Astrobiologie

Bearbeitet von
Mathias Scholz

1. Auflage 2016. Buch. xxi, 542 S. Softcover
ISBN 978 3 662 47036 7
Format (B x L): 15,5 x 23,5 cm
Gewicht: 848 g

Weitere Fachgebiete > Physik, Astronomie > Astronomie: Allgemeines > Exobiologie, Astrobiologie, Xenobiologie

Zu Inhaltsverzeichnis

schnell und portofrei erhältlich bei

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

Was ist und wie funktioniert „Leben“? 2

Homo liber nulla de re minus quam de morte cogitat; et eius sapientia non mortis sed vitae meditatio est.
Spinoza, Ethik

Der Begriff „Leben“ hat etwas mit dem Begriff „Zeit“ gemein, über den Thomas von Aquin Folgendes zu sagen wusste: „Was ist also die Zeit? Wenn mich niemand darnach fragt, weiß ich es, wenn ich es aber einem, der mich fragt, erklären sollte, weiß ich es nicht, (…)“. In einem ähnlichen Dilemma steht man, wenn man „Leben“ allgemeingültig definieren möchte, z. B. in Form eines Algorithmus, der, angewendet auf eine Entität der natürlichen Umwelt, als Ergebnis „ Leben ja“ oder „Leben nein“ liefert. Das Problem beginnt bereits damit, dass wir nur eine Lebensform kennen, die unserer Erde. Sie beruht auf komplexer Kohlenstoffchemie, für die sogar eine eigene Bezeichnung, der Begriff der „organischen Chemie“ bzw., noch genauer, der „Biochemie“ geprägt wurde. Ob andere chemische Grundlagen auch etwas Ähnliches wie Leben ermöglichen, ist eher fraglich. Daher ist es eine gute Arbeitshypothese, wenn man davon ausgeht, dass Leben im Kosmos immer auf den speziellen chemischen Eigenschaften des Elements Kohlenstoff beruht. Derartiges Leben soll im Folgenden als „Leben, wie wir es kennen“ verstanden werden. Aber schon hier, in einer Welt, in der es von Leben nur so wimmelt, ist es eine Herausforderung, eine Definition für dieses erstaunliche Phänomen zu finden. Man kann es sogar als Paradoxon auffassen, dass die Formulierung einer allgemeingültigen Definition für Leben anscheinend immer schwieriger wird, je mehr die biologischen Wissenschaften darüber in Erfahrung bringen. So ist es nicht verwunderlich, dass man in der Fachliteratur – je nach wissenschaftlichem Blickwinkel – eine Vielzahl von Definitionen findet, von denen jede Einzelne sicherlich ihre Berechtigung hat, aber keine von ihnen so allgemeingültig ist, dass man sagen kann – ja genau, das ist Leben.

Das beginnt bereits damit, dass eine solche Definition „minimalistisches“ Leben von „nichtlebenden“ Entitäten sicher abgrenzen muss. Spezielle Eigenschaften des Lebens wie z. B. das menschliche Bewusstsein oder – viele Etagen tiefer in der Komplexitätsleiter – die Mehrzelligkeit „höheren“ Lebens spielen in dieser Hinsicht

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

M. Scholz, *Astrobiologie,* DOI 10.1007/978-3-662-47037-4_2

keine Rolle. Das Problem besteht darin, einen Satz von Eigenschaften zu finden, die es in ihrer Gemeinsamkeit erlauben, lebende molekulare Systeme (sie entsprechen minimalistischen Organismen) von nichtlebenden zu unterscheiden. Dass das nicht einfach ist, zeigen z. B. Viren, die zwar biologische Objekte sind, denen aber die Eigenschaft „Leben“ abgesprochen werden muss, da sie weder einen eigenen Stoffwechsel noch einen eigenen Reproduktionsmechanismus besitzen. In der anderen Richtung bedarf es aber auch einer eindeutigen Abgrenzung gegenüber „künstlichem“ Leben, soweit man darunter komplett künstlich erschaffene Objekte mit begrifflich ähnlichen Eigenschaften wie „natürliches“ Leben verstehen will. Man denke z. B. an die (noch) hypothetischen Von Neumann-Sonden, die nach den Vorstellungen ihrer Schöpfer John von Neumann und Arthur W. Burks (Von Neumann 1966) die Fähigkeit besitzen, sich anhand eines Programms (= genetischer Code) unter Ausnutzung von Ressourcen der Umwelt und ihrer Energie (= Metabolismus) beliebig reproduzieren zu können (= Fortpflanzung). Selbst Objekten der virtuellen Welt, wie sie sich in großer Zahl in den Speichern von Computern tummeln, lassen sich einige Eigenschaften von Leben nicht gänzlich absprechen. Aber sowohl künstliches als auch virtuelles Leben ist an seiner Entstehungsgeschichte fassbar, wenn man davon ausgeht, dass natürliches Leben nur infolge der Selbstorganisation der Materie (also ohne Zutun von „Schöpfern“ ihrer eigenen komplexesten Zunft) entstehen kann. Das zeigt, dass auch die Genese Bestandteil einer Definition von Leben sein sollte. Sie beinhaltet immerhin eine der wichtigsten, noch ungelösten Probleme der Astrobiologie: Wie entsteht Leben aus anorganischer Materie?

