

Die Entstehung des Lebens

Ulrich Kull

Biologisches Institut der Universität Stuttgart

Die Evolution der Lebewesen auf der Erde wird erklärt durch die Evolutionstheorie. Sie geht aus von den Mutationen, die sich an den Genen (Gesamtheit der Gene = Genotyp) abspielen, und von der Selektion, die an Individuen (den Phänotypen) angreift und sich in den Populationen dieser Individuen so auswirkt, daß der Genpod verändert wird. Die Verbindung von Genotyp und Phänotyp ist im Prinzip durch die Molekularbiologie geklärt (Abb. 1). Die genetische Substanz der Lebewesen besteht aus Nucleinsäuremolekülen, in deren Basenabfolge die Information enthalten ist. Diese Nucleinsäuremoleküle werden in der Zelle identisch redupliziert. Auf diesem Wege wird die genetische Information bei der Zellteilung weitergegeben. Die Information der Nucleinsäuremoleküle ist in dieser Gestalt für die Zelle nicht „verwendbar“; sie muß in einem Übersetzungsmechanismus in eine Form gebracht werden, welche in der Zelle bestimmte Vorgänge verursachen kann. Dieser im Einzelnen sehr komplexe Übersetzungsmechanismus wird als Transkription und Translation bezeichnet und führt

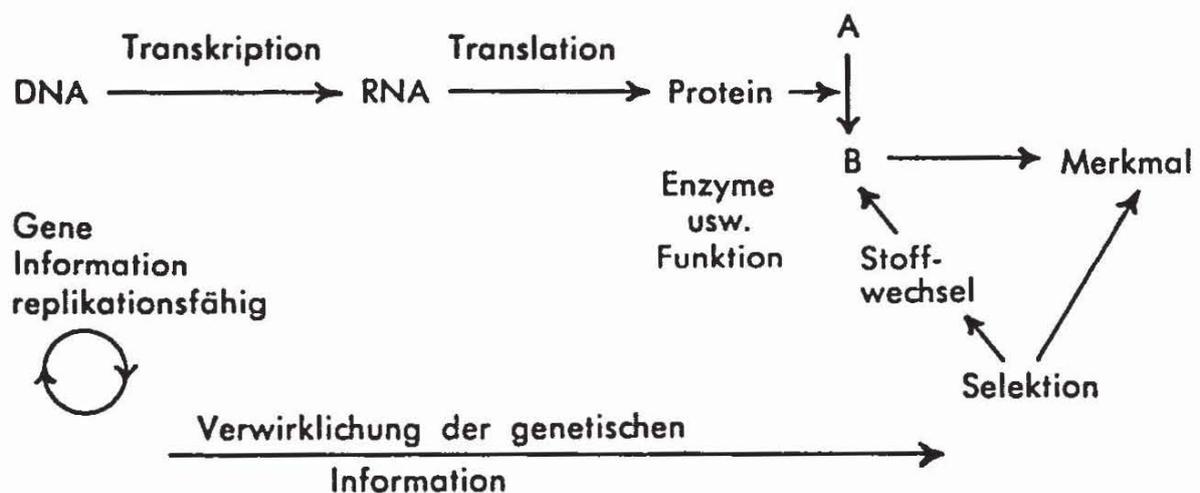


Abb. 1: Molekularbiologische Grundlagen der Verknüpfung von Genotyp (Gesamtheit aller Gene = DNA) und Phänotyp (Gesamtheit aller Merkmale. Zu den physiologischen Merkmalen gehört der Stoffwechsel).

zur Synthese von Proteinen (Eiweißkörpern). Proteine sind als Enzyme die Katalysatoren nahezu aller Stoffwechselfvorgänge und an der Steuerung aller Lebensvorgänge führend beteiligt. Die Proteine haben aber nicht die Fähigkeit der Reduplikation. Die Struktur der Proteine

ist durch die Abfolge der einzelnen Aminosäuren, die zum Protein zusammentreten, vollständig festgelegt. Die Kette von Aminosäuren faltet sich zur richtigen Raumstruktur, die bestimmte Wechselwirkungen mit anderen Molekülen erlaubt und dadurch die Funktion des Proteins ermöglicht.

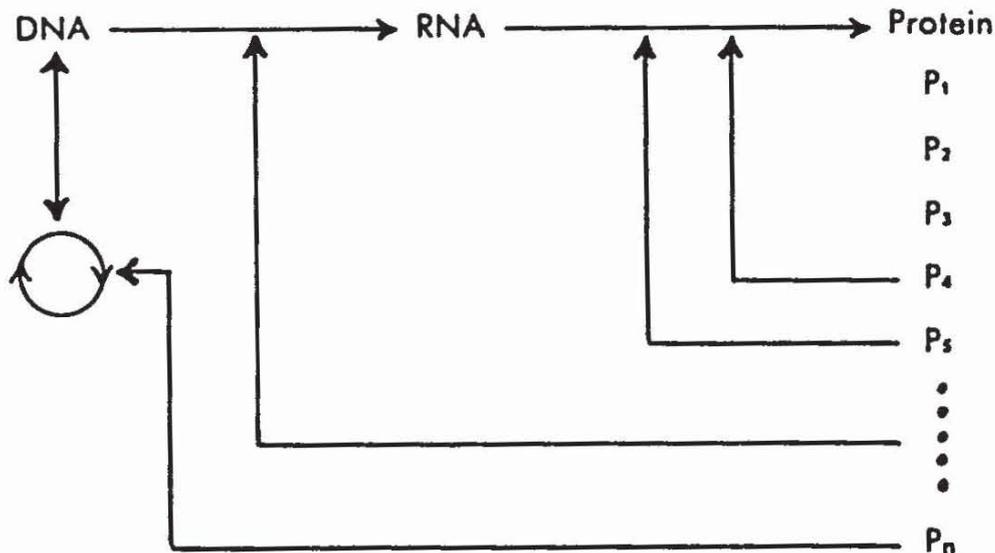


Abb. 2: Rückkopplungen bei der Verwirklichung der genetischen Information in stark vereinfachter Darstellung. Die Enzymproteine P₄, P₅ usw. sind als Katalysatoren an der Replikation, Transkription und Translation beteiligt. Andere Enzymproteine (z. B. P₁ bis P₃) dienen dem Stoffwechsel als Katalysatoren.

Von dieser Betrachtung ausgehend kann man auch die Vorgänge der Evolution auf molekularer Ebene verstehen. Zunächst müssen Strukturveränderungen in den Nucleinsäuren, dem genetischen Material der Zelle, eintreten. Diese werden als Mutationen bezeichnet; sie sind Zufallsereignisse. Die Mutationen führen dann zu veränderten Proteinstrukturen. Die Selektion wirkt auf die Merkmale, die durch die Tätigkeit der Proteine direkt oder indirekt bestimmt werden. Mutation und Selektion sind also völlig unabhängig voneinander. Die Selektion wirkt wie ein Sieb, das aus den zahlreichen Mutationen bestimmte auswählt, die dann innerhalb des Genpools der Population angereichert werden. Die überwiegende Mehrzahl der Mutationen aber verschwindet wieder (vgl. KULL 1977 b).

Die Verwirklichung der genetischen Information erfordert ihrerseits natürlich auch Enzymproteine, so daß ein rückgekoppelter, komplexer Stoffwechsel vorliegt. Er ist stark vereinfacht in Abb. 2 dargestellt.

