

**Zeitschrift:** Schweizer Archiv für Tierheilkunde SAT : die Fachzeitschrift für Tierärztinnen und Tierärzte = Archives Suisses de Médecine Vétérinaire  
ASMV : la revue professionnelle des vétérinaires

**Herausgeber:** Gesellschaft Schweizer Tierärztinnen und Tierärzte

**Band:** 128 (1986)

**Artikel:** Die Evolution in mikrobiologischer Sicht

**Autor:** Fey, Hans

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-589370>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Schweiz. Archiv für Tierheilk. 128, 165–183, 1986

Aus dem Veterinär-Bakteriologischen Institut der Universität Bern

## Die Evolution in mikrobiologischer Sicht

*Von Hans Fey<sup>1</sup>*

### I.

Die Evolutionslehre ist heute, vor allem dank der Molekular-Biologie und -Genetik, zu einem imposanten Gebäude geworden. Deren Ergebnisse sind derart eindrücklich, dass sie entweder begeisterter Zustimmung oder aber leidenschaftlicher Ablehnung rufen. Jedenfalls ist sie geeignet, das Weltbild nicht nur von Biologen nachdrücklich zu beeinflussen. In der Tat befassen sich nicht nur diese, sondern Theologen, Philosophen, Psychologen, Soziologen, Verhaltensforscher u. a. mit der Evolution. Es sei deshalb versucht, an dieser Stelle eine Darstellung von Fakten und Konsequenzen dieser Forschungsrichtung zu geben, soweit sie der Mikrobiologe übersehen kann.

Als ich 1980 vor der Stiftung «Lucerna» über «Werden und Vergehen der Infektionskrankheiten» sprach, wurden in der Diskussion die Naturwissenschaften durch einen Zoologie-Studenten gerügt, weil diese dem Materialismus verhaftet seien. Ich machte dem Studenten klar, dass er den Beruf verfehlt habe, wenn er in seiner biologischen, experimentellen Tätigkeit den rationalen, materiellen Boden verlasse und Elemente des Glaubens hineinmische. In der Tat studiert man in der Biologie die materiellen Grundlagen der Lebensabläufe, nichts anderes. Man möchte die Eigenschaften des Organismus aus der Struktur der ihn aufbauenden Moleküle erklären [24]. Wenn dann der Naturwissenschaftler nach getaner Arbeit über diese nachdenkt, so tut er dies entsprechend von Neigungen und Glaubensbekenntnis als Christ, oder Agnostiker oder Vitalist oder Philosoph oder was auch immer, aber nicht mehr als Fachbiologe. Er ist sich dann wohl bewusst, dass das Ganze mehr ist als die Summe der Teile [23, 24], aber worin dieser Unterschied liegt, kann er mit seinem Wissen nicht erklären, und er versucht es auch nicht. Jedenfalls ist es falsch, dem Biologen vorzuwerfen, für ihn sei der Mensch «nothing but» Chemie plus Physik. Diese Trennung zwischen Beschäftigung mit experimentellen Ergebnissen und deren philosophischen Implikationen oder Glaubenshalten ist mir ein zentrales Anliegen.

Man wird bei der Beschäftigung mit diesen Themen unweigerlich auch Stellung nehmen müssen, entweder als Creationist oder als Evolutionist. Meine folgenden Ausführungen stehen völlig auf dem Boden der naturwissenschaftlichen Evolution.

Die missionarische Abstützung auf den Wortlaut der Genesis im 1. Buch Mose hat dazu geführt, dass überall dort, wo sich eine protestantische Naturtheologie ausbreite, ein sog. Scientific Creationism beachtlichen (auch politischen) Einfluss gewann, so z. B. im Bible Belt des nordamerikanischen Mittelwestens mit Ausläufern bis ins Weisse

---

<sup>1</sup> Adresse: Prof. Dr. H. Fey, Postfach 2735, CH-3001 Bern

Haus, sowie im australischen Queensland. Viele Anhänger dieser Bewegung sind Akademiker, z. T. mit PhD. Sie wenden sich mit ihren Thesen vor allem an die öffentliche Presse, Lehrbuch-Komitees, Gerichtshöfe. Sie suchen den Beifall des Volkes, der vor allem, wenn es gegen die Intellektuellen geht, leicht zu haben ist. Dies wird dann bedenklich, wenn sie die Hand auf die Biologie-Ausbildung in den Mittelschulen legen können. Feyerabend proklamierte: «Three cheers to the fundamentalists in California who succeeded in having a dogmatic formulation of the theory of evolution removed from the textbooks and an account of Genesis included» [5].

Nichts, auch die modernsten Ergebnisse der Molekular-Biologie nicht, hindert uns daran, die Schönheit der Schöpfungs-Geschichte in uns aufzunehmen. Sie hat auch zu wunderbaren Darstellungen in der Kunst geführt.

Es ist übrigens interessant, darauf hinzuweisen, dass gemäss dem Ersten Buch Mose Gott am ersten Tag das Licht schuf und Tag und Nacht trennte. Bereits am dritten Tag sprach Gott: «Die Erde lasse sprossen junges Grün; Kraut, das Samen trägt, und Fruchtbäume, die nach ihrer Art Früchte tragen auf der Erde, in denen ihr Same ist.»

Aber erst am *vierten* Tag sprach Gott: «Es sollen Lichter werden an der Feste des Himmels, Tag und Nacht zu scheiden, und es geschah also. Gott machte die zwei grossen Lichter; das grössere Licht, dass es den Tag beherrsche, und das kleinere Licht, dass es die Nacht beherrsche, dazu auch die Sterne.»

Nach naturwissenschaftlicher Kenntnis können grüne Pflanzen erst entstanden sein, *nachdem* der Energiespender Sonne am Himmel stand, weil das Grün der Pflanzen und die Photosynthese untrennbar verbunden sind.

Aber es ist mir wichtig, festzustellen, dass religiöse Wertvorstellungen und naturwissenschaftliche Kenntnisse längst keine Antithesen mehr sind [25]. Biologen sind mindestens so grosse Bewunderer der «Schöpfung» wie gewisse Leserbriefschreiber, die genau Bescheid wissen. Auch jener Automobilist, der auf seinem Gefährt einen Kleber mitführte: «EVOLUTION, NEIN DANKE» und daneben gleich noch mit ebensolchem Slogan Atomkraftwerke ablehnte, überzeugte nicht sonderlich.

*H. v. Ditzfirth* [14] meint sogar, dass die Aussichten auf eine Harmonisierung von religiösem und naturwissenschaftlichem Weltbild seit dem frühen Mittelalter nie mehr so günstig waren wie heute.

Eines trennt die Evolutionsgegner unüberbrückbar von den Biologen: Die scheinbare Sicherheit des Wissens, die die ersteren für sich beanspruchen. Demgegenüber hält Popper fest: «Kein echter Wissenschaftler beansprucht Autorität». In der Wissenschaft ist das *Resultat* die Autorität nicht der Forscher. Man höre auch Xenophanes (ca. 500 v. Chr.):

«Sichere Wahrheit erkannte kein Mensch  
und wird keiner erkennen.  
Nicht von Beginn an enthüllten die Götter  
den Sterblichen alles.  
Aber im Laufe der Zeit, finden wir,  
suchend, das Bess're.»

Die Wissenschaft von der Evolution hat ein schweres Handicap: Sie basiert auf der Geschichte und ihre Befunde können deshalb nicht experimentell überprüft werden. Sie haben also nur im Sinne von Analogieschlüssen Gültigkeit. Aufgrund solcher Analogien ist aber heute die Evolution weltweit von jedem ernst zu nehmenden Wissenschaftler als *Tatsache* anerkannt. Die Evolutionslehre bedient sich gesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse von heute, vor allem der Molekular-Genetik, und schliesst daraus auf physikalisch-chemische und biologische Abläufe vor Milliarden von Jahren. Das Enzym Cytochrom c ist beim oxydativen Stoffwechsel aller Zellen beteiligt und tat dies schon in vergleichbarer Weise vor 1,2 Milliarden Jahren.

Demgemäß führen die Ergebnisse moderner Biologie zu folgenden Folgerungen [25]:

- 1) Grundsätzliche genetische Erkenntnisse, die an einer bestimmten Art gewonnen wurden, erlauben Rückschlüsse für den Gesamtbereich aller biologischen Arten.
- 2) Auch auf die Arten früherer geologischer Zeitalter dürfen die genetischen Grund-erkenntnisse angewandt werden.
- 3) Wir erhalten durch die Genetik einen klaren Beweis für die Tatsache der Ab-stammung alles Lebens der Erde aus einheitlicher Wurzel.

Der Begriff *Evolution* wurde von *Charles Darwin* [9] eingeführt. Sein Vorgänger war *Lamarck*, der 1809 vier Prinzipien verkündete, nach denen ein Organismus sich mit seiner Umwelt auseinandersetzt [32]. Der vierte Punkt betrifft den berühmten Irrtum von der «Vererbbarkeit erworbener Eigenschaften».

Darwin besuchte 1831 als Naturforscher die Galapagos-Inseln auf H.M.S. «Beagle». Er fand auf jeder Insel eigene Arten von Schildkröten, Spottdrosseln und Finken. Aufgrund umfassender zoologischer und botanischer Kenntnisse, sowie Beob-achtungen formulierte er sein umwälzendes Konzept von geschichtlicher Grösse, wel-ches er 1859 in seinem Buch «Origin of Species» publizierte.