2.1 Grundlegende Eigenschaften lebender molekularer Systeme

Man kann sich dem Phänomen Leben wissenschaftlich von verschiedenen Seiten annähern. In besonders allgemeingültiger und auch heute noch beeindruckender Weise gelang das dem berühmten Physiker und Nobelpreisträger von 1933, Erwin Schrödinger, in seinem 1944 geschriebenen Buch *What is Life?*, welches seitdem immer wieder neu aufgelegt wurde (Schrödinger 2012). Es entstand unter dem Eindruck der seit Anfang der 1930er-Jahre aufgekommenen Debatte darüber, ob sich Leben allein aus der Physik (und Chemie) erklären lässt, oder ob es einen so großen qualitativen Unterschied (im Sinne von Bohrs Komplementaritätsprinzip der Quantenmechanik) zwischen lebender und nichtlebender Materie gibt, dass dies niemals gelingen wird. Letzteres wurde zunehmend bezweifelt, da man immer mehr der Überzeugung war, dass z. B. die Vererbung offensichtlich auf mikrophysikalischer (d. h. molekularer) Grundlage beruhen muss (Schrödinger sprach noch von einem „aperiodischen Kristall“, in dem die Baupläne eines Organismus gespeichert sind). Nur dann konnte man widerspruchsfrei (auch ohne den genauen Mechanismus zu kennen) die von den Genetikern entdeckten und detailreich untersuchten Vererbungsgesetze plausibel erklären. Die Quintessenz dieser Forschungen, an denen auch eine Anzahl noch heute bekannter Physiker beteiligt war (z. B. Max Delbrück, Karl Günther Zimmer, Salvador Luria), bestand in der endgültigen Negierung eines

élan vital (Bergson 1944), einer besonderen Lebenskraft, die nur Lebewesen eigen sein sollte und die sich nach Meinung der „Vitalisten" der physikalisch-mechanischen Erklärungsweise widersetzt. Leben ist offenbar eine Eigenschaft komplexer, thermodynamisch offener physikalisch-chemischer Systeme, die ihre interne Organisation nicht nur allein durch einen ununterbrochenen Stoff- und Energiefluss durch ihren Organismus zeitlich aufrechterhalten können, sondern dazu auch noch intern gespeicherter und lesbarer Information bedürfen. Ein reduktionistischer Erklärungsansatz, wie er für Deutungsprozesse in der anorganischen Natur gang und gäbe ist, versagt bei biologischen Entitäten. Denn erst wenn alle Teile eines irgendwie entstandenen komplexen physikalisch-chemischen Systems auf geeignete Weise kollektiv zusammenarbeiten, kann es zu so etwas wie einem lebenden System emergieren – vielleicht vergleichbar mit einem spontan vonstattengehenden Phasenübergang. Die Beantwortung der Frage, auf welche Weise und unter welchen Voraussetzungen es vor ca. 3,8 Mrd. Jahren auf der Erde erstmalig zu einem derartigen Phasenübergang gekommen ist, stellt noch immer die wichtigste Herausforderung der Theorie der Abiogenese dar.

Aber noch ein weiteres Problem sprach Schrödinger in seinem Buch von 1944 an, und zwar die Tatsache, dass lebende Systeme offensichtlich einem als grundlegend erkannten Naturgesetz widersprechen: dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Dazu muss man wissen, dass es in der Thermodynamik eine extensive Zustandsgröße gibt, für die Rudolf Clausius 1865 den Begriff der „Entropie" eingeführt hat (s. Abschn. 2.4.1). Sie stellt eine Verbindung zwischen der klassischen Wärmelehre und der statistischen Mechanik (Stichwort Mikro- und Makrozustände) her und ist ein Maß für den Ordnungszustand eines physikalischen Systems. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik sagt nun aus, dass in einem abgeschlossenen System diese Größe entweder konstant bleibt oder zunehmen muss. Oder einfach ausgedrückt: Die Unordnung nimmt bei jeder Zustandsänderung zu. Außerdem ist diese Größe eng mit dem Begriff der Irreversibilität verbunden: Bei einem umkehrbaren Prozess ändert sie sich nicht, bei einem unumkehrbaren Prozess kann sie nur zunehmen. Sie gibt damit eine Richtung vor, die sich interessanterweise mit der Zeit verknüpfen lässt. Da sie, wie gesagt, in einem abgeschlossenen physikalischen System nur zunehmen kann, muss von zwei Zuständen der Zustand geringerer Entropie immer der frühere sein. Auf diesen Umstand (Zeitpfeil) hat als Erster der Astrophysiker Arthur Stanley Eddington hingewiesen.

