©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

Osnabrücker Naturw. Mitt.	1	S. 13–28	Osnabrück 1972

Die Entstehung des Lebens
Denkmodelle und naturwissenschaftliche Versuche*

von Gottfried Krampitz[1]

Die Charakteristika des Lebens

Man kann die Natur des Lebens damit zu definieren beginnen, indem man diejenigen Eigenschaften zusammenstellt, die lebende Organismen besitzen und die nichtlebenden Organismen fehlen.
Die Ergebnisse können ein zufriedenstellendes Mittel darstellen, um zwischen dieser besonderen zweifachen Teilung des Universums zu unterscheiden.
Alle lebenden Dinge zeigen die Fähigkeit zur unabhängigen Bewegung gegen eine Kraft. Ein Wassertropfen läuft nur wegen der Anziehungskraft der Erde nach unten und nicht aus eigenem Vermögen. Im Gegensatz dazu kann eine Raupe gegen die Erdanziehung nach oben kriechen. Sogar Lebewesen können bewegungslos erscheinen, aber trotzdem partielle Bewegungen ausführen. Eine Auster kann während ihres Erwachsenenlebens an einen Felsen geheftet bleiben; sie öffnet und schließt aber ihre Schale. Pflanzen bewegen sich, wenn sie sich der Sonne zuwenden. Außerdem gibt es in allen Organismen kontinuierliche Bewegungen innerhalb der Substanzen, die die Zellen aufbauen.
Typischerweise sind alle Lebewesen reizbar, d. h., sie können auf verschiedene Weise empfinden und ihrer Art entsprechend auf Reize oder chemische oder physikalische Veränderungen ihrer Umgebung reagieren. Das Ergebnis dieser Reaktion ist eine Veränderung in dem Organismus, die ihm erlaubt, zu überleben oder so angenehm wie möglich zu leben. Pflanzen z. B. fühlen die Anwesenheit von Licht und Wasser. Demzufolge richten sie ihre Wurzeln in Richtung auf das Wasser und die Blätter dem Licht entgegen. Sogar sehr einfache, mikroskopisch kleine Lebensformen können die Anwesenheit von Nahrung oder Gefahren wahrnehmen.

* Vortrag gehalten am 3. 11. 1970 in Osnabrück

[1] Prof. Dr. Gottfried Krampitz (Lehrbereich Biochemie), Institut für Anatomie und Physiologie der Haustiere, Universität Bonn, 53 Bonn, Katzenburgweg 7–9

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

Ein anderes Charakteristikum aller Lebewesen ist der Stoffwechsel, die Summe aller biochemischen Prozesse, durch die ein Organismus das Material seiner Umgebung in seine eigene Substanz umwandelt. Im Verlauf des Stoffwechsels müssen diese Materialien mechanisch zerbrochen, befeuchtet oder sonst in irgendeiner Form behandelt werden. Sie müssen ferner chemisch verändert werden, wobei große und komplizierte chemische Einheiten oder Moleküle in kleinere verwandelt werden. Die einfachen Moleküle werden dann in die lebende Struktur resorbiert. Dort werden einige zur Energiegewinnung abgebaut und der Rest wird – zunächst teilweise in umgewandelter Form – in die komplexen Komponenten der Struktur eingebaut. Substanzen, die nicht verwertet werden können, werden dann eliminiert. Die verschiedenen Phasen dieser Prozesse umfassen Respiration, Verdauung, Resorption, Assimilation und Exkretion.

Lebewesen wachsen normalerweise. Als Ergebnis der metabolischen Vorgänge kann mehr und mehr der Substanzen der Umgebung in Körpersubstanz oder Protoplasma umgewandelt werden. Wachstum kann aus der Vergrößerung individueller Zellen, einer Zunahme der Anzahl der Zellen oder aus beiden Prozessen herrühren. Die Tiere und Pflanzen besitzen eine begrenzte Wachstumsperiode, die bei den Tieren im Erwachsenenstadium für die Spezies charakteristisch ist.

Lebewesen zeigen weiterhin die Fähigkeit, sich zu vermehren. Sie können auf verschiedene Weise neue Lebewesen, wie sie selbst, produzieren. Die Reproduktion ist das Mittel, durch das die Kontinuität des Lebens gewährleistet wird. Ein Objekt, das alle diese Fähigkeiten besitzt, kann man eindeutig als lebend bezeichnen und ein Objekt, das keine dieser Eigenschaften aufweist, ist ebenso eindeutig nicht lebend. Aber die Situation ist keineswegs immer so klar; z. B. wächst ein erwachsener Mensch nicht mehr, und ein anderes Individuum vermehrt sich nie. Beide Fälle wird man aber als lebend ansprechen müssen. Der Grund hierfür liegt darin, daß das Wachstum in gewissen Lebensabschnitten stattgefunden hat und daß die Fähigkeit zur Vermehrung potentiell vorliegt. In ähnlicher Weise kann man Samen ansehen. Sie zeigen keine Bewegung und keine Reizempfindlichkeit; aber unter geeigneten Bedingungen fangen Samen plötzlich an zu wachsen.

Auf der anderen Seite wachsen Kristalle in Lösung; es bilden sich neue Kristalle. Ein Thermostat empfindet die Temperatur und reagiert entsprechend. Feuer könnte als ein Prozeß angesehen werden, durch den Brennstoff verzehrt und in einfachere Substanzen umgewandelt wird in die Struktur der Flamme und bei der die Asche als Stoff eliminiert wird, der nicht weiter verwertbar ist (Exkremente). Darüber hinaus bewegt sich die Flamme fortlaufend, sie kann leicht wachsen und sich selbst vermehren. Allerdings ist keines dieser Beispiele als lebend anzusehen. Deshalb

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

müssen die Eigenschaften des Lebens gründlicher untersucht werden. Der Schlüssel liegt in einem Vorgang, der schon vorher erwähnt worden ist; ein Wassertropfen kann nur der Schwerkraft folgen, während eine Raupe sich gegen die Schwerkraft fortbewegen kann.

