	Der Weg des Menschen zur technologisch fortgeschrittenen Intelligenz	195
11.3	Die Macht der Sozialstruktur	197
11.4	Die finalen Schritte zur Technologie	199
11.5	Vorbedingungen für technologische Intelligenz	201
11.6	Warum ist Technologie nur einmal in der Erdgeschichte entstanden?	203
	Weiterführende Literatur	209
 Teil III Besuch im lebendigen Universum		
12	Wie erkennen wir ein lebendiges Universum?	213
12.1	Leben finden	214
12.2	Planetenbesuch	224
12.3	Das Höchstmaß an Komplexität: Die Suche nach außerirdischer Intelligenz	233
12.4	Ein Besuch im lebendigen Universum	234
	Weiterführende Literatur	235
13	Der große Filter und das Fermi-Paradoxon	237
	Weiterführende Literatur	243
Glossar		245
Sachverzeichnis		267

Einleitung

Gibt es außer dem Menschen noch andere hoch entwickelte, intelligente Lebewesen im Universum? Das ist eine uralte Frage, die wir immer noch nicht beantworten können, doch dank neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse können wir darüber nachdenken, wie die Antwort lauten könnte. Die Grundlage für dieses Buch ist unser Wissen über das Leben auf der Erde und darüber, was es uns darüber verraten kann, wie wahrscheinlich es ist, dass sich komplexes, aktives Leben, das Werkzeuge benutzt, irgendwo anders entwickelt hat. Im Unterschied zu vielen anderen Büchern über das Leben im Universum werden wir uns nicht so viel mit Bakterien oder Algen beschäftigen, außer wenn diese uns etwas über unseren eigenen Entstehungsweg verraten. Wir geben gerne zu, dass dies ein ziemlich anthropozentrischer Ansatz ist, aber wir haben ihn ganz bewusst gewählt, weil wir an der Entwicklung von komplexen, intelligenten Organismen interessiert sind.

Wir blicken in den Nachthimmel und sehen keine Außerirdischen, deshalb fragen wir mit Enrico Fermi: „Wenn das Leben so weitverbreitet ist, wo sind sie dann?“ Es ist paradox. Die meisten glauben, dass sich auf jedem geeigneten Planeten Leben entwickeln wird (darüber werden wir in Teil I genauer sprechen). Aber wir finden keine Beispiele für intelligentes, Radiowellen aussendendes oder Raumschiffe bauendes Leben am Himmel. Es muss also etwas geben, was Robin Hanson den „großen Filter“ nennt, der irgendwo zwischen der Existenz von Planeten und dem Auftreten einer technologischen Zivilisation liegt. Dieser Filter könnte prinzipiell jeder der vielen Schritte sein, der in den letzten 4 Mrd. Jahren zur modernen Menschheit geführt hat. Welche dieser wichtigen Schritte oder Übergänge sind also

sehr wahrscheinlich und welche unwahrscheinlich? Welche Auswirkungen hat es darauf, wie oft Leben entstehen kann, vor allem komplexes Leben, das fortschrittliche Technologien entwickeln kann?

Um dies zu beantworten, können wir die Eigenschaften der Biologie identifizieren, die entscheidend für unsere Existenz und unsere Art sind, etwa, dass wir Knochen und Gehirne haben, und solche, die eher ebensächlich sind, so wie unsere Ohrläppchen. Dann können wir versuchen, den Punkt in unserer Entwicklung zu finden, an dem wir die wichtigsten Merkmale erhalten haben. Es geht uns nicht um Ähnlichkeiten in unserem Äußeren oder um das, was wir hier als Star-Track-Trugschluss parodieren – nämlich, dass alle komplexen, intelligenten Außerirdischen fünfgliedrige Hände, eine kreisförmige Iris und nur die Männer Gesichtsbehaarung haben. Genau wie Stephen J. Gould glauben wir, dass, wenn man das Band des Lebens auf der Erde zurück- und nochmals abspielen würde (oder es nochmals auf einem vergleichbaren Planeten ablaufen ließe), sich keine Menschen entwickeln würden. Wir interessieren uns hier für die Vorgänge, die zu bestimmten Funktionen, nicht zu einer bestimmten Anatomie geführt haben. So sind zum Beispiel die Augen von Wirbeltieren etwas sehr Spezifisches und Einzigartiges, aber die Fähigkeit zu sehen hat sich mehrfach entwickelt. So entstanden ganz unterschiedliche Augentypen wie die von Insekten, Spinnen, Weichtieren, Kopffüßern und natürlich Säugetieren. Uns interessiert also weniger, in welcher Hinsicht eine Kreatur intelligent ist, sondern vielmehr, ob sie es ist.

Die Entwicklung des Lebens von den einfachsten Formen bis zu uns wird oft als eine Reihe von großen Schritten, Wandlungen oder entscheidenden Innovationen dargestellt, die alle dem neu entstandenen Organismus eine wichtige Fähigkeit verliehen, die es in vorhergehenden einfacheren Formen nicht gegeben hat. Die Evolution geschieht nicht linear mit einer bestimmten Absicht (so eine „Absicht“ gibt es nicht). Jeder Schritt in der Evolution fügt dem Werkzeugkasten ein neues Element hinzu, mit dem Herausforderungen, die die Umwelt an jede Lebensform stellt, bewältigt werden können. Die Grundlage dafür sind anatomische, biochemische und genetische Fähigkeiten, die schon da sind. Was sind also die entscheidenden Schritte oder Innovationen, und wo auf dem Weg von unserem letzten gemeinsamen universellen Vorfahren zum Menschen sind sie aufgetreten? Welche der großen Schlüsselinnovationen vom Ursprung des Lebens bis zu einer fortschrittlichen Technologiegesellschaft wie der unseren sind sehr wahrscheinlich und welche eher nicht? Wo ist der große Filter?