Auch stehen Lebewesen nicht außerhalb der Naturgesetze. Gerade sie sind bekanntlich ein Sinnbild wohlgeordneter Strukturen und können nur in einem Prozess ständiger Selbsterneuerung fernab des thermodynamischen Gleichgewichts existieren (Prigogine et al. 1984). Wie man weiß, können schon kleine Abweichungen in diesen Strukturen dem Lebewesen das Prädikat „Leben" wieder rauben. Was folgt ist Zerfall, der damit eine direkte und sichtbare Konsequenz des 2. Hauptsatzes ist. Solange ein Lebewesen „lebt", muss es offensichtlich seinen Ordnungszustand präzise aufrechterhalten, was nur dadurch möglich ist, dass es ständig für den Aufbau des Organismus benötigte Stoffe (und Energie) aufnimmt und vermehrt Abbauprodukte (und damit Entropie) an die Umgebung abgibt. Dieser Vorgang wird gemeinhin als Metabolismus (Stoffwechsel) bezeichnet und ist in den Details auch schon

bei den primitivsten Lebewesen äußerst kompliziert: Strukturaufbau ist immer mit Entropieverbrauch und Arbeitsleistung verbunden, d. h., Lebewesen verbrauchen Energie, um Ordnung zu erschaffen, und müssen dabei aber zugleich Unordnung produzieren (Stichwort Stoffwechselprodukte). Die dazu notwendige Energie entnehmen sie der Umgebung. Diese Energiequelle wird dabei in der Biologie gewöhnlich „Nahrung“ genannt. Erwin Schrödinger hat diesen grundsätzlichen Vorgang in seinem schmalen Büchlein von 1944 klar herausgearbeitet und dabei den (wie wir heute wissen entbehrlichen) Begriff der „negativen Entropie“ eingeführt (von Leon Brillouin als „Negentropie“ bezeichnet, (Brillouin 1949)). Aufnahme von Negentropie bedeutet dabei Aufbau von Ordnung und Struktur – also eine Art von Selbstorganisation. Dies funktioniert aber nur, wenn auf der anderen Seite eine größere Unordnung erzeugt wird. Nahrungsmittel müssen z. B. im Organismus wieder in ihre molekularen Bestandteile zerlegt werden (Entropie wächst), um die dabei freigesetzte (chemische) Energie zu nutzen und die Lebensvorgänge aufrechtzuerhalten (Negentropie wächst). Da dabei die Entropie stärker anwächst als die Negentropie, ist dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik Genüge getan. Möglich ist dies nur, weil es im Kosmos in Form der Sterne ein Ungleichgewicht mit der Tendenz zur Gleichverteilung z. B. der in den Weltraum abgestrahlten Photonen gibt. (Der thermodynamisch wahrscheinlichste Zustand ist ein Kosmos, in dem alle Teilchen die gleiche Temperatur haben und damit alle Strukturbildungsprozesse erlöschen – dieser Zustand wurde in der klassischen Thermodynamik als der Zustand des Wärmetodes des Kosmos als unausweichliche Konsequenz des 2. Hauptsatzes angesehen. Es ist aber auch heute noch nicht klar, ob man den Kosmos überhaupt als abgeschlossenes System betrachten darf – aber nur darauf beziehen sich die Aussagen des Entropiesatzes.) Die direkte Konsequenz daraus ist die Erkenntnis, dass Leben auf der Erde (oder Strukturbildung, auch abiotische, also ganz allgemein) nur deshalb möglich ist, weil die Sonne an ihrer Oberfläche so heiß (5778 K) und der umgebende Kosmos so kalt (2,7 K) ist. Man erkennt das, wenn man sich einmal die Entropiebilanz anschaut. Dazu muss man die drei Systeme Sonnenoberfläche, Erdoberfläche und Kosmos bezüglich des Entropietransports betrachten, denen thermodynamisch jeweils verschiedene Temperaturen zugeordnet sind. Das Modell entspricht ziemlich genau einer einfachen Wärmekraftmaschine (Carnot-Maschine), die aus einem Reservoir hoher Temperatur (Sonne) und einer Umgebung niedriger Temperatur (Weltall) besteht und die Temperaturdifferenz ausnutzt, um (auf der Erde) verwertbare Energie zu erzeugen. Die Photonen, welche die Sonne verlassen, bilden einen isotropen Wärmestrom von ca. 10^{26} W, von dem die Erde $\sim 10^{17}$ W aufnimmt und auch wieder isotrop abgibt. Es gibt aber einen qualitativen Unterschied. Aufgenommen werden hochwertige solare Photonen mit einer spektralen Energieverteilung, die dem eines Schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 5778 K entspricht. In diesem Wärmebad nimmt die Erde eine effektive Temperatur von ~ 254 K an (wenn man den Treibhauseffekt einmal beiseitelässt). Und mit dieser Temperatur gibt sie die gleiche Energiemenge in Form niederenergetischer Photonen an den kosmischen Hintergrund (2,7 K) ab. Das entspricht einem Entropieexport von $-3{,}8 \times 10^{14}$ WK^{-1}.Und genau dieser Entropieexport ermöglicht auf der Erde Strukturbildungsprozesse, zu denen auch das Leben gehört (andere sind z. B. die globalen Zirkulationssysteme der Atmosphäre und der Ozeane). Die Erde ver-