Fossilien im Präkambrium

Stellt man die Frage nach der Entstehung des Lebens, so ist es naheliegend, zunächst die ältesten Fossilreste zu betrachten. Daraus sind

Rückschlüsse über die Gestaltung primitivster Lebewesen und über die Zeit ihrer Entstehung möglich. Zu Beginn des Kambriums vor etwa 600 Millionen Jahren existierten bereits viele Stämme vielzelliger Pflanzen und Tiere. Die Evolution bis zum Vielzeller muß also vorher im Präkambrium stattgefunden haben, das mehr als $\frac{5}{6}$ der ganzen Erdgeschichte umfaßt.

Die vergleichende Cytologie der heutigen Lebewesen zeigt, daß es zwei verschiedene Grundtypen von Zellen gibt: die Prokaryontenzelle oder Procyte und die Eukaryontenzelle oder Eucyte. Die erstere ist gekennzeichnet durch das Fehlen eines echten Zellkerns sowie von Plastiden und Mitochondrien und durch eine vergleichsweise geringe Kompartimentierung; die Eucyte besitzt eine gute Kompartimentierung, einen umgrenzten Zellkern, Mitochondrien und bei Pflanzen Plastiden. Beide Zelltypen müssen bereits im Präkambrium entstanden sein.

Lange Zeit wurde *Corycium enigmaticum* aus dem Archaikum Finnlands (Alter ca. 1,7 Milliarden Jahre) als der älteste Fossilrest angesehen. Es handelt sich hierbei um graphitisierte Reste, die aufgrund ihres C-Isotopen-Verhältnisses von Lebewesen, vermutlich Algen, stammen müssen. In den letzten 20 Jahren sind Fossilreste aus präkambri-schen Gesteinen sehr unterschiedlichen Alters und aus vielen Teilen der Erde beschrieben worden. Zumeist handelt es sich um mikroskopische Algen (vgl. KULL 1977 a, dort Originalliteratur zitiert). Die ältesten nur schwach metamorphen Sedimentgesteine auf der Erde findet man in den etwa 16 000 m mächtigen Schichten des Swaziland-Systems von Südafrika. Es ist daher naheliegend, dort nach ältesten Fossilresten zu suchen. Die Herkunft der meisten darin tatsächlich gefundenen Partikel mit organischen Verbindungen bleibt aber problematisch. Das Swaziland-System schließt nach oben ab mit den etwa 3,1 Milliarden Jahre alten Gesteinen der Fig-Tree-Serie. Darin kommen Reste vor, die als älteste Fossilien beschrieben wurden. Kugelige Gebilde, die man *Archaeosphaeroides barbertonensis* nannte, werden als Blaualgen angesehen, sehr kleine, stäbchenförmige Gebilde als Bakterien (*Eobacterium isolatum*). Jedoch ist es nicht völlig sichergestellt, daß es sich um echte Lebewesen gehandelt hat. Nahezu 3 Milliarden Jahre alte Gesteine in Rhodesien (Bulawayo-Formation) enthalten die ältesten Kalkkonkretionen mit Einlagerungen organischer Substanz, die durch die Tätigkeit von Blaualgen (und Bakterien?) gebildet werden. Man nennt diese Gebilde Stromatolithen. Solche strukturier-ten Kalkabscheidungen werden im Verlauf des Präkambriums immer häufiger, in ihnen sind oft die Zellstrukturen von Algen erhalten. Auch die ersten eindeutigen Blaualgenreste (*Petraperia*) aus den Transvaal-Schichten Südafrikas liegen in Stromatolithen vor. Sie sind etwas mehr als 2 Milliarden Jahre alt. Berühmt sind mittlerweile die Fossilfunde

aus der Gunflint-Serie in Kanada (Alter 1,9 Milliarden Jahre) geworden. In ihr sind mindestens 12 verschiedene Formen von Blaualgen und Bakterien enthalten.

In der Bitter-Springs-Serie aus Zentralaustralien (Alter ca. 800–900 Millionen Jahre) findet man Gebilde, welche heutigen kugeligen Grünalgen stark ähneln. Es wird behauptet, daß in diesen Resten gelegentlich Zellkerne erhalten seien, womit sie eindeutig als eukaryontisch identifiziert wären. Die Entstehung der Eukaryonten (alle Organismen außer Bakterien und Blaualgen zählen dazu) darf man aufgrund dieser Befunde vor etwa 1000–1500 Millionen Jahren ansetzen. Die ältesten sicher bekannten Metazoen sind ca. 600–650 Millionen Jahre alt (Ediacara-Fauna). Sie waren morphologisch schon hoch entwickelt und gehören verschiedenen Tierstämmen an. Es muß also schon eine längere Zeit der Vielzellerentwicklung vorausgegangen sein.

Faßt man alle diese Ergebnisse der Paläontologie zusammen, so darf man eine biogene Evolution seit etwa 3 Milliarden Jahren annehmen. Die Entstehung des Lebens muß also vorher erfolgt sein. Davon sind Fossilreste bisher nicht mit Sicherheit bekannt. Die Wahrscheinlichkeit, solche zu finden, ist infolge des hohen Metamorphiegrades der ältesten Gesteine auch nicht groß. Es gibt also keine direkten paläontologischen Hinweise auf die Entstehung des Lebens. Man kann jedoch aus dem Alter der Erde (ca. 4–4,5 Milliarden Jahre) und dem Auftreten der ersten Lebensreste auf die Zeit der Lebensentstehung schließen. Die Entstehung der Eukaryonten muß länger zurückliegen als 1 Milliarde Jahre, die Entstehung der Mehrzeller mehr als 700 Millionen Jahre.

Die Prozesse, welche der Entstehung von Leben vorausgegangen sein müssen, lassen sich gliedern in:

1. die Bildung organischer Verbindungen durch abiogene Synthese;
2. die Bildung von Makromolekülen;
3. die Organisation von Makromolekülen zu biochemischen und zu morphologischen Einheiten. Dabei erfolgte ein Erwerb von Information, und damit in Zusammenhang entstand die Fähigkeit zur Evolution im biologischen Sinn.

Diese Vorgänge haben zum Teil auch zeitlich nebeneinander stattgefunden.

Von welchem Zeitpunkt ab man von „Leben“ sprechen will, hängt von der Definition für Leben ab. Diese ist bis heute nicht einheitlich, man kann nur Kennzeichen des Lebens angeben, aber nicht eigentlich Leben definieren. Die für Leben mindestens erforderlichen Merkmale sind: Fähigkeit zu Selbstreproduktion und damit zur Vermehrung, Stoffwechsel und Fähigkeit zur Veränderung der Erbinformation durch Mutation und damit zur Evolution.

