

## Zur Entstehung des Lebens auf der Erde

Von Doz. Dr. A. WACKER

Organisch-chemisches Institut der Technischen Universität Berlin-Charlottenburg,  
Biochemisches Laboratorium

Bei dem Internationalen Symposium über „Die Entstehung des Lebens auf der Erde“, das im August 1957 in Moskau stattfand<sup>1)</sup>, wurden mehr als 60 Vorträge und Referate gehalten. In diesem Bericht sollen nun Ergebnisse und Hypothesen mitgeteilt werden, aus denen ersichtlich ist, wie sich organische Verbindungen in einer Uratmosphäre gebildet haben können, wie vielleicht Leben in der einfachsten Form entstand und wie vermutlich die Evolution des Lebendigen zustande kam. Es war nicht möglich, über alles zu berichten, was vorgetragen wurde. Mit dieser Auswahl wurde gleichzeitig versucht, eine zusammenhängende Darstellung des gesamten Problems, angefangen bei der Astrophysik bis zur Biologie, zu geben.

### Einleitung

Mit dem Problem der Entstehung des Lebens hängt auf das engste die Frage nach dem Urzustand der Erde zusammen. Betrachten wir Leben als das Ergebnis der Evolution multimolekularer organischer Systeme, so müssen wir fragen, wie es überhaupt zur Bildung dieser organischen Verbindungen kam bzw. welche Voraussetzungen vorhanden sein mußten, damit sie sich bilden konnten. Diese organischen Substanzen müßten dann den primären Lebewesen sowohl zum Aufbau ihrer Struktur als auch als Energiequelle gedient haben. In diesem Zusammenhang dürfte der Beschaffenheit der Uratmosphäre größte Bedeutung zugekommen sein.

Leider gibt es heute noch keine einheitliche, allgemein anerkannte Theorie der Bildung unseres Planeten und der Zusammensetzung seiner Uratmosphäre. Auf Grund verschiedener Überlegungen, besonders im Hinblick auf die Bildung organischer Verbindungen, kam A. Oparin zu dem Schluß, daß die Uratmosphäre reduzierend war und aus  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{H}_2$  bestand<sup>2)</sup>. Auch N. Pirie<sup>3)</sup>, J. Bernal<sup>4)</sup> und H. Urey<sup>5)</sup> kamen — teilweise auf Grund anderer Argumente — zu der gleichen Vorstellung einer reduzierenden Atmosphäre. H. Urey meint sogar<sup>\*)</sup>, daß theoretische, biochemische Betrachtungen überzeugendere Aussagen über den primitiven Zustand der Erde zulassen, als man sie aus geochemischen und kosmochemischen Studien erhalten kann, wobei letztere die biochemischen Folgerungen bestätigen.

Mit den Entwicklungsstufen der Erdatmosphäre im Vergleich zu den entsprechenden Phasen der Erde befaßte sich V. Sokolov<sup>\*)</sup>.

<sup>\*)</sup> Mit einem Stern versehene Stellen im Text dieser Arbeit beziehen sich auf die „Reports on the International Symposium 1957“. — Die Auswahl selbst wollte nicht werten, sondern die Meinung der Autoren und nicht die des Referenten wiedergeben.

<sup>1)</sup> Vgl. Nachr. Chem. u. Techn. 5, 332 [1957].

<sup>2)</sup> A. I. Oparin: Die Entstehung des Lebens auf der Erde, 3., stark veränderte Aufl., VEB Dtsch. Vlg. d. Wissenschaften, Berlin 1957, (s. diese Ztschr. 70, 581 [1958]).

<sup>3)</sup> N. W. Pirie, New Biol. 16, 41 [1954].

<sup>4)</sup> J. D. Bernal: The Physical Basis of Life, Rutledge and Kegan Paul Ltd., London 1951.

<sup>5)</sup> H. C. Urey: The Planets, Yale Univ. Press. 1952.

Man nimmt heute allgemein an, daß die Erde aus einer Gas-Staub-Wolke entstanden ist. Die Atmosphäre enthielt dabei nur Wasserstoff und Helium.

Infolge der Verdichtung der Materie erhitze sich die Erde. Durch chemische, radiochemische und radioaktive Prozesse bildeten sich neue Gase: Ne,  $\text{N}_2$ , CO und  $\text{CH}_4$ , zu denen später noch  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  und  $\text{NH}_3$  hinzukamen. Wasserstoff und Helium entwichen in den Raum. Die Bildung von Wasserdampf und die Entwicklung von Wasserstoff verminderten die Konzentration chemisch aktiver Gase wie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  und  $\text{NH}_3$ .

Die Stufe der Erdatkühlung war mit dem Freiwerden von Wasserdampf,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , CO,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{NH}_3$  aus dem Magma durch vulkanische und andere Prozesse verbunden. Wasserstoff und Helium entwichen weiter in den Raum.  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  häuften sich in der Atmosphäre an. Es entstand eine geringe Menge Sauerstoff, die Gase wie  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  und CO oxydierte.

In dem biogenetischen Stadium der Erdgeschichte wurde ebenfalls  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , CO,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{NH}_3$  aus Magma-Gestein frei. Mit der Entstehung pflanzlicher Organismen begann die biochemische Absorption von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre und die Entwicklung von  $\text{O}_2$ .

### Die Bildung organischer Verbindungen auf der Erde

#### Aminosäuren

S. Miller<sup>\*)</sup> untersuchte im Laufe der letzten Jahre die Bildungsmöglichkeiten organischer Verbindungen in einer Atmosphäre aus  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{H}_2$ . Er verwendete die in Abb. 1 dargestellte Apparatur. Das Wasser, das sich in dem kleinen Rundkolben befand, wurde zum Sieden erhitzt, so daß der Wasserdampf in den Kolben, in dem eine elektrische Funkenentladung stattfand, gelangen konnte. Danach wurden die Entladungsprodukte kondensiert und flossen in das U-Rohr. Hierdurch wurde eine Zirkulation in der falschen Richtung verhindert. Die Partialdrucke des Wasserstoffs, Methans und Ammoniaks betru-

gen 100, 200 und 300 mm Hg. Die Gasanalyse am Ende des Versuches zeigte, daß sich während der Reaktion zusätzlich CO, CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> gebildet hatten. Die entstandenen organi-

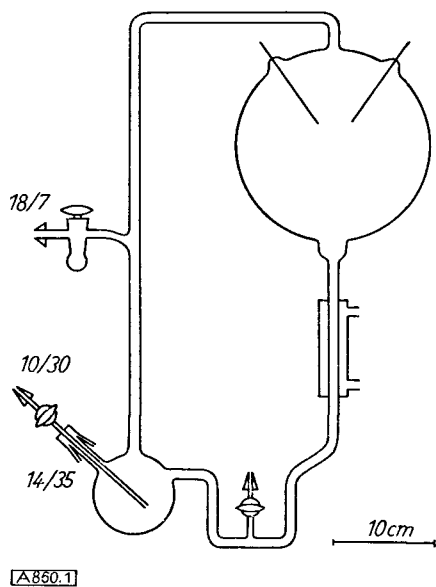


Abb. 1  
Funkenentladungsapparat für die Synthese organischer Verbindungen

	Funken- entladung	Stille elektrische Entladung
Glycin .....	63	80
Alanin .....	34	9
Sarcosin .....	5	86
β-Alanin .....	15	4
α-Aminobuttersäure .....	5	1
N-Methylalanin .....	1	12,5
Asparaginsäure .....	0,4	0,2
Glutaminsäure .....	0,6	0,5
Iminodiessigsäure .....	5,5	0,3
Imino-essig-propionsäure .....	1,5	—
Ameisensäure .....	233	149
Essigsäure .....	15,2	135
Propionsäure .....	12,6	19
Glykolsäure .....	56	28
Milchsäure .....	31	4,3
α-Hydroxybuttersäure .....	5	1
Bernsteinsäure .....	3,8	—
Harnstoff .....	2	—
Methylharnstoff .....	1,5	—
Ausbeute <sup>a)</sup> .....	15 %	3 %

<sup>a)</sup> Summe der Ausbeute der aufgeführten Verbindungen bezogen auf den Kohlenstoff des eingeführten Methans.