Es gibt zwei Typen der Veränderung: ein Typ umfaßt eine Zunahme einer Eigenschaft, den die Physiker Entropie nennen, der andere betrifft die Abnahme dieser Eigenschaft. Unter Entropie kann man sich die Größe der Zufallsverteilung oder „Unordnung" im Universum vorstellen. Veränderungen, die zu einer Zunahme der Entropie führen, treten spontan auf, d. h., sie ereignen sich von selbst. Beispiele sind die Abwärtsbewegung eines Steins, der ins Tal rollt, die Explosion von Wasserstoff und Sauerstoff zur Wasserbildung, das Aufrollen einer Spirale und das Verrosten von Eisen.

Veränderungen, die eine Abnahme der Entropie bewirken, ereignen sich nicht spontan. Sie treten nur durch den Einfluß einer Energiequelle ein; z. B. kann ein Stein bergauf gestoßen werden, Wasser kann in Wasserstoff und Sauerstoff durch elektrischen Strom getrennt werden, eine Feder kann durch Muskelkraft gespannt werden, und Eisenrost läßt sich durch genügend Hitze in Eisen umschmelzen. Man kann mit einiger Sicherheit annehmen, daß irgendeine Veränderung, die gegen einen bestehenden Widerstand gerichtet ist, oder etwas relativ Einfaches in etwas relativ Komplexes umwandelt, oder etwas relativ Ungeordnetes in etwas Geordnetes überführt, die Entropie verringert. Keine dieser Veränderungen tritt spontan auf.

Die charakteristischsten Aktionen von Lebewesen sind mit einer Abnahme der Entropie befaßt. Lebende Bewegung wirkt sehr oft gegen die Schwerkraft oder andere Widerstände; und der Stoffwechsel als Ganzes tendiert dahin, aus einfachen Molekülen komplizierte Baueinheiten zu produzieren. Dies alles geschieht auf Kosten der Energie, die aus der Nahrung stammt oder letztlich aus dem Sonnenlicht. Die Gesamtveränderung der Entropie in diesem System, das Nahrung oder Sonnenlicht umfaßt, stellt einen Zuwachs dar. Trotzdem ergibt sich aus den lokalen Veränderungen einschließlich der lebenden Organismen eine direkte Abnahme der Entropie.

Kristallwachstum andererseits ist ein rein spontaner Effekt, der einen Zuwachs an Entropie bedeutet. Es ist nur ein Anschein von Leben, wenn Wasser von einem Baumstamm herabrinnt. In ähnlicher Weise führen alle physikalischen und chemischen Veränderungen in einem Feuer zu einer Zunahme von Entropie. Auf der Grundlage dieser Tatsachen ist es sicher, Leben als Eigenschaft von solchen Objekten zu definieren, die entweder tatsächlich oder potentiell, ganz oder teilweise, sich bewegen, fühlen, einen Stoffwechsel besitzen, wachsen und sich vermehren und zwar in einer Weise, die zur Abnahme ihres Entropie-Vorrates führt.

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

Ein Zeichen von abnehmender Entropie ist zunehmende Organisation, d. h., eine zunehmende Zahl von Bauteilen, die miteinander in zunehmend komplexer Weise verbunden sind. Es ist nicht überraschend, daß lebende Objekte im allgemeinen höher organisiert sind als ihre nicht belebte Umwelt. Die Substanzen, aus denen selbst die einfachsten Lebensformen aufgebaut sind, besitzen eine viel größere Vielfalt und ein Netzwerk von komplexen Querbeziehungen als die Substanzen, die die kompliziertesten Mineralien aufbauen.

Die Formen des Lebens

Alle sichtbaren Formen des Lebens scheinen in eine von zwei extrem breit angelegten Gruppen zu fallen: Pflanzen und Tiere.
Im allgemeinen wurzeln Pflanzen im Boden oder treiben passiv im Wasser, während Tiere häufig die Fähigkeit zu freiwilliger, sofortiger Bewegung besitzen. Pflanzen können die Energie des Sonnenlichtes direkt dazu benützen, um den Stoffwechsel zu stützen; sie machen zu diesem Zweck Gebrauch von grünen Verbindungen, dem Chlorophyll. Tiere, denen das Chlorophyll fehlt, beziehen ihre Energie aus komplexen Verbindungen der Nahrung, die sie aufnehmen. Die Tiere können sich direkt von Pflanzen ernähren, oder sie fressen andere Tiere, die sich ihrerseits von Pflanzen ernährt haben. Sie erhalten ihre Energie mittelbar vom Sonnenlicht.
Die Einteilung der Lebewesen in Pflanzen und Tiere kann dadurch erweitert werden, indem man die Kleinlebewesen hinzuzieht.
Es gibt ungefähr 400 000 Pflanzenspezies und mehr als eine Million Tierspezies; dabei werden laufend neue Spezies entdeckt. Es erhebt sich nun die Frage, was so viele unterschiedliche Spezies gemeinsam besitzen. Das bloße Auge kann hier keine Antwort finden. Aber bereits 1838 hat der deutsche Botaniker MATTHIAS J. SCHLEIDEN vermutet, daß alle Pflanzen aus mikroskopisch kleinen Einheiten, genannt Zellen, aufgebaut sind. 1839 erweiterte der Zoologe THEODOR SCHWANN die Zelltheorie, indem er sie auch auf die Tiere ausdehnte.