Bildung organischer Verbindungen

Aus Chemismus und Struktur der – metamorphen – ältesten Sedimentgesteine sowie aus physikochemischen und kosmochemischen Daten lassen sich Schlüsse über die ursprünglichen Verhältnisse auf der Erdoberfläche und in der Atmosphäre ziehen (vgl. SCHIDLOWSKI 1971). Für die „Uratmosphäre“, die sekundären Ursprungs ist und durch Entgasungsvorgänge entstand, ergibt sich daraus etwa folgendes Bild: Die wichtigsten Bestandteile waren Stickstoff, Wasserstoff (der schon früh in den Weltraum zu entweichen begann), Ammoniak, Wasserdampf, Blausäure, Schwefelwasserstoff, Methan und wahrscheinlich schon von Anbeginn an auch Formaldehyd. Methan, Blausäure und Formaldehyd sind als Kohlenstoff-Quellen für den Aufbau organischen Materials außerordentlich wichtig. Freier Sauerstoff war in der reduzierenden Uratmosphäre nicht vorhanden. Im Wasser der Urozeane gelöst fanden sich Phosphate, Silikate und Metallionen. Durch starke und zahlreiche Gewitter, einen vermutlich viel stärkeren Vulkanismus, die UV-Einstrahlung und eine intensivere radioaktive Strahlung (damals waren noch viele kurzlebige Isotope vorhanden, die heute in der Natur nicht mehr vorkommen) war eine ständige Energiezufuhr gewährleistet, die eine Bildung von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Stickstoff ermöglichte. Aus Wasser entstanden auch geringe Mengen von freiem Sauerstoff, der aber entweder in Mineralien gebunden oder in der Atmosphäre zu Ozon umgesetzt wurde. So bildete sich langsam die Ozonschutzschicht, welche kurzweilige UV-Strahlung absorbiert, und die Atmosphäre blieb zunächst sauerstoff-frei. Die Anhäufung von O₂ in der Atmosphäre begann erst erheblich später, nachdem die Photosynthese in Lebewesen entstanden war. Man erkennt dies am Vorkommen bestimmter leicht oxidierender Mineralien, die sich nur in einer O₂-freien Atmosphäre bilden konnten. Ihr Auftreten endet vor etwa 1,6–1,8 Milliarden Jahren. Damals muß der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre $\frac{1}{100}$ des heutigen Wertes, d. h. 0,2 %, überschritten haben.

Die starke Energiezufuhr führte ferner zur Bildung zahlreicher organischer Verbindungen. Ihre Synthese unter simulierten Bedingungen der Uratmosphäre ist experimentell nachgewiesen.

Die Entstehung von *Aminosäuren* ist durch die allgemein bekannt gewordenen Versuche von MILLER und später auch anderer Autoren erwiesen. Ein Gemisch von Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Wasserdampf wird dabei elektrischen Entladungen oder einer starken UV-Strahlung ausgesetzt, und man erhält ein Gemisch verschiedener organischer Verbindungen, worin neben zahlreichen Aminosäuren auch mehrere Aldehyde, Blausäure, Ameisen-, Essig-, Glykol- und Milchsäure sowie Harnstoff und andere Amide auftreten. Die einzige Kohlenstoff-Quelle, von der ausgegangen wurde, war hier stets Methan.

Ein Aminosäurengemisch kann man ferner durch Anwendung von Stoßwellen aus dem erwähnten Ausgangsgemisch erhalten. Bei der Umsetzung von Methan, Ammoniak und Wasserdampf in Gegenwart von Kieselgel als Katalysator bei 1000° C und anschließendem Abschrecken des Reaktionsproduktes in ammoniakhaltigem Wasser sind nach Aufarbeitung 13 verschiedene der 20 proteinogenen Aminosäuren zu finden, aber nur wenige Aminosäuren, die in heutigen Lebewesen nicht vorkommen. Auch in wäßriger Lösung kann man ein Aminosäure-Gemisch erhalten, wenn man Ammoniumsalze mit Formaldehyd unter Einwirkung von UV-Strahlung umsetzt. Voraussetzung für jede Aminosäure-Bildung ist das Vorliegen reduzierender Verhältnisse; es darf also kein freier Sauerstoff vorhanden sein.

Die Bildung von Zuckern erfolgte aus den Vorstufen Formaldehyd und Acetaldehyd. Es ist schon lange bekannt, daß durch deren Kondensation unter dem Einfluß schwacher Basen oder von UV-Licht ein Gemisch verschiedener Zucker entsteht. Beim Erhitzen einer verdünnten Formaldehydlösung mit Kaolinit oder bei Behandlung mit γ -Strahlung erhält man Ribose und Desoxyribose, die beiden für den Aufbau von Nucleinsäuren erforderlichen Zucker, in merklichen Ausbeuten.

Die Entstehung von *Purin-* und *Pyrimidinbasen*, die als Bausteine der Nucleinsäuren auftreten, erfolgte unter Beteiligung von Blausäure. Aus dieser allein kann durch mehrstufige Polymerisation Adenin entstehen. Eine ganz ähnliche Reaktionsfolge führt von Ammoniumcyanid zum Adenin. Auch die Einwirkung energiereicher Elektronenstrahlung auf ein Gemisch von Methan, Ammoniak und Wasser liefert diesen Purinkörper. Für die Bildung einiger anderer Basen ist im Experiment Eisen als Katalysator erforderlich. Dieses kann auf der Ur-Erde als Meteor-eisen zur Verfügung gestanden haben. Alle biologisch wichtigen Purin- und Pyrimidinbasen sind mittlerweile unter simulierten präbiotischen Bedingungen hergestellt worden.

Die gebildeten Basen können mit Zuckern zu Nucleosiden zusammentreten. So liefert eine wäßrige Lösung von Adenin und Ribose (bzw. Desoxyribose) unter Einwirkung von UV-Strahlung Adenosin (bzw. Desoxyadenosin) und eine Reihe von Nucleosiden mit anderen Verknüpfungen zwischen Base und Zucker. Unter Beteiligung anorganischer Polyphosphate kommt es auch zur Bildung von Nucleotiden, wobei bevorzugt Mono-, Di- und Triphosphate gebildet werden. Die Reaktion zwischen Nucleosiden und NaH_2PO_4 bei etwa 160° C liefert ebenfalls Nucleosidmonophosphate.

Auch Fettsäuren, Kohlenwasserstoffe und Porphyrinkörper (wie sie im Hämoglobin, Chlorophyll usw. enthalten sind) sind unter präbiotischen Bedingungen hergestellt worden.

Ein wichtiges Problem ist ferner die Entstehung von Energiedonatoren. Diese Funktion hat in den Zellen aller heutigen Lebewesen vor allem

das Adenosintriphosphat (ATP) inne. Die ersten Energielieferanten für prämetabolische Reaktionen waren wahrscheinlich anorganische Polyphosphate, welche im Urozean gelöst vorlagen. Im Laufe der Zeit wurden dann organische Phosphatester und Polyphosphate gebildet, die günstiger waren.

Die Hauptmasse der gebildeten organischen Verbindungen lag sicher gelöst im Urozean vor. Diese Lösung organischen Materials wird als „Ursuppe“ bezeichnet. Die Konzentration organischer Substanzen wird bis zu 1 % geschätzt, mag aber lokal, etwa in abgeschnürten Küstenbecken, 10 % weit überschritten haben. Im Strandbereich ist ferner mit einer Austrocknung solcher Becken zu rechnen, wodurch Festkörperreaktionen bei Temperaturen von über 100° C möglich waren. Zwischen den Verbindungen fanden statistische Reaktionen statt. Dabei wurden auch Polymere gebildet. Tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen sowie die Gezeiten veränderten die Umwelt periodisch, so daß Zeitabschnitte vorwiegender Synthesen mit Zeiten vorwiegenden Abbaus solcher Polymeren abwechselten.

