

3

Der Geist beginnt mit dem Leben

In seiner berühmten „Ignorabimus“- („wir werden es nicht wissen“-) Rede von 1880 nannte der berühmte Berliner Physiologe Emil Dubois-Reymond (1818–1896) neben der Entstehung des Bewusstseins die Entstehung des Lebens ein nie zu lösendes „Welträtsel“. Rund 140 Jahre später wissen wir immer noch nicht genau, wie und wo Leben zuerst entstanden ist, aber die Mehrzahl der Naturwissenschaftler sieht diesen Umstand nicht mehr als Welträtsel an, sondern als ein Problem, das durch geduldiges Forschen ebenso wie durch glückliches Entdecken seiner Lösung näher gebracht wurde. Es hat seinen mystischen Glanz verloren. Ich gehe davon aus, dass dies mit dem „Mysterium Geist“ genauso sein wird.

Was ist Leben?

Über die Frage, was Leben ist bzw. wie es sich vom Unbelebten unterscheidet, ist seit dem Altertum viel nachgedacht und geschrieben worden. Die bis weit in die Neuzeit hinein am weitesten verbreitete Anschauung war, dass den Lebewesen ein lebendig machendes Prinzip innewohnt, *pneuma*, *anima* oder *spiritus* genannt, wobei diese Begriffe „Atem“ bzw. „Lebensatem“ („Odem“) und davon abgeleitet „Seele“ oder „Geist“ bezeichnen. Bei Aristoteles findet man eine Untergliederung der

Lebewesen in drei Reiche: das Reich der Pflanzen, das der Tiere und das des Menschen. *Pflanzen* stellen dabei die niedrigste Stufe des Lebens dar und weisen lediglich die Fähigkeit zu Ernährung und Fortpflanzung auf. Das zugrunde liegende Prinzip nannte man später die „*anima vegetativa*“ oder „Pflanzenseele“. Bei *Tieren* kommt die Fähigkeit zur Selbstbewegung und zu Sinnesleistungen hinzu, die später als „*anima animalis*“ oder „Tierseele“ bezeichnet wurde. Der *Mensch* schließlich besitzt die „*anima rationalis*“, die „Vernunftseele“. Der Mensch hat also etwas, das alle anderen Lebewesen nicht haben, nämlich Vernunft (*ratio* oder *intellectus*).

Verwandt mit der antiken Pneuma- oder Anima-Lehre ist der neuzeitliche *Vitalismus*. Seine Anhänger glaubten, Leben beruhe auf einem besonderen lebendig machenden Prinzip, das oft „*vis vitalis*“ oder „*élan vital*“ genannt wurde; beide Begriffe bedeuten „Lebenskraft“. Dieses Prinzip sollte jenseits der physikalisch-chemisch-physiologischen Prinzipien wirken und durch deren Gesetze auch nicht erklärbar sein. Bedeutende Entwicklungsbiologen wie Hans Driesch vertraten noch im 20. Jahrhundert eine solche Anschauung. Verknüpft mit dem Vitalismus war die Vorstellung, die für Prozesse des Lebendigen wichtige „organische Chemie“ sei fundamental verschieden von der „anorganischen Chemie“ – daher auch die unterschiedlichen Bezeichnungen. Dies wurde bereits im 19. Jahrhundert durch den deutschen Chemiker Friedrich Wöhler widerlegt, dem es gelang, Harnstoff – eine typische organisch-chemische Verbindung – aus anorganischen Komponenten zu synthetisieren. Heute bezeichnet der Begriff „organische Chemie“ die Chemie der Kohlenstoffverbindungen. Dennoch hielten auch nach Wöhler viele Biologen und Mediziner (wie der berühmte Louis Pasteur) an der Anschauung fest, Lebewesen zeichneten sich durch den Besitz einer einzigartigen, naturwissenschaftlich nicht erklärbaren Fähigkeit oder Kraft aus.

Dem steht die heute in den Naturwissenschaften allgemein akzeptierte Vorstellung entgegen, dass Leben eine spezielle

Organisationsform nichtlebendiger Bausteine ist. Bei diesen Bausteinen handelt es sich vor allem um Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor sowie Natrium, Kalium, Chlorid, Eisen, Jod, Calcium und Magnesium. Diese Stoffe, vor allem Wasserstoff und Kohlenstoff, verbinden sich zu ausgedehnten Strukturen – Makromolekülen wie Nucleinsäuren, Eiweißen (Proteine), Fettsäuren und Kohlenhydraten –, die zugleich bestimmte Funktionen aufweisen und in selektiver Weise miteinander wechselwirken.