Darin kommt er zum Schluss, dass die Arten nicht unabhängig voneinander er-schaffen worden sind, sondern ähnlich den Varietäten von andern Arten abstammen. Die Hauptpostulate waren die folgenden: Der Mechanismus der Artenbildung beruht auf der Selektion von Varietäten; die Welt ist nicht statisch, sondern unterliegt einer kontinuierlichen, schrittweisen Evolution. Daraus ergibt sich, dass 1. die Arten auf eine gemeinsame Abstammung zurückgehen; 2. dass ähnliche Organismen miteinander verwandt sind (womit Darwin sich im Gegensatz zu Lamarck setzt) und alle Lebewesen wohl von einem einzigen Ursprung her stammen.

Die erwähnte Selektion nennt Darwin «natürliche Zuchtwahl» und «geschlecht-liche Zuchtwahl». Es werden viel mehr Einzelwesen einer Art geboren, als je leben können. Also muss jedes Individuum, welches irgendwie vorteilhaft von den andern abweicht, von der Natur zur Zucht ausgewählt werden. Damit kommt es zur bevor-zugten Veränderung einer Varietät.

Darwin prägte den Begriff «Struggle for life», aber anerkannte, dass Spencers Aus-druck «Survival of the fittest» besser sei. Beide Begriffe haben die Welt erschüttert.

Es geht um das Prinzip, dass jede geringfügige, wenn nur nützliche Veränderung, im Individuum konserviert wird und sich züchterisch auswirkt. Darwin betont – und

dies ist im Hinblick auf späteren Missbrauch wichtig zu wissen – dass er den Ausdruck «struggle for life» in einem metaphorischen Sinne gebraucht, der, was wichtiger ist, nicht nur das Leben des Individuums, sondern auch seine Fähigkeit, Nachwuchs zu hinterlassen, mit einschliesst. Dies führte zum Begriff der «geschlechtlichen Zuchtwahl»: «Diese Form der Zuchtwahl hängt nicht von einem Kampf ums Dasein mit anderen Lebewesen ab, sondern vom Kampf zwischen den Individuen eines Geschlechts, gewöhnlich des männlichen, um den Besitz des andern. Schluss-Ergebnis ist nicht dessen Tod, sondern eine geringere oder gar keine Nachkommenschaft.»

Im Gründungswerk heisst es nur nebenbei, weil Darwin ein sehr vorsichtiger, verantwortungsbewusster Wissenschaftler war: «Es wird Licht fallen auf den Ursprung des Menschen und auf sein Geschlecht.»

Das Buch war sofort nach Erscheinen vergriffen und es kam zu wilden kontradiktiorischen Diskussionen. Der Gedanke von der «Abstammung vom Affen» wurde von vielen als empörend empfunden, weil man trotz jahrtausendealter geschichtlicher, genteiliger Information den Menschen als lichtvolle Spitzenleistung der Schöpfung betrachten wollte.

Wilhelm Busch hat das sehr schön ironisiert:

«Sie streiten sich beim Wein herum,  
was das nun wieder wäre.  
Das mit dem Darwin wär' gar zu dumm  
und wider die menschliche Ehre.  
Sie tranken manchen Humpen aus,  
sie stolperten aus den Türen,  
sie grunzten vernehmlich und kamen zu Haus  
gekrochen auf allen Vieren.»

Darwins Konzept, welches von den Naturwissenschaftern bald völlig übernommen wurde, hatte schwere Missdeutungen zu überstehen: Der Kampf ums Dasein ergab eine biologische Entschuldigung für die Ausbeutung durch den Frühkapitalismus und für die Rücksichtslosigkeit des Merkantilismus. Karl Marx konstruierte damit eine wissenschaftliche Begründung seiner Lehre, obwohl er von Darwin abgelehnt wurde. Unter dem Abusus von Nietzsches «Übermenschen» hatten die Nazis aus «survival of the fittest» das «Recht des Stärkeren» und zuletzt die «Vernichtung nicht lebenswerten Lebens» gemacht [32].

Ich wiederhole, dass Darwin den Begriff als Metapher verstand und selbst betonte, dass die genetisch Bevorteilten nicht immer die «Besten» zu sein brauchen.

Jedenfalls aber wurde Darwins Jahrhundert-Idee einer konstant evolvierenden Welt bald einmal, d.h. noch vor seinem Tod im Jahre 1882, von der gesamten ernstzunehmenden Wissenschaft akzeptiert und hat heute dank der Erkenntnisse der modernen Molekularbiologie, die auf der materiellen Ebene «fast alles erklären kann», eine vollumfängliche Bestätigung erhalten. Die Evolution ist eine wissenschaftlich begründete Tatsache, ein Naturgesetz [15].

Schwierigkeiten kamen, und kommen teilweise immer noch, von theologischer, besonders fundamentalistischer Seite. Da die Evolution eine konstante Veränderung seit allen Zeiten und bis in alle Zeiten bedingt und den Menschen mit einschliesst, so ist sie

nicht deterministisch. Der heutige Naturzustand, immer inklusive Mensch, hat damit provisorischen Charakter, und unsere Gegenwart kann also weder das Ende noch das Ziel der Entwicklung sein. «Das Universum, käme auch ohne uns zurecht» [14]. Es gibt überhaupt kein Ziel! Die Natur fördert nur, was bereits existiert. Allerdings gibt es ein Urteil über die Qualität der Varietät, welches von der Selektion gesprochen wird. Die Variation entsteht durch reinen Zufall, d.h. ohne jede Beziehung zwischen Ursache und Wirkung. Die Giraffe hat nicht einen langen Hals, *damit* sie hoch liegende Blätter erreichen kann, sondern sie kann diese holen, *weil* sie einen langen Hals hat [24].

Diese Gedanken wurden gerade von *Jacques Monod* [33] mit brutaler Konsequenz verfochten: «Wir verdanken unsere Existenz einer Kette von konservierten Zufällen; aber wir möchten, dass wir notwendig sind, dass unsere Existenz unvermeidbar und seit allen Zeiten beschlossen ist.» Dies aber sei eine anthropozentrische Illusion. «Er (der Mensch) weiss nun, dass er seinen Platz wie ein Zigeuner am Rande des Universums hat, das für seine Musik taub ist und gleichgültig gegen seine Hoffnungen, Leiden oder Verbrechen» (S. 211). «Der Alte Bund ist zerbrochen: der Mensch weiss endlich, dass er in der teilnahmslosen Unermesslichkeit des Universums allein ist, aus dem er zufällig hervortrat. Nicht nur sein Los, auch seine Pflicht steht nirgendwo geschrieben. Es ist an ihm, zwischen dem Reich und der Finsternis zu wählen.» (S. 219).

*Manfred Eigen* hat diese Aussage wesentlich gemildert, obwohl er in der Darstellung der Molekularbiologie völlig mit Monod übereinstimmt [15]. «Der Mensch ist weder ein Irrtum der Natur, noch sorgt diese automatisch für seine Erhaltung.» Der Mensch ist vielmehr Teilnehmer an einem grossen Spiel. Im Mikrokosmos, der Welt der Elementarteilchen, spielen sich alle physikalischen Elementarprozesse ab, und der Zufall hat seinen Ursprung in der Unbestimmtheit dieser Elementarereignisse. Dieser bestimmt zwar die Entstehung gewisser Moleküle, aber nicht die Entstehung des Lebens. Der Zufall hat also bei Eigen nicht die geradezu existentielle Bedeutung, die ihm Monod beimisst, sondern ist im Sinne eines Jahrmillionen dauernden Würfelspiels zu interpretieren.

Die Mutation erfolgt zwar nicht zielstrebig, aber durch die Selektion wird das Ziel eindeutig festgelegt. Dadurch ist Eigen wesentlich deterministischer als Monod, der den blinden Zufall absolut betont. Nach Eigen grenzt die zufällige Grundstruktur die Möglichkeiten ihrer eigenen Evolution schon ganz wesentlich ein. Wechselwirkungen des Systems mit der Umwelt sind völlig determiniert. Eigen's «Spiel» zeigt, dass irgend einmal ein Treffer gezogen werden muss, danach wird basierend auf einer speziellen Kombination von Regeln, die ein variables Verhalten ganzer Klassen von Spezies oder von Molekülen zulässt, ein selektiver Vorteil stabilisiert. Der Glückstreffer ermöglicht das Weiterspielen auf einer günstigeren Gewinnebene. «So kam am Ende ein ansehnlicher Evolutionsgewinn heraus, eben der Mensch.»

Solchen Überlegungen müsste sich eigentlich auch *Arthur Koestler* [27] anschliessen können, der die Evolution als «Blindekuh-Spiel» brandmarkt. Er argumentiert für seine Ablehnung mit dem Riesenpanda, der an seinen vorderen Tatzen einen zusätzlichen, höchst nützlichen Finger besitzt. «Die Möglichkeit, dass unter allen denkbaren Mutationen gerade diejenigen sich entwickelt haben, die dazu nötig sind, sei infinitesimal gering.» Deshalb sei die Doktrin, ihr zeitliches Zusammentreffen sei einer Reihe von

blindenden Zufällen zu verdanken, nicht nur ein Affront gegen den gesunden Menschenverstand, sondern verstösse auch gegen die Grundprinzipien wissenschaftlicher Methodik. Koestler propagiert deshalb die Konzeption einer «inneren Selektion», was immer das bedeuten möge, nämlich einer Hierarchie von Kontrollstationen, mit deren Hilfe die Folgen schädlicher Gen-Mutationen eliminiert und die Auswirkungen nützlicher Mutationen koordiniert werden.