Dieses Buch versucht, einige Antworten zu geben. Und der Titel verrät unsere Antwort schon im Voraus – wir glauben, dass Leben, wenn es erst einmal auf einer Welt entstanden ist, sich sehr wahrscheinlich zu komplexem Leben weiterentwickelt. Wenn das Leben weit verbreitet ist, befinden wir uns inmitten eines *lebendigen Universums*.

Teil I

Die Hypothese vom lebendigen Universum



1

Die Hypothese vom lebendigen Universum und der Werkzeugkasten der Evolution

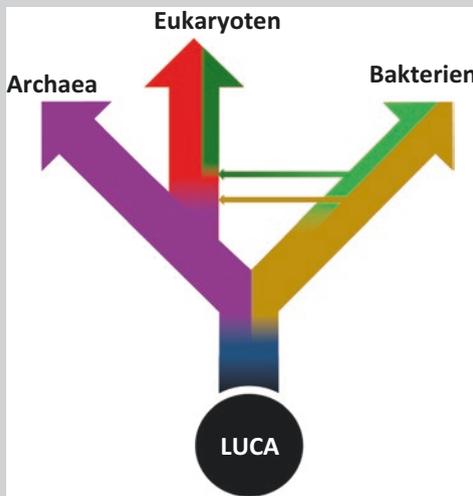
In diesem Buch werden wir begründen, warum die Entwicklung komplexen Lebens in jeder stabilen Umgebung mit ausreichend Lebensraum sehr wahrscheinlich ist, sobald auf einem planetaren Körper einmal Leben entstanden ist. Das komplexe Leben auf der Erde sind die echten (obligaten) Lebensformen aus vielen Zellen, vor allem die Mitglieder aus den Reichen der Plantae (Pflanzen), Fungi (Hefen, Pilze) und Animalia (Tiere) (Box 1.1). Ihr Aufbau aus vielen spezialisierten Zellen ist das entscheidende Kennzeichen für diese Art von weiterentwickeltem, komplexem Leben. Wenn es nur wenige habitable terrestrische Planeten gibt, dann ist auch komplexes Leben im Universum selten. Wenn auf diesen Planeten nur sehr selten Leben entsteht, dann ist das Leben etwas sehr Seltenes, und wir leben in einem ziemlich *leeren Universum*. Wenn aber Leben leicht entstehen kann und es eine Vielzahl von habitablen terrestrischen Planeten gibt, dann ist das Leben etwas weitverbreitetes, und wir befinden uns inmitten eines *lebendigen Universums*.

Jüngste Forschungserfolge bei der Suche nach Exoplaneten weisen stark darauf hin, dass Gesteinsplaneten weitverbreitet sind. Nicht alle sind für komplexes Leben geeignet. Auf manchen ist Leben überhaupt unmöglich. Auf manchen könnte es vielleicht nur einfache Lebensformen geben, denn komplexes Leben benötigt ein großes bewohnbares Volumen, und es muss viel Leben auf dem Planeten geben (fachsprachlich: eine große Gesamtbiomasse). Die Umgebung muss stabil sein (auch wenn Umgebungsparameter wie die Temperatur nicht so eng beschränkt sein müssen wie auf der Erde).

Doch im Rahmen dieser kosmischen Bedingungen besagt unsere Hypothese, dass alle entscheidenden Übergänge oder Schlüsselinnovationen des Lebens hin zu einer größeren Komplexität in einer ausreichend großen Biosphäre erreicht werden können, sofern nur genügend Zeit zur Verfügung steht. Es gibt lediglich zwei Übergänge, von denen wir nur wenig verstehen und über die wir viel spekulieren können – die Entstehung des Lebens selbst und den Ursprung (oder das Überleben) einer technischen Intelligenz. Beide könnten das Fermi-Paradoxon erklären – warum wir bisher noch keinerlei Zeichen für technologisch fortgeschrittenes Leben im Universum gefunden haben. Der letztendliche Test unserer Hypothese wird erst möglich werden, wenn sich die Raumfahrt und unsere Fähigkeiten der Fernerkundung so weit entwickelt haben, dass wir andere Planeten und Monde jenseits unseres Sonnensystems erkunden und so Biosphären darauf ausfindig machen können – was eine der größten Leistungen unserer Spezies sein würde.

Box 1.1: Die wichtigsten Lebensformen

Alles Leben auf der Erde hat eine gemeinsame chemische Basis, deshalb glaubt man, dass es von einem gemeinsamen Vorfahren stammt, dem *letzten gemeinsamen Vorfahren* (Last Common Ancestor, LCA), manchmal auch *letzter universeller gemeinsamer Vorfahre* (Last Universal Common Ancestor, LUCA) genannt.



Der LCA geht wohl bis an den Ursprung des Lebens zurück, doch das wissen wir nicht mit Sicherheit. Vielleicht gab es nicht nur einen LCA

auf der Erde, aber wir haben keine weiteren Lebensformen aus dieser Ära gefunden. Es handelte sich um einen relativ einfachen einzelligen Organismus. Seine Nachkommen entwickelten sich in zwei verschiedenen Gruppen: die *Archaeen* und die *Eubakterien* (meist nur *Bakterien* genannt). Eine Gruppe der Archaeen waren wahrscheinlich die Ahnen einer weiteren Gruppe von Organismen, den Eukaryoten – Lebewesen, deren Zellen Zellkerne und Mitochondrien oder deren Abkömmlinge hatten. Bald nachdem die Eukaryoten entstanden sind, gliederte diese Urzelle ein Alphaproteobakterium (brauner Pfeil nach links) ein, aus dem sich die Mitochondrien entwickelten. Eine Gruppe von Bakterien entwickelte die Fähigkeit, das Sonnenlicht zu nutzen, um Kohlendioxid einzufangen und Sauerstoff als Abfallprodukt zu produzieren – das waren die Vorfahren der Cyanobakterien (grün). Eine davon wurde von einem Eukaryoten eingefangen (grüner Pfeil nach links), und so entstand der Urahn der Chloroplaste in den grünen Pflanzen von heute. Bemerkenswert ist, dass viele dieser Übergänge keine genau definierten Schritte waren – wir kennen weder die genaue Reihenfolge noch den zeitlichen Ablauf vieler dieser Ereignisse.