Bildung von Makromolekülen

Die erste Bildung von Polymeren erfolgte auf anderen Wegen als heute bei der Biosynthese in der lebenden Zelle. Im letzteren Fall ist die Bildung der Makromoleküle ein hochgeordneter Prozeß, der an das Vorhandensein von funktionsfähigen Makromolekülen gebunden ist. Die Synthesen von Polymeren im Urozean waren hingegen statistische Reaktionen. Experimentell sind solche Synthesen unter simulierten Bedingungen ebenfalls gelungen. Aus einem Aminosäuregemisch entstehen eiweißartige Verbindungen mit Molekulargewichten zwischen 3000 und über 11 000, die als Proteinoide bezeichnet wurden (S. W. FOX). Man erhält diese Proteinoide entweder bei ca. 150° C oder bei Temperaturen unter 100° C bei Zusatz anorganischer Polyphosphate in konzentrierter wäßriger Lösung. Unter den Aminosäuren des Reaktionsgemisches müssen Asparaginsäure, Glutaminsäure oder Lysin vorhanden sein; alle anderen Komponenten können beliebig gewählt werden. Die Proteinoide besitzen keinen völlig statistischen Aufbau, sondern ihre Zusammensetzung ist von der Reaktionsfähigkeit der einzelnen zur Kondensation gebrachten Aminosäuren abhängig. Proteinoide werden durch eiweißabbauende Enzyme langsam abgebaut, was ihren proteinähnlichen Charakter unterstreicht. Viele der gebildeten Proteinoide haben katalytische Fähigkeiten. Diese sind sehr unterschiedlich und quantitativ stets viel geringer als bei echten Enzymen. Entsprechend der Bildung von Proteinoiden aus Aminosäuren ist eine Polymerisation von Nucleotiden zu mehr oder weniger statistisch aufgebauten Polynucleotiden vorstellbar. Im Experiment ist diese Reaktion

bei Anwendung von Polyphosphatestern als Energielieferanten gelungen. Durch SCHRAMM wurden auf diesem Wege Polynucleotide mit Molekulargewichten bis 50 000 erhalten. Beim Erhitzen von Cytidylsäure in Gegenwart von Polyphosphorsäure auf 65° C bilden sich Oligocytidylsäuren mit Polymerisationsgraden um 5. Eine Kondensation von Mononucleotiden erfolgt in wäßriger Lösung auch unter dem Einfluß von Cyanamid, sofern Tonminerale als Katalysatoren zugegen sind.

Es darf als sicher angesehen werden, daß in der Ursuppe neben kleineren organischen Molekülen schon früh Makromoleküle von Eiweiß- und Nucleinsäure-Charakter vorhanden waren. Beide haben sich vermutlich etwa gleichzeitig gebildet. Entstanden nun unter den zahlreichen Polynucleotiden solche, die nur einen bestimmten Zucker (die D-Ribose) als Baustein enthielten und bei denen gleichzeitig alle Nucleotidbausteine gleichartig verknüpft waren, so konnte sich bei geeigneter Energiezufuhr ein solches Polynucleotid identisch reduplizieren. Dabei entsteht nach dem Matrizen-Mechanismus zunächst ein komplementärer Strang durch Anlagerung komplementärer Nucleotide. Hierzu ist kein Enzym erforderlich. Diese nichtenzymatische Bildung von Doppelsträngen verlief sehr langsam und mit beträchtlicher Fehlerquote.

Die Doppelstränge wurden durch die Tageshitze zu Einzelsträngen „aufgeschmolzen“. Während einer Abkühlungsphase (Schatten, Nacht) entstanden bei Gegenwart von Nucleotidbausteinen wieder Doppelstränge, so daß nun zwei Doppelstrang-Strukturen vorlagen. Diese konnten in der Wärme des nächsten Tages wieder aufschmelzen usw. Die Doppelstränge haben unter ungünstigen Bedingungen höherer Stabilität als Einzelstränge, sie überleben also die Zeiten bevorzugten Polymeren-Abbaus besser. Man darf ihnen daher einen Selektionsvorteil zuschreiben. Der Prozeß der Selektion ist also viel älter als die ersten Lebewesen und war bereits bei der Entstehung des Lebens wirksam. Die nichtenzymatische Replikation von Polynucleotiden verlief außerordentlich langsam und mit einer hohen Fehlerquote. War nun aber in der unmittelbaren Umgebung ein Proteinoid vorhanden, das eine Katalyse-Wirkung für die Verknüpfung von Nucleotiden hatte, so wurde die Reaktion beschleunigt.

Die ganze Entstehung von Makromolekülen mußte unter sterilen Bedingungen erfolgen. Solche waren damals naturgemäß gegeben. Heute dagegen bestehen derartige Verhältnisse nirgends auf der Erde. Würden heute geeignete organische Moleküle abiogen gebildet, so würden sie sehr bald von irgendwelchen Organismen „gefressen“. Dies war damals unmöglich; daher konnte die Entwicklung weitergehen.

Entstehung optisch aktiver Verbindungen

Polynucleotide, die befähigt sind, Doppelstränge auszubilden, dürfen nur einen bestimmten Zucker enthalten. Die Zucker sind aufgrund ihrer chemischen Struktur optisch aktive Verbindungen, d. h. es gibt von jedem Zucker zwei spiegelbildliche Formen, die man als D- und L-Form unterscheidet. Die Ribonucleinsäuren enthalten nur D-Ribose. In entsprechender Weise treten in Proteinen nur L-Aminosäuren, nie D-Aminosäuren auf. Bei chemischen Synthesen erhält man in der Regel jeweils beide Molekülformen in gleicher Menge; man spricht dann vom Racemat. Auch Simulationsexperimente liefern Racematgemische. Da aber in allen Organismen jeweils nur eine Form der Moleküle von Bedeutung ist, muß bei der Entstehung erster echter Lebewesen die Auswahl bereits erfolgt gewesen sein. Für den Vorgang der Auswahl gibt es zwei Hypothesen, zwischen denen gegenwärtig nicht entschieden werden kann:

1. Die optische Aktivität der Biomoleküle ist ausschließlich durch statistischen Zufall ausgewählt worden. Entstände das Leben nochmals, so würde die Auswahl vermutlich ganz anders aussehen.
2. Die optische Aktivität ist durch eine asymmetrisch wirkende Kraft ausgewählt worden. Entstände das Leben nochmals, so käme mit hoher Wahrscheinlichkeit dieselbe Verteilung optisch aktiver Verbindungen zustande.

Die zweite Hypothese ist für den Naturwissenschaftler befriedigender, weil ihr ein Gesetz zugrunde liegt und man somit nach einer Ursache, d. h. nach der wirkenden asymmetrischen Kraft, fragen kann. Dafür sind wiederum zwei Möglichkeiten in der Diskussion:

- a) Zirkular-polarisiertes Licht kann zur Bildung optisch aktiver Verbindungen führen. Das zirkular polarisierte Licht kann aus linear polarisiertem Himmelslicht unter Einfluß des Erdmagnetfeldes gebildet werden. Die Richtung des Erdmagnetfeldes während der präbiologischen Evolution wäre also letztlich bestimmend.
- b) Mehrfach wurden Beziehungen der optischen Aktivität zum Gesetz von der Nichterhaltung der Parität bei schwachen Wechselwirkungen angenommen. Dies sei an einem einfachen Beispiel demonstriert: Gegeben sei die Kernzerfallsreaktion



Die Elektronen, welche bei diesem β -Zerfall freigesetzt werden, sind polarisiert. Ihre Bremsstrahlung führt zu zirkular-polarisierter γ -Strahlung. So könnte eine Dissymmetrie auf der Stufe der Elementarteilchen Wirkungen im molekularen Bereich hervorrufen. Nach dieser Ansicht wäre das bevorzugte Auftreten z. B. von L-Aminosäuren durch die Grundgesetze der Materie determiniert.