«Mit Worten lässt sich trefflich streiten,  
mit Worten ein System bereiten»,

aber mit solcherart verschwommenen Vorstellungen lässt sich allerdings kein Staat machen und grundsätzlich ist festzuhalten, dass man zwar mit Hilfe von Fakten in einem Gebiet, in dem die Fakten noch nicht ausreichen, philosophieren kann und soll. Man kann aber nicht Fakten wegphilosophieren. Der Irrtum Koestler's besteht darin, dass er unterstellt, die überaus komplexen Mutationen, die für die Panda-Zehe notwendig waren, seien in einem einzigen Zufallsschritt aufgetreten. Dies wäre in der Tat unwahrscheinlich, und wir kommen im Zusammenhang mit der Besprechung der Bedeutung von Cytochrom c für das Evolutions-Verständnis nochmals darauf zurück. Die Evolution ist aber die Geschichte der ganz kleinen Schritte, deren vorteilhafte oder jedenfalls nicht störende Ergebnisse konserviert wurden.

In der vor-molekularbiologischen Zeit hat sich *Teilhard de Chardin* (gest. 1955) das Verdienst erworben und ist das Risiko eingegangen, die Ergebnisse der Evolutionslehre in ein christliches Gedankengebäude zu integrieren [39]. Damit hat er, der von einer geologisch-paläontologischen Sicht ausging, die Evolution als «endgültige Erkenntnis» in breiten und vor allem auch kirchlichen Kreisen bekannt gemacht. Seine Kirche hat ihm das übel genommen und ihn mit Sprech- und Publikationsverbot belegt. T. de Chardin stellt fest, dass das Universum keineswegs statisch, sondern höchst dynamisch ist, indem sich fortschreitende Entwicklungsprozesse abspielen, die sich in biologischen Erscheinungen abzeichnen. Allerdings können wir «wohl ihre Existenz feststellen, ohne jedoch ihre innere Struktur erklären zu können». «Es ist nötig, dass sich über den Einzelwissenschaften eine Synthese der Wissenschaften aufbaue, die uns über uns selbst und über unseren Platz im Kosmos unterrichtet.» Für T. de Chardin ist es, als strebe die kosmische Evolution zur Bildung immer komplizierterer Strukturen. Atome werden durch Affinität zusammengedrängt, die Moleküle bilden sich. Zellen vereinigen sich zu Organismen. Durch Vereinigung lebender Organismen entstehen verschiedene Formen der Gemeinschaft (Wald, Herde, Ameisenstaat). Die Vereinigung von Personen führt zu Familie, Volk, Gemeinschaft der Völker.

Ausgehend von wissenschaftlichen Fakten hat sich damit T. de Chardin auf das Gebiet einer mythischen Ideologie begeben. Sein Erfolg liegt wohl darin begründet, dass er ein allgemeines anthropozentrisches Bedürfnis befriedigte, indem er den Menschen als nicht zufälligen Zweig des Tierreiches betrachtete. «Die Stellung des Menschen in der Evolution ist zu zentral. Darin liegt seine Würde und Überlegenheit.» Obwohl T. de Chardin damit den Boden der Wissenschaft verlässt, hat er es doch nicht verdient, von Monod als «zweitrangiger Anthropologe» bezeichnet zu werden.

In der Musik ist Gustav Mahler mit seiner 3. Symphonie auf ähnlichen Wegen geschritten wie T. de Chardin. Er hat diesem Werk ein, später allerdings wieder zurückgenommenes, Programm zugrunde gelegt, welches die Evolution beschreibt, indem er dessen sechs Sätze wie folgt umschrieb: 1. «Pan erwacht, der Sommer marschiert ein.» 2. «Was mir die Blumen erzählen.» 3. «Was mir die Tiere im Walde erzählen.» 4. «Was mir der Mensch erzählt.» 5. «Was mir die Engel erzählen.» 6. «Was mir die Liebe erzählt.» Mahler erklärte sein Werk wie folgt: «Es beginnt bei der leblosen Natur und steigert sich zur Liebe Gottes . . . vom dumpfen, starren, bloss elementaren Sein (der Naturgewalten) bis zum zarten Gebilde des Herzens, welches wiederum über dieses hinaus (zu Gott) weist und reicht.» (K. Schädelin).

Meine Aufgabe ist es nun, über naturwissenschaftlich gesicherte Ergebnisse zu berichten, und zwar vorwiegend aus dem Gebiet der Molekularbiologie und der Bakteriengenetik. Ich spreche also von experimentellen und nicht von spekulativen Befunden. Von der heutigen genauen Kenntnis der biologischen Mechanismen, die in der Tat sehr weit gediehen ist, lassen sich zwangslässig Rückschlüsse auf den Ursprung des Lebens ziehen. Denn es ist nicht denkbar, dass sich am Ursprung des Lebens etwas ganz anderes abgespielt hat, als heute. Die einzelnen Prozesse sind genau bekannt, aber es gibt naturgemäß grosse Lücken des Verständnisses, was zwischen den Ereignissen lag.

Im Gegensatz zu den Creationisten sagen die Wissenschaftler nicht, «es ist so», sondern man spricht aufgrund von wissenschaftlich fundierten Fakten von Evidenzen. Neue Fakten mögen alte Irrtümer stürzen. So kommt es denn, dass man im Sinne von Karl Popper in der Wissenschaft eigentlich niemals ein Resultat beweisen, sondern höchstens falsifizieren kann.

Manfred Eigen [15] können wir uns jedenfalls bedingungslos anschliessen, wenn er sagt: «Es ist keineswegs so, dass das Wundervolle dadurch zu existieren aufhört, dass man es begreift.»

## II.

Die molekular-biologischen Grundlagen, die das Verständnis der Lebensvorgänge ermöglichten, wurden in den letzten 30 Jahren an Bakterien und Viren erarbeitet. Den stark vereinfachten Weg von der genetischen Information, welche in der Desoxyribonukleinsäure (DNA) festgelegt ist, bis zum Protein habe ich anderswo beschrieben [18, 19, 1].

Die logische Folge der identischen Replikation der DNA und der durch die Bot-schafter-RNA (mRNA) gesteuerten Proteinsynthese ist einerseits die Invarianz der genetischen Information und andererseits die Herstellung des immer gleichen Genproduktes. Deshalb hat die Tochterzelle die gleichen Eigenschaften wie die Mutterzelle.

Evolution ist aber nur möglich, weil diese Invarianz durch eine Reihe weiterer genetischer Vorgänge durchbrochen werden kann: 1. Mutation/Selektion, und bei den Bakterien: 2. Transformation, 3. Transduktion, 4. lysogene Konversion (3 und 4 durch Bakteriophagen vermittelt), 5. Konjugation und 6. Transposition oder Translokation.

Da die Mutation/Selektion für die Evolution von zentraler Bedeutung ist und auch bei kernhaltigen Eukaryoten spielt, sei sie am Beispiel der Streptomycin-Resistenz von

*E. coli* in Erinnerung gerufen. Es sind denn auch vorwiegend Antibiotica-Resistenzerscheinungen, die dem Bakteriologen eine tägliche Anschauung dieses wichtigen Mechanismus der Evolution gewähren.

Bei der Mutation wird bei der DNA-Replikation die Nukleotidsequenz durch Wegnehmen, Hinzufügen oder Austausch von Nukleotiden spontan und zufällig verändert. Ist die neue Information für die Zelle vorteilhaft, so wird diese Zelle gegenüber der Stammpopulation durch ökologischen Druck *selektiv* bevorzugt, und sie verdrängt in der Folge durch Vermehrung die bisherige Population. In Fig. 1 wird der Vorgang grafisch dargestellt.

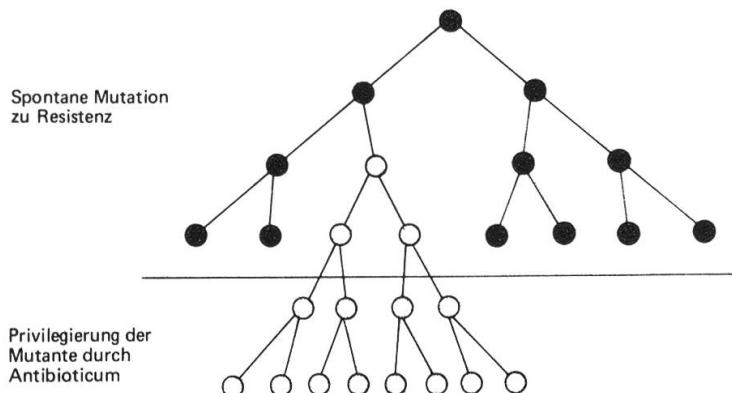


Fig. 1 Spontanmutation und Selektion der Mutante durch Änderung der Ökologie am Beispiel der Streptomycin-Resistenz von *E. coli*. (nach H. Fey [18] S. 93)

Die Streptomycin-resistente Mutante entsteht spontan und vor allem unabhängig von der Anwesenheit von Streptomycin. Es gab also schon immer solche Mutanten und nicht erst seit der Verfügbarkeit von Streptomycin in der Therapie ab 1947/48.