Nach ungefähr 4 Mrd. Jahren der Evolution hatte sich eine Spezies entwickelt, die intelligent ist und Technologie nutzt – wir. Die Entwicklung von komplexem Tierleben auf der Erde ist das Ergebnis einiger großer Schritte, bei denen das Leben neue Fähigkeiten dazugewonnen hat, und einige dieser Schritte oder großen Übergänge wurden inzwischen identifiziert.

Diese großen evolutionären Sprünge waren zeitlich über geologische Zeiträume verteilt und eng mit bestimmten Umweltbedingungen verknüpft, denen diese Lebensformen ausgesetzt waren. Unser Ziel ist es zu erkunden, wie wahrscheinlich jede Schlüsselinnovation ist und wie wahrscheinlich es ist, dass derselbe Sprung auch auf anderen Welten passieren könnte.

Dazu verwenden wir einen einfachen Ansatz. Wir schlagen vor, dass es drei Klassen von Erklärungen für einen derartigen großen evolutionären Entwicklungssprung oder eine derartige Schlüsselentwicklung in der Geschichte des Lebens gibt. Diese basieren auf:

1. *Kritischer-Weg-Modell*: Jeder Übergang erfordert Ausgangsbedingungen, die eine gewisse Zeit benötigen, um sich zu entwickeln. Die Zeit wird (zumindest meistens) durch den Übergang und die zugrunde liegende Natur des Planeten bestimmt. Deshalb wird der Übergang in einem genau festgelegten Zeitrahmen tatsächlich auftreten, sobald die notwendigen Bedingungen auf dem Planeten herrschen. Es ist wie beim

Füllen einer Badewanne, sobald man den Hahn geöffnet hat, wird die Wanne volllaufen; es benötigt einfach eine gewisse Zeit.

2. *Das Random-Walk-Modell:* Jeder Übergang ist in einem bestimmten Zeitrahmen sehr unwahrscheinlich, und diese Wahrscheinlichkeit ändert sich auch im Laufe der Zeit nicht wesentlich, weil für das Ereignis etwas sehr Unwahrscheinliches passieren müsste oder weil mehrere sehr unwahrscheinliche Schritte aufeinanderfolgen müssten. Deshalb muss eine beträchtliche Zeit vergehen, bis der Übergang zufällig stattfindet. Wenn es erst einmal Leben auf einem Planeten gibt, wird die entscheidende Neuerung schließlich passieren, doch wann dies ist, hängt vom Zufall ab, und ob sie geschieht, bevor dem Planeten die Zeit ausgeht und er unbewohnbar wird, kann man nicht wissen. Es ist, wie wenn man mit einem Würfel eine bestimmte Zahl von Sechsern nacheinander würfeln soll; es kann in der erlaubten Zeit passieren, vielleicht aber auch nicht.
3. *Das Viele-Wege-Modell:* Jeder Übergang oder jede Schlüsselinnovation erfordert viele zufällige Ereignisse, damit eine komplexe neue Funktion entstehen kann, aber viele Kombinationen davon können zum gleichen *funktionalen* Ergebnis führen, selbst wenn die genetischen oder anatomischen Details der verschiedenen Ergebnisse *nicht* dieselben sind. Deshalb ist, sobald es erst einmal Leben gibt, die Wahrscheinlichkeit für die Innovation in einem gewissen Zeitrahmen hoch. Den genauen Zeitpunkt können wir aber nicht wissen. Es ist, wie wenn man beim Pokern ein gutes Blatt bekommt: Die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Kartenkombination ist winzig, doch es gibt viele verschiedene „gute Blätter“, und man kann zuversichtlich sein, dass man ab und zu eines haben wird.

Jede Erklärung kann auch in eine vierte Kategorie gehören, die wir das *Die-Leiter-hochziehen-Ereignis* nennen wollen. In dieser Kategorie der Erklärungen ist eine Innovation wahrscheinlich (weil es sich entweder um einen Kritischer-Weg- oder einen Viele-Wege-Vorgang handelt), aber die Ergebnisse der Neuerung zerstören die Bedingungen, auf deren Grundlage der Vorgang ablaufen konnte. Die neuen Organismen „ziehen die Leiter hinter sich hoch“. Wir vertreten die Ansicht, dass die wichtigsten evolutionären Entwicklungssprünge größtenteils mit diesem „Werkzeugkasten“ erklärt werden können.

Ein Beispiel für das Kritischer-Weg-Modell könnte eine der Erklärungen für das Auftauchen verschiedener hartschaliger Tiere auf der Erde vor etwa 541 Mio. Jahren sein, was man meist als kambrische Explosion bezeichnet. Dabei wird festgestellt (worauf wir in Kap. 9 noch einmal zurückkommen

werden), dass Tiere Sauerstoff für ihren energiehungrigen Stoffwechsel benötigen. Die bakteriellen Vorläufer der Pflanzen hatten über 1 Mrd. Jahre lang Sauerstoff erzeugt, bevor die ersten Tiere auftauchten. Doch all dieser Sauerstoff war vom Gestein auf der Erdoberfläche gebunden worden, und Vulkane brachten weitere Gase aus dem Erdinneren. Erst als alles Gestein vollständig oxidiert war und es keinen weiteren Sauerstoff mehr binden konnte, bildete sich gasförmiger Sauerstoff in der Atmosphäre. Deshalb musste zwischen der Entstehung von sauerstoffproduzierenden Bakterien und der von tierischem Leben viel Zeit vergehen. Nachdem die Sauerstoff-erzeugung durch Photosynthese erst einmal entstanden war, war das Auftauchen von tierischem Leben sehr wahrscheinlich, wenn auch mit großer Verzögerung (Abb. 1.1).