Die Zelle

Jede Zelle stellt eine selbständige Einheit dar, die von allen anderen Zellen durch Membranen getrennt ist. In jeder Zelle kommen alle die Fähigkeiten zum Ausdruck, die mit Lebensvorgängen assoziiert sind. Organismen, die mit dem bloßen Auge erkennbar sind, werden von einer Vielzahl von Zellen zusammengesetzt. Ein erwachsener Mensch z. B. besteht aus

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

ungefähr 50 Trillionen Zellen. In solch einem vielzellulären Organismus ist jede Zelle auf die Anwesenheit von anderen Zellen angewiesen; die Einzelzelle ist unter normalen Bedingungen nicht in der Lage, isoliert zu leben. Es gibt natürlich einige Zellen, die unabhängig lebensfähig sind. Die meisten Formen der Mikroorganismen sind einzellige Lebewesen, d. h., sie bestehen nur aus einer einzelnen Zelle. Schließlich beginnt das Leben, selbst von großen Lebewesen wie der Mensch, als einzeln befruchtete Zelle.
Wie schon erwähnt, stellt die strukturelle Grundeinheit aller Pflanzen und Tiere die Zelle dar. Jene Teile eines Lebewesens, die nicht aus aktiven Zellen aufgebaut sind, kann man nicht als lebend bezeichnen. Ein Tierhaar ist nicht lebend, ebensowenig wie eine Muschelschale oder eine Feder. Das bedeutet allerdings nicht unbedingt, daß der Organismus ohne die nichtlebenden Teile lebensfähig ist. Im Gegensatz dazu fehlen nichtlebenden Dingen aktive Zellen. Der Ausdruck „aktive Zellen" bedeutet, daß diese Zellen die charakteristischen Aktionen des Lebens ausführen können. Auf diese Weise läßt sich der Begriff Leben definieren als die Eigenschaft von Objekten, die aus Zellen aufgebaut sind und die Fähigkeit haben zur unabhängigen Bewegung (vor allem von Substanzen innerhalb der Zellen), zur Reizwahrnehmung, zum Stoffwechsel, zum Wachstum und zur Fortpflanzung. Dies schließt jede Möglichkeit aus, nichtzelluläre Objekte wie Kristalle und Feuer als lebend zu bezeichnen.

Die Chemie des Lebens

Zellen enthalten eine enorm komplexe Mischung von Substanzen, aber diese Substanzen sind nur aus einigen wenigen Elementen aufgebaut. Fast alle Atome, die eine Zelle enthält, gehören zu folgenden Elementen: Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel. Es gibt noch kleine Mengen anderer Atome wie Eisen, Kalzium, Magnesium, Natrium, Kalium und Spuren von Kupfer, Kobalt, Mangan und Molybdän.
Innerhalb der Zellen kommen die Atome in Verbänden vor, den Molekülen, die in der Hauptsache in drei Stoffgruppen unterschieden werden können: Kohlenhydrate, Lipide (Fette) und Proteine (Eiweiß). Von diesen sind die Proteine am kompliziertesten aufgebaut. Kohlenhydrate und Fette enthalten Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, dagegen besitzen Proteine außerdem noch Stickstoff und Schwefel. Beim Abbau von Kohlenhydraten und Fetten findet man gewöhnlich nur einige wenige Bausteine. Zerlegt man aber Proteine, dann stellt man meist weniger als 20 Baueinheiten fest. Diese Proteinbausteine nennt man Aminosäuren.
Proteine sind von besonderer Bedeutung in Verbindung mit den tausenden verschiedenen chemischen Reaktionen, die fortlaufend in Zellen statt-

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

finden. Die Geschwindigkeit dieser verschiedenen Reaktionen wird durch eine Gruppe von Proteinmolekülen kontrolliert, die Enzyme genannt werden. Es gibt praktisch für jede Reaktion ein spezifisches Enzym.
Die Zelle enthält eine Vielzahl verschiedener Enzyme. Jedes Enzym ist in bestimmten Mengen vorhanden und oft auch in speziellen subzellulären Strukturen untergebracht. Weil das Enzym-Muster auch das Muster der chemischen Reaktionen bestimmt, kontrolliert es auch die Natur der Zelle und die Merkmale der Organismen. Die Eigenschaften der Enzym-Moleküle hängen insbesondere von der Anordnung der Aminosäuren ab. Die Zahl der möglichen Anordnungen und Verteilungen ist unvorstellbar groß; z. B., wenn ein Enzym aus 500 Aminosäurenmolekülen von 20 verschiedenen Aminosäurenspezies aufgebaut ist, dann beträgt die gesamte Zahl der möglichen Kombinationen 10^{1100}. Es erhebt sich die Frage, wie eine Zelle die speziellen Anordnungen aus der Vielzahl von Möglichkeiten auswählt.
Die Antwort liegt in den Chromosomen, dünnen, fadenförmigen Strukturen innerhalb der Zelle. Wenn sich die Zelle teilt, wird jedes Chromosom verdoppelt. Es entsteht jeweils die genaue Kopie jedes Chromosoms. Dieser Prozeß wird auch als Replikation bezeichnet.
Chromosomen bestehen aus Protein in Verbindung mit noch komplexeren Molekülen, den Desoxyribonucleinsäuren, gewöhnlich als DNS abgekürzt. In ihren Strukturen enthält die DNS die Information für die Konstruktion der spezifischen Enzyme und auch für die Replikation, so daß die DNS fortfahren kann, die Konstruktion spezifischer Enzyme in den Tochterzellen zu lenken. Jedes Lebewesen besitzt DNS-Moleküle, um seine eigenen Enzyme und keine anderen zu bauen.
Es stellt sich die Frage, ob – ebenso wie gewisse Organismen aus individuellen Zellen bestehen – noch einfachere Organismen aus individuellen Chromosomen bestehen. Dies ist offensichtlich der Fall, denn Viren gleichen individuellen und unabhängigen Chromosomen. Jeder Virus ist aus einer äußeren Proteinhülle und einem inneren DNS-Molekül oder in manchen Fällen einem ähnlichen Molekül, genannt Ribonucleinsäure oder RNS, aufgebaut. Die DNS oder die RNS dringt in das Innere einer Zelle und überwacht dort die Produktion von Enzymen, die an der Synthese von neuen Virus-Partikeln beteiligt sind.
Die Moleküle aller Viren und die Zellen aller Pflanzen und Tiere sowie aller einzelliger Organismen enthalten zumindest ein DNS- oder RNS-Molekül; im Fall von Zellen können es mehrere tausend sein. Solange diese Moleküle in der Lage sind, die Bildung von Enzymen zu leiten, lebt der Organismus mit allen Charakteristika des Lebens. Objekte, die niemals lebend waren, oder die lebten, oder heute tot sind, besitzen keine aktiven DNS- oder RNS-Moleküle. Deshalb wird Leben als jene Eigenschaft definiert, die solche Objekte besitzen, die zu-

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

mindest ein aktives DNS- oder RNS-Molekül enthalten. Nach dieser Definition könnte man Viren als Lebewesen bezeichnen.