Tabelle 1

In einer Mischung von CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O und H<sub>2</sub> gebildete organische Verbindungen [Mol·10<sup>-5</sup>]

schen Verbindungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Aus ihr geht hervor, daß in beiden Experimenten die Ameisensäure in größter Menge gebildet wird. Wird an Stelle der Funkenentladung eine stille elektrische Entladung benutzt (Ozonisator), so macht sich dies nur quantitativ bemerkbar, die Ausbeute sinkt von 15 auf 3%. Auch der Zusatz von Eisen-(II)-ammonsulfat und der Ersatz des Ammoniaks durch Stickstoff erbrachten qualitativ keine Veränderungen. Interessant ist, daß bisher keine Purine und Pyrimidine in der Reaktionsmischung gefunden wurden.

Auf welchem Wege entstanden nun die organischen Verbindungen aus Methan, Ammoniak und Wasserstoff?

Miller gibt hierfür zwei Möglichkeiten an:

1. Im elektrischen Lichtbogen werden HCN, Aldehyde, Acrylnitril, aliphatische Nitrile, Aminonitrile und ein Teil

der Polymeren gebildet und aus ihnen entstehen durch Hydrolyse die entspr. Amino- sowie Hydroxy-Verbindungen und aliphatischen Säuren.

2. Alle in Tabelle 1 aufgeführten Verbindungen werden als solche in der Gasphase aus Radikalen gebildet.

Entnimmt man zu verschiedenen Zeiten Proben aus der Apparatur und analysiert sie, so zeigt sich, daß die Ammoniak-Konzentration ständig abnimmt, während sich die Konzentration des Cyanwasserstoffes und der Aldehyde nach einem anfänglichen Anstieg kaum noch ändert. Die Konzentration der Aminosäuren ändert sich nach 120 h ebenfalls nur noch wenig.

Bekanntlich bilden sich aus HCN, Aldehyden und Ammoniak Amino- und Hydroxy-nitrile nach der *Streckerschen* Synthese. Wie *Miller* fand, hydrolysieren sie auch unter den vorhandenen Bedingungen zu den entspr. Säuren. β-Alanin, das nicht nach der *Streckerschen*-Aminosäuren-Synthese entstanden sein kann, könnte sich durch eine *Michael*-Addition von Ammoniak an Acrylnitril, Acrylamid oder Acrylsäure gebildet haben. Die gebildeten Aldehyd- und HCN-Mengen würden vollkommen ausreichen, um die Ausbeute an Aminosäuren zu erklären. Hieraus läßt sich folgern, daß die Hauptmenge der Aminosäuren sicher über die Nitrile entstanden ist. Es sei aber hervorgehoben, daß elektrische Entladungen nicht entscheidend für die Bildung der Aminosäuren sind; ähnliche Ergebnisse können auch mit UV-Licht erhalten werden.

*E. Pavlovskaya* und *A. Passynsky*<sup>\*)</sup> berichteten über Ergebnisse, die sie bei der Bildung organischer Verbindungen unter der Einwirkung von UV-Licht erhielten. Die wäßrige Lösung, die sie bestrahlten, enthielt 2,5% Formaldehyd und 1 bis 1,5% Ammoniumnitrat oder Ammoniumchlorid. Mit Hilfe der Papierchromatographie konnten sie die Bildung von Glycin, Alanin, Valin, Glutaminsäure und vermutlich auch basischer Aminosäuren nachweisen. Die Ausbeute, bezogen auf Formaldehyd, betrug ungefähr 10%.

Bekanntlich reagiert Wasserstoff, der bei der photolytischen Zersetzung von Methan, Ammoniak und Wasser entsteht, mit CO zu Formaldehyd<sup>6)</sup>. Photolytisch entstandene Hydroxyl-Radikale würden mit Kohlenwasserstoffen Aldehyde ergeben<sup>7)</sup>. Aktivierter Stickstoff würde mit Methan und anderen Kohlenwasserstoffen so reagieren, daß HCN in guter Ausbeute entsteht<sup>8)</sup>. Aus all dem ergibt sich, daß Blausäure und Aldehyde auch durch photochemische Reaktionen entstanden sein könnten.

Die gleichen Autoren wiederholten auch die Experimente von *Miller*, die sie vollauf bestätigen konnten. Nach ihrer Ansicht ist es aber günstiger, wenn man in der Reaktionsmischung Wasserstoff durch Kohlenmonoxyd ersetzt, da man annehmen kann, daß CO auch geochemisch eine mögliche Komponente der primären Erdatmosphäre war. Durch diesen Umtausch verliert die Mischung nicht ihren reduzierenden Charakter. Es zeigte sich, daß in einer solchen Gasatmosphäre die Bildung der Aminosäuren unter der Einwirkung elektrischer Entladungen stärker begünstigt ist als in der von *Miller*. Die Bildung der Aminosäuren Glycin, α- und β-Alanin, α-Aminobuttersäure, Asparagin- und Glutaminsäure verläuft vermutlich ebenfalls auf dem von *Miller* vorgeschlagenen Weg über Cyanhydrine. Somit konnte gezeigt werden, daß für die Bildung der Aminosäuren unter der Einwirkung elektrischer Entladungen kein Wasserstoff notwendig ist.

<sup>6)</sup> A. Carass u. E. K. Rideal, Proc. Roy. Soc. [London] Ser. A 120, 370 [1928]; H. S. Taylor, Trans. Faraday Soc. 21, 560 [1926].

<sup>7)</sup> N. A. Milas, L. E. Stahl u. B. B. Dayton, J. Amer. chem. Soc. 71, 1448 [1949].

<sup>8)</sup> C. A. Winkler u. H. I. Schliff, Discuss. Faraday Soc. 14, 63 [1953].

Bei einer eingehenden reaktionskinetischen Betrachtung der *Strecker*-Aminosäuren-Synthese muß man berücksichtigen, daß die Aldehyde eine Konkurrenzreaktion in Form einer Aldolkondensation eingehen können. Durch diese Kondensation könnten Triosen, Tetrosen, Pentosen und Hexosen entstanden sein.

Auf Grund geochemischer Argumente vertritt *W. Rubey* den Standpunkt, daß die Erde in ihrem Urzustand eine Atmosphäre aus  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{H}_2\text{O}$  gehabt habe<sup>9)</sup>. Wenn man in einer solchen Atmosphäre die Bildung organischer Verbindungen untersucht, so zeigt sich, daß nur bei Anwesenheit von Wasserstoff Aminosäuren entstehen können. Entweicht im Laufe der Erdgeschichte Wasserstoff in den Raum, so würde die stark reduzierende Atmosphäre der Erde ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ) weniger stark reduzierend ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) und schließlich auch oxydierend werden. Es würde sich somit die von *Oparin* und *Urey* vorgeschlagene Atmosphäre in eine solche von *Rubey* entwickelt haben. Von grundsätzlicher Bedeutung wäre noch die Frage, wie lange die Erde diese reduzierenden Atmosphären besaß, da sich ja in beiden (vorausgesetzt, daß in der *Rubey*-schen Atmosphäre etwas Wasserstoff vorhanden war) organische Verbindungen bilden konnten.

Wie Untersuchungen mit  $^{34}\text{S}$  ergaben, ist dieser in Sulfaten stärker angereichert als in Sulfiden<sup>10)</sup>. Dieser Prozeß der Isotopentrennung könnte mit dem ersten Auftreten von Sauerstoff (Oxydation von  $\text{S}^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ ) beginnen. Zahlreiche massenspektrometrische Analysen von Sulfaten und Sulfiden ergaben, daß erstmalig vor ungefähr 800 Millionen Jahren eine Isotopentrennung des Schwefels auftrat. Wenn man annimmt, daß die Erde vor ungefähr  $4,5 \cdot 10^9$  Jahren entstanden ist, ergibt sich daraus, daß die Atmosphäre über den größeren Zeitraum hinweg reduzierenden Charakter besaß.