Die Frage, ob die heute existierende Zusammensetzung lebender Materie zwingend ist oder ob Leben auch aus ganz anderen chemischen Bestandteilen entstehen könnte, ist nicht eindeutig zu beantworten. Alternativen zu Wasserstoff und Kohlenstoff wären Silizium und Aluminium, die häufig genug auf der Erde vorkommen und ähnliche strukturbildende Eigenschaften besitzen. Aufgrund dieses Mangels an Wissen ist es nicht möglich, Leben allein über seine chemischen Bestandteile hinreichend zu definieren. Leben in seiner auf der Erde existierenden Form ist offenbar nur einmal entstanden, und es könnte sein, dass es auf der Erde andere mögliche Formen des Lebens verdrängt hat. Ebenso könnte Leben auf anderen Planeten des Weltalls in einer anderen als der irdischen Form existieren.

Dieses Problem führt uns zu der alternativen Herangehensweise, Leben nicht vornehmlich *materiell*, sondern *formal* zu definieren, nämlich als eine bestimmte Form der Wechselwirkung nichtlebender, aber für das Leben wesentlicher Bausteine. In einem grundlegenden Sinne kann man Lebewesen als selbsterstellende und selbsterhaltende Systeme definieren, das heißt *Selbsterstellung* und *Selbsterhaltung* sind die Basiseigenschaften von Lebewesen (an der Heiden et al. 1984a, 1984b, 1985; Roth 1986). Selbsterstellung bedeutet dabei das Auftreten eines bestimmten Ordnungszustandes, der über die Wechselwirkung der Komponenten eines Systems erreicht und nicht wesentlich extern vorgegeben wird. Lebewesen stellen ihre Bestandteile selber her, und diese fügen sich „von selbst“ zu einer strukturellen

und funktionalen Ordnung zusammen, die *nicht* von außen aufgezwungen ist und auch gar nicht aufgezwungen werden kann, denn kein Biologe weiß zur Zeit genau, wie man so etwas machen müsste. Wir erkennen also zwei wichtige Grundprinzipien des Lebens, nämlich erstens die Herstellung der Bausteine der Lebewesen durch die Lebewesen selbst und zweitens das richtige Zusammenfügen dieser Bestandteile zu einer ganz bestimmten Ordnung. Diese *Selbsterstellung* eines Ordnungszustandes ist keineswegs ausschließlich bei Lebewesen zu finden, vielmehr gibt es in der unbelebten Natur viele Prozesse, die dem Phänomen der Selbsterstellung nahekommen, und Lebewesen haben nur eine besondere Art von Selbsterstellung entwickelt. Um die präbiotischen Arten von Selbsterstellung von Ordnungszuständen zu verstehen, müssen wir etwas weiter ausholen und uns mit dem schwierigen Begriff der *Ordnung* befassen.

Ordnung, Selbsterstellung und Selbsterhaltung

Ordnung kann statisch oder dynamisch sein. Natürlich gibt es in unserem Universum nichts, was im strengen Sinne statisch ist. Alles verändert sich, aber manches verändert sich sehr schnell und anderes sehr langsam. Nur eine Art von Gebilde scheint dem unvermeidlichen Zerfall zu trotzen, nämlich Lebewesen. Leben ist vor 3,5 bis 4,4 Milliarden Jahren entstanden und hat bisher alles überdauert, was auf unserer Erde an Katastrophen auftrat, und es gibt keinerlei Anzeichen dafür, dass es mit dem Leben auf der Erde in absehbarer Zeit zu Ende gehen wird. Selbst wenn einzelne Arten – unter denen durchaus auch der Mensch sein könnte – von der Erde verschwinden, andere (Bakterien, Schachtelhalme oder Würmer) werden überleben und weiterexistieren.

Leben ist, anders als ein Kristall, kein statischer, sondern ein *dynamischer* ordnungsbildender Prozess; dieser existiert, während

er sich ändert, wobei die Änderungen mit dem Weiterexistieren kompatibel sein müssen. Das ist das im Prinzip fast triviale, aber entscheidende Merkmal von Leben: Ein Lebewesen muss sich ändern, um weiterexistieren zu können, denn nur durch Änderungen in Form des ständigen Ersatzes, *Stoffwechsel* genannt, kann es dem ansonsten unvermeidlichen Zerfall entgegenwirken.