liert also im Mittel pro Quadratmeter ~1 WK^{-1} „Unordnung“, was quasi permanent geschieht und auf diese Weise Platz für Strukturbildung schafft. In das Bild passt auch sehr gut, dass die Hochtemperaturphotonen der Sonne über die Photosynthese die primäre Energiequelle der irdischen Biosphäre sind. Auch wenn wir uns gern von tierischem Eiweiß ernähren, so sind wir doch alle nur Sekundär-Vegetarier!

Diese hier kurz beschriebene Wärmekraftmaschine hat den sehr griffigen Namen „Photonenmühle“ erhalten (Ebeling und Ulbricht 1986). Ihr verdanken wir unsere Existenz.

Lebewesen sind – physikalisch gesehen – immer makroskopische Objekte. Das kleinste bis heute bekannte Lebewesen, das thermophile Cyanobakterium *Nanoarchaeum equitans*, besitzt eine Größe von ~400 nm, was einem Volumen von $\sim 3{,}35 \times 10^7$ nm^3 entspricht. Darin haben $\sim 10^{10} - 10^{11}$ Atome Platz. Diese Anzahl von Atomen scheint damit größenordnungsmäßig die untere Grenze zu sein, um Leben zu ermöglichen. Zwar sind z. B. viele Viren noch einmal um knapp eine Größenordnung kleiner. Man kann sie aber nicht als Lebewesen betrachten, da sie u. a. keinen eigenen Metabolismus besitzen und für ihre Vermehrung auf andere Lebewesen (z. B. Bakterien bei den Phagen) angewiesen sind.

Was Leben ausmacht, ist seine hohe Komplexität. Komplexität bedeutet hier, dass extrem viele Einzelprozesse in Form biochemischer Reaktionen koordiniert zusammenarbeiten müssen, um unter Austausch von Energie und Entropie mit der Umgebung ein Fließgleichgewicht weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht aufrechtzuerhalten (Homöostase). Damit ist zwingend Metabolismus, Informationsverarbeitung und Selbstregulierung verbunden.

Komplexe Systeme sind auch der Emergenz fähig, d. h., sie können nach innen und nach außen wirkende Eigenschaften annehmen, die sich nicht offensichtlich – reduktionistisch gesehen – aus den Eigenschaften ihrer Strukturelemente herleiten lassen. So wird z. B. von den mehr materialistischen Schulen der Philosophie das menschliche Bewusstsein (genauer: der menschliche Geist) als eine emergente Eigenschaft des Gehirns betrachtet. Auch das Leben „an sich“ ist in dieser Beziehung eine emergente Eigenschaft spezieller komplexer biochemischer Systeme. Die Frage, die in diesem Zusammenhang noch weitgehend unbeantwortet ist, lautet, ab wann ein derartiges System das Prädikat „Leben“ verdient. Dies führt wieder zurück zu dem Eingangsdilemma, nämlich der genauen Definition, was Leben eigentlich ist.