Zur Klärung der Frage wurden Experimente durchgeführt, die nicht völlig eindeutig verliefen, aber mehr auf die letztgenannte Ursache hindeuten.

Wenn sich einmal asymmetrische Proteinoide als primitive Katalysatoren herausgebildet haben, so fand fortlaufende Verstärkung statt: am Katalysator werden viele neue asymmetrische Moleküle gebildet, dadurch entstehen viele neue asymmetrische Katalysatoren usw.

Organisation von Makromolekülen

Polynucleotide können mit Proteinoiden in Wechselwirkung treten und Aggregate bilden. Dabei ist eine gewisse Spezifität experimentell nachgewiesen. Wenn in solchen Aggregaten nun Proteinoide auftraten, die primitive katalytische Funktionen von Polynucleotid-synthetisierenden Enzymen aufwiesen, so war die identische Replikation von Polynucleotiden erleichtert. Wenn außerdem Proteinoide vorhanden waren, die eine katalytische Wirkung auf die Polymerisation von Aminosäuren ausübten, so lief dadurch die Synthese neuer Proteinoide besser ab. Waren die genannten Proteinoide mit Katalysfunktionen ihrerseits von der Struktur bestimmter Polynucleotide durch eine – wenn auch anfangs nur wenig spezifische – Wechselwirkung abhängig, so kam es zu einer fortlaufenden Verstärkung infolge Rückkopplung: das Aggregat vermehrt sich einigermaßen identisch. Wegen der hohen Fehlerrate bei der Replikation der Nucleinsäure ist die Weitergabe der Information mit viel „Rauschen“ verbunden. Das Wachstum geschieht auf Kosten der Umgebung; von dort werden die Bausteine (Nucleotide, Aminosäuren usw.) entsprechend dem Konzentrationsgefälle durch Diffusionsvorgänge herbeigeschafft.

Da die für die Bildung solcher reproduktionsfähiger Aggregate erforderlichen Wechselwirkungen auch beim Vorliegen sehr vieler Proteinoide nicht sehr wahrscheinlich sind, muß man mit beträchtlichen Zeiträumen rechnen, bis solche Gebilde entstanden. (Auch bei einem Würfelspiel mit 3 Würfeln ist ein dreifacher Sechser-Wurf nicht sehr wahrscheinlich, und man muß möglicherweise lange würfeln, um diese Kombination einmal zu erreichen.) Tritt aber die Kombination der spezifischen Proteinoide und Polynucleotide einmal ein, so hat sie einen hohen Selektionsvorteil. Die Zusammensetzung der Proteinoide wird immer genauer durch die Polynucleotide festgelegt; dadurch werden sie zu Proteinen.

Theoretische Überlegungen zeigen, daß eine Evolution, d. h. eine weitere Veränderung der Aggregate unter Verbesserung ihrer Eigenschaften, nur möglich ist, wenn die replikationsfähigen Polynucleotide und die Proteinoide (bzw. Proteine) miteinander in einem komplizierten, aber geschlossenen Reaktionszyklus verknüpft sind. Dieser Zyklus heißt der Hyperzyklus (Abb. 3). In ihm werden Polynucleotide durch die Wir-

kung von Proteinen (Enzymen) mit größerer Genauigkeit als vorher möglich repliziert; ihre Information bleibt also zumeist erhalten. Die Polynucleotide steuern ihrerseits die Bildung der Enzymproteine; so bleibt deren Struktur und damit auch ihre Funktion erhalten.

Kommt es in einem Hyperzyklus zu Veränderungen, so werden jeweils die Varianten einen Vorteil haben, die am raschesten arbeiten und so die meisten Molekülbausteine an sich ziehen und die mit den übrigen vorhandenen Strukturen am besten zusammenarbeiten können. Sie werden dann bevorzugt. Solche neuen Varianten entstehen durch zufällige Veränderungen von Polynucleotiden („Mutationen“) und werden durch die Bevorzugung bzw. Benachteiligung der Proteinstrukturen (anfangs wohl auch der Polynucleotid-Strukturen selbst) ausgelesen. Es erfolgt also eine Bewertung (Selektion), die „besser funktionierende“ Form setzt sich durch. So sind Mutation und Selektion schon in der präbiotischen Evolution wirksam geworden. Entstanden anfangs mehrere Hyperzyklen, so mußte sich aus demselben Grund der am besten arbeitende durchsetzen. So wird der Hyperzyklus im Laufe der Zeit immer vollkommener, er liefert aber niemals verschiedene Individuen, sondern schließlich müßte ein Hyperzyklus die ganze Erde beherrschen.

Das Wachstum des jeweils besten Hyperzyklus verläuft dabei hyperbolisch. Demgegenüber zeigen alle Lebewesen bei unbegrenztem Nahrungsvorrat ein exponentielles Wachstum. Während dieses erst nach unendlich langer Zeit zu unendlicher Größe (bzw. Zahl von Individuen) führen würde und in Wirklichkeit infolge des begrenzten Nahrungsvorrats nur bis zu einer Sättigungsgröße führt, ist die Zuwachsrate

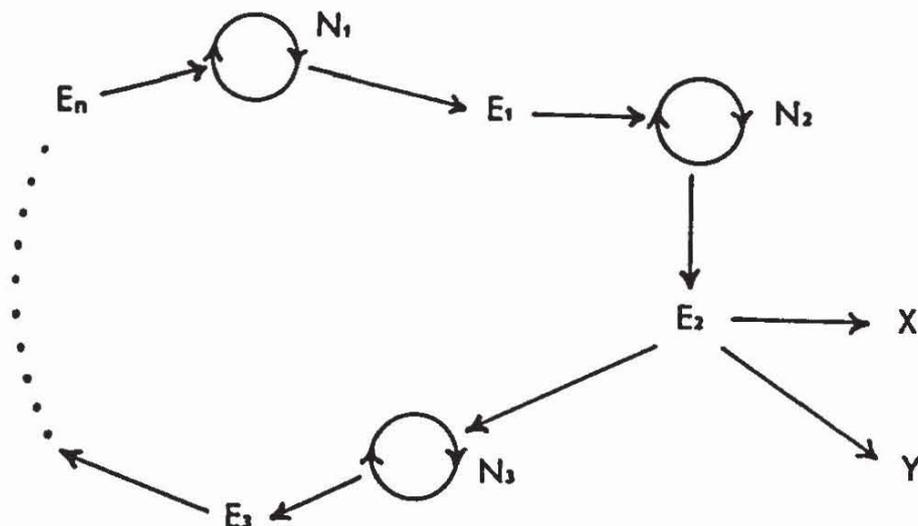


Abb. 3: Hyperzyklus. Das Polynucleotid N₁ katalysiert die Entstehung des Enzymproteins E₁, dieses die Replikation des Polynucleotids N₂ usw. Das Enzymprotein E₂ katalysiert sowohl die Replikation des Polynucleotids N₃ als auch die Bildung der Stoffe X und Y. Das Enzymprotein E_n katalysiert die Replikation von N₁, dadurch schließt sich der Hyperzyklus.

beim hyperbolischen Wachstum viel stärker. Daher würde schon nach endlicher Zeit eine unendliche Größe (des Hyperzyklus) erreicht, wenn nicht Nahrungsmangel dies verhinderte. Eine mathematische Beschreibung kann zeigen, daß sich Mutationen auf Dauer nur in Populationen durchsetzen können, die einem exponentiellen Wachstumsgesetz gehorchen. Dagegen werden in hyperbolisch wachsenden Populationen einmal festgelegte Strukturen nur anfangs, aber nicht mehr nach weiterem starkem Anwachsen, verändert. Möglicherweise ist aus diesem Grund der genetische Code, nachdem er im Hyperzyklus entstanden war, stabil geblieben.