Zum Schluß sei noch darauf hingewiesen, daß sich in einer oxydierenden Atmosphäre keine organischen Verbindungen bilden können, ja sogar unter der Einwirkung von UV-Licht mehr oder weniger rasch zerstört werden.

Anmerkung des Referenten: Am einfachsten läßt sich in der Urhydrosphäre die Bildung der Kohlenhydrate vorstellen. Nach der Synthese von *A. Butlerow*<sup>11)</sup> entsteht aus Formaldehyd beim Stehen in Kalkwasser ein Zucker-ähnlicher Sirup. *Emil Fischer*<sup>12)</sup> und Mitarbeiter wiederholten später diese Experimente unter geänderten Bedingungen und konnten dabei unter anderem Fruktose und Sorbose nachweisen. Wie *H. Bredereck*<sup>13)</sup> kürzlich mitteilte, bilden sich aus Formamid im Autoklaven Purin- und Pyrimidin-Verbindungen in guter Ausbeute. Wie weit man aus diesen beiden Ergebnissen Rückschlüsse auf die abiogene Bildung der Kohlenhydrate, Purine und Pyrimidine im Frühzustand der Erde ziehen kann, müssen weitere Versuche ergeben.

## Erdöl

In diesem Zusammenhang sei noch auf die Entstehung des Erdöls eingegangen. In seinem Referat führte *P. Kropotkin*<sup>\*)</sup> verschiedene Gründe an, die für einen abiogenen Ursprung des Erdöls sprechen. So sind z. B. gasförmige Kohlenwasserstoffe, freier Wasserstoff, Stickstoff und Helium charakteristische Begleiter des Petroleums. Der Gasdruck in der Tiefe ist so hoch (brennbare Gase bis 900 atm), daß er nur schwerlich als Folge biochemischer Prozesse erklärt werden kann. Daraus könnte man schließen, daß die Gase aus den tieferen Regionen der Erdkruste stammen. Nach neueren Analysen findet sich Wasserstoff mitunter bis zu 10% in den Erdgasen. *V. Vernadsky*<sup>14)</sup> weist auf das

geologische Zusammentreffen von diesen Gasen mit Verwerfungen hin, und er betont, daß die großen Helium-Lager mit dem Ausströmen tektonischer Gase wie Stickstoff, Methan-Stickstoff oder Methan verbunden sind. Es könnten sich daher analoge Prozesse, nach denen man auch im Laboratorium Kohlenwasserstoffe erhält, im Magma abgespielt haben, die zur Bildung von Erdöl führten.

Porphyrine, die von so großer Wichtigkeit für die Hypothese des biogenen Ursprungs des Petroleums sind, sind in einigen der klaren Leichtöle nicht vorhanden; sie finden sich vorwiegend in den schweren, harzigen, sulfurierten Ölen. Man könnte also diskutieren, daß Petroleum- und Erdgaslager durch das Aufsteigen von Kohlenwasserstoffen aus tieferen Schichten der Erde entstanden sind. Die Argumente für den tiefen, aber magma-unabhängigen Ursprung der Erdgase und des Petroleums stimmen auch mit neueren Anschauungen über die tiefen Verwerfungen des Erdmantels und die Bildung unseres Planeten aus kosmischem Staub und Gas überein.

## Proteine

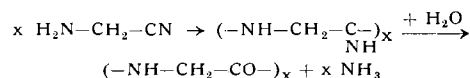
Wie wir gesehen haben, bilden sich Aminosäuren in einer reduzierenden Gasatmosphäre. Man könnte nun annehmen, daß die ersten Proteine aus diesen Aminosäuren durch Polykondensation entstanden sind. Dies ist aber im Hinblick auf die erforderliche Bildungsenergie unwahrscheinlich.

1955 veröffentlichte *S. Akabori*<sup>15)</sup> eine Hypothese, die er bei dem Symposium<sup>\*)</sup> durch experimentelle Befunde begründete. Danach könnten die ersten Proteine auf folgenden Wegen entstanden sein:

Zuerst bildete sich aus Formaldehyd, Ammoniak und HCN Amino-acetonitril.

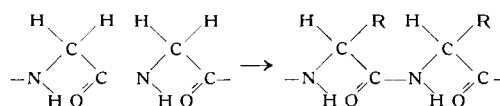


In einem zweiten Schritt wurde das Amino-acetonitril an einer festen Oberfläche (Ton) polymerisiert<sup>15a)</sup> und anschließend zu Polyglycin und Ammoniak hydrolysiert.



In einem dritten Schritt werden durch eine Reaktion mit Aldehyden oder ungesättigten Kohlenwasserstoffen Seitenketten in das Polyglycin eingeführt.

*Akabori* nimmt an, daß durch diesen Bildungsmechanismus die gebildeten Aminosäuren die gleiche Konfiguration in einer einzelnen Peptidkette haben. Durch die Adsorption des Polyglycins an der festen Oberfläche in der cis-Form würde eine Ausrichtung der Atome derart geschehen, daß die von außen kommende, mit dem Polyglycin reagierende Molekel nur mit einem Wasserstoff-Atom reagieren kann.



Der Beweis für die Gültigkeit des zweiten Schrittes in dem oben vorgeschlagenen Schema wurde dadurch erbracht, daß ein Teil Amino-acetonitril mit 20 Teilen Kaolin vermischt und 5 h auf 130–135°C erhitzt wurde. Das Reaktionsprodukt wurde mit verdünnter Natronlauge extrahiert und gebildetes Glycyl-glycin und Glycyl-diglycin chromatographisch nachgewiesen.

Der dritte und letzte Schritt für die Bildung der ersten Proteine wurde wie folgt bewiesen: Polyglycin (das auf andere Weise synthetisiert wurde), wurde auf die Oberfläche

<sup>15)</sup> *S. Akabori*, *Kagaku* [Science] 25, 54 [1955].

<sup>15a)</sup> Vgl. hierzu katalytische Prozesse mit Hilfe orientierender Träger-substanzen, die stereospezifische Synthesen ermöglichen. *G. Natta*, diese Ztschr. 68, 393 [1956].

<sup>9)</sup> *W. W. Rubey*, *Geol. Soc. America, Special Paper* 62, 631 [1955].

<sup>10)</sup> *H. G. Thode*, *J. MacNamara* u. *W. H. Fleming*, *Geochim. cosmochim. Acta* [London] 3, 235 [1953].

<sup>11)</sup> *A. Butlerow*, *Liebigs Ann. Chem.* 120, 295 [1861].

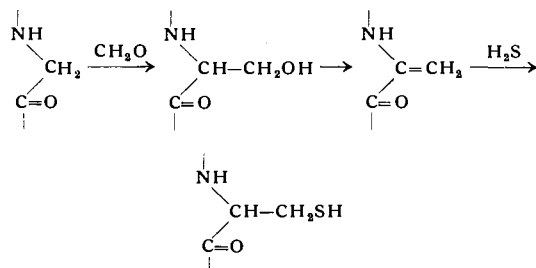
<sup>12)</sup> *E. Fischer* u. *F. Passmore*, *Ber. dtsch. chem. Ges.* 22, 359 [1889].

<sup>13)</sup> *H. Bredereck*, diese Ztschr. 67, 750 [1955]; *H. Bredereck* u. a., *Chem. Ber.* 89, 12 [1956].

<sup>14)</sup> *V. I. Vernadsky*: *The History of the Minerals of the Earth's Crust*, Vol. I., Leningrad 1927.