2.1.1 Die acht Säulen des Lebens

Bevor man sich an den Versuch einer Definition des Lebens heranwagt, soll als Erstes analysiert werden, welche Eigenschaften „Leben, wie wir es kennen“ (d. h. irdisches Leben) als Alleinstellungsmerkmale und als Abgrenzung gegenüber nichtlebender Materie besitzt. Diese Eigenschaften müssen so allgemein sein, dass sie sowohl auf uns Menschen als auch auf Organismen der Art *Nanoarchaeum equitans* zutreffen. Auf der 2. Astrobiologiekonferenz der NASA, die im Jahre 2002 stattfand, hat man ungefähr 100 Merkmale von Lebewesen zusammengetragen (Clark 2002), die man so in der unbelebten Natur nicht findet. Darunter auch eine Vielzahl

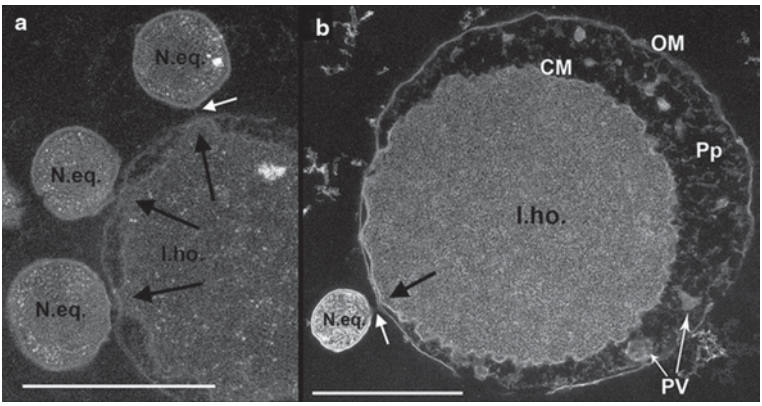

Abb. 2.1 Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von drei *Nanoarchaeum equitans*, die an einem Bakterium der Art *Ignicoccus hospitalis* angedockt haben. *CM* ist die Zytoplasmamembran, *OM* die äußere Membran, *Pp* bezeichnet das die Bakterienzelle ausfüllende Periplasma und *PV* periplasmatische Vesikel. Die weiße Linie gibt die Länge von 1 nm an (Jahn et al. 2008)

von Eigenschaften, die für minimalistische Organismen offensichtlich nicht gelten. Aber gerade diese Organismen muss ja eine allgemeingültige Definition auf jeden Fall einschließen, was zwar die Sache etwas schwieriger macht, die Zahl der Merkmale aber entscheidend reduziert. Am Ende bleiben folgende acht Merkmale übrig (erweitert nach (Koshland 2002)), die im Folgenden etwas näher diskutiert werden sollen:

- Kompartimentierung (Zelle),
- Energiestoffwechsel,
- Katalyse,
- Regulation,
- Wachstum,
- Programm (Software),
- Reproduktion,
- Anpassung.

Zu beachten ist, dass die Reihenfolge der Merkmale in dieser Aufzählung keine Wichtung darstellt (Abb. 2.1).

2.1.1.1 Kompartimentierung

Es gibt keine Ausnahmen. Jedes Lebewesen auf der Erde besteht aus bzw. beginnt mit mindestens einer Zelle, d. h. einem durch eine Zellmembran umschlossenen Raum (Kompartiment), in dem alle biochemischen Lebensvorgänge stattfinden (Virchows Prinzip des *omnis cellula e cellula*). Die Zelle ist die kleinste lebende Einheit, die wir kennen, und Zellen individualisieren Lebewesen. Um Leben zu verstehen, muss man die Funktionsweise von Zellen verstehen.

Der Zweck der Zellmembran ist es, eine Abgrenzung zur Umwelt herzustellen (die bei Metabionta auch aus anderen benachbarten Zellen bestehen kann), was zunächst einmal eine Schutzfunktion vor negativen Umwelteinflüssen einschließt. Sie muss darüber hinaus einen Stoffaustausch mit der Umwelt ermöglichen, indem sie auf eine definierte und regulierte Art und Weise Nährstoffe in die Zelle hinein und Abfallstoffe aus der Zelle herauszutransportieren in der Lage ist. Nur in einem derartigen Kompartiment können sich die für Lebensprozesse unabdingbaren Ingredienzien – z. B. Enzyme, welche die lebenswichtigen biochemischen Reaktionen katalysieren – konzentrieren, um darin, im Zellplasma, ihre Wirkung zu entfalten. Es ist sicherlich nicht falsch anzunehmen, dass zellähnliche Gebilde – z. B. kugelförmige, innen mit Zellplasma ausgefüllte Strukturen aus Lipiden – ganz am Anfang der Ereigniskette standen, an dessen Ende das erste Lebewesen auf der frühen Erde erschien.