Heutige Lebewesen

Die Lebewesen unserer Tage stellen verschiedene Ebenen der Komplexität und Organisation dar. Sie sind das Ergebnis von langsamen Veränderungen, die mindestens 2–3 Milliarden Jahre gedauert haben. Die Veränderungen wurden durch zufällige, imperfekte Replikationen in DNS-Molekülen hervorgerufen. Sie führten zu entsprechenden Veränderungen in Enzymstrukturen und demzufolge auch zu Umstellungen der Reaktionsmuster in Zellen. Die veränderten Zellen, die das überlebten, profitieren unter den gegebenen Umweltbedingungen in denen sie lebten. Eine solche Theorie der Evolution wurde zuerst von dem englischen Biologen CHARLES DARWIN 1859 vertreten.
Heute wird jede Zelle aus früher existierenden Zellen gebildet und jedes DNS-Molekül wird durch ein zeitlich vorangehendes DNS-Molekül produziert. Allerdings existierte das Leben nicht immer, und es gab eine Zeit als die Erde noch nicht existierte.
Deshalb taucht die Frage nach dem Ursprung des Lebens auf der Erde schon sehr früh in den verschiedenen philosophischen Betrachtungen auf. Heute ist der Begriff noch weiter ausgedehnt worden, nämlich nach dem Ursprung des Lebens im Kosmos.
Vermutlich ist die Frage nach dem Ursprung des Lebens immer wieder gestellt worden, solange es vernunftbegabte Lebewesen auf der Erde gibt.
Die frühen Griechen glaubten, daß die verschiedenen Teile eines Individuums aus Feuer, Wasser, Luft und Erde entstanden sind. Ihrer Meinung nach seien diese Glieder durch die Kraft der Liebe vereinigt worden. Der griechische Lehrer und Philosoph ARISTOTELES hat den Grund gelegt für eine philosophische Auffassung, die sich wie ein roter Faden durch die Jahrhunderte zieht, nämlich die Vorstellung einer Urzeugung, wie er es nannte. Er war von diesem Prinzip so überzeugt, daß er es auf Insekten und Würmer, auf Fische und Frösche und auf Mäuse übertragen wissen wollte.
Mehr als 1000 Jahre glaubte man an die Theorie der Urzeugung. Im späten 17. Jahrhundert widerlegte der Italiener FRANZESCO REDI diese Vorstellung durch ein einfaches Experiment. Er legte ein Stück Fleisch in ein Gefäß und verschloß es mit einem Tuch, und in ein anderes Gefäß legte er ebenfalls ein Stück Fleisch, ohne es zu bedecken. Weil sich Maden nur in dem Stück Fleisch entwickelten, das offen stand, schloß REDI, daß die Maden nicht aus dem Fleisch, sondern aus Eiern stam-

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

men müßten, die von Fliegen dort abgelegt worden waren. Es hat aber erst 200 Jahre später des scharfen und kämpferischen Geistes eines LOUIS PASTEURs bedurft, um der wissenschaftlichen Welt klarzumachen, daß die Hypothese der fortwährenden Urzeugung unhaltbar ist.
Die Theorie der individuellen Erschaffung basiert auf der wörtlichen Auslegung des Buches der Genesis. Diese Theorie besagt, daß jede Spezies von Lebewesen in ihrer exakten Form erschaffen wurde. Sie kann sich demzufolge nicht in einen anderen Organismus weiter entwickeln. Mit fortschreitender Entwicklung der Kenntnisse auf diesem Gebiet der Naturwissenschaften ist diese Auffassung weitgehend liberal interpretiert worden; sie stellt heute kein Problem mehr dar. Zu Beginn dieses Jahrhunderts (1908) entwickelte der schwedische Chemiker SVANTE ARRHENIUS die Vorstellung, daß lebende Keime von Bereichen jenseits der Erde gekommen sein könnten. Obwohl diese Annahme lediglich eine Verschiebung, aber keine Lösung des Problems selbst bedeutet, hat sie doch kraftvolle Fürsprecher gehabt.
HELMHOLTZ beispielsweise nahm an, daß lebende Keime mit Meteoriten auf die Erde gelangt sein könnten, was zu wiederholten und immer genaueren Untersuchungen der Zusammensetzung von Meteoriten geführt hat.
ARRHENIUS belebte die Idee der Panspermie von neuem, indem er durch sehr sorgfältige Berechnungen den interstellaren Transport von kleinsten lebentragenden Sporen mittels Lichtdruck zu beweisen suchte. Aber auch diese Hypothese ging an der Kernfrage vorbei. Außer den Vitalisten und Panspermisten und neben „omne vivum e vivo"-Verfechtern, gibt es eine vierte Gruppe, die man die Materialisten nennen könnte. Diese Gruppe vertritt die Auffassung, daß der Ursprung des Lebens auf dem Planeten Erde zu suchen ist und daß jede Erklärung der Entstehung und Entwicklung auf der harten Grundlage von Physik und Chemie gemacht werden müsse, entweder in Form von Beobachtungen, besser aber in Ausführung geeigneter Experimente. Wenn auch im 19. Jahrhundert die Kenntnisse auf dem Gebiet von Chemie und Physik bei weitem noch nicht ausreichten, um das Kernproblem zu bearbeiten, so gab es damals bereits Wissenschaftler, die der damals noch spektakulären Ansicht einer graduellen Entwicklung des Lebens aus anorganischer Materie waren.
Die logische Fortsetzung dieser Überlegungen brachte 1924 der russische Biochemiker ALEXANDER I. OPARIN zu Papier. In seinem Buch über die Entstehung des Lebens legte OPARIN seine auf geophysikalischen Erkenntnissen beruhende Auffassung der wissenschaftlichen Welt vor. OPARINs Theorie besagte, daß sich organische Verbindungen während der Frühzeit der Erde spontan aus anorganischen Substanzen gebildet haben und als Bedingung gibt OPARIN an: Hohe Temperaturen und eine Atmosphäre, die sich hauptsächlich aus Methan, Ammoniak, Wasserstoff