Das Grundprinzip des Ganzen ist das, was der Biosystemtheoretiker Ludwig von Bertalanffy als *Fließgleichgewicht* bezeichnete: ein dynamischer quasi-stationärer Zustand, bei dem fortwährend Substanzen und Energie in ein System eingebracht und Reaktionsprodukte herausgebracht werden. Es handelt sich um ein Gleichgewicht von Aufbau und Abbau, auch *Homöostase* genannt, sozusagen eine ständige Reparatur, wobei nicht verlangt wird, dass die Reparatur immer denselben Zustand wiederherstellt.

Lebewesen sind die einzigen uns bekannten selbstherstellenden *und* selbsterhaltenden Systeme. Selbstherstellung allein wird in der unbelebten Natur häufiger gefunden, und manche selbstherstellenden Systeme zeigen sogar vorübergehend Merkmale der Selbsterhaltung und damit eines Fließgleichgewichts. Hierzu gehören all diejenigen physikalisch-chemischen Systeme, die eine räumlich-zeitliche *Musterbildung* aufweisen. Diese Musterbildung wird etwa dadurch erreicht, dass komplexe chemische Prozesse in Gang kommen, die sich gegenseitig beeinflussen und dabei einen Zyklus durchlaufen, der in der Regel zu einem Anfangspunkt zurückkehrt – es muss aber nicht unbedingt genau derselbe sein. Chemische selbstorganisierende Systeme sind solche Prozesse, die durch Reaktions-Diffusions-Gleichungen beschrieben werden, einschließlich der Existenz von positiven und negativen Rückkoppelungen und autokatalytischen Prozessen. Solche selbstorganisierenden Prozesse gehören sämtlich in die Klasse der Nichtgleichgewichtsprozesse, zu denen die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion, der Winfree-Oszillator oder die Bénard-Konvektion gezählt werden, aber auch bekanntere

Vorgänge wie Wolkenbildung, wachsende Kristalle oder die Kerzenflamme.

Typischerweise zerfallen solche selbstorganisierend entstandenen Ordnungszustände wieder, und zwar in der Regel umso schneller, je komplizierter sie sind, da sie thermodynamisch einen unwahrscheinlicheren Zustand darstellen. Auch Lebewesen befinden sich in einem thermodynamisch unwahrscheinlichen Zustand hoher Ordnung. Aber sie sind, wie oben schon erläutert, in der Lage, diesen Ordnungszustand aufrechtzuerhalten, indem sie sich nicht nur stets mit Energie und Materie versorgen, sondern in diesem Prozess fortwährend Ordnung importieren, und zwar auf Kosten der Ordnung in der Umgebung. Dies ist der physikalische und thermodynamische Aspekt ihrer *Selbstorganisation*. Lebewesen sind die einzigen bekannten Systeme, die dauerhaft zur Selbstorganisation fähig sind. Sie sind in diesem Sinne *autonom*, während die nichtlebenden selbsterhaltenden Systeme *heteronom* sind.

Heteronomie bedeutet hier, dass ein System entscheidend von Kräften oder Zuständen *außerhalb des Systems* abhängt. Ein Bénard-Zellen-System bricht sofort zusammen, wenn die Wärmezufuhr abgestellt wird. Die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion zeigt ihre Farboszillationen nur so lange, bis Kaliumbromat und Malonsäure aufgebraucht sind. Auch eine Flamme brennt nur so lange, bis die Kerze mit Docht und Wachs abgebrannt ist. Das Entscheidende dabei ist, dass die Bénard-Zellen keinen Einfluss auf die Wärmezufuhr nehmen, die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion nicht aktiv neues Kaliumbromat und neue Malonsäure herbeischafft und sich auch die Flamme nicht selbst mit Docht und Wachs versorgt. Alle diese Systeme sind von externen Faktoren abhängig, meist von der Hilfe des Menschen. Wären sie zur Selbstversorgung in der Lage, so kämen sie unserer Definition von Lebewesen als selbsterhaltenden Systemen schon sehr nahe.