Die Mutante wird nun unter dem Selektionsdruck von Streptomycin bevorzugt (survival of the fittest) und verdrängt die sensiblen Keime, die abgetötet werden. Damit wird die ursprünglich Streptomycin-sensible Population durch eine resistente ersetzt.

Mutation ist ein häufiges Ereignis. Zum Beispiel ist die Wahrscheinlichkeit, dass *E. coli* Lac-minus wird, also die Fähigkeit, Milchzucker zu vergären, verhältnisweise gering,  $10^{-6}$ . Das bedeutet, dass in einer Population von  $10^6$  Bakterien eine Zelle in diesem Genlocus mutiert ist. In einer Bakterienkultur von 18 Std. mit  $10^9$  Keimen/ml gibt es also bereits 1000 Lac-minus-Mutanten. Dasselbe gilt für alle anderen Gene. Die Mutation ist demnach die Regel und nicht die Ausnahme. Indessen geht die Mutante meist unter, weil die normale Gesamtpopulation üblicherweise im Vorteil ist: in einer Milchzucker-haltigen Bouillon vermehren sich die Lactose-vergärenden Bakterien rascher als Minus-Mutanten, die deshalb bald wegverdrängt werden. Nur eine gezielte Selektion der besonderen Eigenschaft fördert die Mutante, sofern ihr aus der neuen Eigenschaft ein Vorteil erwächst.

Dieses Beispiel gilt, mutatis mutandis, für alle Evolutions-Phänomene, die jetzt besprochen werden sollen.

### III. Die Entstehung der Erde und des Lebens

Wir befassen uns in dieser Arbeit mit der Zeit von der atomischen-chemischen Evolution bis und mit der Bildung von primitiven Einzellern, den Eukaryoten (Algen), also dem Präkambrium.

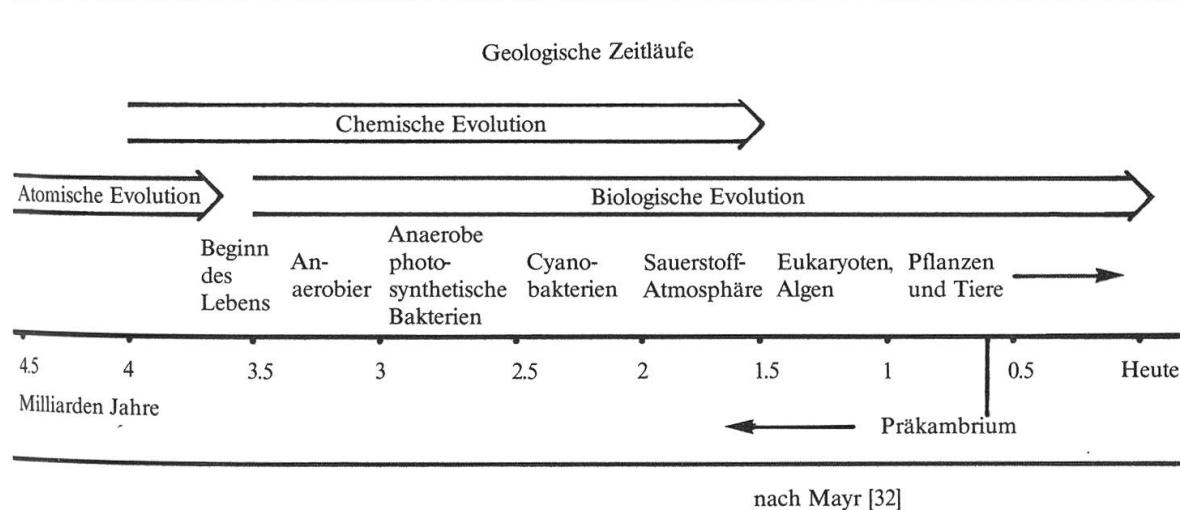


Fig. 2

Im Kambrium wurden Fossilien von Pflanzen und Tieren gefunden, die genauen Einblick in die Evolution von da an gewähren. Es gibt zwar fossile Funde von Mikroorganismen in der Form von australischen Stromatoliten, die 3,5 Milliarden Jahre alt sind. Man nimmt deshalb an, dass Leben nicht später als 1 Milliarde Jahre nach der Entstehung der Erde in dieser primitiven Form existierte.

Leben wird definiert als ein System, welches zu Replikation, Stoffwechsel und Variabilität fähig ist [17], ausserdem unterscheidet es sich von allen andern Naturerscheinungen durch den Besitz eines Programmes, welches in der Substanz der Gene niedergelegt ist [30].

Für die Art der Entstehung des Lebens gibt es keine experimentellen Beweise. Die Evolutionslehre hat aber aus den heute bestens bekannten molekular-biologischen Fakten ein Gedankengebäude errichtet, «wie es hätte sein können», welches einen sehr hohen Grad von Wahrscheinlichkeit beanspruchen kann.

#### *Die präbiotische Epoche*

Die Erde ist 4,55 Milliarden Jahre alt, wobei die Kosmologen nur noch über die zweite Stelle nach dem Komma diskutieren [37]. Sie wurde von Anfang an massiv aus dem Weltraum bombardiert, wodurch gewaltige Mengen von Kohlenstoff- und Stickstoff-Verbindungen auf deren Oberfläche gelangten. Diese Verbindungen (Methan, Formaldehyd, Ameisensäure, Ammoniak und Cyanwasserstoff) sind alle spektroskopisch in den Staubwolken unseres Galaxie-Systems nachgewiesen worden [17]. Vor allem inter-

essant sind die Meteoriten, die bis zu 5% Kohlenstoff enthalten. Daraus konnten Purine, Pyrimidine und Aminosäuren extrahiert werden, Grundbausteine für die alles entscheidenden Lebens-Polymeren der Nukleinsäuren und Proteine. Im Murchison-Chondriten (Australien) entfällt ein Drittel des gesamten Aminosäurengehaltes auf Glycin, an zweiter Stelle steht Alanin. Beide Aminosäuren sind auch in allen Lebensformen die wichtigsten Vertreter [14]. Diese Bevorzugung ist offenbar nicht zufällig, denn das Codon GGC der RNA, welches für Glycin codiert, ist nach Eigen das chemisch stabilste und spezifischste. Das zweitstabilste Codon GCC codiert für Alanin [14].

Die sog. «Ursuppe» enthielt auch Zucker, die für den Aufbau der Nukleinsäuren wichtig sind. Da die Atmosphäre von Venus und Mars heute hauptsächlich aus Kohlensäure besteht, wird angenommen, dass die Erde zu Beginn ebenfalls vorwiegend eine  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre besass wie die benachbarten Planeten des gleichen Sonnensystems.

Realistische Vorstellungen über die Entstehung lebenswichtiger Verbindungen wurden durch das berühmte Schlüsselexperiment gewonnen, welches *Stanley Miller* 1953 durchführte [14, 12, 4]: Die präsumtiven Moleküle aus der Uratmosphäre,  $\text{CO}_2$ , Methan, Ammoniak und molekularer Wasserstoff wurden bei völliger Abwesenheit von Sauerstoff in Wasser in einem hermetischen Gefäß während Tagen verdampft und kondensiert und dabei dauernd heftigen elektrischen Entladungen ausgesetzt. Dabei entstanden spontan lebenswichtige Aminosäuren, Cyanide und Formaldehyd. Die für Vorläufersubstrate des Lebens wichtigen Bausteine: Aminosäuren für die Proteine, Zucker, Phosphate und organische Basen für die Nukleinsäuren, Lipide für Membranen konnten in der «Ursuppe» entstanden sein. Formaldehyd-Moleküle tendieren dazu, sich zu Zuckern zu verbinden, wie z. B. Ribose, dem Baustein von RNA. Allerdings sind bei solchen Experimenten wie demjenigen von Miller bis jetzt nie Nucleotide entstanden [4].

Die nicht-biologische Synthese von Polyphosphaten ist bekannt, daraus mag ATP, das wichtige Energiespeicher-Molekül entstanden sein [12]. Man sah nur etliche Schwierigkeiten, wie die Polymerisation zu Makromolekülen in einer wässrigen Umgebung vor sich ging, weil die Anwesenheit von Wasser die Depolymerisation begünstigt und nicht das Gegenteil. Man denkt sich deshalb, dass sich solche Vorgänge an Orten abspielten, wo immer wieder Verdunstung erfolgt, wie in einem Gezeitengebiet. Es war auch nicht anzunehmen, dass in wässriger Umgebung die für eine Polymerisation nötigen Substrat-Konzentrationen garantiert seien. Damit ergaben sich Zweifel, dass «das Leben aus dem Meer kam».