Ein Beispiel für das Random-Walk-Modell könnte die Überlegung sein, dass Säugetiere aufgrund zweier Vorbedingungen die beherrschende Gattung auf der Erde wurden: der Evolution früher, kleiner Säugetiere und des

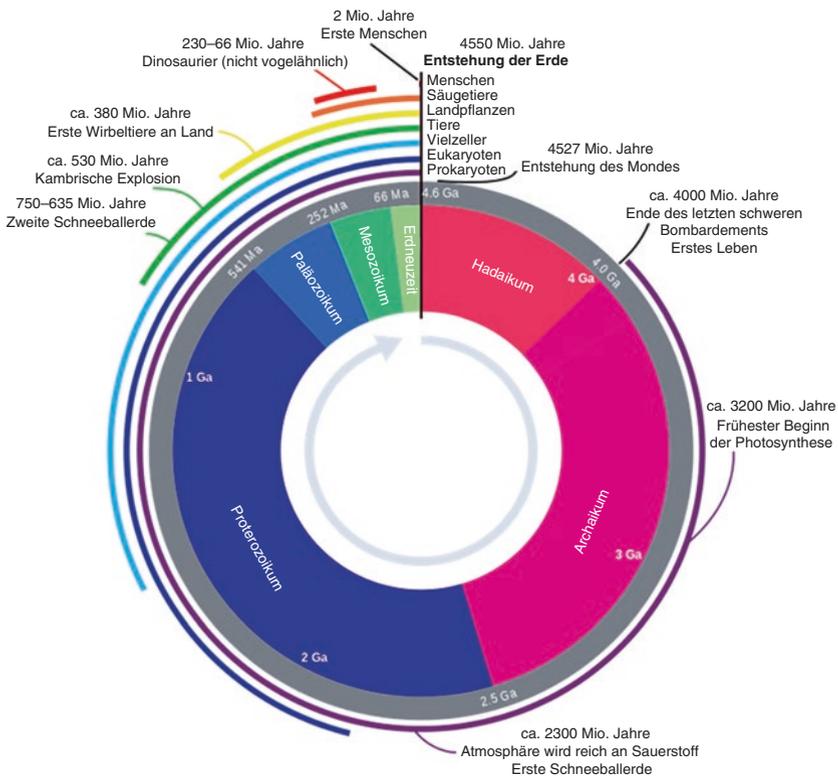


Abb. 1.1 Ringdiagramm, das einige der Höhepunkte der Naturgeschichte der Erde zeigt. Der Zeitraum, in dem es Menschen gab, ist zu klein, um in den Maßstab zu passen. Absolute Altersbestimmungen sind unsicher und viele davon deshalb umstritten

Vorhandenseins ökologischer Nischen, in denen sie sich entwickeln konnten, um zu den großen verschiedenartigen Tieren zu werden, die wir heute kennen. Die ersten Säugetiere gab es auf der Erde schon im Trias (Abb. 1.2),

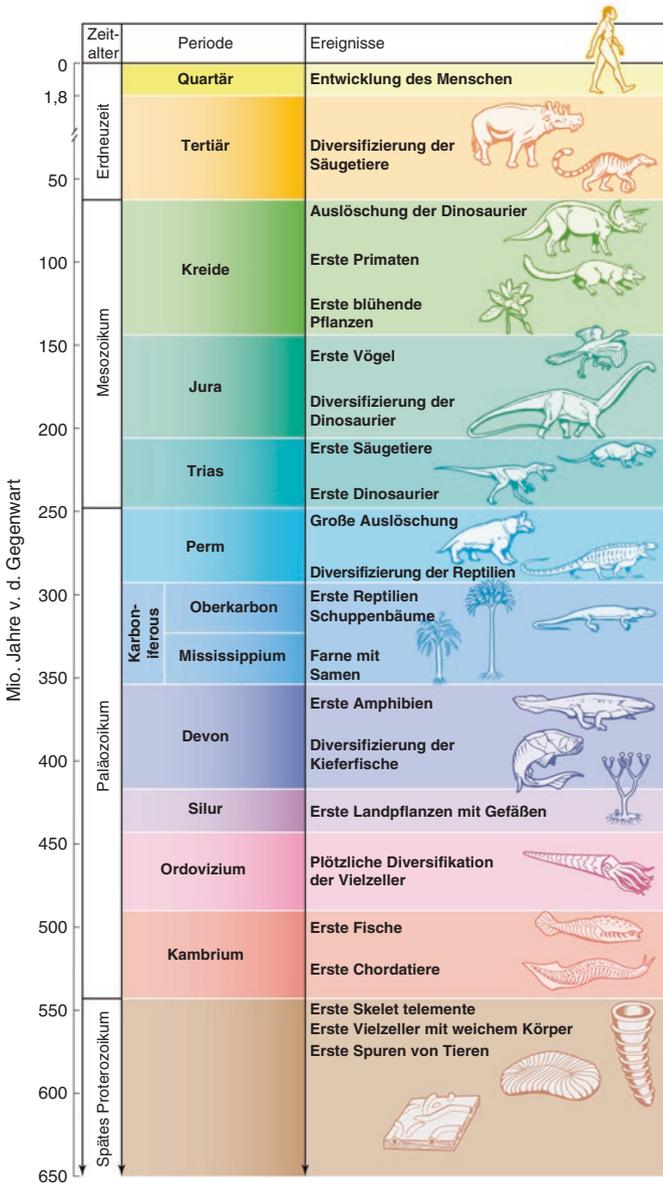


Abb. 1.2 Die letzten 650 Mio. Jahre der Naturgeschichte bis heute mit den wichtigsten geologischen Zeiträumen und Ereignissen in der Geschichte des Lebens, beginnend etwa mit dem Auftauchen der ersten Tiere. (Encyclopaedia Britannica/UIG/Getty Images)

doch die ökologischen Nischen für große Pflanzenfresser und die großen Fleischfresser, die diese fraßen, waren von den Dinosauriern gefüllt. Säugetiere blieben klein und nachtaktiv. Dann passierte zufällig etwas, was die Nische für die Säugetiere öffnete: Ein Komet oder Asteroid schlug am Ende der Kreidezeit in der Nähe der heutigen mexikanischen Stadt Chicxulub auf der Erde ein. Die daraus folgenden großen Klimaänderungen löschten die Dinosaurier aus und öffneten die ökologischen Nischen für die Säugetiere, die sich darin entwickeln konnten. Dieser Einschlag hätte am Ende des Jura oder des Eozän oder überhaupt noch nicht passieren können. Im letzteren Fall könnten die Säugetiere immer noch die seltenen, kleinen, nachtaktiven Tiere sein, die sie vor 70 Mio. Jahren waren.

