

Die Genese der Erdatmosphäre

Von Univ.-Prof. Dr. Max T o p e r c z e r, Wien

Vortrag, gehalten am 19. Jänner 1966.

Wir leben auf dem Grunde des die ganze Erde umgebenden und einhüllenden Luftozeans, der Atmosphäre; sie ist die Grundbedingung für das organische Leben in seiner heutigen Form, das an den in ihr enthaltenen Sauerstoff (O) gebunden ist. Die Atmosphäre hat aber auch wichtige Schutzfunktionen, sie absorbiert in ihren obersten Schichten die kurzwellige Ultraviolettstrahlung der Sonne, die lebensfeindlich ist, sie verteilt die von der Sonne kommende Wärme und schafft so ein ausgeglichenes Klima. Sie schützt die Erdoberfläche gegen das kosmische Bombardement. Die Erdatmosphäre besteht aus 78% Stickstoff (N), 21% Sauerstoff (O) und fast einem Prozent Argon. Außerdem enthält sie noch Kohlendioxyd (CO₂) und Spuren von Neon (Ne), Helium (He), Krypton (Kr), Wasserstoff (H) und Xenon (X). In wechselnder Menge ist in der unteren Atmosphäre noch Wasserdampf (H₂O) vorhanden. Die Lufthülle ist

damit auch der Träger des lebenserhaltenden Wasserkreislaufes.

Die Gashülle der Erde unterscheidet sich grundlegend von den Gashüllen aller anderer Planeten des Sonnensystems, sie nimmt eine Ausnahmestellung ein. Die Gashüllen der anderen Planeten enthalten keinen Sauerstoff, oder doch nur geringe Spuren dieses lebenswichtigen Elements. Sie sind durchwegs lebensfeindlich.

Von den inneren Planeten hat Merkur wegen seiner geringen Masse und der großen Sonnennähe keine nennenswerte Atmosphäre. Die Venusatmosphäre ist im wesentlichen aus Stickstoff, Kohlensäure und Wasserdampf aufgebaut, die Marsatmosphäre ist wegen der kleinen Masse dieses Himmelskörpers sehr dünn; sie besteht aus Stickstoff, Spuren von Kohlensäure und vielleicht Wasserdampf und sehr wenig Sauerstoff.

Ganz anders sind die Atmosphären der großen und massereichen äußeren Planeten beschaffen. Nur von den drei folgenden Planeten, Jupiter, Saturn und Uranus kann auf Grund spektroskopischer Messungen festgestellt werden, daß ihre Gashüllen im wesentlichen aus Methan (CH_4), Ammoniak (NH_3) und Cyan (CN)₂ bestehen. Wahrscheinlich haben auch die Gashüllen von Neptun und Pluto, soweit wegen der niederen Temperatur merkliche Gashüllen noch bestehen, eine ähnliche Zusammensetzung.

Im Aufbau der verschiedenen Gashüllen muß eine gemeinsame Gesetzmäßigkeit enthalten sein, mit der auch die Sonderstellung der Erdatmosphäre sich erklären läßt. Sie läßt sich am leichtesten auffinden und erklären, wenn wir von der Entwicklung des Planetensystems ausgehen.

Die Sonne und die diese begleitenden Planeten haben als Ursprung eine kosmische Staub- und Nebelwolke. Zunächst waren also Gas- und Staubpartikel in großer Verdünnung vorhanden, aus denen sich durch Massenzusammenballung die Sonne und die einzelnen Planeten entwickelten. Im Gegensatz zu früheren Theorien über die Entstehung des Sonnensystems, bei denen die Sonne die Planeten im Laufe ihrer Entwicklung ausgestoßen haben sollte, also sozusagen als Planetenmutter auftrat, ist heute die Geschwistertheorie des Sonnensystems die herrschende Auffassung.