Weil der Hyperzyklus nicht verschiedene Varianten nebeneinander zuläßt und weil er hyperbolisch wächst, konnte er allein nicht Ausgangspunkt für die Entstehung von Lebewesen mit einer Vielfalt von Arten sein. Nun war eine Diffusion der notwendigen kleinmolekularen Bausteine (Nucleotide, Aminosäuren) innerhalb kurzer Zeit zu den Syntheseorten nur dann möglich, wenn der ganze Vorgang in einem kleinen Raum stattfand. Daher konnte ein Hyperzyklus nur innerhalb einer kleinen morphologischen Einheit, z. B. einer Mikrosphäre, auf Dauer erfolgreich sein. Der Einschluß des Hyperzyklus in eine solche Einheit aber führt gezwungenermaßen zum Übergang um exponentiellen Wachstum. So erfolgte eine Individualisierung des Hyperzyklus.

Wie entstanden nun die für den Einschluß eines Hyperzyklus erforderlichen kleinen Räume?

Makromoleküle sind in Wasser höchstens kolloidal löslich. In solchen kolloidalen Lösungen kann es durch Entmischungsvorgänge zur Bildung von diskreten Aggregaten hochmolekularer Verbindungen kommen. Diese können auch kleinmolekulare Verbindungen aus der wäßrigen Lösung einschließen. Man bezeichnet solche Aggregate in der Kolloidchemie als Koazervate. Solche Koazervate kann man, wie OPARIN gezeigt hat, experimentell z. B. aus Protein und Nucleinsäure herstellen. Sie können mikroskopische Tröpfchen bilden, die in der wäßrigen Lösung schweben.

Für die Theorie der Lebensentstehung ist es nun interessant, daß bei Behandlung von Proteinoiden mit heißem Wasser Gebilde mit ganz ähnlichen Eigenschaften und wesentlich höherer Stabilität entstehen. Sie wurden von FOX als Mikrosphären bezeichnet. Diese können infolge der Selbstaggregation von Proteinoiden membranartige Oberflächen ausbilden. Sogar die Bildung von Doppelmembranen (ohne Beteiligung von Lipiden) ist nachgewiesen. Dadurch besitzen diese Mikrosphären osmotische Eigenschaften, außerdem sind ein selektiver Durchtritt von Molekülen durch die Membran und ein „Wachstum“ durch Stoffaufnahme möglich. Die Aggregation von Mikrosphären unter Ausbildung echter Brücken ist ebenfalls gezeigt worden. Ferner

sind Sprossungserscheinungen, welche Hefesprossungen morphologisch stark ähneln, nachgewiesen. Im Urozean wurden zahlreiche solche morphologische Einheiten gebildet. Von diesen waren manche gegenüber anderen im Vorteil. Begünstigt waren solche, die mehr strukturerhaltende oder -erweiternde Eigenschaften aufwiesen.

In solche morphologischen Einheiten wurde ein Hyperzyklus eingeschlossen. Wenn nun Proteine, die am Hyperzyklus beteiligt sind, gleichzeitig membranartige Strukturen ausbilden können, so hatte ein solches Gebilde zusätzliche Vorteile. Der Nachteil nur exponentieller Vermehrung wurde durch die anderen Vorteile weit überwogen. Die so entstandenen Gebilde hatten die Eigenschaften Stoffwechsel und Selbstregulation (zur Erhaltung), Vererbung (über Polynucleotide) zur identischen Vermehrung und Mutation (infolge der Fehler bei der Replikation der Polynucleotide, zur Veränderung und Evolution). Damit sind alle Grundfunktionen lebender Systeme vorhanden, es liegt ein Protobiont vor und die morphologische Einheit wird zur Zelle.

Solche Protobionten konnten auf unterschiedliche Gebiete mit unterschiedlicher Umwelt (unterschiedliche Biotope) verteilt werden, und eine Isolation war möglich. Dadurch konnten sich die Hyperzyklen etwas verschieden weiterentwickeln, und zwischen den Protobionten kam es zur Konkurrenz und die Selektion war nun zwischen unterschiedlichen individuellen Einheiten möglich. Die präbiotische Selektion von Molekülen wurde so ersetzt durch die biologische Selektion von Protobionten.

Eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der Bildung solcher Protobionten ist von KAPLAN durchgeführt worden. Er hat errechnet, daß in einer Masse von 10 t bis 100 000 t morphologischer Einheiten im Mittel ein Protobiont zu erwarten ist. Derartige Mengen morphologischer Einheiten konnten sich ohne weiteres gebildet haben. So sind bei einer Konzentration von 1‰ der makromolekularen Bausteine etwa 100 000 t Aggregate in einem Ursuppen-See von 10^3 m^3 zu erwarten. Ein derartiger See hat bei 10 m Tiefe nur eine Fläche von 10 km².

Man darf annehmen, daß solche Seen im Laufe der Jahrtausende präbiotischer Evolution vielfach aufgetreten sind. Die Entstehung von Hyperzyklen und Protobionten ist also vermutlich mehrfach möglich gewesen. Dabei haben Systeme mit besseren Wechselwirkungen stets größere Chancen zu „überleben“. Deshalb häuften sich im Verlauf der einzelnen Schritte die vorteilhaften molekularen Wechselwirkungen an. Auch wenn die einzelnen Verbesserungen, verglichen mit anderen, nicht zu Verbesserungen führenden Veränderungen selten waren, kam es zu dieser Anhäufung, denn bei den geschilderten Vorgängen zählt nur der Erfolg. Wenn wir nochmals mit dem Würfelspiel vergleichen: gewertet werden nur die dreifachen Sechser-Würfe, alle anderen Würfe zählen nicht.

Evolution des Stoffwechsels

In den Protobionten liefen nun die Evolutionsprozesse als biologische Evolution weiter. Neben der Übernahme der Informationsspeicherung auf die DNA steht vor allem die Ausbildung neuer Enzyme und die fortlaufende Erhöhung ihrer Spezifität im Zentrum des Geschehens.

Parallel zur Zunahme der Spezifität ist eine Erhöhung der katalytischen Wirksamkeit und damit der Reaktionsgeschwindigkeit der katalysierten Reaktion anzunehmen. Dadurch wird der ursprünglich sehr langsam ablaufende Proto-Metabolismus zu einem echten Stoffwechsel. Neben Proteinoiden hatten anfangs vermutlich auch schon Metallionen katalytische Funktionen. Diese wurden dann in Komplexe eingebaut und letztere schließlich vielfach mit Proteinen kombiniert. So kann man sich die Entstehung erster Enzyme mit Coenzymen vorstellen.

Für die Evolution ist ferner die Vermehrung der Nucleinsäuremenge pro Zelle wichtig. Dadurch kann mehr Information gespeichert werden. Die Vermehrung erfolgt zunächst durch eine Verdoppelung von Nucleinsäureabschnitten infolge einer „Störung“ bei der Replikation. Verdoppelte Stücke unterliegen den zufälligen Mutationen. Sie müssen nicht sofort eine neue Funktion erhalten, sondern können für kürzere oder längere Zeit funktionslos bleiben. Damit findet naturgemäß auch keine Selektion dieser „Gene“ statt.