Nach dem Grad ihrer Komplexität unterscheidet man bei irdischem Leben zwei Typen von Zellen, die man als prokaryotische (ohne Zellkern, *pro* = vor, *karyon* = Kern) und als eukaryotische Zellen (mit Zellkern, *eu* = echt, *karyon* = Kern) bezeichnet. Etwas salopp ausgedrückt, lassen sich bezüglich der Komplexität Prokaryonten mit „Kuckucksuhren aus dem Schwarzwald“ und Eukaryonten mit „Smartphones aus Taiwan“ vergleichen. Von den drei Domänen des irdischen Lebens werden zwei den Prokaryonten (*Archaea* und *Bacteria*) und eine den Eukaryonten (*Eukaria* – Pflanzen, Pilze und Tiere) zugeordnet. Eukaryotische Zellen sind in der Erdgeschichte fossil erst seit ~ 1,8 Ga nachweisbar. Die Entstehung der Prokaryonten wird in eine Zeit um ~ 3,8 Ga datiert, als Ergebnis der sogenannten „chemischen Evolution“, die, wie man vermutet, ungefähr zu diesem Zeitpunkt zur Entstehung des Lebens führte. Die meiste Zeit in der Geschichte des irdischen Lebens haben demnach primitive prokaryotische Lebensformen die Erde bevölkert – und sie tun es in Bezug auf die Individuenzahl und vielleicht selbst nach der in ihnen konzentrierten Biomasse noch heute.

2.1.1.2 Metabolismus

Lebewesen müssen in thermodynamischer Hinsicht offene chemische Systeme sein, die gezwungen sind, ständig mit der Umgebung Stoffe und Energie auszutauschen, um weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht überhaupt existieren zu können (Prigogine et al. 1984). Diese grundlegende Eigenschaft lebender Systeme nennt man Stoffwechsel (Metabolismus) und das strukturerhaltene Gleichgewicht Fließgleichgewicht. Man unterscheidet dabei Energiestoffwechsel (dient der Gewinnung von Energie) und Anabolismus (dient dem Aufbau körpereigener Substanzen und verbraucht Energie), wobei Letzterer Ersteren voraussetzt. Energie heißt hier zunächst einmal chemische Energie (genauer Gibbs-Energie, früher „freie Enthalpie“ genannt, s. Abschn. 2.4.1). Sie entstammt exergonen Redoxreaktionen, die einen sogenannten Elektronenspender (Elektronendonator) benötigen. Je nachdem, ob dieser Elektronenspender anorganischer oder organischer Natur ist, spricht man von lithotrophem bzw. von organotrophem Energiestoffwechsel. Wird dagegen die Energie direkt aus dem Photonenstrom der Sonne entnommen, spricht man von Phototrophie.

Man kennt mittlerweile eine Vielzahl lithotropher Reaktionen, die Energie für den Anabolismus primitiven Lebens liefern können. Auf der Erde erlauben sie die Besiedlung extremer Lebensräume durch entsprechend spezialisierte Bakterien und Archaeen. Als Beispiel sei *Thiobacillus thiooxidans* genannt, der seinen Energiestoffwechsel gemäß der Reaktion

$$H_2S + 2O_2 \rightarrow H_2SO_4 \left(-793,4 \frac{kJ}{mol}\right) \tag{2.1}$$

durch Oxidation von Schwefelwasserstoff bestreitet. Schwefel ist hier der Elektronendonator und Sauerstoff der Elektronenakzeptor (s. Abschn. 2.4.2). Derartige Reaktionen werden auf der Erde nur von chemoautotrophen mikrobiellen Lebewesen zur Aufrechterhaltung eines vergleichsweise noch relativ einfachen Metabolismus genutzt. Ein besonders großer Schritt in der Evolution des Lebens auf der Erde war deshalb ohne Frage die Entwicklung der Photosynthese(s. Abschn. 2.4.2.2.2). Sie ermöglicht einen phototrophen zellularen Energiestoffwechsel und kann auf diese Weise direkt das Sonnenlicht als Energiequelle anzapfen. Außerdem wird bei diesem Prozess molekularer Sauerstoff freigesetzt, der sich in der ehemals reduzierenden Uratmosphäre immer mehr ansammelte und schließlich (nach einem dadurch bedingten Massenaussterben anaerober Mikroorganismen vor ~2,4 Ga) die Voraussetzungen für organotrophe Lebewesen wie Pilze und Tiere schuf. Die eukaryotische Zelle mit ihrer hochgradigen Strukturierung und ihrer großen Zahl spezialisierter Zellorganellen war schließlich in der Lage, den nun frei verfügbaren Sauerstoff optimal für die Zellatmung zu nutzen, was bekanntlich völlig neue evolutionäre Entwicklungswege ermöglichte. Ab diesem Moment kann man das Leben nicht mehr als „einfach“ bezeichnen. Es war nun in der Lage, hochmolekulare Verbindungen wie Fette, Eiweiße und Kohlenhydrate mit besserer Energieausbeute als Nahrung zu nutzen, was wiederum die Entstehung von Ökosystemen mit spezifischen Nahrungsketten bedingte. Das erhöhte den Selektionsdruck sowohl unter den Produzenten als auch unter den Konsumenten mit dem Resultat einer schnell fortschreitenden Diversifikation des Lebens auf der Erde.