Ein Beispiel für das Viele-Wege-Modell ist die Entwicklung des Sehvermögens. Augen, die uns ein Abbild der Welt liefern (und nicht nur hell und dunkel unterscheiden), haben sich mehrmals entwickelt, z. B. in Insekten, bei Kopffüßern, Wirbeltieren und ausgestorbenen Gruppen wie den Trilobiten. Sie entstanden unabhängig voneinander und hatten einen unterschiedlichen Aufbau, wie man beim Vergleich von Insekten- und Menschaugen sofort erkennen kann. Doch diese verschiedenen, unabhängig voneinander entstandenen Augen weisen die gleiche *Funktion* auf.

Wir klassifizieren diese entscheidenden Entwicklungsschritte auf diese Art und Weise, weil uns dies etwas über den *zeitlichen Ablauf* und die *Wahrscheinlichkeit* verrät, und das ist das, was wir wissen wollen, ohne uns über *Mechanismen* (z. B. welche Gene genau daran beteiligt sind, damit das Auge eines Insekts oder eines Wirbeltieres entsteht und wie sie sich entwickelt haben) Gedanken machen zu müssen. Denken Sie daran, dass es hier um die Evolution einer *Funktion* (z. B. das Sehvermögen) und nicht die einer *Struktur* geht (z. B. ein Auge mit einer Linse und einer Retina, wie unseres).

1. *Das Kritischer-Weg-Modell*: Dazu benötigt man nur eine Reihe von Ausgangsbedingungen, die herrschen müssen. Sobald diese vorhanden sind, wird sich der Entwicklungsschritt in einem bestimmten Zeitraum ereignen. Die Ausgangsbedingungen benötigen nur Zeit, der Zufall spielt keine große Rolle. Vielleicht ist der Zeitraum sehr lang (wie in der vorher genannten Verbindung von Sauerstoff und tierischem Leben), doch das ist vorhersehbar, wenn man genug über den Planeten und seine Biosphäre weiß. Wenn ein Entwicklungsschritt aufgrund eines Kritischer-Weg-Vorgangs mehr als einmal geschieht, werden die verschiedenen Beispiele wahrscheinlich einen ähnlichen evolutionären Weg gehen. Auf diese Weise kann eine unabhängige evolutionäre Entwicklung der Funktion aus ähnlichen Mechanismen oder Strukturen hergeleitet werden.

2. *Das Random-Walk-Modell:* Hier sind keine besonderen spezifischen Anfangsbedingungen erforderlich, abgesehen vom Leben, das den Entwicklungsschritt erreichen kann (es wird sich z. B. das Sehvermögen kaum in einer Umgebung entwickeln, in der es kein Licht gibt, das zum Sehen notwendig ist). Der Entwicklungsschritt wird also zufällig geschehen. Weil es nach unserer Definition sehr unwahrscheinlich ist, dass er geschieht – wäre er sehr wahrscheinlich, würde er einfach auftreten und es würde sich nicht um eine Schlüsselinnovation oder einen bedeutenden Entwicklungsschritt handeln –, ist es auch unwahrscheinlich, dass er zweimal stattfindet.
3. *Das Viele-Wege-Modell:* Für einen Viele-Wege-Prozess gibt es keine besonderen Anfangsbedingungen, außer dass es bereits Leben geben muss, das Fortschritte machen kann. Wenn jedoch irgendeine der passenden Anfangsbedingungen eintritt, dann wird der Entwicklungsschritt ziemlich sicher kurz darauf stattfinden (gemessen in Generationen). Es ist also beinahe unvermeidlich, dass der Entwicklungsschritt stattfinden wird. Weil es aber viele Möglichkeiten gibt, wie er geschehen kann, wird jedes Mal die *Funktion* durch einen anderen *Mechanismus* ausgeführt werden.

Ein Viele-Wege-Prozess ist nicht dasselbe wie ein Random-Walk-Prozess. Beim Random-Walk-Prozess müssen viele Ereignisse eintreten, doch wann dies geschieht, hängt vom Zufall ab – deshalb ist der zeitliche Ablauf des Ereignisses insgesamt zufällig. Im Gegensatz dazu können beim Viele-Wege-Prozess viele Kombinationen zufälliger Ereignisse zu einem Ereignis oder Entwicklungsschritt führen. Die Mathematik liefert das erstaunliche Ergebnis, dass das zeitliche Eintreten des Gesamtereignisses besser vorhersehbar ist als das der zufälligen Einzelereignisse, aus denen es besteht. Wir kennen das aus unserem alltäglichen Leben. Der Besitzer einer Imbissbude kann nicht vorhersehen, wann ein bestimmter Kunde kommen wird, um eine Currywurst zu bestellen, aber er kann am Ende des Tages berechnen, wie viele Currywürste er verkauft hat, und so eine geeignete Menge im Voraus bestellen. Das Viele-Wege-Modell bringt zum Ausdruck, dass ein Ereignis bestimmt eintreten wird, wenn es durch viele Kombinationen zufälliger Einzelereignisse ausgelöst werden kann, und es wird in einem bestimmten Zeitraum mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eintreten.