Die einfachste Art des spontanen Aufbaus ist die Kristallisation aus simplen Einheiten. Dies gab *Cairns-Smith* [4] die Idee, dass Tonerden als erste Strukturmaterialien dienten. Tonminerale kristallisieren aus verdünnten Lösungen von Kieselsäure und hydrierten Metallionen, und Polyphosphate tendieren dazu, an Ton zu kleben. *Weiss et al.* [zit. n. 17] zeigten, dass Tone – mikroskopisch dünne Plättchen, die auf beiden Seiten wasseranziehende chemische Gruppen tragen – mit spezifischen katalytischen Eigenschaften replizieren können und diese Eigenschaften in weiteren Generationen behalten. Tone können auch Energie aus ihrer Umwelt aufnehmen und über Jahrtausende speichern.

Wenn Adenylate (Ester aus Aminosäuren und Adenosin-Monophosphat) an Ton absorbieren, bilden sich Polypeptidketten von 50 und mehr Aminosäuren mit nahezu 100% Ausbeute. Das sind Vorläufer der Proteinsynthese [21]. Die Tone bilden damit auch eine Art von Matrize für die Bildung von Makromolekülen [4].

Leben bedingt die Existenz von replizierenden Molekülen, die Information tragen. *Eigen et al.* [16] nehmen an, dass die erste genetische Information von RNA-Molekülen gewährleistet wurde. Aufgrund physikochemischer Experimente kommen sie auch zum Schluss, dass sich auf der molekularen Ebene die Scherfrage, wer zuerst gewesen sei, das Huhn oder das Ei, nicht stelle. Primitive RNA und proteinoide Polymere, die sich bei der Erwärmung von Aminosäuren spontan bilden, müssen simultan evolviert haben. Protein allein kann aber nicht evolvieren; nur selbst replizierende Moleküle, die die Information speichern, können das. Sicher ist die heute bekannte Proteinsynthese viel zu komplex, als dass sie in einem einzigen Schritt durch Zufall hätte entstehen können [16].

Genau dieser kritische Vorwurf wird vom britischen Physiker *Bernal* erhoben [zit. n. 12]: «The picture of the solitary molecule of DNA on a primitive seashore generating the rest of life was put forward with slightly less plausibility than that of Adam and Eve in the Garden.»

*Cairns-Smith* [4] meint deshalb, es sei vorstellbar, dass die ersten «Organismen» simple Gene gewesen seien. Er meint auch, dass RNA-Moleküle niedriger Stufe vorerst wenig komplexe und deshalb sehr unspezifische Funktionen ausübten. Die dazu nötigen dreidimensionalen Strukturen haben sie wohl nicht durch ein einmalig-zufälliges Arrangement gewonnen. Vielmehr wurden sie möglicherweise an eine Matrize angelehnt (scaffold).

Vielleicht haben sich dann einmal aus lipidhaltigem Material membranartige Strukturen gebildet, die ähnlich den, spontane Vesikeln bildenden Liposomen kleine geschlossene Räume formierten.

Kompartiment-Bildung war sicher ein Vorteil gegenüber der wechselnden chemischen Zusammensetzung der Umgebung. *Eigen et al.* [16] weisen darauf hin, dass wenn einmal in einem Kompartiment Mutationen entstanden, die in einem andern ausblieben, die Möglichkeit zur Kompetition gegeben war. Dies war die mögliche Grundlage zur Verbesserung einer genetischen Information im Sinne der Darwinschen Evolution. So mag man sich den Ausgangspunkt zur zelligen Organisation erklären.

### *Die biotische Epoche*

Die ersten lebenden Organismen waren wohl Einzeller, die den heutigen Clostridien ähnlich waren. Es waren Anaerobier mit der Fähigkeit zu Fermentation und einem genetischen Apparat. Sie hatten einen Stoffwechsel, der sie abhängig machte von nicht-biologisch entstandenen energiereichen organischen Molekülen [34]. Diese primitiven Einzeller sind 3,5 Milliarden Jahre alt [12] und lebten immer noch in einer sauerstofffreien Atmosphäre.

Zu einem bestimmten Zeitpunkt lernten gewisse Organismen das Sonnenlicht als Energiequelle zu verwenden, die *Photosynthese* war damit in Funktion und veränderte die Kapazität der Erde, Leben zu tragen, grundlegend [13]. Das Zeitalter der Bakterien

und blau-grünen Algen, der Cyanobakterien war angebrochen. Deren fossile Vorgänger wurden in 3,2 Milliarden Jahre alten Sedimenten gefunden [12].

Bei der Photosynthese wird Sonnenenergie verwendet zur Reaktion von CO<sub>2</sub> mit Wasser; sie führt zum Aufbau organischer Substanz. Das Produkt der Photosynthese ist das korrosive und giftige Gas Sauerstoff. Einige Bakterienarten zogen sich davor zurück in anaerobe Nischen; andere und die Cyanobakterien entwickelten Schutzmechanismen gegen Sauerstoff (Catalase, Peroxidase). Wieder andere lernten die Oxydation zur Energie-Gewinnung [13].

Die Respiration geschieht bei höheren Organismen in den Mitochondrien, den eigentlichen zellulären Energie-Gewinnungsstätten, wo energiereiche Moleküle aus der Nahrung abgebaut und mit Sauerstoff verbunden werden, wobei Energie in Form von ATP (Adenosin-Tri-Phosphat) gespeichert wird. Die Glykolyse und Atmung ist als Erbe von den heutigen Eukaryoten, d. h. Zellen mit einem Kern, übernommen worden. Die Photosynthese blieb eine Eigenschaft der blau-grünen Algen und grünen Pflanzen. Diese begannen rasch alle Habitats zu dominieren und mit dem Aufkommen des Zitronensäurezyklus, der eine effizientere Energiegewinnung aus Nährstoffen gestattete, war das Leben von aeroben Organismen dominiert.

Vor der Zeit der Photosynthese konnte ultraviolettes Licht ungehindert auf die Erdoberfläche gelangen, was organisches Leben ausserhalb des Wassers verunmöglichte. Mit dem Aufbau einer Sauerstoff-Atmosphäre (20%) aus biologischer Quelle bildete sich auch ein Ozonschild, welcher den hoch energetischen ultravioletten Anteil des Lichtes wirksam abschirmte [8].

Damit endete die nicht biologische Synthese organischer Stoffe; die biologische Photosynthese, mit der Licht-Energiequelle im sichtbaren Bereich, war von jetzt an für den Aufbau organischer Substanz verantwortlich [12].

Einen wichtigen Schlüssel für das Verständnis frühen Lebens im Prökambrium bilden die *Stromatoliten* [17, 34, 38]: Das sind Lebensgemeinschaften von blau-grünen Algen und Bakterien mit Kalkstein (Stroma = Bett, Lithos = Stein). Feines Sediment aus Calciumcarbonat verklebt jedes Jahr neu mit einer schleimigen Schicht der Mikroorganismen. Daraus ergeben sich horizontal geschichtete säulenartige Formationen. In West-Australien fand man solche Gebilde mit einem Alter von 3,5 Milliarden Jahren, die ähnlich aussehen wie die heutigen Stromatoliten in der Shark Bay, ebenfalls West-Australien [22].

Bisher haben wir von einfachen Bakterien gesprochen, die entweder einen anaeroben oder einen aeroben Stoffwechsel besitzen. Der letztere ist später evolviert. Diese Mikroorganismen gehören zu den *Prokaryoten*, d. h. es sind Organismen, die noch keinen Zellkern haben und sich deshalb asexuell durch Teilung vermehren.

*Eukaryoten*, also höher organisierte Zellen mit einem DNA-haltigen Kern, sind sicher nicht Abkömmlinge von Mutanten aus Prokaryoten. Man glaubt vielmehr, dass kernlose Zellen sich ursprünglich zu einer Art Symbiose zusammengetan haben [31].

Ausser den *Mitochondrien* in Eukaryoten finden sich in den eukaryotischen Pflanzenzellen zudem die grünen *Chloroplasten*, in denen sich die Photosynthese abspielt. Man nimmt heute an, dass beide Organellen einmal freilebende, Sauerstoff verwendende Bakterien waren, die sich im Sinne der erwähnten Symbiose mit Wirtszellen, vielleicht

fermentierenden Bakterien, zusammentaten und letztlich zu pflanzlichen und tierischen Zellen evolvierten. Die Wirtssymbionten haben sich dann wohl in der Richtung von Amoeben entwickelt, womit eine neue Population von aeroben, grossen Zellen auf den Plan getreten ist.

Wiederum andere Gastbakterien von Geisselgestalt, vergleichbar den Spirochäten, haben sich eventuell an Wirtszellen attachiert und damit deren Beweglichkeit enorm erhöht. Solche Partnerorganismen gleichen nun sehr den *Myxotricha*, von denen man Grund hat, anzunehmen, dass sie im Präkambrium die universellen Vorgänger eukaryoter Organismen darstellten. Jetzt konnte sich auch die *Mitose* und damit die *Meiose* entwickeln, beides Voraussetzungen für Zellteilung sowie für die geschlechtliche Differenzierung der Keimzellen [31, 21].

Der Gewinn eines Kerns in den *Eukaryoten* (eu = wahr, echt; karyon = Kern, Nuss) war ein viel grösserer Schritt als die Differenzierung etwa in Pflanzen und Tiere. Nur kernhaltige Zellen sind zu einer sexuellen Reproduktion fähig. Das Resultat ist eine viel häufigere genetische Variabilität und neue Formen und Funktionen können sich der Kompetition der Evolution stellen [34]. Dies geschah vor 1,5 Milliarden Jahren.