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

und Wasserdampf zusammensetzt, die also reduzierend war, also völlig anders als die Atmosphäre, mit der wir es heute zu tun haben. Bei langsamem Abkühlen der Gasmischungen bildeten sich nach OPARIN einfache, kleine organische Moleküle, die sich später durch Zusammenlagerungen zu großen Molekülen weiter entwickelt haben; heute bezeichnen wir dieses Zusammenlagern von kleinen Einheiten zu Riesenmolekülen als Polymerisation.
Die OPARINsche Theorie legt zugrunde, daß die molekulare Entwicklung vom Einfachen zum Komplizierten, von der Simplizität zur Komplizität fortschritt, um dann ohne abrupte Sprünge in die Evolution DARWINschen Stils einzumünden.

Modelle für die Evolution von Molekülen

Es erhebt sich aber nach dem bisher Dargestellten die Frage, was man denn nun eigentlich unternehmen kann, um – wie FRIEDRICH ENGELS das seinerzeit genannt hat – auf der harten Basis von Physik und Chemie voranzukommen. Dabei bieten sich nur wenige Möglichkeiten an. Die eine von ihnen besteht darin, daß man nach Zeugen sucht, die uns Bericht erstatten könnten über das, was sich vor 3–4 Milliarden Jahren auf diesem Planeten abgespielt hat. Aber leider gibt es dafür keine verläßlichen Spuren. In einem verwandten Wissenszweig, der Paläontologie, ist man gewöhnt, mit Fossilien zu arbeiten. Wenn man aus den dort gewonnenen Resultaten Schlußfolgerungen ziehen kann, werden diese Fossilien – je weiter sie in der Erdgeschichte zurückdatiert werden können – immer kleiner. Man muß daher annehmen, daß auch die dazugehörigen Lebewesen kleiner waren, je weiter wir in den Erdzeitaltern zurückgehen. Wir müssen demnach vermuten, daß die ersten Lebewesen Einzeller waren. Es gibt zwar Berichte über fossilierte Bakterien, die insbesondere von dem Amerikaner BARGHOORN stammen. Allerdings wird häufig dagegen eingewendet, daß die Mikroorganismen, die man in ganz bestimmten Erdschichten findet, nachträglich eingewandert sein könnten, also keineswegs so alt sind wie die Erdschichten selbst. Deshalb besitzen diese Zeugen nur eine untergeordnete und begrenzte Bedeutung. Eine weitere Möglichkeit liegt natürlich darin, Meteoriten eingehender zu studieren. Man könnte annehmen, daß Meteoriten lebende Systeme von außerhalb der Erde aus dem Weltraum zu uns transportiert haben, und in der Tat findet man insbesondere auf kohlenstoffreichen Meteoriten Abdrücke, die Mikroorganismen sehr ähnlich sehen. Heute wird das Vorkommen von Nichtprotein-Aminosäuren im Murchison-Meteorit und ihre Entstehung im extraterrestrischen Raum diskutiert.

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

Es stellt sich von allein die Frage, woher diese Abdrücke stammen. Sind sie tatsächlich im Weltraum entstanden, dann verschiebt sich nur die Ebene der Fragestellung. Die Frage müßte dann jedoch nicht nach der Entstehung des Lebens auf der Erde lauten, sondern nach der Entstehung im Kosmos. Man muß berücksichtigen, daß bei der Passage durch die äußeren Gashüllen der Erde, in denen sich Mikroorganismen befinden, Meteoriten auf diese Organismen treffen und diese sich dort leicht abdrücken können.

Ein ganz anderer Weg ist eng mit der Weltraumfahrt verknüpft. Er zielt darauf ab – und das deutet natürlich in die Zukunft –, auf anderen Himmelskörpern zu untersuchen, ob dort irgendwann Lebensformen oder lebende Systeme jemals existiert haben, ob sie ausgestorben sind, ob sie sich in einem weiteren Entwicklungsstadium befinden oder ob etwa – und das wäre für diese Fragestellung außerordentlich interessant – diese Entwicklung sich gerade in der Phase befindet, die vom Übergang der unbelebten Materie zum belebten System führt. Wir müssen annehmen, daß dieser Übergang keineswegs sprunghaft abgelaufen ist, sondern daß dabei eine breite Übergangszone vorgelegen hat.
Alles das klingt nicht sehr hoffnungsvoll, und es erscheint überhaupt fraglich, ob wir jemals eine Information erhalten können über das, was sich in längst vergangenen Tagen abgespielt hat. Aber es bleibt noch eine Möglichkeit übrig, die durch die „OPARINsche Theorie" vorgezeichnet ist. Wenn man nämlich die Bedingungen der unbelebten Erde vor 3 bis 4 Milliarden Jahren nachzuahmen versucht, könnte es gelingen, eine Vorstellung über die allerersten Schritte zu gewinnen.
Das sind natürlich Modellvorstellungen, und man muß sich genau vor Augen halten, daß solche Modelle eben Modelle sind und niemals eine direkte Antwort geben können.
Sie können im besten Fall eine Annäherung an die mutmaßlich richtigen Verhältnisse bringen. Wir müssen dabei von den Überlegungen, die um 1924 von OPARIN angestellt worden sind, ausgehen, daß zunächst sehr einfache Verbindungen entstanden sein müssen; d. h., wir müssen eine Bestandsaufnahme über diejenigen Rohmaterialien aufstellen, die auf der damals jungen Erde überhaupt existent gewesen sind und die zum Aufbau von Molekülen verwendet werden konnten. Die Erdkruste hat zumindest in dem damaligen Stadium nur anorganisches Material geliefert.
Eine andere Situation hat sicherlich in der Atmosphäre der Erde vorgelegen, und es muß angenommen werden, daß sich die Atmosphäre der Erde mehrfach geändert hat. Die erste, sogenannte „primitive" Atmosphäre, hat vermutlich aus Methan, Ammoniak, Wasserdampf und Wasserstoff, dessen Menge heute noch umstritten ist, bestanden.
Es muß ferner angenommen werden, daß die erste primitive Atmosphäre