Die ersten Lebewesen waren sicher heterotroph; sie ernährten sich vom organischen Material der Ursuppe. Da die Atmosphäre keinen Sauerstoff enthielt, gab es nur einen anaeroben Stoffwechsel. Die Energiegewinnung der Protobionten erfolgte ausschließlich durch Gärungsprozesse. Daran sind sehr wahrscheinlich von Anbeginn Stoffwechselreaktionen der Glykolyse (EMBDEN-MEYERHOF-PARNAS-Abbau) beteiligt gewesen. Der Kern dieser Reaktionsfolge dürfte ein sehr hohes phylogenetisches Alter aufweisen. Dafür spricht auch sein Vorkommen in allen heutigen Lebewesen, die daraufhin untersucht wurden. Ein ähnlich hohes phylogenetisches Alter dürften Teile des Carbonsäurestoffwechsels haben. Der zentrale Teil des Säurestoffwechsels der meisten rezenten Organismen, der Tricarbonsäurezyklus, ist mit der Atmung verknüpft. Dies konnten die ursprünglichen Wege des Säurestoffwechsels natürlich nicht sein. Dagegen sind die von Carbonsäuren ausgehenden Aminierungsreaktionen zu Aminosäuren sicher sehr alt. Als Kern des Ur-Metabolismus darf man somit Reaktionen der Glykolyse, des Säurestoffwechsels und der Aminierung bzw. Transaminierung ansehen.

Ein wichtiger Evolutionsschritt war die Erfindung der Photosynthese. Dadurch wurden die Organismen von der langsam abnehmenden Menge organischer Verbindungen des Milieus unabhängig. Durch die Photosynthese kam es zur Bildung von freiem Sauerstoff. Dieser wurde

anfangs durch Oxidationsvorgänge in der Lithosphäre gebunden, vor allem durch die Oxidation von Eisen. Dadurch war eine allmähliche Anpassung der Organismen an den Sauerstoff möglich. Die ältesten Rotsedimente der Erde, die unter dem Einfluß von Sauerstoff entstanden sein dürften, sind ca. 1,8 Milliarden Jahre alt (CLOUD 1968). Schließlich kam es zur Ansammlung freien Sauerstoffs in der Atmosphäre. Lebensformen, die sich dem oxidierenden Milieu nicht angepaßt hatten, wurden infolgedessen vernichtet. So trennt die Erfindung der Photosynthese das „präaktualistische“ Leben unter reduzierenden Bedingungen vom „aktualistischen“. Bei der Veränderung der Energiebasis auf der Erdoberfläche hat das Wasser eine Sonderstellung inne. Es ist als einzige der Verbindungen der Uratmosphäre neben dem inerten Stickstoff sowohl im reduzierenden Milieu (als Hydrid des Sauerstoffs) als auch im oxidierenden (als Oxid des Wasserstoffs) stabil. Lebende Systeme, die den Übergang von präaktualistisch nach aktualistisch erfolgreich vollziehen konnten, mußten also auf der Basis wäßriger Systeme aufgebaut sein. Die Photosynthese ist heute der quantitativ wichtigste biochemische Vorgang überhaupt und liefert durch die CO₂-Fixierung letztlich nahezu die gesamte Biomasse der Erde. Die ältesten Wege der Bindung von CO₂ standen vermutlich in Zusammenhang mit dem Säurestoffwechsel. Solche Reaktionen sind in rezenten Chlorobacteriaceen gefunden worden und können zum reduktiven Carbonsäure-Zyklus zusammengefaßt werden.

Nach der Anhäufung von freiem Sauerstoff wurde ein neuer Mechanismus des Energiegewinns unter Verwendung dieses Sauerstoffs ausgebildet. So entstand die Zellatmung. Erforderlich ist dazu ein Sauerstoff-Partialdruck von etwa $\frac{1}{100}$ des heutigen Wertes (PASTEUR-Punkt). Durch die Verschiebung der Energiebasis wird viel mehr Energie pro abgebautes organisches Molekül verfügbar. Dies war für die Höherentwicklung von Zellkolonien zu echten Vielzellern wahrscheinlich von großer Bedeutung. Die Sauerstoffanreicherung erfolgte zunächst vermutlich in der Nähe von Organismen mit Photosynthese. Daher war dort die Entwicklung auch von atmenden Organismen ohne eigene Photosynthese möglich. Diese waren zunächst an die „Sauerstoff-Oasen“ gebunden. Eine isolierte Lage solcher Oasen könnte an der Herausbildung divergierender Evolutionslinien beteiligt gewesen sein. Als der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre über 1 % anstieg, wurden die Organismen von den Oasen unabhängig (vor ca. 1,5 bis 1 Milliarden Jahren). Vor etwa 500 Millionen Jahren, vielleicht auch schon früher (vgl. WELTE 1970, GLAESSNER 1971) wurde der 10 %-Spiegel erreicht. Damit war eine Voraussetzung für die Entwicklung von Gefäßpflanzen und Landtieren gegeben.

Sauerstoff ist für die Biosynthese der meisten tierischen Hartteile erforderlich, vor allem für die Bildung von Kollagen, welches seinerseits

Voraussetzung jeder Knochenbildung ist. Möglicherweise hängt damit zusammen, daß es im Präkambrium wenige hartschalige Organismen gab.

Höherentwicklung (Anagenese)

Wir haben gesehen, daß die Protobionten die grundlegenden Eigenschaften des Lebens aufwiesen: Selbstreproduktion informations-tragender Moleküle, Stoffwechsel und Fähigkeit zur Mutation. Eine notwendige Folge der autokatalytischen Vermehrung der Systeme ist die Selektion. Wenn die Selbstreproduktion ohne Fehler abliefe, entstünden lauter völlig gleiche Systeme. Davon würden aufgrund von Baustoff-Mangel in ihrer Umgebung irgendwelche zugrunde gehen. Da alle als gleich angenommen wurden, kann man nicht vorhersagen, welche dies sind. Wenn hingegen aufgrund der Materialeigenschaften der Systeme Unterschiede zwischen ihnen bestehen, ist das Zugrundegehen auch abhängig von diesen unterschiedlichen Eigenschaften. Diese aber kommen zustande durch Mutationen. Verschieden sein können z. B. die Synthese- und Abbauraten von Nucleinsäuren und Proteinen und die Genauigkeit der Nucleinsäure-Replikation. Die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Systeme, zugrunde zu gehen, entspricht dem Begriff des Selektionswertes oder der Fitness in der biologischen Evolutionstheorie. Die Fitness ist also eine komplexe Materialeigenschaft, die im Prinzip auf Moleküleigenschaften zurückgeführt werden kann. Sie ist meßbar als Überschuß der Bildungsrate der Systeme durch exakte Replikation über die Verschwindens-Rate durch Zufall und durch Mutation. Sie muß aber auch aus den Moleküleigenschaften bei vorgegebenen Umweltbedingungen (Randbedingungen) prinzipiell berechenbar sein. Wegen unzureichender experimenteller Daten ist eine solche Berechnung praktisch allerdings noch nicht möglich. Hinzu kommt, daß die Umweltbedingungen variabel sind und man über frühere Umweltbedingungen keine zureichende Kenntnis erlangen kann. In der Theorie ist es aber möglich, den informations-tragenden Molekülen (also den Nucleinsäuren) eine *Wertfunktion* zuzuordnen (EIGEN, 1971 u. 1975).