Nun wurde vor kurzem so etwas wie ein «missing link» zwischen Prokaryoten und Eukaryoten gefunden, die *Archaeabacteria* [40]. Sie sehen aus wie Bakterien und haben keinen Kern. In ihren biochemischen Eigenschaften und in der Struktur gewisser Makromoleküle (ribosomale RNA) sind sie ebenso weit entfernt von den Bakterien wie von den Eukaryoten. Ihr Stoffwechsel lässt vermuten, dass diese Gruppe von Organismen die älteste ist. Es ist anzunehmen, dass Archaeabacteria und echte Bakterien gemeinsam die Eukaryoten bildeten.

Es kann an ihnen auch studiert werden, dass die Translation, d. h. die Formierung der Proteinketten gemäss genetischer Information zu Beginn der Evolution sehr viel primitiver war als heute und demgemäß die daraus entstehenden Proteine eine geringere funktionelle Spezifität besassen. Heute besitzen alle Zellen einen präzisen genetischen Apparat, und das Resultat sind komplexe Protein-Strukturen mit hoch spezifischen enzymatischen Funktionen.

Nach mehr als 500 Millionen Jahren begannen sich diese Einzeller zu kooperativen Verbänden zu organisieren. Erst entstanden Meeralgen und andere Pflanzen, dann etwa 100 Millionen Jahre später die Tiere [28].

Nachdem nun gezeigt ist, wie sich im Anschluss an die chemische Evolution die Mikroorganismen gebildet haben müssen, sind einige naturwissenschaftliche Phänomene und Arbeitsmethoden zu diskutieren, die wesentlich zur Erforschung und zum Verständnis der Evolution beigetragen haben.

### 1. Studium der Protein-Evolution anhand von Cytochrom c

Diese Enzyme finden sich in allen Zellen, die einen Kern besitzen und gehören zu der uralten Familie von Electron-transferierenden Proteinen. Sie oxydieren Nährstoffe zum Zwecke des Energiegewinns, und ihr Alter ist anhand der molekularen Evolution auf mindestens 1,2 Milliarden Jahre zurückzuverfolgen [11, 13]. Die molekulare Geschichte aller Proteine, nicht nur von Cytochrom c, ist von deren dreidimensionaler Faltung und der Aminosäuresequenz abzulesen.

Der Mensch, ebenso wie die Pilze, sowie die Organismen, die eine Zwischenstellung einnehmen, besitzen gewisse gemeinsame Proteine. Diese haben wegen der ähnlichen Struktur auch ähnliche Funktionen, die sich bis in geologische Zeiten zurückverfolgen lassen. Proteine sind also nach *Dayhoff* [10] «lebende Fossile». Die Wissenschaft, die die Evolution metabolischer und genetischer Komplexität biochemischer Prozesse untersucht, heisst *chemische Paläogenetik* [10].

Der Mensch und der Schimpanse besitzen identisches Cytochrom c, bestehend aus 104 Aminosäuren. Bei *Neurospora crassa* sind 44 davon abweichend [13]. Je mehr Mutationsänderungen nachzuweisen sind, umso früher haben sich zwei Arten vom gemeinsamen Stammbaum getrennt. Der Vergleich der Aminosäuresequenzen von Cytochrom c beim Menschen und Huhn ergibt, dass beide Arten sich vor 300 Millionen Jahren trennten [14].

Solche Abweichungen sind durch Mutationen entstanden, die jedoch die enzymatisch wirksame Stelle am Molekül unbehelligt liessen. Je älter ein Organismus, umso mehr Mutationen weist er in einem gegebenen Protein auf. Daraus kann man einen Stammbaum aufbauen, dessen Konstruktion durch Computeranalyse erleichtert wird.

Cytochrom c konnte, wenn überhaupt, mit seinen 104 Aminosäuren nicht rein zufällig durch einen einzigen Wurf entstanden sein, oder jedenfalls nicht ein zweites Mal. Da 20 Aminosäuren am Aufbau seiner 104 Glieder beteiligt sind ergibt das  $20^{104} = 10^{130}$  Kombinationen. Es gibt aber auf der ganzen Welt nur  $10^{80}$  Moleküle [14]. Dieses Argument der statistischen Unwiederholbarkeit der Zufallsentstehung von Cytochrom c brachte *Monod* und *Jordan* [zit. n. 14] zum Schluss, Leben könne im Kosmos kein zweites Mal entstanden sein. Das irdische Leben sei ein untypisches Phänomen und der Mensch sowie die anderen Lebewesen ein ausserplanmässiger Zufall. v. *Ditfurth* [14] hat aber sicher Recht, wenn er darauf hinweist, dass dieses Protein wie alle anderen *eben gerade nicht* durch Zufall habe entstehen können, sondern das Produkt eines Jahrmilliarden langen Entwicklungsprozesses sei. Aus dem ursprünglichen primitiven, unspezifischen Enzym sei durch evolutive Anpassung das definitive Enzym entstanden.

Die Veränderungen, die durch Mutation in der Aminosäuresequenz eines Proteins aufgetreten sind, werden mit Hilfe der *Gelelektrophorese* ermittelt. Durch Zählen der Banden im Pherogramm, welche verschieden bzw. identisch sind, kann die Anzahl der mutierten Gene ermittelt werden [7, 2].

Direkte Untersuchungen an der Nucleotidsequenz eines bestimmten Gens bei verschiedenen Individuen derselben Species haben einen sehr starken Grad von Variabilität ergeben [35, 2]. Die meisten genetischen Verschiedenheiten werden die Überlebensfähigkeit des Individuums weder hindern noch verbessern, aber wegen der zahllosen Variationen ist auch dann genügend Möglichkeit für evolutives Verhalten gegeben, wenn die Mehrheit der Variationen indifferent ist.

## 2. Genetic Drift und Genetic Shift

Der Begriff wurde aus der Epidemiologie der Influenza bekannt. Das Virus trägt gewisse antigene Strukturen auf seiner Hülle: Eine Neuraminidase, verantwortlich für das Ausschleusen des Virus aus der Zelle und Neuinfektion von anderen Zellen, und ein Hämagglutinin, welches das Virus an die Oberfläche von Zielzellen klebt [26].

Die *antigenic Drift* betrifft geringgradige Veränderungen dieser Antigene. Bei der *antigenic Shift* dagegen gibt es abrupte Änderungen in der Zusammensetzung der beiden Antigene, wodurch gewissermassen ein neues Virus entsteht. Solche neuen Virusstämme sind verantwortlich für weltweite Pandemien, weil die Bevölkerung gegen sie noch keine Antikörper produzieren konnte.

Eine harmlosere, aber nicht minder bedeutsame Beobachtung wurde bei Katzen gemacht, die, wie die meisten tierischen Species, sog. endogene Viren tragen. Diese machen nicht krank, gehören aber zum genetischen Pool der Zellen [20]. Mit phylogenetischen Studien hat man bei gewissen Arten den Zeitpunkt ermittelt, zu dem die Infektion mit diesem endogenen Virus erfolgen müssen. Man hat den Grad der Nucleotid-Homologie, d. h. das Ausmass ähnlicher Zusammensetzung der DNA von Virus und Wirtszellen und von Zellen verwandter Arten bestimmt (molekulare Hybridisierung). Man stellte fest, dass die Hauskatze ein endogenes Virus trägt (RD114), dessen DNA-Aufbau starke Ähnlichkeit mit dem endogenen Virus BaEV von Primaten aufweist. Aufgrund des Grades der Verwandtschaft kann man schliessen, dass vor mehreren Millionen Jahren eine Katze sich mit einem Affen-Retrovirus infizierte und diese neue Information für alle Zeiten in ihr genetisches Inventar einbaute.

Diese Beobachtungen aus der Virologie belegen, dass genetische Veränderungen durchaus nicht immer graduell in kleinen Schritten auftreten.

Genetic Drift von Blutgruppen-Häufigkeiten wurde von *Cavalli-Sforza* [6] bei einer Bevölkerungsgruppe in einem abgeschlossenen Bergtal untersucht. Hypothetisch beschreibt er folgenden Vorgang: Wenn eine kleine Gruppe von Europäern ein kleines Eiland bevölkert, so mag es vorkommen, dass kein Individuum der selteneren Blutgruppe B (15%) oder AB (5%) dabei ist. Dieses Gen würde in dieser Population untergehen. Es geht übrigens auch unter, wenn der Träger eines seltenen Gens keine Nachkommen zeugt, worauf schon Darwin hinwies.

### 3. Self Assembly

Besonders bei den Viren gibt es komplexe Strukturen, die nicht so evolvieren, wie sie sich jetzt präsentieren, sondern sich aus einfacheren, gleichartigen Einheiten spontan zusammenfügen. Bei diesem Vorgang sind keine Enzyme notwendig. Die Struktur dieser Untereinheiten ist so beschaffen, dass diese wie Stücke eines Puzzle zusammenpassen und auch zusammenhalten. Diese spontane sog. Virus-Morphogenese ist ein sehr gut untersuchtes Beispiel, wie in lebenden Zellen grosse molekulare Strukturen geformt werden können. Viren geben deshalb einen tiefen Einblick in Evolutionsprozesse. [3, 36].