Der Kritiker wird einwenden, dass auch Lebewesen nicht *völlig* autonom sind. Sollte die Sonne die Erde für einige Zeit

nicht mehr bescheinen, so würde das allermeiste Leben von der Erde verschwinden: Zunächst würden alle vom Sonnenlicht abhängigen (*photoautotrophen*) Einzeller und alle Pflanzen aussterben und als Folge davon alle Tiere, weil diese sich von Pflanzen oder pflanzenfressenden Tieren ernähren. Aber selbst *chemoautotrophe* Bakterien, die kein Sonnenlicht benötigen, brauchen energiereiche chemische Verbindungen, zum Beispiel Schwefelwasserstoff. Ein Lebewesen ist kein Perpetuum mobile, das ohne Zufuhr von Energie auskommt, vielmehr macht es sich bereits vorhandene Energie zunutze. Der wichtige Unterschied zwischen Lebewesen und den oben genannten physikalischen und chemischen selbstorganisierenden bzw. selbsterstellenden Systemen besteht aber darin, dass Lebewesen *aktiv* für die Aufrechterhaltung ihres Ordnungszustandes sorgen, indem sie zwecks Energie- und Stoffzufuhr mit der Umwelt wechselwirken.

Im günstigsten Fall findet das Lebewesen Energie und Materie in ausreichender Menge in seiner unmittelbaren Umgebung. Eigentlich braucht es die benötigten Substanzen nur über den Konzentrationsgradienten durch seine Membranen hineinzu lassen. Jedoch werden sich in seiner unmittelbaren Umgebung auch Stoffe befinden, die das Lebewesen nicht benötigt oder die ihm schaden können. Seine Membranen müssen also *selektiv* sein, das heißt sie dürfen nur bestimmte Stoffe hereinlassen und umgekehrt andere hinauslassen. *Dies ist die Urform einer selektiven Interaktion von Lebewesen mit ihrer Umwelt.*

Allerdings befindet sich die benötigte Nahrung sich nicht immer in ausreichendem Maße in unmittelbarer Reichweite, meist muss man sie aufsuchen oder herbeischaffen. Dennoch gibt es verschiedene Lebewesen, deren Existenz dem Leben im Schlaffenland ziemlich nahe kommt. Ein Beispiel hierfür sind die Pflanzen, die der Luft Kohlendioxid und dem Boden Wasser entnehmen und daraus mithilfe des Sonnenlichtes im Prozess der Photosynthese Glucose und Stoffwechselenergie produzieren. Sie haben einen lichtgesteuerten Tag-Nacht-Rhythmus, sie

zeigen Phototropismus und Geotropismus, das heißt sie richten sich in ihrem Verhalten eindeutig nach Umweltreizen wie Licht und Schwerkraft. Das andere Beispiel sind sogenannte Endoparasiten wie der Bandwurm, die sich in den Stoffwechsel der Wirtstiere „einklinken“. Diese Tiere zeichnen sich in aller Regel durch ein sehr reduziertes Nervensystem und sehr einfache Sinnesorgane aus, denn die Nahrung kommt sozusagen zu ihnen. Trotzdem geht es auch in diesen einfachsten Fällen von Energie- und Nahrungsbeschaffung nicht ohne Informations- und Kommunikationsmechanismen ab, wie wir noch sehen werden.

Leben, Energiegewinnung und Energiestoffwechsel

Leben ist notwendig an Stoffwechsel gebunden. Stoffwechsel bedeutet zum einen *Energiestoffwechsel*, nämlich Gewinnung von Energie für energieverbrauchende Prozesse, und zum anderen *Baustoffwechsel*, nämlich Aufbau und Wachstum von Strukturen. Energiestoffwechsel beruht immer darauf, dass aus der Umgebung Energie aufgenommen wird, die dann dem Erhaltungs- und Baustoffwechsel zur Verfügung gestellt wird.

Die ursprünglichste Form der Energiegewinnung ist der *Chemotrophismus*. Energiequellen sind hier energiereiche anorganisch-chemische Verbindungen wie Schwefelwasserstoff, die aufgebrochen werden, wobei die in der chemischen Bindung gespeicherte Energie freigesetzt und durch spezielle Mechanismen aufgefangen wird. Wichtig beim Energiestoffwechsel ist die Gewinnung von Protonen (H^+) und Elektronen. So zerlegen *Schwefelbakterien* beispielsweise Schwefelwasserstoff (H_2S) in Schwefel und zwei Wasserstoff-Atome nebst ihren Elektronen, die von geeigneten „Akzeptoren“ aufgenommen werden. *Methanbakterien* wiederum setzen Kohlendioxid und Wasserstoff zu Methan und Wasser um und gewinnen dabei Energie. Dabei bilden sie das gefährliche Methangas.