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

Edelgase und sehr viel Wasserstoff in den Weltenraum verloren hat, so daß sich also eine Veränderung der Zusammensetzung ergeben hat.
Aus dieser ersten Atmosphäre hat sich dann später eine zweite Atmosphäre durch einen Prozeß, den man als Ausgasung aus dem Inneren der Erde versteht, entwickelt, d. h., es müssen durch Vulkanismus und sonstige Prozesse eingeschlossene Gase in die Atmosphäre entwichen sein, um dann eine zweite Atmosphäre zu bilden. Die zweite Atmosphäre ist vermutlich ähnlich zusammengesetzt gewesen wie die erste. Sie bestand – so glaubt man heute – wiederum aus Methan, aus Ammoniak, aus Wasserdampf und wahrscheinlich aus wechselnden Mengen von Wasserstoff. In gar keinem Falle jedoch hat diese Atmosphäre Sauerstoff enthalten. Der Sauerstoff muß wesentlich später aufgetreten sein. Diese zweite Atmosphäre ist der Ausgangspunkt für die OPARINschen Überlegungen und die ersten Ansätze für experimentelle Arbeiten gewesen. Wir müssen davon ausgehen, daß zunächst nach der Entstehung von organischen Kleinmolekülen aus sehr einfachen Verbindungen aus Gasen der zweiten Erdatmosphäre gesucht werden sollte; daraus müßten sich dann in einer weiteren Phase große Moleküle gebildet haben, wie Eiweiß, Nukleinsäuren, die Träger der Erbsubstanz, wie Polysaccharide, Cellulose, Stärke und andere. Schließlich – das ist der entscheidende Sprung – muß man erwarten, daß sich die genannten Substanzen zu partikulierten Systemen vereinigt haben, die man evtl. als präzelluläre Formen bezeichnen könnte.

Versuche zur Synthese kleinerer Moleküle unter den Bedingungen der unbelebten Erde.

Die genannten Rohmaterialien, die zum Aufbau von kleinen Molekülen dienen können, stellen eine sehr kleine Anzahl von individuellen chemischen Verbindungen dar. Es erhebt sich nun die Frage, wie diese kleinen Moleküle in Bausteine der lebendigen Substanz umgewandelt werden können. Man muß sich dabei vor Augen halten, daß theoretisch – zumindest in der organischen Chemie – etwa 2 Millionen Substanzen möglich sind, aber in Zellen nicht mehr als 10000 definierte Verbindungen vorkommen. Es liegt demnach hier bereits eine Selektion auf molekularer Ebene vor. Wie aber ist diese begrenzte Anzahl an Verbindungen entstanden? Wir müssen dabei die verschiedenen Energieformen in Betracht ziehen, die auf diese Gase eingewirkt haben. Dabei soll auf den klassischen Versuch, der 1951 von MILLER durchgeführt worden ist, hingewiesen werden. Er hat eine simulierte Uratmosphäre elektrischen Entladungen ausgesetzt, d. h., MILLER hat eine nachgeahmte Uratmosphäre einem

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

Gewitter ausgesetzt; dieses „Gewitter" dauerte mehrere Tage. Daraus resultierten vorwiegend Verbindungen, die in Zellen vorkommen, also nicht willkürliche Kombinationen.
Die Versuche von MILLER sind in den verschiedensten Abwandlungen wiederholt worden. Abgesehen davon, daß die Gaskombinationen variiert wurden, hat man nicht nur elektrische Energie auf die Gasgemische einwirken lassen, sondern auch andere Energieformen wie UV-Licht, Röntgenstrahlen, radioaktive Strahlungen oder Gemische von Energieformen.
Die Ergebnisse ähneln im Prinzip denen von MILLER. Als besonders beachtenswertes Resultat fanden diese Versuchsansteller, daß unter dem Einfluß von Energie auf Gasgemische, die der Uratmosphäre ähnelten, stets einige Eiweißbausteine zu finden waren.
Wenn man die einfachste Energieform, die wir kennen – Hitze – auf solche Gasgemische einwirken läßt, dann führt das ebenfalls zur Bildung von einigen wenigen Bausteinen der Proteine. Bei einem solchen Versuch werden Ammoniak, Methan und Wasserdampf durch ein auf 1000° C erhitztes Gefäß geleitet; dabei bilden sich Aminosäuren, die man in ammonalkalischer Lösung auffangen kann.
Füllt man jedoch das zur Erhitzung bestimmte Gefäß mit Silicagel oder einfach mit Seesand, dann findet man nach der Gasreaktion nicht nur 3 oder 4 Bausteine des Eiweißes, sondern praktisch alle die das Protein aufbauenden Aminosäuren.
Theoretisch kann man einige hundert Aminosäuren formulieren und zum Teil auch synthetisieren. Biologische Bedeutung besitzen dagegen nur relativ wenige. Im Eiweiß findet man etwa 20 individuelle Aminosäuren, und nur diese Aminosäuren entstehen während der genannten thermischen Gasreaktion. Unter diesen Bedingungen findet also eine Selektion auf molekularer Ebene statt. Diese Auswahl mit Blickrichtung auf die biologisch so extrem wichtigen Proteine oder Eiweißkörper für Struktur und Funktion der Zellen kann nicht hoch genug bewertet werden.
Dieses Modell gibt eine mögliche Erklärung, wie unter geologisch plausiblen Bedingungen (vulkanische Zonen) die Baueinheiten der Proteine entstanden sein könnten.

Versuche zur Synthese von Makromolekülen unter den Bedingungen der unbelebten Erde.