Viren bestehen aus infektiösen Nukleinsäuren mit einer Schutzhülle. Die wegen ihrer Kleinheit beschränkte genetische Information der Viren wurde teilweise dadurch kompensiert, dass die Schutzhülle aus lauter Untereinheiten autoaggregiert. Am besten sind diese Verhältnisse bei den Bakteriophagen, dem Tabakmosaikvirus (TMV) und dem Tomato Bushy Stunt Virus untersucht. TMV kann im Reagenzglas aus isolierten Protein-Einheiten und RNS-Komponenten rekonstituiert werden. Werden diese beiden gemischt, entstehen infektiöse Viruspartikel, die sich vom Originalvirus nicht unter-

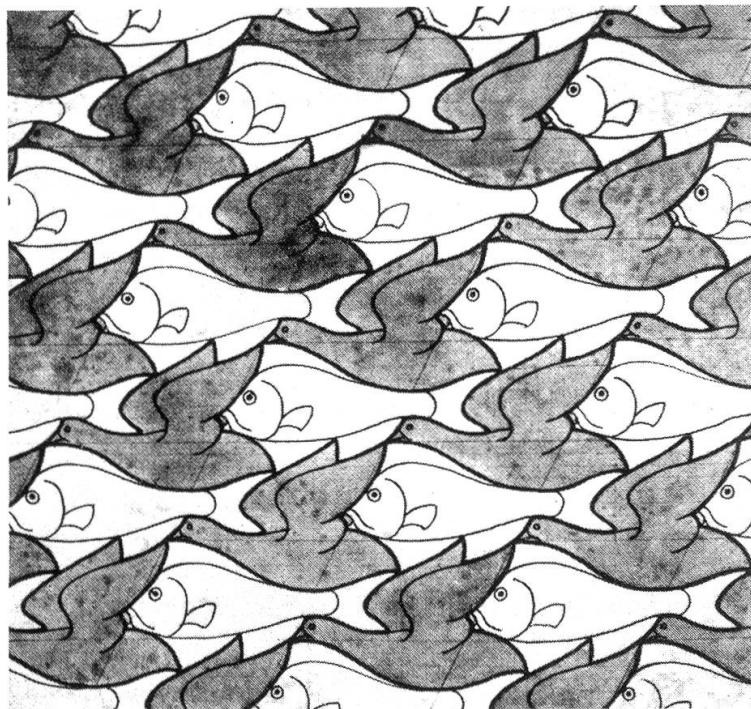


Fig. 3 Aus *Locher J. L.*: Die Welten des M. C. Escher. Heinz Moos Verlag, München [29]

scheiden. Somit genügt die genetische Information für die Untereinheiten, das grössere entsteht dann von selbst.

Auch Bakteriengeisseln bauen sich auf diese Weise aus der Untereinheit Flagellin auf, und in den animalen Zellen gibt es zahlreiche Strukturen, die aus repetierenden Einheiten bestehen.

Die Kunst hat von diesen Schönheiten bewusst oder unbewusst Kenntnis genommen. Ein Beispiel ist der Graphiker *M. C. Escher* [29], der ausgehend von maurischen Mosaiken und der Kristallographie, in die ihn sein Bruder einführte, regelmässig sich wiederholende, zusammengeschlossene geometrische Grundfiguren schuf, die sich bis ins Unendliche erstrecken können. Er versuchte aber, nicht bei der Geometrie stehen zu bleiben, sondern Lebendes in abstrakter Form darzustellen.

Sein Motto lautete: «Lange bevor es Menschen auf Erden gab, wuchsen in der Erdkruste schon die Kristalle. Eines Tages sah ein Mensch zum ersten Mal solch ein glitzerndes Stückchen Regelmässigkeit liegen, oder er stiess darauf mit seiner steinernen Hacke, es brach ab und fiel vor seine Füsse. Er hob es auf und betrachtete es in seiner offenen Hand, und er wunderte sich.»

### Epilog

Wir haben die Entstehung von Leben und dessen Evolution als eine Reihe von naturwissenschaftlichen Abläufen dargestellt. Alle diese Vorgänge liegen in naturgesetzlichem Rahmen ab und tun dies noch immer [25]. Man braucht keine Wunder oder einen einmaligen Schöpfungsakt im Sinne der Bibel oder der Creationisten beizuziehen, um sich vor dem Wundervollen dieser «Schöpfung» zu verneigen. Wenn man aus begreiflichem Bedürfnis an einem Schöpfungsakt festhalten will, so ist dieser auf einer anderen Ebene zu suchen.

Die Grundlage der Evolution ist die Variation einer genetischen Information, die immer ziellos an einem bestimmten Ort des ganzen Genoms erfolgt. Sie hat weder Bezug zu Ursache noch Wirkung [24]. Die Umwelt löst zwar solche Veränderungen aus (z.B. durch energetische Strahlung), aber niemals mit Absicht oder gar mit einem Programm.

Durch Mutation ausgelöste Veränderungen im Genom der Zelle sind letal, wenn in einem lebenswichtigen Protein, welches durch dieses Genom codiert wird, die funktionale Stelle ausfällt. Mutanten können sich auch indifferent verhalten. Für die Evolution ist die dritte Möglichkeit entscheidend, nämlich die Selektion eines Mutationsproduktes, welches gegenüber dem Vorgänger einen Vorteil aufweist, der eine bessere Adaptation an die Umwelt gewährleistet. Dies ist auch die Basis der Individualität [7]. Die Evolution ist opportunistisch [32 zit. *Simpson*], erst durch sie wird ein Ziel festgelegt. Beispielsweise haben regelmässige Strukturen eine höhere Evolutionsgeschwindigkeit, weil sich ein Vorteil auf alle Untereinheiten auswirkt, bei unregelmässigen Strukturen aber nur auf eine einzige Einheit [15].

Da also die Natur nur mit den Mitteln der Selektion auf zufällig entstandene Mutationsprodukte *reagiert* und nicht mit eigenem Programm *agiert*, macht sie immer wieder die gleichen Fehler, deren Produkte untergehen. An ihren Treffern und Erfolgen hält sie aber offensichtlich über Hunderte von Jahrmillionen fest (Cytochrom c). Die Natur lernt nicht, und es ist auch nicht so, wie es verbreitet angenommen wird, «dass die Natur es schon am besten mache».

Alle Daten von heute sprechen dafür, dass das Leben einen gemeinsamen Ursprung hatte. Wäre es nicht so, so müssten doch wohl mehrere Code- und Strukturschemata existieren und nicht nur das durch die Molekularbiologie bestens erforschte [15]. Man nimmt an, dass Lebensvorgänge vor 3,5 Milliarden Jahren zum ersten Mal begannen.

Es ist aber unwahrscheinlich, dass dieses Ereignis ein einziges Mal ablief, denn es ist undenkbar, dass alle Strukturen und Funktionen, die zur Entwicklung des Lebens nötig waren, gerade im richtigen Moment einmalig zur Verfügung standen [15]. Man muss im Gegenteil annehmen, dass zahllose alternative Lösungen bereitstanden.

Zwei Milliarden Jahre später kam der grosse Schritt mit der Entwicklung von den kernlosen Prokaryoten zu den kernhaltigen Eukaryoten [12]. Damit war der Weg frei für die Bildung von Verbänden und vor allem zu sexueller Vermehrung, die Voraussetzung zu ungehemmter Variabilität und, wiederum durch Selektion, zur ungeheuren Vielfalt der Artenbildung.

### Résumé

L'origine de la vie et son évolution jusqu'à l'apparition des eukaryotes (cellules avec un noyau) sont présentées ici. La biologie moderne possède une grande quantité d'informations qui permettent une explication rationnelle des mécanismes de l'évolution. Malgré ce fait les créationnistes s'opposent vigoureusement à cette interprétation. N'ayant pas de raison de douter de la base «matérialistique» de la vie, les biologistes sont néanmoins capables d'admirer les «miracles» de la nature.

L'évolution se base sur des variations fortuites de l'information génétique. Si la forme résultante est avantageuse dans l'environnement, elle est sélectionnée et favorisée, ce qui signifie un plus grand nombre des descendants. Les mécanismes qui règlent l'évolution ainsi que leurs implications philosophiques sont ensuite discutés.

### Riassunto

Abbiamo presentato l'insorgere della vita e la sua evoluzione come una serie di eventi naturali. Tutti questi avvenimenti si sono sviluppati entro confini di legge naturale ed ancora oggi ciò avviene [25]. Non occorre pensare ad un miracolo o ad un unico atto creativo nel senso biblico o della creazione per comprendere il carattere meraviglioso di questa «creazione». Se per motivi comprensibili occorre ancorarsi su un atto creativo, ciò deve esser cercato su altri piani.

La base dell'evoluzione è la variazione di una informazione genetica che segue sempre senza prezzo traguardo ad un luogo preciso. Essa non ha riferimento né alla causa né all'affetto [24]. L'ambiente determina infatti queste modifiche (p. es. con le irradiazioni energetiche), ma mai con intenzione o con un programma.