Wir können also zwischen den drei in Abb. 1.3 gezeigten Modellen unterscheiden. Wenn ein entscheidender Entwicklungsschritt nur einmal passiert ist, sollten wir das Random-Walk-Modell verwenden. Ist er im Laufe der Zeit in der Evolution mehrmals passiert, ist das Viele-Wege-Modell geeignet, und

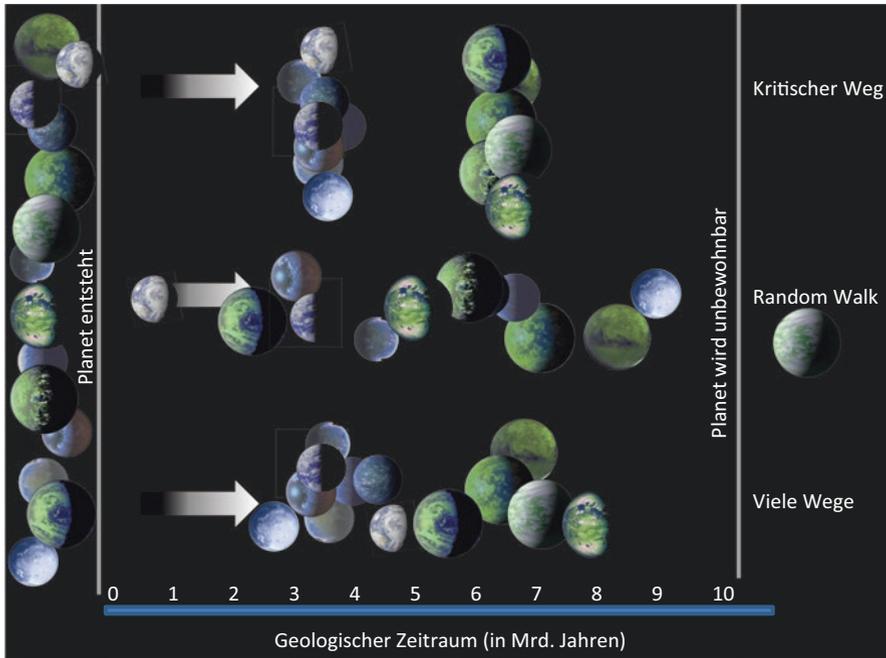


Abb. 1.3 Zeitliche Abfolge der drei Evolutionsmodelle (schematisch). Hier illustrieren wir die drei Modelle mit nur zwei Arten von Welten – einem erdähnlichen Planeten (blau) und einer trockeneren Supererde (grün). Das Kritischer-Weg-Modell sagt voraus, dass ein bestimmter Entwicklungsschritt mehr oder weniger zur selben Zeit stattfinden wird, sofern die Welten die gleichen Eigenschaften aufweisen. Hier passieren die Entwicklungsschritte auf den blauen, erdähnlichen Planeten etwa 3,2 Mrd. Jahre nach ihrer Entstehung. Das Random-Walk-Modell sagt voraus, dass er jederzeit passieren kann, und auf manchen Welten geschieht er nicht, bevor der Planet unbewohnbar wird (hier bei 10 Mrd. Jahren). Das Viele-Wege-Modell sagt voraus, dass der Entwicklungsschritt innerhalb eines eng begrenzten Zeitraumes geschehen wird. Wieder hängt dies davon ab, wann der Planet die notwendigen Anfangsbedingungen für den Schritt erreicht. Hier ist dies bei 3,5 Mrd. Jahren bei den blauen und 6,5 Mrd. Jahre bei den grünen Welten. (Bilder der Planeten: Mit freundlicher Genehmigung der NASA)

wir können sogar noch sicherer sein, wenn er oft und gleichzeitig bei verschiedenartigen Ausgangsbedingungen eingetreten ist. An einen Kritischer-Weg-Vorgang müssen wir denken, wenn er zwar oft, aber im Laufe der geologischen Zeiträume in einem sehr kurzen Zeitraum passiert ist. Selbst wenn wir nicht wissen, wann sich etwas entwickelt hat, aber sehen, dass eine Funktion mehrmals unabhängig voneinander entstanden ist und dabei denselben Mechanismus nutzt (etwa die gleiche Art von Genen oder dieselbe anatomische Grundstruktur), bevorzugen wir das Kritischer-Weg-Modell.

Wir haben uns diese drei Arten der Erklärung ausgedacht, um zu versuchen, unsere Ausgangsfrage zu beantworten. Natürlich sind Menschen etwas Einmaliges. Wir haben uns nur einmal entwickelt; die Chance, dass sich etwas genau wie der Mensch nochmals entwickelt haben könnte, ist astronomisch gering, und der evolutionäre Weg zum Menschen ist außerordentlich kompliziert und zum großen Teil unbekannt. Aber es geht uns nicht darum, ob irgendwo anders noch einmal Menschen entstanden sind, sondern ob sich intelligente, tatkräftige Organismen, die Werkzeuge verwenden, irgendwo anders entwickelt haben, d. h., es geht um die Evolution einer *Funktion* und nicht um die einer *Anatomie*. Unser Modell macht es uns möglich, die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Funktion entwickelt hat, sowohl vom spezifischen evolutionären Weg, den sie genommen hat, als auch von der Anatomie oder der Biochemie des endgültigen Organismus zu trennen. Wir können also fragen, wie oft sich das Sehvermögen entwickelt, ohne uns im Netz der spezifischen Gene und Zellen zu verlieren, aus denen das menschliche Auge oder das der Insekten besteht.

Die Unterscheidung zwischen Struktur und Funktion ist zentral, deshalb werden wir ein weiteres Beispiel anführen. Die Plazenta (die „Nachgeburt“) hielt man lange Zeit für einzigartig bei Säugetieren. Sie macht es möglich, dass die Mutter ihr Baby in der Gebärmutter ernährt und der Fetus bis zu einem relativ fortgeschrittenen Stadium wächst, während er von der Mutter vor allem – von Viren bis hin zu Tigern – geschützt wird. Die Plazenta der Säugetiere ist in der Tat einzigartig. Sie hat eine bestimmte Anatomie, die es in keiner anderen Tiergruppe gibt. Doch ihre Funktion ist nicht einzigartig. Die Funktion der Plazenta liegt darin, das Gewebe der Mutter und den Blutkreislauf des Fetus nahe genug zueinander zu bringen, sodass Nährstoffe von der Mutter leicht zum Fetus im Körperinneren der Mutter gelangen können. Wenn wir die Frage stellen, ob andere Tiere ein spezielles Gewebe oder Organ für diese Aufgabe entwickelt haben, dann ist die Antwort ganz bestimmt ja: Skorpione, manche Arten von Kakerlaken, einige Eidechsen, Haie und Schlangen haben ihr spezielles mütterliches und embryonales Gewebe so angeordnet, dass der wachsende Fetus seinen Sauerstoff und Nährstoffe von seiner Mutter erhält.