Die große Schwierigkeit besteht jedoch darin, die einzelnen Bausteine zu großen Einheiten zu verbinden. Das gilt für das Zusammenfügen von Aminosäuren zu Proteinen, von Nucleotiden zu Nucleinsäure, von Zucker-

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

molekülen zu Polysacchariden. Erst vor zwei Jahren ist die chemische Synthese des ersten Enzyms im Laboratorium gelungen, obwohl hier keineswegs Einschränkungen technischer Art – wie sie bei Synthesen unter Bedingungen der unbelebten Erde existieren – vorlagen.
Vor ungefähr 20 Jahren hatte der amerikanische Chemiker SIDNEY W. FOX die geniale Idee, zur Verknüpfung von Aminosäuren thermische Energie zu verwenden. Hierfür reichten bereits Temperaturen von etwa 180° C aus. Dieser scheinbar so einfache Prozeß genügte, um ein Modell für die Entstehung von Eiweiß abzugeben. Daß es sich vom Prinzip her um eine relativ einfache Reaktion handeln müsse, hatte bereits 30 Jahre vorher OPARIN gefordert; nur wußte niemand, wie einfach eine solche Reaktion sein würde.
Dieses Modell paßt sich durchaus mit den vorher genannten thermischen Gasreaktionen in eine geologisch plausible Sequenz ein.
Besonders interessant sind die Eigenschaften dieser thermischen Polymerisationsprodukte (Proteinoid). Im Vergleich zu biologischen Proteinen bestehen keine nennenswerten Unterschiede auf physiko-chemischem Gebiet. Dagegen besitzen diese synthetischen Substanzen katalytische Eigenschaften und die Eigenschaft, ganz bestimmte morphologische Formen auszubilden.
Das bedeutet, daß diese Produkte in der Lage sind, chemische Reaktionen, die von allein nicht ablaufen würden, in Gang zu setzen oder sehr langsam verlaufende Reaktionen zu beschleunigen. Das ist nur eine Umschreibung für die Vorgänge des Stoffwechsels in den Zellen. Die unter abiotischen Bedingungen synthetisierten Verbindungen mit Eiweißcharakter vermögen tatsächlich einzelne biochemisch wichtige Verbindungen zu spalten oder in verschiedene Richtungen hin umzuwandeln. Dies ist besonders im Hinblick auf den Ursprung des Stoffwechsels von großem Interesse. Wenn man den Ursprung lebender Systeme diskutiert, muß man den Ursprung von Enzymen ganz besonders berücksichtigen. Heutige Enzyme werden durch eine Serie bereits existierender Enzyme gebildet. Viele Schwierigkeiten und sogar ein vollständiges Dilemma auf diesem Gebiet haben ihre Wurzeln in der Frage: „Wie konnten die ersten Enzyme trotz der Abwesenheit von Enzymen entstehen?"
Dieses Problem konnte und kann immer noch nicht durch rein theoretische Erörterungen allein gelöst werden. Allerdings hat OPARINs Konzeption vom Ursprung des Lebens besonders dazu beigetragen, produktive Denkmodelle zu schaffen. Diese Vorstellungen haben dann schließlich zu geeigneten Experimenten in mehreren Laboratorien geführt.
Man muß sich schließlich darüber im klaren sein, daß die Kernfrage nur durch ein experimentelles Modell für Enzyme beantwortet werden kann. Spekulationen führen hier zwangsläufig ins Leere. Ein experimentelles Modell für ein Urenzym muß gleichzeitig zumindest schwache katalyti-

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

sche Aktivitäten besitzen. Es muß natürlich eine Substanz vom Typ eines Polypeptids oder einer Polyaminosäure sein. Die Minimalerfordernisse für ein Urenzym sind ebenfalls schwache Aktivitäten, die später durch Prozesse der Evolution in Organismen verstärkt, angereichert, ausgeweitet und spezialisiert werden konnten.
Die erste Frage, die man bei jedem Modell für ein „Urprotein" untersuchen muß, ist nämlich die, ob dieses Modell in seinen Eigenschaften denen heutiger Enzyme ähnelt. Mindestens sechs Laboratorien haben Berichte über Aktivität in thermisch synthetisierten Eiweißmodellen publiziert.
Bisher sind fünf Arten von reaktionsbeschleunigenden oder katalytischen Aktivitäten in den genannten thermischen Proteinmodellen entdeckt worden:

1. Hydrolyse
2. Decarboxylierung
3. Aminierung
4. Desaminierung
5. Katalase-Effekte

Nach den Voraussagen, daß Enzyme die Produkte lang andauernder evolutionärer Prozesse sind, schien theoretisch die Gesamtsituation hoffnungslos. Die genannten Ergebnisse zeigen jedoch, daß dies nicht so ist. Die Versuche mit thermisch synthetisierten Eiweißmodellen deuten darauf hin, daß enzymähnliche Substanzen mit Polypeptidcharakter sehr früh erschienen sein müssen. Mit anderen Worten, die ersten eiweißähnlichen Verbindungen dürften bereits katalytische Aktivitäten besessen haben. In späterer Folge dürften diese enzymähnlichen Aktivitäten durch Prozesse der Evolution verstärkt und spezialisiert worden sein.
Es konnte kürzlich herausgestellt werden, daß thermisch synthetisierte Proteinoide als Modelle für „Urproteine" keine zufällige Struktur besitzen, sondern daß sie nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten aufgebaut sind.
Trotzdem haben theoretische Überlegungen zu der Schlußfolgerung geführt, daß die ersten Proteine durch Zufallspolymerisation gebildet worden sein müßten. Nach diesen Vorstellungen besaßen diese Produkte keinerlei katalytische Aktivität. Die Experimente mit Proteinoid als Modell für „Urprotein" oder ein „Urenzym" zeichnen ein gänzlich anderes Bild. Für die Konzeption des Ursprungs des Stoffwechsels benötigen wir jedoch ein Stadium der Evolution, das bereits die Ebene der Organisation von Makromolekülen in strukturierte Elemente erreicht hat.
An dieser Stelle sollte auf eine weitere Eigenschaft der thermisch synthetisierten Proteinoide hingewiesen werden. Dieses Material bildet im Kontakt mit Wasser (vorzugsweise Seewasser) Partikel aus, deren Ähn-