Le modifiche del genoma della cellula determinate da mutazione sono letali, se in una proteina di importanza vitale, codificata da questo genoma, cade la parte funzionale. Per l'evoluzione è determinante la terza possibilità, in particolare la selezione di un prodotto di mutazione, che rispetto al precursoro presenta un vantaggio, che assicura una migliore adattabilità all'ambiente. Ciò è anche la base della individualità [7]. L'evoluzione è opportunistica [32 cit. *Simpson*], solo quando con essa viene fissato un traguardo. Per esempio strutture regolari hanno una più alta velocità evolutiva, poiché un vantaggio si sovrappone a tutte le altre unità subordinate. In strutture irregolari tuttavia si esplica su una sola unità [15].

Poiché la natura *reagisce* solo con i mezzi della selezione sui prodotti di mutazione casualmente realizzati, e non agisce con un proprio programma, essa compie sempre gli stessi errori, per cui i suoi prodotti soccombono. Essa si aggrappa evidentemente ai propri traguardi colpiti ed ai successi per la durata di centinaia di milioni di anni (citocroma C). La natura non impara, e non è anche così, come largamente si ritiene, che la «natura sempre fa al meglio».

Tutti i dati attualmente indicano che la vita ha un'unica origine. Se non fosse così dovrebbero esistere diversi schemi di codice e di strutture e non solo quello magistralmente studiato della biologia molecolare [15]. Si ritiene che processi vitali già iniziarono 3,5 miliardi di anni or sono.

È improbabile che questo evento si sia sviluppato una sol volta, poiché è impensabile che tutte le strutture e funzioni che furono necessarie allo sviluppo della vita siano state disponibili una sol volta nel giusto momento. [15]. Si deve per contro ritenere che erano presenti indefinite soluzioni alternative.

Due miliardi di anni più tardi subentrò il grande passo con lo sviluppo dai procarioti esenti da nucleo agli eucarioti con nucleo [12]. Con ciò era aperta la via per la formazione di unità ed in modo particolare della procreazione sessuale, condizione per una variabilità sciolta, nuovamente attraverso la selezione, per una formazione molteplice di specie.

### Summary

The evidences of the origin of life and its evolution are described according to modern biology.

Creationism and evolutionism are contradictory ways of thinking; the latter, however, is based on an overwhelming mass of scientific facts and is no longer doubted by serious researchers. Despite the «materialistic» background of modern biology, biologists admire the «wonders» of life which can be explained in quite rational ways.

Evolution is based on random variations of genetic information which is selected if the product of mutation exhibits a better adaptation to the environment than the preceding form. The biological facts and suggestions which explain these mechanisms and their philosophical implications as well are discussed.

### Literatur

- [1] Arber W.: Restriktionsendonucleasen. Angewandte Chemie 90, 79–85 (1978). – [2] Ayala F.J.: The mechanisms of evolution. Sci. Amer. 239, 48–61 (1978). – [3] Butler P. J. G. and Klug A.: The assembly of a virus. Sci. Amer. 239, 52–59 (1978). – [4] Cairns-Smith A. G.: The first organisms. Sci. Amer. 252, 74–82 (1985). – [5] Cavanaugh M. A.: Scientific Creationism and Rationality. Nature 315, 185–189 (1985). – [6] Cavalli-Sforza L. L.: Genetic drift in an Italian population. Sci. Amer. 221, 30–37

(1969). – [7] *Clarke B.*: The causes of biological diversity. *Sci. Amer.* 233, 50–60 (1975). – [8] *Cloud P. and Gibor A.*: The oxygen cycle. *Sci. Amer.* 223, 111–123 (1970). – [9] *Darwin Ch.*: Die Entstehung der Arten. Reclam Stuttgart (1963). – [10] *Dayhoff M. O.*: Computer analysis of protein evolution. *Sci. Amer.* 221, 86–94 (1969). – [11] *Dickerson R. E.*: The structure and history of an ancient protein. *Sci. Amer.* 226, 58–72 (1972). – [12] *Dickerson R. E.*: Chemical evolution and the origin of life. *Sci. Amer.* 239, 62–78 (1978). – [13] *Dickerson R. E.*: Cytochrome c and the evolution of energy metabolism. *Sci. Amer.* 242, 99–100 (1980). – [14] *Ditfurth H. von*: Wir sind nicht nur von dieser Welt. Hoffmann und Campe, Hamburg (1981). – [15] *Eigen M. und Winkler R.*: Das Spiel. Naturgesetze steuern den Zufall. Piper R., München (1979). – [16] *Eigen M., Gardiner W., Schuster P. and Winkler-Oswatitsch R.*: The origin of genetic information. *Sci. Amer.* 244, 78–94 (1981). – [17] *Ferris J. P.*: The Chemistry of Life's Origin. Chem. & Engineering News 62, 22–35 (1984). – [18] *Fey H.*: Kompendium der allgemeinen medizinischen Bakteriologie. Pareys Studientexte 19, Paul Parey Berlin (1978). – [19] *Fey H.*: In-vitro Rekombination (Genmanipulation) mit Restriktions-Endonukleasen. Zum Nobelpreis von Prof. Werner Arber, 1978. Schweiz. Arch. Tierheilk. 121, 221–229 (1979). – [20] *Girard M. et Hirth L.*: Virologie Générale et Moléculaire. Doin Edit., Paris (1980). – [21] *Goodenough U. W. and Levine R. P.*: The genetic activity of mitochondria and chloroplasts. *Sci. Amer.* 223, 22–29 (1970). – [22] *Groves D. I., Dunlop J. S. R. and Buick R.*: An early habitat of life. *Sci. Amer.* 245, 56–65 (1981). – [23] *Heisenberg W.*: Der Teil und das Ganze. Piper R. München (1971). – [24] *Jacob F.*: Die Logik des Lebenden. S. Fischer, Frankfurt a/Main (1972). – [25] *Jordan P.*: Der Naturwissenschaftler vor der religiösen Frage. Stalling G., Oldenburg/Hamburg (1964). – [26] *Kaplan M. M. and Webster R. G.*: The epidemiology of influenza. *Sci. Amer.* 237, 88–106 (1977). – [27] *Koestler A.*: Das Gespenst in der Maschine. Molden, Wien (1968). – [28] *Kohl L.*: Origin of Earth and Life. *Nat. Geographic* 168/2, 151 (1985). – [29] *Locher J. L.*: Die Welten des M. C. Escher. Heinz Moos Verlag, München (1971). – [30] *Luria S.*: Leben – Das unvollendete Experiment. Piper R., München (1974). – [31] *Margulis L.*: Symbiosis and evolution. *Sci. Amer.* 225, 49–57 (1971). – [32] *Mayr E.*: Evolution. *Sci. Amer.* 239, 39–47 (1978). – [33] *Monod J.*: Zufall und Notwendigkeit. Philosophische Fragen der modernen Biologie. Piper R., München (1973). – [34] *Schopf J. W.*: The evolution of the earliest cells. *Sci. Amer.* 239, 85–102 (1978). – [35] *Stebbins L. G. and Ayala F. J.*: The evolution of Darwinism. *Sci. Amer.* 253, 54–64 (1985). – [36] *Stryer L.*, Biochemistry. 2nd ed. p. 713. W. H. Freeman & Co.; San Francisco (1981). – [37] *Tamann G.*: Evolution im Cosmos. 59. Ferienkurs Stiftung Lucerna «Evolution des Kosmos, des Lebens, des Menschen». 7.–11. Oktober 1985. – [38] *Vidal G.*: The oldest eukaryotic cells. *Sci. Amer.* 250, 32–41 (1984). – [39] *Wildiers N. M.*: Teilhard de Chardin. Herder Bücherei Nr. 122. – [40] *Woese S. R.*: Archaeabacteria. *Sci. Amer.* 244, 94–106 (1981).

Manuskripteingang: 9. Dezember 1985

## BUCHBESPRECHUNGEN

**Kompendium der Geflügelanatomie**, von Prof. Dr. Erich Schwarze und Prof. Dr. Lothar Schröder, 4. Auflage, 1985. 300 Seiten, 118 Abbildungen, Verlag Gustav Fischer, Stuttgart, Gzl. DM 34.–. Die 4. Auflage des Kompendiums wurde gegenüber der 3. Auflage nur unwesentlich verändert. Einige neue Erkenntnisse über Anatomie, Histologie und Embryologie des Hausgeflügels sind frisch eingearbeitet. Die Nomenklatur wurde den «Nomina Anatomica Avium» angeglichen. Einige Abbildungen sind durch neue ersetzt, das Literaturverzeichnis ist erweitert. Nach wie vor sind in die trockenen anatomischen Beschreibungen Bemerkungen zur Physiologie eingestreut. Die histologischen Strukturen werden durch mehr oder weniger gute schwarzweisse Bilder und gute Zeichnungen dargestellt. Ein eigenes Kapitel ist den Besonderheiten der Embryonalentwicklung des Vogels gewidmet. Im Anhang sind tabellarisch morphologische und physiologische Daten des Hausgeflügels zusammengetragen, die sonst mühsam in der Literatur gesucht werden müssen.

Das Kompendium kann in erster Linie Studenten der Tiermedizin und Tierärzten empfohlen werden, enthält aber auch Wissenswertes für Zoologen und Geflügelzüchter. *H. Ehrlsam*, Zürich