Manche dieser lebendgebärenden Tiere (etwa plazentare Reptilien) erlauben es, dass das Gewebe des Fetus direkt mit dem Blut der Mutter in Kontakt kommt; bis vor Kurzem hatte man angenommen, dass dies nur bei Säugetieren vorkommt. Lebendgebären hat sich unabhängig voneinander sehr oft entwickelt, mit unterschiedlicher Anatomie, aber jedes Mal mit der gleichen Funktion. Es ist daher weit davon entfernt, eine einzigartige

unwahrscheinliche Random-Walk-Eigenschaft von Säugetieren zu sein; vielmehr ist die Lebendgeburt ein Viele-Wege-Prozess, den es bei vielen Tiergruppen gibt. Wenn wir also einige Beispiele haben, die wir untersuchen, können wir die Frage, wie wahrscheinlich es ist, dass eine Funktion entsteht, von der Frage trennen, wie diese Entstehung genau abläuft.

In diesem Buch beschäftigen wir uns mit den entscheidenden Entwicklungsschritten der Evolution und daher der Frage nach dem Auftauchen von Funktionen, die die Biosphäre radikal verändert haben. In Teil II dieses Buches werden wir die großen Entwicklungsschritte oder Schlüsselinnovationen des Lebens analysieren, um die Frage zu beantworten, ob sie einem Kritischer-Weg-, einem Random-Walk- oder einem Viele-Wege-Modell folgen. Auf Grundlage dieser Analyse können wir dann abschätzen, wie leicht jeder wichtige Übergang vom Leben geschafft werden kann (Abb. 1.3). Ist die Erde ein außergewöhnlicher und seltener Ort des Lebens in unserer kosmischen Umgebung, wie von Peter Ward und Donald Brownlee in ihrem Buch *Unsere einsame Erde* behauptet wird? Oder lässt sich aus unseren Ergebnissen folgern, dass wir in einem *lebendigen Universum* leben? Bevor wir aber zu dieser Frage kommen, müssen wir uns anschauen, welche Bedingungen auf einem Planeten notwendig sind, damit sich komplexes, makroskopisches Leben entwickeln kann.

Weiterführende Literatur

- Archibald, J. D. (2011). *Extinction and radiation: How the fall of the dinosaurs led to the rise of the mammals*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- Bains, W., & Schulze-Makuch, D. (2015). Mechanisms of evolutionary innovation point to genetic control logic as the key difference between prokaryotes and eukaryotes. *Journal of Molecular Evolution*, 81, 34–53.
- Conway Morris, S. (2008). *Jenseits des Zufalls: Wir Menschen im einsamen Universum*. Berlin: Berlin University Press.
- Gould, S. J. (1989). *Wonderful life: The Burgess shales and the nature of history*. New York: W. W. Norton.
- Smith, J. M., & Szathmáry, E. (1996). *Evolution: Prozesse, Mechanismen, Modelle*. Heidelberg: Spektrum Akademischer.
- Ward, P. D., & Brownlee, D. (2001). *Unsere einsame Erde: Warum komplexes Leben im Universum unwahrscheinlich ist*. Heidelberg: Springer.



2

Voraussetzungen für komplexes Leben

Bevor wir darüber sprechen, wie Leben auf einem Planeten entstehen kann, müssen wir uns der Frage widmen, ob ein Planet grundsätzlich Leben aufrechterhalten kann. Die Minimalvoraussetzungen für komplexes Leben sind deutlich höher als für mikrobielles. Wir werden zuerst überlegen, was unsere Erde zu einem bewohnbaren Planeten macht und inwiefern ihre Geschichte im Sonnensystem eng mit dem Auftauchen und dem Fortbestand von Leben zusammenhängt – dies ist nicht der Fall für unsere Nachbarplaneten, die ziemlich unwirtlich erscheinen. Danach werden wir über die astronomischen und die unmittelbar auf die Planeten bezogenen Randbedingungen für Bewohnbarkeit und Leben, vor allem die für komplexes Leben, eingehen und Vermutungen darüber anstellen, wie oft diese Voraussetzungen im Universum auftreten.

2.1 Eine sehr kurze Geschichte der Erde und des Lebens

Man nimmt an, dass sich die Erde und die anderen Körper des Sonnensystems vor etwa 4,54 Mrd. Jahren durch einen Prozess gebildet haben, der Akkretion genannt wird. Das ganze Sonnensystem hat sich aus einer Wolke aus Staub und Gas gebildet, die unter ihrer eigenen Gravitation zu einer sich drehenden Scheibe, der protoplanetaren Scheibe, zusammengefallen ist. In ihr zog sich der Staub zu einer Reihe größerer Körper zusammen. Der größte davon befand sich im Mittelpunkt und wurde zur Sonne, viele

andere bildeten sich in einer Umlaufbahn um diese Protosonne. Die kleinen Körper, die Planetesimale, ähnelten den heutigen Asteroiden und Kometen. Es gab Millionen davon, und auch sie stießen miteinander zusammen und bildeten so größere Körper, aus denen die Protoplaneten entstanden, die groß genug waren, um durch ihre eigene Gravitationskraft noch mehr Kometen, Felsen und Staub anzuziehen. Streiftreffer verliehen den wachsenden Planeten ihre Drehbewegung. In der Nähe der Sonne wurden chemische Stoffe wie Wasser und Methan erwärmt und dadurch gasförmig; die Protoplaneten dort bestanden hauptsächlich aus Gestein, das zurückblieb, als dieses Gas verdampfte. So entstanden die inneren erdähnlichen Planeten unseres Sonnensystems. Weiter von der Sonne entfernt lagen Ammoniak und Methan als gefrorene Feststoffe vor, und auch diese blieben an den Planetesimalen hängen. Sie sammelten deshalb Eis, Gase und Staub an sich und wuchsen sehr schnell. Heute sind das die großen Gasriesen mit ihren Eismonden.