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

lichkeit mit Mikroorganismen wiederholt diskutiert worden ist. Diese organisierten Mikropartikel sind oft als Modelle für Protozellen beschrieben worden. Sie sind aus Material aufgebaut, das die vorher besprochenen Reaktionen beschleunigen kann. Man kann sich vorstellen, daß die verschiedenen pH-Werte, die für die individuellen enzymatischen Reaktionen sehr unterschiedlich sein können, nur in unterteilten Partikeln aufrechtzuerhalten sind. Dies bedeutet eine Auffächerung der Mikrostrukturen in weitere Kompartimente. Solch eine Bildung von Kompartimenten ist auch in Proteinoid-Mikropartikeln beobachtet worden.
Analog zu heutigen Zellen wird katalytisches Material weitgehend von den Grenzflächen zurückgehalten. Diese Grenzflächen besitzen andererseits selektive Effekte auf die Diffusion verschiedener anderer Substanzen.
OPARIN hat versucht, heutige Enzyme innerhalb mikrostruktureller Koacervat-Tröpfchen zu konzentrieren. Er hat beobachtet, daß enzym-katalysierte Reaktionen viel schneller innerhalb der Partikel ablaufen als ohne Partikelbegrenzung. Hierbei sollte aber besonders auf folgendes verwiesen werden. Im Gegensatz zu den genannten Versuchen hat OPARIN heutige Enzyme benutzt, die bereits durch Enzyme synthetisiert worden waren. Die Aktivitäten in den Mikropartikeln sind ohne Enzyme erzeugt worden. Sie wurden unter den Bedingungen der unbelebten Erde hergestellt.
Die Proteinoid-Mikropartikel besitzen eine genügend große Anzahl von Eigenschaften, um in diesem Zusammenhang den Ursprung des Stoffwechsels zu studieren.
Die genannten Individualreaktionen lassen sich in Reaktionsfolgen in den Mikropartikeln integrieren. Die Beispiele, die bis jetzt verfügbar sind, zeigen, wie ein vereinfachter Stoffwechsel in frühen Organismen oder Protozellen entstanden sein könnte.
Nach heutigen Vorstellungen muß sehr früh schon ein Kopiermechanismus für die genetische Information von einer Zellgeneration zur anderen vorgelegen haben. Allerdings sind die Fortschritte auf diesem Gebiet der Molekularevolution der Nucleinsäuren weit hinter denen auf dem Gebiet der Proteine zurückgeblieben. Das hängt z. T. damit zusammen, daß viel früher mit der abiotischen Synthese von Proteinen begonnen worden ist. Die Anfänge datieren in eine Zeit zurück, als noch umstritten war, ob Nucleinsäuren oder Proteine mit der Chemie der Vererbung in direktem Zusammenhang stehen. Damals waren vor allem auch methodische Erfolge auf dem Gebiet der Proteinchemie erzielt worden, so daß solche Arbeiten viel leichter vorangetrieben werden konnten. Trotz aller Einzelerfolge bei der Synthese von Bausteinen der Nucleinsäuren, fehlt doch leider ein plausibles Modell für die Synthese von Nucleinsäuren unter den Bedingungen der unbelebten Erde.

©Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück e.V.

Es hat nicht an Stimmen gefehlt, die vermuten, daß Nucleinsäuren erst enzymatisch aufgebaut werden konnten. Ferner stellt sich immer wieder die Frage, ob Proteine oder Nucleinsäuren doch gleichzeitig entstanden sind oder ob die eine oder die andere Stoffgruppe vielleicht zuerst da war. Die Beantwortung dieser Fragen geht aber so weit in den Bereich der Spekulation, so daß hier nicht der Versuch dazu unternommen werden soll.

Die dargestellten Befunde lassen erkennen, daß auf experimenteller Basis eine gewisse Erklärung für den Ursprung biochemisch wichtiger Stoffgruppen gegeben werden kann. Darüber hinaus zeichnet sich auch ab, wie man sich den Ursprung von Enzymen und das Entstehen des Stoffwechsels vorstellen könnte. Ferner bietet das experimentelle Modell eine Vorstellung für eine spontane Selbstorganisation von Mikrostrukturen.

Trotz aller noch bestehender Mängel zeigt sich immerhin, wie Vorstufen des Lebens auf der Erde und vielleicht auch im Kosmos entstanden sein könnten.

Wie lebende Systeme jedoch gebildet worden sind, entzieht sich nach wie vor unserer Kenntnis.

Weitere Literatur

BOSCHKE, F. L. (1966): Die Schöpfung ist noch nicht zu Ende. Naturwissenschaften auf den Spuren der Genesies. – Droemer-Knaur

FOX, S. W. (1965): The Origins of Prebiological Systems and of their Molecular Matrices. – Academic Press New York and London

FOX, S. W., HARADA, K., KRAMPITZ, G. und MÜLLER, G. (1970): Chemical Origins of Cells. – Chemical Engeneering News

FOX, S. W., KRAMPITZ, G. und WAEHNELDT, T. (1967): Wie begann das Leben? – Bild der Wissenschaft

KRAMPITZ, G. (1963): Über den Ursprung des Lebens auf der Erde in biochemischer Sicht. – Veterinär-Medizinische Nachrichten

(1968): Origin of Enzymes and Metabolism. – American Association for the Advancement of Science, 135th Meeting, Dallas, Texas

OPARIN, A. J. (1968): Genesis and Evolutionary. Development of Life. – Academic Press New York and London

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Osnabrücker Naturwissenschaftliche Mitteilungen

Jahr/Year: 1972

Band/Volume: 1

Autor(en)/Author(s): Krampitz Gottfried

Artikel/Article: Die Entstehung des Lebens Denkmodelle und naturwissenschaftliche Versuche 13-28