Energieakzeptoren und damit auch Energieüberträger sind in Lebewesen meist Nucleosidphosphate, denn sie nehmen H-Atome bereitwillig auf und geben sie ebenso bereitwillig ab. Hierzu gehören das Adenosin- und Guanosin-Phosphat, die als Triphosphat (ATP, GTP), Diphosphat (ADP, GDP) oder Monophosphat (AMP, GMP) vorliegen können. Daher ist das Triphosphat die energiereichste Verbindung. Der Abbau von Tri- zu Di- und schließlich zu Monophosphat setzt umgekehrt Energie frei, die zum Aufbau anderer Strukturen verwandt werden kann. ATP bzw. GTP und ADP bzw. GDP sind daher sehr gute *Energieüberträger*.

Hauptenergielieferant der meisten Lebewesen ist das Sonnenlicht, dessen Energie über den *Phototrophismus* zur Spaltung des Wassermoleküls benutzt wird. Dies ist ein äußerst trickreicher Prozess. Das erste Auftreten des Phototrophismus, wahrscheinlich bei Cyanobakterien („Blualgen“), war einer der folgenreichsten Schritte der biologischen Evolution. Zum einen gab es hierfür in Form des Sonnenlichts eine für irdische Verhältnisse praktisch unbegrenzte Energiequelle, zum anderen entstand bei der Photosynthese durch Vereinigung von CO_2 und den Bruchstücken des H_2O neben Glucose auch Sauerstoff (O_2), der schließlich zusammen mit dem Stickstoff den Hauptteil unserer Atmosphäre bildete, ohne die Pflanzen und Tiere und wir Menschen nicht leben können.

Aus Kohlendioxid und Wasser entstehen bei der Photosynthese Zucker (Glucose) und Sauerstoff. Beide Bestandteile werden in raffinierter Weise weiterverwendet. Zum einen geht es um Glucose als Energielieferant. Die in dem Glucosemolekül gespeicherte Energie kann bei Bedarf wieder hervorgeholt werden, indem das Molekül zu Brenztraubensäure (Pyruvat) abgebaut wird. Dies nennt man *Glycolyse*. Hierbei entstehen pro Glucose-Molekül zwei Moleküle ATP. Beim sogenannten *oxidativen Stoffwechsel* (Zitronensäurezyklus plus oxidative Phosphorylierung), auch Zellatmung genannt, entstehen neben Kohlendioxid und Wasser hingegen 36 Moleküle ATP. Der Unterschied zwischen

der Glykolyse und der oxidativen Energiegewinnung ist also beträchtlich, denn er beträgt 34 Moleküle ATP.

Die Entstehung des ersten Lebens

Über die tatsächliche Entstehung des Lebens auf unserer Erde gibt es keine Einigkeit. Allgemein wird angenommen, dass die ersten Lebewesen vor 4,4 bis 3,5 Milliarden Jahren auf der Erde entstanden sind, also rund eine Milliarde Jahre nach der Entstehung der Erde. Nach vorherrschender Meinung ist Leben auf der Erde allmählich entstanden, indem sich die wichtigsten niedermolekularen chemischen Bausteine, nämlich Methan, Ammoniak, Wasser, Hydrogensulfid, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid sowie Phosphat zu kleinen Einheiten, sogenannten organischen Monomeren wie Aminosäuren und Nucleinsäuren zusammenschlossen, die wiederum langkettige Gebilde wie Peptide und RNA- oder DNA-Stränge formten. Wie es dazu aber im Einzelnen kam, ist bis heute umstritten. Einige Forscher nehmen an, dass die organischen Monomere auf der Erde entstanden sind, sind sich aber uneins über den genauen Vorgang, andere glauben, dass solche organischen Monomere oder sogar primitive Formen des Lebens aus dem Weltall zu uns gekommen sind (s. unten), was allerdings das Problem der Entstehung des Lebens nur an einen anderen Ort verlagert.

Eine lange vorherrschende Meinung geht davon aus, dass die ursprüngliche Atmosphäre der Erde reich an Ammoniak, Methan und Wasserstoff war. In ihrem berühmten Experiment konnten Stanley Miller und Harold Urey im Jahre 1953 zeigen, dass sich aus einer „Ursuppe“ aus Wasserstoff, Methan, Ammoniak und Wasserdampf unter Zufuhr hoher Energie (etwa in Form von „Gewitterblitzen“) organische Verbindungen wie Formaldehyd, Blausäure, Aminosäuren und langkettige Kohlenwasserstoffe bildeten. Zudem ließ sich zeigen, dass sich der Zusammenschluss von Monomeren zu langen Ketten (die so-

Wie einzigartig ist der Mensch?

Die lange Evolution der Gehirne und des Geistes

Roth, G.

2010, XXII, 442 S. 54 Abb., 20 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-8274-2147-0