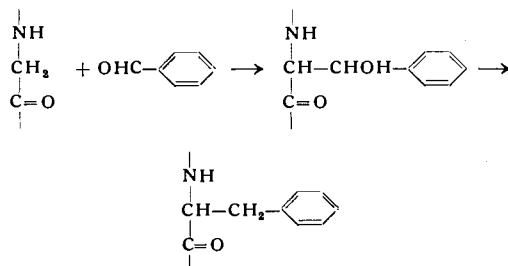
von Kaolin versprüht und in Gegenwart eines basischen Katalysators ( $K_2CO_3$ ,  $NaHCO_3$ ) mit Formaldehyd oder Acetaldehyd behandelt. Das Reaktionsprodukt wurde mit 6n HCl hydrolysiert und in dem Hydrolysat Serin und Threonin nachgewiesen. Ungefähr 2–3% der Glycyl-Reste wurden bei der Reaktion mit Formaldehyd in Seryl-Reste umgewandelt. Im Falle des Acetaldehyds entstanden aus 1,5% Glycyl-Resten Threonin-Reste. Der Polymerisationsgrad des dispergierten Polyglycins betrug 140–170. Unter den gleichen Reaktionsbedingungen wurden in Abwesenheit von Kaolin keine Seitenketten in das Polyglycin eingeführt.

Die Umwandlung der Seryl- in Cysteinyl-Reste könnte wie folgt stattfinden:



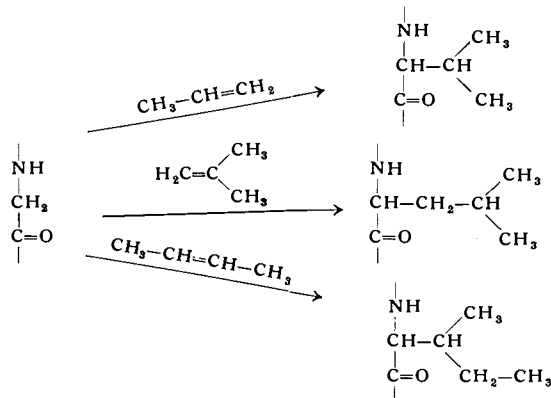
Der experimentelle Beweis hierfür konnte aber noch nicht einwandfrei erbracht werden.

Die Bildung aromatischer und heterocyclischer Aminosäuren mag durch Kondensation der Methylen-Gruppe des Glycyl-Restes mit Aldehyden und anschließender Hydrierung geschehen sein, z. B. die Bildung von Phenylalanin:



Die chemische Struktur von Phenylalanin, Tyrosin, Tryptophan und Histidin, bei denen sich eine Methylen-Gruppe zwischen einem aromatischen oder heterocyclischen Kern und einem Glycin-Rest befindet, könnte für diese Bildungsweise sprechen.

Valin, Leucin und Isoleucin können aus Polyglycin und ungesättigten Kohlenwasserstoffen entstanden sein (experimentell teilweise sichergestellt).



Auch für die restlichen Aminosäuren wurden von Akabori Bildungs-Hypothesen entwickelt, deren experimentelle Bestätigung aber noch aussteht. Erwähnt sei nur noch die

mögliche Bildung von Lysin aus  $\beta$ -Hydroxy- $\alpha,\alpha'$ -diaminopimelinsäure, die durch Kondensation von einer Molekel Acrolein mit zwei Polyglycin-Ketten entstanden sein könnte. Diese Hydroxy-diamino-pimelinsäure könnte dann zur Diamino-pimelinsäure reduziert worden sein, einer Verbindung, die bekanntlich in Bakterienzellen ein Vorläufer des Lysins ist. Interessant ist die weite Verbreitung der Diamino-pimelinsäure in Mikroorganismen<sup>16)</sup>, was den vorgeschlagenen Mechanismus der Bildungsweise des Lysins stützt.

## Entstehung von Stoffwechsel und Struktur

A. Oparin betrachtet die Entstehung von Leben als das Ergebnis der Evolution multimolekularer, organischer Systeme, die von ihrer Umgebung durch eine Grenzfläche getrennt sind, aber trotz dieser Trennung dauernd mit ihrer Umwelt in der Art eines „offenen Systems“ in Wechselwirkung stehen<sup>2)</sup>. Systeme, die möglicherweise der Ausgangspunkt der Evolution waren, sind Coazervate<sup>17)</sup>. Protoplasten<sup>18)</sup> lassen sich nach ihrer Struktur mit ihnen vergleichen. In den Urcoazervaten mußten, im Gegensatz zu den *in vitro* erhaltenen Coazervaten, bestimmte Reaktionen ablaufen, wodurch im Laufe der Evolution die ursprünglichen Systeme räumlich und auch reaktionsmäßig komplexere Natur annahmen. Im Laufe der Entwicklung sind durch natürliche Selektion die Urcoazervate verschwunden. Wenn wir daher heute in dieser Richtung Versuche zur Entstehung des Lebens beginnen, so können wir dies entweder mit einem künstlichen System (Coazervat) tun, dessen Komplexität wir ansteigen lassen oder mit Fragmenten natürlicher Systeme (Protoplasten), die wir durch graduelle Zerstörung von Zellen von Mikroorganismen erhalten haben.

Bei den Experimenten mit einem künstlichen System prüfte A. Oparin\*) die fermentative Wirkung von Enzymen, die in Coazervaten eingeschlossen waren. Hierbei muß man beachten, daß Coazervate nur innerhalb bestimmter, kleiner  $p_H$ -Intervalle existenzfähig sind und daß Enzyme zur optimalen Wirkung ebenfalls einen bestimmten  $p_H$ -Bereich benötigen. Bei allen Versuchen stellte man die Coazervate aus verdünnten Lösungen (0,01–0,1%) bei einer bestimmten Temperatur her, und 30 min nach der Inkorporation der Enzyme und Substrate wurden die Coazervate durch Zentrifugieren abgetrennt. In dem Sediment und der überstehenden Lösung wurden die Reaktionsprodukte der eingeschlossenen Enzyme bestimmt.

Zum Studium des Stärke-Abbaus in Coazervat-Tropfen unter dem Einfluß der  $\beta$ -Amylase wurden 2 ml einer 0,67proz., wäßrigen Lösung von Gelatine (5 Teile) und Gummi arabicum (3 Teile) mit 0,5 ml einer 1proz. Lösung phosphorylierter oder löslicher Stärke und 0,5 ml einer 0,05proz. Amylase-Lösung vermischt, das  $p_H$  der Mischung auf 4,8 eingestellt und 15 min bei 40–42°C gehalten. Es zeigte sich, daß sowohl die Konzentration der Stärke als auch die der Reaktionsprodukte des enzymatischen Abbaus in den Coazervat-Tropfen ungefähr vierfach größer

<sup>16)</sup> E. Work, Biochem. J. 49, 17 [1951]; J. gen. Microbiol. 9, 394 [1953].

<sup>17)</sup> Bei der Koagulation hydrophiler Kolloide beobachtete man auch eine andere Erscheinung, die man als „Entmischung“ bezeichnet. Dabei teilt sich die Lösung in zwei Schichten, wobei die eine reich an kolloidalen Stoffen ist, während die andere, die von der ersten scharf getrennt ist, eine von Kolloiden fast freie Flüssigkeit darstellt. Zur Unterscheidung von der Koagulation nennt man die Entmischung Coazervation und die kolloid-reiche Flüssigkeit Coazervat. Interessant ist die Strahlenempfindlichkeit von Coazervaten, die man experimentell zum Nachweis schwacher, radioaktiver Strahlung verwendet.

<sup>18)</sup> Bakterienprotoplasten sind Zelleinheiten, die keine feste Zellwand mehr haben. — In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, daß man neuerdings Bakterien zur Aufnahme großer Molekeln (Bakteriennucleinsäure, Virusnucleinsäure) in die Protoplasten-Form überführt.

war als in der umgebenden Flüssigkeit. Kontrollversuche erbrachten, daß es sich dabei um keine Adsorptionseffekte handelte. Aus all dem kann man schließen, daß die Reaktionsprodukte deswegen in den Coazervaten angehäuft sind, weil diese auch die Enzyme enthalten.