Die neu entstandenen Protoplaneten blieben nicht da, wo sie sich gebildet hatten. Komplizierte Gravitationskräfte zwischen den Protoplaneten, der Gasscheibe, in der sie wuchsen, und der größer werdenden Sonne brachten die Planeten dazu, näher an die Sonne zu wandern. Wir finden heute einige Systeme um andere Sterne, bei denen die großen Eisplaneten so nahe um ihrem Stern kreisen, dass sie rotglühend sind, oder andere, bei denen die Planeten so nahe beieinander kreisen, dass sie unmöglich dort entstanden sein können. Es kann auch passieren, dass Planeten aus ihrem Sonnensystem herausgeschleudert werden, sodass sie zu vagabundierenden Planeten werden. Dies spricht für eine stürmische und chaotische Anfangszeit vieler Sternsysteme. Unseres war keine Ausnahme. Es wird allgemein angenommen, dass in der Frühzeit des Sonnensystems die primordiale Erde mit einem anderen jungen Planeten, der etwa die Größe des Mars besaß, kollidiert sein muss. Dabei verdampfte ein großer Teil beider Körper und schleuderte eine große Wolke aus weißglühendem, kochendem Gestein in die Umlaufbahn um die Erde. Das meiste dieser Masse fiel wieder zurück, kühlte ab und bildete die Erde, wie wir sie heute kennen. Der Rest blieb im Orbit, kondensierte, kühlte ab und bildete den Mond.

Ein natürlicher Satellit von der Größe unseres Mondes ist ungewöhnlich, könnte aber vielleicht wichtig gewesen sein für die spätere Entwicklung einer Biosphäre auf unserem Planeten, denn er stabilisierte die Drehachse der Erde, wodurch die Oberflächentemperatur in einem engeren Bereich blieb. Außerdem übte er Gezeitenkräfte auf den jungen Planeten aus, die viel stärker waren als heute, wodurch das Erdinnere stärker aufgeheizt wurde, was auch Auswirkungen auf die Küstenbewohner hatte, sobald erst

einmal das Wasser aus der Atmosphäre kondensiert war und Meere gebildet hatte. Der Einschlag, durch den der Mond gebildet wurde, war der größte, den die Erde überstehen musste. Er verdampfte sogar die Kruste. Wir können mit ziemlicher Sicherheit sagen, dass es auf der Erde kurz nach diesem Einschlag kein Leben gegeben hat. Nach dem Einschlag bildeten sich im Erdinneren Mantel und Kern aus, und es formte sich wieder eine Art von Kruste. (Wir wissen nicht genau, wann dies geschah und wie dick sie war.). Die Zusammensetzung der Atmosphäre stabilisierte sich, wobei Stickstoff und Kohlendioxid die Hauptkomponenten waren. Wasser tauchte an der Oberfläche auf, aber wieder zeigt sich, wie wenig wir von diesen Tagen verstehen, denn es ist nicht einmal klar, ob es hauptsächlich von der primordialen Protoerde oder von Kometen kam, die die Erde getroffen haben, nachdem der Mond entstanden ist.

Aber selbst nach diesem Ereignis wurde die Erde immer noch von Asteroiden und Kometen getroffen, wobei die Zahl allmählich abnahm, vielleicht mit gelegentlichen Häufungen wie in der Periode, die man als Großes Bombardement (Late Heavy Bombardment, LHB) bezeichnet und die zwischen 4,1 und 3,8 Mrd. Jahren stattfand. Es ist auch der Zeitraum, aus dem wir die ersten Hinweise auf Leben auf der Erde finden, wie geochemische (Untersuchungen von Isotopen) und fossile Hinweise zeigen. Das Leben ist vermutlich ziemlich schnell entstanden, vielleicht sogar schon vor dem Großen Bombardement, fast sofort nachdem die Bedingungen an der Oberfläche Leben erlaubten. Die Biochemie und die Struktur dieses ersten Lebens sind unbekannt. Es handelte sich bestimmt um einzellige, mikroskopische und anaerobe (d. h. keinen Sauerstoff benötigende) Lebewesen. Diese Lebensformen gibt es auch heute noch. Ein allgemeines Prinzip ist, dass der überragende Großteil des Lebens auf der Erde klein und einfach blieb. Wir glauben nicht, dass die ersten Organismen das Licht als Energiequelle nutzen konnten, aber die Photosynthese tauchte ziemlich bald auf, vermutlich vor etwa 3,5 Mrd. Jahren, wenn nicht sogar früher. Wie wir in Kap. 4 und 5 besprechen werden, sind die Fähigkeiten, Licht einzufangen und diese Energie zu nutzen, um Sauerstoff zu produzieren, zwei verschiedene Dinge, doch das Leben hat vermutlich beides bis etwa vor 2,7 Mrd. Jahren geschafft. Dieser frühe Sauerstoff wurde aber durch Reaktionen mit Oberflächenmineralien, vulkanischen Gasen und organischer Materie (etwa der von toten Organismen) verbraucht; deshalb reicherte sich bis vor etwa 2,4 Mrd. Jahren fast nichts davon in der Atmosphäre an. Erst dann begann der Sauerstoffgehalt anzusteigen, bis es zur Großen Sauerstoffkatastrophe (Great Oxygenation Event, GOE) kam. Während dieser Sauerstoffkatastrophe oder kurz danach, vor etwa