Die Bereitstellung freier Energie ist nur eine Seite der Medaille. Exergone Reaktionen laufen bekanntlich spontan ab und müssen in Lebewesen enzymatisch reguliert werden. Außerdem muss die dabei freigesetzte Energie auf eine geeignete Weise zwischengespeichert werden, um sie bei Bedarf häppchenweise dem Aufbaustoffwechsel zur Verfügung stellen zu können. Beim irdischen Leben wird in dieser Hinsicht dem ATP und verwandten Verbindungen eine Schlüsselrolle zugeteilt. Als Stichwort und als Beispiele seien hier nur die für Stoffwechselvorgänge fundamentale Glykolyse und der noch effektivere Citratzyklus genannt (s. Abschn. 2.4.2.2).

Zusammenfassend muss man feststellen, dass sich das irdische Leben im Laufe seiner Entwicklung in mehreren Stufen immer effektivere Energiequellen erschlossen hat, insbesondere nachdem genügend viel organisches Material als Reduktionsmittel zur Verfügung stand. Sowohl der phototrophe (Pflanzen) als auch organotrophe (Bakterien, Pilze, Tiere) Energiestoffwechsel ist demnach ein weitgehend

evolutionär entstandener Prozess und entsprechend komplizierter als beispielsweise einfache Oxidationsreaktionen der Art (2.1). Letztere werden natürlich immer noch (und wie schon immer) von Mikroorganismen, die in anoxischen oder anderen extremen Biotopen vorkommen, mit Erfolg genutzt. Sie zeigen damit in besonders markanter Weise die große Anpassungsfähigkeit mikroskopischen Lebens an widrige Umweltbedingungen, weshalb sie von den Astrobiologen als „Extremophile" auch mit besonderer Aufmerksamkeit bedacht werden (s. Abschn. 2.9.1).

Betont man beim Begriff „Leben" mehr dessen Verbform, den Vorgang „leben", dann ist der Metabolismus quasi seine Daseinsweise. Denn nur er ermöglicht die aktive und permanente Selbsterhaltung eines Organismus im stetigen Kampf gegen seinen naturbedingten Zerfall. Nur aufgrund der komplexen Vernetzung von Katabolismus und Anabolismus und der sie ausmachenden stofflichen, energetischen und auch kommunikativen Prozesse wird der Vorgang „leben" überhaupt erst möglich. Und gerade dieser Vorgang macht die eigentliche Kluft zwischen lebender und nichtlebender Materie aus. Immerhin müssen hunderte, ja tausende auf äußerst komplizierte Weise miteinander verflochtene chemische Reaktionen simultan und selbstreguliert in einem extrem kleinen Volumen ($\sim 10^{-18}$ m^3) ablaufen – und zwar kommunikativ abgestimmt als harmonisches Ganzes. Und dieses Netzwerk muss auch genügend robust gegen äußere Störungen sein, damit es nicht gleich bei wechselnden Umgebungsbedingungen im Chaos auseinanderbricht.

2.1.1.3 Katalyse

In lebendigen Zellen läuft simultan eine Vielzahl äußerst komplexer chemischer Reaktionen ab, die miteinander gekoppelt sind und die u. a. dem Aufbau körpereigener Substanzen dienen. Es handelt sich dabei überwiegend um endergone, d. h. energieverbrauchende Reaktionen. Damit sie überhaupt schnell genug ablaufen können, benötigen sie spezifisch wirkende Katalysatoren, die auf eine genau definierte Weise auf die Aktivierungsenergie der entsprechenden chemischen Reaktion Einfluss nehmen. Diese spezifischen Katalysatoren sind chemisch gesehen gewöhnlich Proteine und werden in der Biochemie als Enzyme bezeichnet. Sie sind für die biochemischen Vorgänge in der Zelle fundamental, da sie den Energie- und Informationsfluss in der Zelle bestimmen und damit die Synthese strukturell genau festgelegter Makromoleküle ermöglichen. Jedes Enzym ist dabei auf eine oder wenige Reaktionen spezialisiert und wird im Laufe eines Reaktionszyklus nicht verändert. Eine moderne eukaryotische Zelle benötigt z. B. einige hundert verschiedene Enzyme, um ihre chemisch bedingten Lebensvorgänge aufrechtzuerhalten.