Ein weiteres Beispiel für den Enzym-Einbau in Coazervate waren die Versuche mit Bakterienlysaten von *Micrococcus lysodeikticus*. Dazu wurden 0,2 ml Phosphat-Puffer, 0,1 ml Bakterienlysat und 0,25 ml einer 0,07proz. Gummi-arabicum-Lösung zu 0,5 ml einer 1,5proz. wäßrigen Protaminsulfat-Lösung gegeben. Der  $p_H$ -Wert der vollständigen Mischung war 6,0. Nach dem Hinzufügen von 0,2 ml einer 0,64proz.  $H_2O_2$ -Lösung wurde nach weiteren 5 min das Enzym mit 10proz. Schwefelsäure inaktiviert. Gleichzeitig liefen Kontrollversuche mit inaktiviertem Enzym mit. Die Auswertung ergab, daß die gesamte Katalase-Aktivität des Bakterienlysats vollständig in den Coazervat-Tropfen konzentriert war.

Die zweite Möglichkeit für Versuche zur Entstehung des Lebens bieten Strukturelemente natürlicher Zellen. Zu diesem Zweck wurden bei mehr oder weniger zerstörten Protoplasten von *M. lysodeikticus* die Respiration und Proteinsynthese untersucht.

Die Protoplasten wurden durch Behandeln der Zellen mit Lysozym in verschiedenen Rohrzucker-Konzentrationen bereitet. Die Mischungen, in denen die Lyse ausgeführt wurde, enthielten 3,5 mg NaCl, 12,8 mg Bernsteinsäure, die mit einer 0,1proz. NaOH-Lösung auf  $p_H$  6,5 eingestellt wurde, 0,05 mg  $MgSO_4$ , 0,4 mg Lysozym und soviel Saccharose, daß die molaren Konzentrationen 0,84; 0,74; 0,64; 0,54; 0,44; 0,34 und 0,24 betrugen. Das Endvolumen der Lösung war 2 ml. Bei den Versuchen zur Protein-Synthese mit radioaktivem Glycin wurden 54 mg Bakterien verwendet.

Durch die Lyse der Bakterien in verschiedenen Rohrzuckerkonzentrationen kommt es zur Abgabe intrazellulärer Substanzen in die umgebende Lösung. Dadurch wird die Zellstruktur mehr oder weniger zerstört, was sich besonders bei der Atmung und Protein-Synthese — beides Prozesse, die koordinative Effekte der Zellstrukturen erfordern — auswirkt.

Aus Abb. 2 geht deutlich hervor, daß bei einer Saccharose-Konzentration unter 0,64 Mol/l die Protoplasma-Atmung stark gehemmt wird. Sinkt die Konzentration der Saccha-

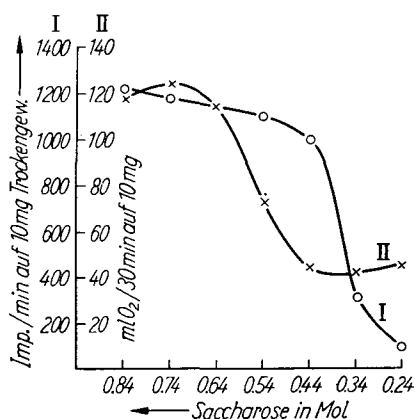


Abb. 2

Atmung (II) der Protoplasten von *Micrococcus lysodeikticus* und Einbau von radioaktivem Glycin (I)

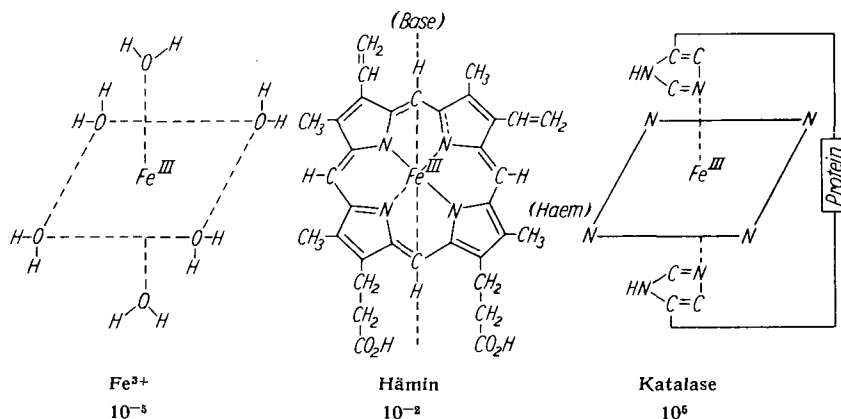
rose noch weiter, unter 0,44 Mol/l, so verliert der Protoplast auch die Fähigkeit, markiertes Glycin aufzunehmen. Die Energie, die für den Einbau des Glycins benötigt wird, ist vermutlich nicht groß, da der Einbau noch mit solchen Protoplasten-Präparationen verläuft, die nur noch eine geringe Intensität der Atmung aufweisen. Augenscheinlich ist es daher nicht das Fehlen von Energie, das den Einbau unterhalb einer 0,44 molaren Rohrzuckerlösung zum Stillstand bringt, sondern schwere Zerstörungen der Zellstruktur.

Oparin berichtet über weitere Experimente zur Proteinsynthese, aus denen sich zusammenfassend folgern läßt, daß die Integrität der multimolekularen Struktur für die Proteinsynthese notwendig ist.

## Evolution des Stoffwechsels

### Katalyse

In seinem Vortrag „Chemische Evolution und die Entstehung des Lebens“ führte M. Calvin\*) einige Beispiele für die Entwicklung bzw. Vervollkommenheit von Katalysatoren an. Bekanntlich zersetzt Eisen in wäßriger Lösung Wasserstoffperoxyd zu Wasser und molekularem Sauerstoff. Die katalytische Aktivität ist jedoch sehr gering.



Evolution eines Katalysators für die Zersetzung von  $H_2O_2 \rightarrow H_2O + \frac{1}{2} O_2$

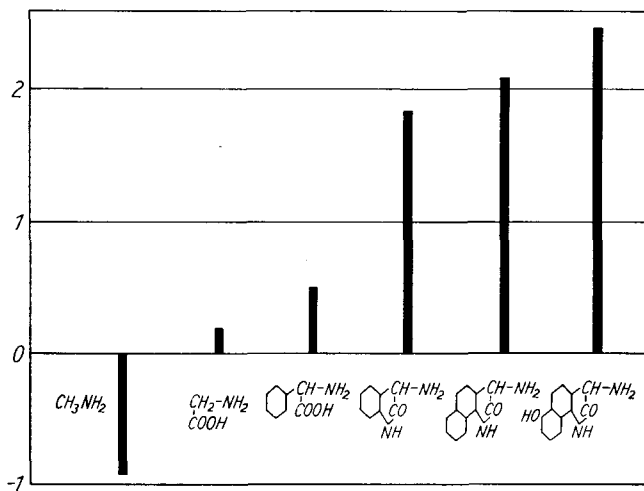
Wird dagegen das Eisen in ein Tetrapyrrol-Ringsystem eingebaut (Porphyrin), so steigt die katalytische Aktivität um den Faktor 1000. Porphyrine können aus Bernsteinsäure und Glycin gebildet werden, und wie diese Stoffe aus einfachsten, anorganischen Verbindungen entstehen konnten, wurde vorstehend schon berichtet. Dies zeigt die Möglichkeit der Bildung der Porphyrin-Molekel in einem nicht-lebenden System. Wird das Hämin noch mit einem spezifischen Eiweiß verbunden, so steigt seine katalytische Aktivität nochmals um den Faktor  $10^6-10^7$  an. Die Entwicklung des Hämins zum Hämoprotein könnte in der Epoche der biologischen Evolution stattgefunden haben.

In Abb. 3 wird ein anderes Beispiel für die Evolution eines Katalysators gezeigt. Wie man sieht, steigt mit der Komplexität der Molekel vom Methylamin über Glycin, Phenylglycin usw. auch die katalytische Aktivität<sup>19)</sup>. Wenn durch die katalytische Wirkung Stoffe gebildet werden, durch die der eigene Katalysator komplexer und damit wirksamer wird, würde dies ein Beitrag zur chemischen Evolution sein.