Schon kleine Unterschiede in den Moleküleigenschaften führen durch die Selektion zu einer Auswahl. Dabei vermehrt sich jeweils die Nucleinsäure mit der höchsten Wertfunktion am stärksten. Sie hat die optimale Struktur, so lange bis eine mit noch höherer Wertfunktion entsteht, die dann die vorhergehende ablöst. Jede Änderung wird dabei gemessen an dem, was an Organisation schon vorhanden ist. Nur gleich gute oder bessere Systeme bleiben erhalten. Durch diesen *Optimierungsvorgang* kommt es zur Informationszunahme im Verlauf der Evolution. Für die Höherentwicklung „zählen“ nur die setenen Muta-

tionsereignisse, bei denen die Information zunimmt, und nicht die viel häufigeren, bei denen sie abnimmt. Alle diese Vorgänge sind Zufallsereignisse, deshalb ist der konkrete Ablauf nicht determiniert. So kommt es zur Selbstorganisation der Materie und weiter zum „Turmbau der Unwahrscheinlichkeit“ der Anagenese.

Im Bereich der biologischen Evolution spricht man auch von der Entstehung neuer Schlüsselcharaktere, die eine neue Lebensmöglichkeit (z. B. einen neuen Lebensraum) eröffnen. Solche neuen „Erfindungen“ sind im Einzelfall unwahrscheinlich, kommen aber infolge der großen Zahl von „Versuchen“ irgendwann einmal vor. Typische Schlüsselcharaktere, die für die Evolution von besonders großer Bedeutung waren, sind z. B.: die Entstehung von Polynucleotiden, die nur D-Ribose enthielten und daher stabile Doppelstränge ausbilden konnten; die Entstehung des Hyperzyklus; die Entstehung der Zelle; die Entstehung der Photosynthese; die Entstehung der Eukaryontenzelle; die Entstehung der Sexualität; die Entstehung eines Nervensystems; die Zentralisierung des Nervensystems und Entstehung eines Gehirns; die Entstehung der Warmblütigkeit; die Entstehung der menschlichen Sprache; die Erfindung der Schrift. Die beiden letztgenannten Vorgänge sind die Grundlage der menschlichen Kultur und haben deren Entstehung und Höherentwicklung eingeleitet.

Die Mutationen sind zufällig. Ihre Auswirkungen werden durch eine notwendigerweise und gesetzmäßig wirkende Kraft, die Selektion, gesiebt. Daher kann Evolution beschrieben werden als ein *Spiel* mit bestimmten *Spielregeln* (EIGEN). Die Grundprinzipien eines solchen Spiels zeigt ein Würfelspiel: das Würfeln spiegelt den Zufall wider, die vorgegebenen Spielregeln entsprechen dem Naturgesetz. Zufällig sind die Anfangszustände und -strukturen, die Randbedingungen (Umweltverhältnisse) und die zeitliche Abfolge einzelner Ereignisse, gesetzmäßig ist das Prinzip der Optimierung durch Selektion.

Diese Betrachtungsweise läßt auch den grundlegenden Fehler einer typologischen Denkweise (MAYR) erkennen, auf die eine Argumentation wie die folgende (des Wissenschaftsautors A. von GOSZTONYI) zurückgeht: „Wenn ein Organismus durch 10 000 Gene aufgebaut ist und für jedes Gen nur zwei verschiedene Mutationen möglich sind, von denen eine die richtige ist, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß alle Mutationen richtig ausfallen, $1:10^{3000}$. Aber erst wenn alle richtig sind, kann der Organismus in der Evolution entstehen.“ – Wer so argumentiert, hat den Evolutionsprozeß nicht verstanden!

Wir haben gesehen, daß man die Entstehung des Lebens und die biologische Evolution als ein Spiel mit bestimmten Spielregeln (Naturgesetzen) beschreiben kann, d. h. als ein Ineinandergreifen von Zufall und Notwendigkeit. Die Gesetzmäßigkeiten sind unabhängig von den

Zufallereignissen gültig. Dieselbe Beschreibung läßt sich auch anwenden auf die physikalische und chemische Evolution des Universums und der Erde. Auch hier sind die einzelnen Ereignisse, z. B. wo im frühen Universum eine Inhomogenität auftrat und sich so der Kern eines Milchstraßensystems oder später ein Stern bildete, zufällig. Daß aber solche Ereignisse stattfinden mußten, ist naturgesetzlich vorgegeben.

Die kulturelle Evolution des Menschen kann ebenfalls durch das Wechselspiel von Zufall (hierher gehören auch die schöpferischen Einfälle) und Gesetzmäßigkeiten erklärt werden. Diese Gesetzmäßigkeiten können wegen ihrer außerordentlichen Komplexität noch nicht mathematisch beschrieben werden. Das ist verständlich, wenn man bedenkt, daß die sicher viel einfachere mathematisierte Theorie der biologischen Evolution von EIGEN erst wenige Jahre alt und noch unvollständig ist.

„Alles Geschehen in unserer Welt gleicht einem großen Spiel, in dem von vornherein nichts als die Regeln festliegen“ (M. EIGEN).

Literatur

- CLOUD, P. F. (1968): Atmospheric and hydrospheric evolution on the primitive earth. *Science* **160**, 729–736.
- EIGEN, M. (1971): Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften* **58**, 465–523.
- EIGEN, M., u. R. WINKLER (1975): *Das Spiel*. Piper-Verlag.
- GLAESSNER, M. F. (1971): Die Entwicklung des Lebens im Präkambrium und seine geologische Bedeutung. *Geol. Rundsch.* **60**, 1323–1339.
- HARADA, K. (1970): Origin and development of optical activity of organic compounds on the primordial earth. *Naturwissenschaften* **57**, 114–119.
- KAPLAN, R. (1972): *Der Ursprung des Lebens*. Thieme-Verlag.
- KULL, U. (1972): Die Entstehung des Lebens. *Jh. Ges. Naturkde. Württemberg* **127**, 90–105.
- KULL, U. (1977 a): Die Fossilien des Präkambriums. *Naturwiss. Rundschau* (im Druck).
- KULL, U. (1977 b): *Evolution*. Studienreihe Biologie, Band 3 (herausgeg. von Prof. Dr. H. KNODEL). Metzler-Verlag (im Druck).
- MAYR, E. (1967): *Artbegriff und Evolution*. Parey-Verlag.
- MONOD, J. (1971): *Zufall und Notwendigkeit*. Piper-Verlag.
- SCHIDLowski, M. (1971): Probleme der atmosphärischen Evolution im Präkambrium. *Geol. Rundsch.* **60**, 1351–1384.
- SCHUSTER, P. (1972): Vom Makromolekül zur primitiven Zelle – die Entstehung biologischer Funktion. *Chemie in uns. Zeit* **6**, 1–16.
- WELTE, D. H. (1970): Organischer Kohlenstoff und die Entwicklung der Photosynthese auf der Erde. *Naturwissenschaften* **57**, 17–23.
- WOESE, C. R. (1971): Evolution of macromolecular complexity. *J. theor. Biol.* **33**, 29–34.

Anschrift des Verfassers: Doz. Dr. U. KULL, Biologisches Institut der Universität Stuttgart, Ulmer Straße 227, 7000 Stuttgart 60.