Für die Zusammensetzung der Materie im Urnebel ist die durch astrophysikalische Untersuchung bestimmte Häufigkeit der Elemente in den Nebelwolken maßgebend. Danach sind die häufigsten Gase in absteigender Häufigkeit Wasserstoff, Helium, Neon, Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff, also die leichten Elemente.

Für die weitere Entwicklung eines Planeten sind zwei Faktoren von ausschlaggebender Bedeutung: seine Masse und sein Energiehaushalt. Letzterer wird zunächst im Anfangsstadium durch die eige-

nen Energiequellen, im wesentlichen also durch die auftretende Kontraktionswärme, die selbst eine Massenfunktion ist, und die eigenen Heizquellen, gespeist aus dem Zerfall radioaktiver Elemente, bestritten. Später nach Bildung des eigentlichen festen Himmelskörpers ist für die Planetenatmosphären der Hauptenergiespender die Sonnenstrahlung.

Schon im Stadium des Protoplaneten, bei dem der eigentliche Planet nur als Bereich höherer Dichte in einer ausgedehnten Gaswolke vorhanden ist, wird bei nicht ausreichender Masse wegen der beginnenden Erwärmung durch die Kontraktion und den radioaktiven Zerfall die aus den leichtesten Elementen gebildete Uratmosphäre zerstreut und an den Weltraum abgegeben, also vor allem der Wasserstoff, das Helium und Neon. Wäre dies nicht der Fall gewesen, dann müßte heute in der Erdatmosphäre das Neon weit häufiger sein, als dies tatsächlich der Fall ist. Im Urplaneten war seine Häufigkeit weit größer als die des Siliciums, das der wichtigste und häufigste Bestandteil der Krustengesteine ist. Als Edelgas ist es zudem keiner chemischen Reaktion fähig. Das Schwerfeld der damals viel ausgedehnteren Erde war nicht fähig, die thermisch angeregten, also rasch bewegten leichten Gase festzuhalten, da es in der äußeren Gashülle des Protoplaneten viel schwächer war als im Bereich der heutigen Erdoberfläche.

Mit zunehmender Kontraktion entstand eine sehr beträchtliche Erhitzung, die noch durch eine intensive radioaktive Heizung kurzlebiger und daher sehr energiereicher radioaktiver Körper verstärkt wurde. Dabei trat nun im Schwerefeld des jungen Planeten die Sonderung seiner Bestandteile nach ihrer Dichte ein; die schweren Elemente wanderten zum Anziehungszentrum, die leichten Elemente wurden dabei nach außen verdrängt. Nach kurzer Zeit aber mußte Abkühlung eintreten, weil nach Erreichung genügend hoher Temperaturen, die Wärmeverluste durch Ausstrahlung, die ja der vierten Potenz der Temperatur proportional ist, die Wärmeproduktion überwog. Der anhaltende Verlust von leichten Elementen entsprach dabei einem weiteren Energieverlust.

Mit zunehmender Abkühlung erhielt nun die Erde eine neue Atmosphäre. Der Erdkern war noch im fluiden Zustand, über ihm lagerte eine Gas-hülle, in der aber schon die ersten chemischen Verbindungen sich bilden konnten und beständig blieben. Es waren dieselben, die wir bei den Außenplaneten auch heute noch feststellen können, nämlich Methan, Ammoniak und Wasserdampf. Als die kritische Temperatur des Wasserdampfes bei der weiteren Abkühlung unterschritten war, bildete sich der Urozean, der zunächst noch kleiner als der heutige Ozean war. Sein Wasser enthielt auch die atmosphärischen Gase in Lösung, wobei das Am-

moniak überwog, da es viel besser löslich ist als Methan.