### Schwefel-Verbindungen

C. Reid\*) berichtete über Experimente, bei denen die Wirkung katalytischer Mengen schwefelhaltiger Verbindungen bei Photopolymerisations-Prozessen in wäßrigen

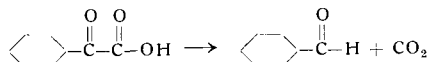
<sup>19)</sup> W. Langenbeck u. a., Z. anorg. allg. Chem. 177, 10 [1930]; Liebigs Ann. Chem. 483, 60 [1931].



A 860.3

Abb. 3

Evolution eines Katalysators für die Reaktion



Zeichenerklärung: Ordinate  $\log \left( \frac{\text{Mole CO}_2}{\text{Mole Katalysator}} \right)$ ;

Reaktionsmenge in 5 min bei 100 °C

Systemen studiert wurden. Die umzusetzenden kleinen Molekeln  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$  usw. waren in hoher Konzentration in der Reaktionslösung vorhanden. Als Lichtquelle diente eine 1000 Watt-Lampe, die Licht der Wellenlänge 1850 Å ausstrahlte. Es zeigte sich, daß sowohl Cystin als auch Cystein den Polymerisationsprozeß wesentlich beeinflussen. Systematische Untersuchungen der Reaktionsprodukte mit Hilfe der Papierchromatographie sind im Gange.

### Entstehung der Stoffwechseltypen

Man kann annehmen, daß die primitiven Lebewesen anaerob-heterotroph waren. D. Sapochnikow\*) schlug vor, auf Grenzfassungen der Begriffe „Autotrophie“ und „Heterotrophie“ zu verzichten, und stattdessen den Begriff „Grad der Autotrophie“ einzuführen, in dem auch der Energiegehalt der assimilierenden Stoffe miteinbegriffen ist. Die primären Organismen waren im höchsten Grade heterotroph, da ihr Stoffwechsel eine Assimilation energiereicher Verbindungen darstellte. Im Verlaufe der Evolution mußten die primären Heterotrophen die Fähigkeit erwerben, die Abbauprodukte weiter zu verwerten, d. h. organische Stoffe mit immer kleinerer Energie. Somit entwickelten sie sich zu Organismen, mit einem niedrigeren Grad der Heterotrophie. Ähnlich wie die Viren nach ihrer chemischen Zusammensetzung den Eiweißstoffen des Wirts nahe stehen, mußte auch das Nährsubstrat der primären Lebewesen nach Struktur und Zusammensetzung den Lebewesen sehr nahe stehen. Da der Unterschied zwischen den primären, assimilierenden Lebewesen und dem von ihm assimilierten Substrat sehr gering war, brauchten diese Lebewesen auch nicht über einen komplizierten Enzymapparat zu verfügen, der gegenwärtigen Organismen den Aufbau kompliziertester, organischer Verbindungen aus einfachsten anorganischen Substanzen ermöglicht. Ein solcher Enzymapparat mußte erst im Laufe der Evolution entstehen.

Infolge der Wiederholung der Assimilations- und Dissimilations-Prozesse erschienen in der werdenden Biosphäre biogene Stoffe, die sich bereits stärker von denen der assi-

milierenden Lebewesen unterschieden. Für die Assimilation solcher organischer Stoffe war die Bildung neuer Enzyme notwendig. Auch heute kann man noch die adaptive Bildung von Enzymen durch neue Substrate beobachten. (Beispiele für die Adaptierung einer Zelle an neue Substrate sind die Wuchsstoff-Aktivität von 5-Brom-uracil-desoxyribosid (an Stelle von Thymin-desoxyribosid) und die sulfonamid-enthemmende Wirkung der p-Aminosalicylsäure an Stelle der p-Aminobenzoesäure.)

Die primären Organismen waren durch den höchsten Grad der Heterotrophie gekennzeichnet. Im Laufe der Evolution wuchs allmählich die Zahl der Aminosäuren, die von den Heterotrophen selbst synthetisiert werden konnten. Gleichzeitig nahm auch die Zahl der Wuchsstoffe zu, die für die Organismen entbehrlich wurden. Im weiteren Verlauf dieses Prozesses mußten sich Lebewesen entwickeln, die amino-autotroph waren, gleichzeitig aber wuchststoff-heterotroph. Unter den heutigen Mikroben finden wir diese Ernährungsweise sehr häufig bei Hefen, Bakterien der Buttersäure- und anderen Gärungen sowie bei parasitären Schimmelpilzen.

Die nächste Etappe, die „Hetero-autotrophie“ ist gekennzeichnet durch Autotrophie gegen Aminosäuren und Vitamine und die Fähigkeit, Stickstoff sowohl in Form von Ammoniak als auch von Nitraten zu assimilieren. Heutige Vertreter dieses Typus sind unter anderem die *Coli*-Bakterien.

Der Abbau der abiogenen, synthetisierten organischen Stoffe führte schließlich zum Auftreten der Kohlensäure. Jedoch dürfte erst nach der Einbeziehung des  $\text{CO}_2$  in den Stoffwechsel vom Auftreten eines Kohlenstoff-Kreislaufes die Rede sein. Als Energiequelle für die heterotrophe Assimilation von  $\text{CO}_2$  dienten zunächst organische Stoffe.

Den nächsten Typ des Stoffwechsels, bei dem anorganische Stoffe als Energiequelle an die Stelle der organischen Verbindungen treten, bezeichnet Sapochnikow als Chemoreduktion. Er unterscheidet drei Entwicklungsetappen beim Übergang der heterotrophen  $\text{CO}_2$ -Assimilation zur Chemoreduktion. Es gibt heute noch heterotrophe Organismen, die als einzige Energiequelle die Oxalsäure verwenden. Diese würden der ersten Stufe angehören. In der nächsten findet der Ersatz einer Komponente des Redoxsystems durch eine anorganische Verbindung statt. Gegenwärtige Organismen dieses Typus sind die sulfat-reduzierenden. In der dritten Etappe wird auch die zweite Komponente durch eine anorganische Verbindung ersetzt, wie z. B. bei den bekannten Wasserstoff-Schwefelbakterien.

Infolge der Lebenstätigkeit von Organismen, deren Stoffwechsel auf Chemoreduktion beruhte, mußten im umgebenden Medium große Veränderungen auftreten. Der allmähliche Rückgang des Kohlendioxids in der Atmosphäre bewirkte auch eine Veränderung der spektralen Zusammensetzung der die Erdoberfläche erreichenden Strahlung.

Die nächsthöhere Stufe der Evolution sollte die Photoreduktion sein. In den Übergang Chemoreduktion — Photoreduktion mußte auch die Entstehung von Farbstoffen fallen, durch die die Verwendung der Lichtenergie für verschiedene Redoxsysteme möglich war. In der letzten Stufe des Überganges mußte die chemische Energie für die Reduktion des  $\text{CO}_2$  durch die Lichtenergie ersetzt worden sein. Dabei mußten allmählich Bedingungen entstehen, die das Auftreten des aeroben Stoffwechsels begünstigten. Der Weg, den wir bisher verfolgt haben, ging von den primären, anaeroben Heterotrophen über die anaeroben Chemoautotrophen zu den anaeroben Photoautotrophen.

In der Epoche der Photoreduktion mußte die Entwicklung des Lebens ein gewaltiges Ausmaß erreicht haben. Die heutigen Formen der aeroben Organismen können aber nur nach dem Erscheinen von freiem, molekularem Sauerstoff entstanden sein. In der Reihe der fortschreitenden Anpassung der Photoreduktion an die Photosynthese lassen sich ebenfalls mehrere Etappen festhalten. Dabei mußten auch eisen-haltige Enzymsysteme entstehen, die vervollkommen wurden. Zuletzt mußte das Redoxpotential so weit erhöht werden, daß der freie Sauerstoff in den photosynthetischen Stoffwechsel miteinbezogen werden konnte. In Abb. 4 ist die Evolution der Stoffwechseltypen veranschaulicht.