Der molekulare Bauplan eines Enzyms (allgemeiner: eines Proteins) ist im Fall des irdischen Lebens in einem speziellen Informationsmolekül hinterlegt, in der DNA (Desoxyribonukleinsäure). Von dort kann die Information ausgelesen, auf RNA (Ribonukleinsäure, hier speziell mRNA) umgeschrieben und in den speziellen „Proteinfabriken" der Zellen (Ribosomen) zur Synthese entsprechender Enzyme verwendet werden. In der Entstehungsphase des Lebens, so vermutet man, könnten Moleküle, die sowohl katalytische Wirkung entfalten als auch zugleich den Bauplan für ihre eigene Synthese in Form von RNA enthalten, eine wichtige Rolle gespielt haben. Diese speziellen Biokatalysatoren werden „Ribozyme" genannt.

Das Konzept der spezifischen Katalyse ist fundamental für „Leben, wie wir es kennen“. Es muss sich in primitiver Form bereits während der Phase der chemischen Evolution entwickelt haben. Im Laufe der Zeit sind dann anorganische Katalysatoren immer mehr von spezifisch wirkenden Polymeren, insbesondere Proteinen, ersetzt worden, die sich wiederum in Koevolution mit DNA/RNA auf bestimmte biochemische Reaktionen spezialisierten. Enzyme können dabei in ihrer Wirkung durch ein breites Spektrum von Cofaktoren (z. B. der Energiespeicher ATP) in ihrer Aktivität und Funktionsweise unterstützt werden. Darunter versteht man verschiedene Molekülgruppen, Moleküle oder Metallionen, welche die Funktionalität der Enzyme erst ermöglichen oder erweitern und damit u. a. das Feintuning von biochemischen Reaktionen ermöglichen. Sie können beispielsweise Einfluss auf die räumliche Ausrichtung des Enzyms und auf das zu verändernde Molekül nehmen oder das Enzym bei der Übertragung von Molekülgruppen oder Elektronen und Protonen auf das zu ändernde Molekül unterstützen. Im Unterschied zum eigentlichen Enzym gehen sie oftmals bei der Reaktion verloren und müssen anschließend – natürlich wieder enzymatisch gesteuert – ersetzt werden.

Spezifische Katalyse ist eine Grundvoraussetzung für alle metabolischen Lebensvorgänge. Sie ist deshalb unabdingbar für „Leben, wie wir es kennen“.

2.1.1.4 Regulation

Lebewesen stellen thermodynamisch offene Systeme dar, die durch einen ständigen Energie- und Stoffffluss in einem Fließgleichgewicht gehalten werden müssen. Dies ist nur durch eine feinabgestimmte innere Regulation aller Stoffwechselvorgänge möglich. Man kann auch sagen, das innere Milieu einer lebenden Zelle muss auch bei Veränderungen im äußeren Milieu (quasi der Umwelt) durch geeignete biochemische Maßnahmen aufrechterhalten werden. Dieser konstant zu haltende Zustand wird allgemein als „Homöostase“ bezeichnet und ist ein fundamentales Merkmal langzeitstabiler offener Systeme. Er erfordert die Übertragung von Signalen aus der Umwelt (die chemischer oder physikalischer Natur sein können) in die Zelle, um die notwendigen Regelleistungen zu veranlassen. Je komplexer ein Lebewesen ist, desto höhere Anforderungen werden an die innere Selbstregulation gestellt, die damit ein Schlüsselelement in der Physiologie von Lebensvorgängen darstellt.

2.1.1.5 Wachstum

Vermehrung setzt Wachstum voraus. Wachstum wiederum ist das Resultat aufbauender (d. h. anaboler) Stoffwechselvorgänge, welche die Menge der im Kompartiment eingeschlossenen Stoffe und das Kompartiment selbst unter Aufrechterhaltung der Homöostase vergrößern. Die Zelle wächst im Laufe der Zeit, bis sie sich teilt und Tochterzellen bildet. Am offensichtlichsten und beeindruckendsten sind Wachstumsprozesse bei Metabionta, wenn man bedenkt, dass der Mensch (Größe ~ 1,70 m) sich aus einer einzigen Eizelle mit einem Durchmesser von 0,13 mm entwickelt.

2.1.1.6 Programm

Leben ist notwendigerweise ein programmgesteuerter und damit informationsverarbeitender Prozess. Die „Software“ besteht in der Bauanleitung spezifischer

http://www.springer.com/978-3-662-47036-7

Astrobiologie
Scholz, M.
2016, XXI, 542 S. 82 Abb., 24 Abb. in Farbe., Softcover
ISBN: 978-3-662-47036-7