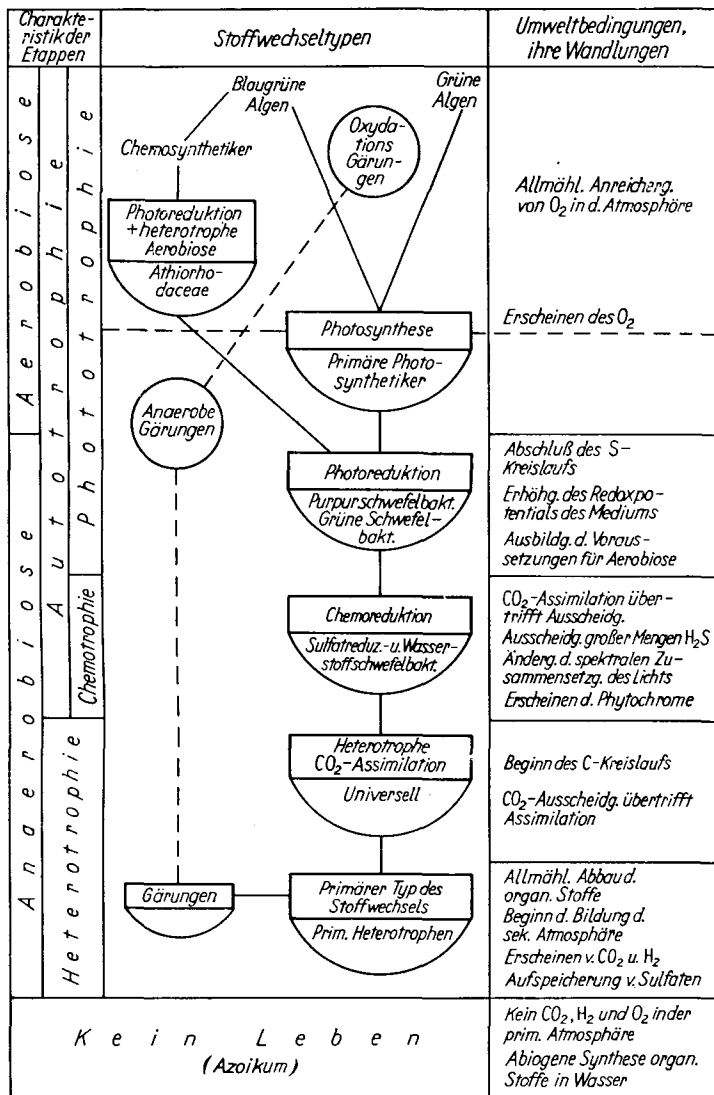
## Isologe und analoge Einheiten der Biochemie

M. Florkin\*) brachte einige Gedanken zur biochemischen Evolution. Florkin sprach von der Bedeutung isologischer Einheiten der Biochemie, worunter er Molekeln oder Makromolekeln versteht, die chemisch nahe verwandt sind, aber verschiedene Funktionen ausüben, wie z. B. die Cytochrome, die Peroxydase, die Katalase, das Hämoglobin. Er sprach weiter von analogen Einheiten der Biochemie, Stoffe, die chemisch verschieden sind, aber die gleiche Funktion in einem biochemischen System ausüben, wie z. B. Phosphorkreatin im Muskelsystem der Säugetiere und Phosphorarginin bei den Crustaceen. Analoge Stoffe können auch isolog sein.

Für die Evolution biochemischer Systeme führte Florkin\*) die Photosynthese an. Nimmt man an, daß das Schema der Photosynthese eine Stoffwechselvariante des Hexose-monophosphat-Abbaues ist, so muß das System der Reduktion von  $\text{CO}_2$  spezialisierter sein als das des Hexose-monophosphat-Abbaues. Da die Biosphäre ursprünglich kein  $\text{CO}_2$  enthielt, konnte sich die Photosynthese erst herausbilden, nachdem  $\text{CO}_2$  durch den primären Stoffwechsel zur Verfügung stand. Wenn es sich bestätigt, daß die Gegenwart des Sauerstoffes in der Erdatmosphäre von der Photosynthese abhängt, so muß die Atmung unter diesem Gesichtspunkt einen höheren Grad der Entwicklung darstellen als die Glykolyse.

Die Einführung eines Bestandteiles eines alten biochemischen Systems in ein neues zeigte Florkin am Beispiel des Prolactins und des Oxytocins. Die Milchsekretion, die bestimmten Säugetierzellen eigen ist, wird ausgelöst und kontrolliert durch das Hormon Prolactin, das von bestimmten Zellen der Hypophyse gebildet wird. Das gleiche Prolactin wird aber auch von der Hypophyse der Fische, Amphibien und Reptilien gebildet. Oxytocin wirkt auf den Uterus der Säugetiere ein, kommt aber auch bei allen Amphibien vor, wo es eine Funktion bei der Regulierung des Wasserhaushaltes ausübt. Im Stoffwechsel des tierischen Organismus finden sich noch viele Beispiele isologischer biochemischer Molekeln, die uns einen Hinweis auf eine biochemische Evolution geben.

Anmerkung des Referenten: R. B. Woodward<sup>20)</sup> wies kürzlich auf die Bedeutung einer theoretischen Biochemie bei der Strukturaufklärung von Naturstoffen hin. Er erwähnte dabei eine Parallele (im Sinne Florkins Isologie) zwischen den Strukturen der Makrolide als Stoffwechselprodukte von Pilzen und manchen weit verbreiteten Steroiden, die in höheren Pflanzen vorkommen und von denen er Strophantin als Beispiel nannte. Ähnlich verhalten sich auch Mycarose und Cladinose und die üblichen Zucker der Steroidglykoside. Weiterhin ist das Vorkommen von  $\alpha$ -Oleandrose sowohl in dem Herzglykosid Oleandrin als auch in dem Makrolid Oleandomycin interessant. „So könnten die Makrolide in einem gewissen Sinne grobe Steroid-Stellvertreter für die relativ einfachen einzelligen Organismen sein, welche sie produzieren. Entwicklungsgeschichtlich gesehen sind die makrocyclischen Lactone vielleicht ungefähre Muster der Stoffe, die der höher organisierte Organismus bilden wird; ob die Parallele im Molekelbau sich auch in der Funktion widerspiegelt, ist eine Frage der Zukunft.“



A 860.4

Abb. 4

Schema der Evolution der Stoffwechseltypen

A. Sapozhnikow\*) konnte zeigen, daß an der Sauerstoff-Übertragung bei Photosynthetikern Carotinoide von epoxydem Typ beteiligt sind. Bei photoreduzierenden Organismen sind Carotinoid-epoxyde überhaupt nicht vorhanden. Ein Vergleich des Enzymapparates der Purpurschwefel-Bakterien mit dem der grünen, höheren Pflanzen ergibt, daß die photosynthetisierenden Organismen zum Unterschied von den photoreduzierenden über einen Satz von Carotinoiden verfügen, der ihnen den aeroben Stoffwechsel ermöglicht. Dies könnte mit als ein Beweis für die Entstehung der Photosynthese aus der Photoreduktion gelten.

## Über Eiweiß- und Nucleinsäure-Strukturen

Mit der strukturellen Ähnlichkeit der Eiweißstoffe beschäftigte sich F. Sorm\*). Obgleich das bis jetzt in der Literatur Mitgeteilte nur über die Struktur eines unbedeutenden Teiles der in der Natur vorkommenden Eiweißstoffe urteilen läßt, kann man doch schon bestätigen, daß die Stoffe, die funktionelle Ähnlichkeit haben, bei verschiedenen Tierarten auch einen analogen Aufbau zeigen.

Um bekannte Eiweiß- und Peptid-Strukturen miteinander vergleichen zu können, wurden die Bindungsformen einzelner Aminosäuren zusammengestellt. Dabei zeigte es

<sup>20)</sup> R. B. Woodward, diese Ztschr. 69, 50 [1957].

sich, daß manche Bindungen in den Eiweißstoffen sehr oft vorkommen, andere dagegen seltener und manche bis jetzt noch gar nicht gefunden wurden. So läßt sich z. B. der Unterschied der Bindungen Serin — Arginin und Arginin — Serin nur teilweise durch die relative Stabilität dieser Bindungen erklären. Andererseits ist interessant, daß die Bindung Threonin — Arginin zum Unterschied von Serin — Arginin bisher in Eiweißstoffen nicht vorgefunden wurde.

Peptid-Gruppierungen bestimmten Typs kommen auch in Eiweißstoffen ganz verschiedener Art vor. In Tabelle 2 werden Gruppierungen verschiedener Tripeptide und höherer Peptide angeführt, die für eine Reihe verschiedener Eiweißstoffe analog sind.

Ileu.	Glu.	Leu.	Ala.	Leu.	Lysozym
Asp.	Glu.	Leu.	Ala.	Glu.	Corticotropin-A vom Schwein
					β-Corticotropin vom Schwein
	Ser.	Phen.	Asp.	Glu.	Lysozym
Phen.	Phen.	Asp.	Glu.	Tyr.	Thyroidin A
Try.	Phen.	Asp.	Glu.	Tyr.	Thyroidin B
Asp.	Val.	Glu.	Ala.		Lysozym
Leu.	Val.	Glu.	Ala.	Leu.	Insulin vom Rind, Schaf
					Schwein
Cys.	Ala.	Ser.	Val.	Cys.	Insulin vom Rind
Asp.	Ala.	Ser.	Val.	OH	Ribonuclease
Cys.	Ala.	Gly.	Val.	Cys.	Insulin vom Schaf
Gly.	Ala.	Gly.	Val.	Gly.	Fibroin
	Ala.	Gly.	Val.	Asp.	Ovalbumin
Cys.	Tre.	Ser.	Ileu.	Cys.	Insulin vom Schwein
Met.	Tre.	Ser.	Ileu.	OH	Tropomyosin
Tyr.	Gly.	Ala.	Gly.	Ala.	Fibroin
Ser.	Gly.	Ala.	Gly.	Ala.	Fibroin
Ser.	Gly.	Ala.	Gly.	Tyr.	Protofibrin
Ala.	Gly.	Ala.	Gly.	Tyr.	Fibroin
Ala.	Gly.	Ala.	Gly.	Ser.	Fibroin
Ala.	Gly.	Ala.	Gly.	Val.	Fibroin
Gly.	Ala.	Gly.	Ala.	Gly.	Fibroin
	Ala.	Gly.	Ala.		Kollagen
Ileu.	Glu.	Asp.	Cys.	Pro.	Oxytocin
Phen.	Glu.	Asp.	Cys.	Pro.	Arg. Vasopressin

Tabelle 2  
Ähnliche Peptide in Eiweißstoffen

Daraus ist ersichtlich, daß Tripeptide sehr oft von gleichen oder ähnlichen Aminosäuren (*kursiv*) umgeben sind. Interessant ist ferner, daß sich z. B. im Fibroin die Stellung des Glycins, in der Regelmäßigkeit 3 3 3 3... und die des Alanins in der Regelmäßigkeit 5 3 5 3 5 3... wiederholt. In dieser Art gibt es noch eine Reihe weiterer Gesetzmäßigkeiten. Vielleicht hängt dieser Befund mit der Spiralanordnung der Peptidkette zusammen.

Die Grenzen unserer gegenwärtigen Kenntnisse verhindern die Verwendung statistischer Methoden bei der Erforschung der Gesetzmäßigkeiten des Aufbaues von Eiweißstoffen. Jedoch werden gerade diese in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

Bei der Analyse der Bakterien-Nucleinsäure fand A. Belozersky\*) interessante Gesetzmäßigkeiten. So besitzt jedes Bakterium eine spezifische Zusammensetzung seiner Desoxy-ribonucleinsäure. Man kann z. B. von einem Adenin — Thymin-Typ bei *Clostridium perfringens* sprechen und von einem Guanin — Cytosin-Typ bei *Actinomyces globisporus streptomycini*. Bei der entsprechenden Analyse

der Ribonucleinsäure<sup>21)</sup> findet man keine derartigen Gesetzmäßigkeiten (s. Tabelle 3).

Kultur	Desoxyribo- nucleinsäure	Ribonucleinsäure
	Guanin + Cytosin <sup>a)</sup> Adenin + Thymin	Guanin + Cytosin <sup>a)</sup> Adenin + Uracil
<i>Clostridium perfringens</i> ...	0,45 <sup>a)</sup>	1,00 <sup>a)</sup>
<i>Staphylococcus pyogenes aureus</i>	0,53	1,03
<i>Pasteurella tularensis</i> .....	0,53	1,07
<i>Proteus vulgaris</i> .....	0,68	0,99
<i>Escherichia coli</i> .....	1,09	1,00
<i>Proteus morganii</i> .....	1,13	1,01
<i>Shigella dysenteriae</i> .....	1,15	0,99
<i>Salmonella typhosa</i> .....	1,14	1,00
<i>Salmonella typhimurium</i> ..	1,18	1,00
<i>Erwinia carotovora</i> .....	1,17	0,99
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	1,20	1,13
<i>Azotobacter agile</i> .....	1,21	0,99
<i>Azotobacter vinelandii</i> .....	1,28	1,02
<i>Azotobacter chroococcum</i> ...	1,34	1,02
<i>Aerobacter aerogenes</i> .....	1,31	1,00
<i>Brucella abortus</i> .....	1,37	0,99
<i>Alcaligenes faecalis</i> .....	2,00	1,01
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ..	2,03	1,05
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> BCG .....	2,08	1,05
<i>Sarcina lutea</i> .....	2,57	1,11
<i>Actinomyces globisporus</i> <i>streptomycini</i> .....	2,73	1,04

a) Quotient aus der Summe der Mol-Prozente der Basen.

Tabelle 3  
Zusammensetzung der Desoxy- und Ribonucleinsäure  
verschiedener Bakterien

Diese Befunde können bei der systematischen Einteilung der Bakterien nützlich sein. So war z. B. die Zuordnung von *Proteus morganii* zur Proteus-Gruppe zweifelhaft. Die Analyse zeigte tatsächlich, daß es korrekter ist, *Proteus morganii* der Salmonella-Shigella-Gruppe zuzuordnen.

Die Unterschiede in der Desoxy-ribonucleinsäure gegenüber der fast gleichmäßigen Zusammensetzung der Ribonucleinsäure<sup>21)</sup> lassen ein direktes Einwirken der beiden Nucleinsäuren aufeinander fraglich erscheinen. A. Belozersky führte mehrere Gründe an, die dafür sprechen, daß die Ribonucleinsäure zu einem früheren Zeitpunkt aufgetreten ist als die Desoxy-ribonucleinsäure.

Mit den Ausführungen über Eiweiß- und Nucleinsäure-Strukturen soll der Bericht über das Symposium enden. Die große Zahl der mitgeteilten Ergebnisse und Hypothesen vermittelte einen guten Überblick über den gegenwärtigen Stand der Erforschung, wie Leben entstanden ist. Der eingeschlagene Weg zeigt aber deutlich, daß nur durch vielseitige Zusammenarbeit vielleicht das große Ziel erreicht werden kann, von dem wir noch so weit entfernt sind.

Eingegangen am 30. Januar 1958 [A 860]

<sup>21)</sup> Anmerkung bei der Korrektur: Die gleichmäßige Zusammensetzung der Ribonucleinsäure konnte A. Belozersky in einer neueren Arbeit (Nature [London] 182, 111 [1958]) nicht bestätigen. Ebenso wie die Desoxy-ribonucleinsäure weist auch die Ribonucleinsäure Gesetzmäßigkeiten auf.