Der Bildung des Urozeans war die Bildung einer festen Erdkruste vorhergegangen. Doch war diese noch sehr dünn, die vulkanische Tätigkeit daher im Verhältnis zum jetzigen Zustand sehr groß. Es erfolgte dabei eine dauernde Nachlieferung verschiedener Gase, vor allem von Wasserdampf. Auch heute noch erfolgen gewaltige Gasexhalationen durch die vulkanische Tätigkeit, die imstande sein würden, das Wasser der Weltmeere in etwa 10 Millionen Jahren wieder zu ergänzen, falls diese austrocknen sollten.

Die Gase, die die zweite Atmosphäre der Erde bildeten, haben durchwegs ein ausreichendes Molekulargewicht, um im Anziehungsbereich der Erde zu verbleiben. Sie bleiben aber dennoch nicht in ihrer ursprünglichen Zusammensetzung. Auf sie wirkt die Strahlung der Sonne ein, die in den obersten Teilen der Atmosphäre durch ihre ionisierende Wirkung eine Zerlegung der Moleküle in einfachere Bestandteile bewirkt. Eine solche Dissoziation kann nur dort erfolgen, wo die Sonnenstrahlung genügend intensiv ist. Sie reicht im Bereich der inneren Planeten für diese Zerlegung gerade aus, natürlich in abgestuftem Maß. Der Energiefluß der Sonnenstrahlung beträgt in der mittleren Entfernung des Merkur 8.95, der Venus 2.55, für die Erde 1.34 und für den Mars 0.58 Kilo-

watt pro Quadratmeter. Hingegen hat sie in der Entfernung des Jupiter nurmehr eine Intensität von 0.05 kW/m^2 , und diese sinkt nach außen weiterhin rasch ab.

Die dissoziierende Kraft der Sonnenstrahlung zerlegte die Bestandteile der zweiten Erdatmosphäre in freien Stickstoff und Kohlensäure (CO_2), wobei der erforderliche Sauerstoff aus der Dissoziation des Wasserdampfes gewonnen wird. Freier Sauerstoff kann nicht bestehen bleiben, da er sich als ein chemisch sehr aktiver Körper sogleich mit anderen Elementen zu Oxyden verbindet. Stickstoff hingegen ist chemisch sehr träge und bleibt daher erhalten. Der freiwerdende Wasserstoff hingegen geht im Lauf der Zeit wieder an den Weltraum verloren.

Auf diese Art entsteht im Laufe der Zeit aus der Methan-Ammoniakhülle, die der Gashülle der äußeren Planeten entspricht, eine Stickstoff-Kohlensäure-Hülle, wie wir sie heute noch auf der Venus vorfinden. Sie ist auf diesem Planeten der — vorsichtig ausgedrückt — vorläufige Endpunkt in der Entwicklung seiner Gashülle.

Auf dem Außenplaneten ist hingegen ihre Gashülle gleichfalls stabil. Durch ihr starkes Schwerfeld können sie auch den Wasserstoff festhalten. Wegen der geringen Strahlungsintensität erfolgt aber auf ihnen auch keine Zerlegung von Methan und Ammoniak in andere Molekülarten. Unter den

dortigen physikalischen Bedingungen sind diese Gase stabil.

Die heutige vierte Atmosphäre der Erde ist nun nicht eine Folge von äußeren auf die Erdatmosphäre einwirkenden Kräften; sie verdankt ihre Existenz der Tätigkeit einer der Erde selbst eigenen Erscheinungsform der Materie und der damit verbundenen chemischen Vorgänge, nämlich der Wirkung des Lebens. Die vierte Atmosphäre der Erde ist biogenen Ursprungs.

Es wurde schon erwähnt, daß der Sauerstoff, der heute zu einem Fünftel die Atmosphäre bildet, ein chemisch sehr aktives Gas ist, das dauernd bestrebt ist, sich mit anderen Elementen zu verbinden. Das können wir an einer sehr einfachen Tatsache feststellen. Die Gesteine, die die Erdkruste also auch unsere Gebirge aufbauen, bestehen zu 38% aus Siliziumdioxid (Kieselsäure), zu 24% aus Magnesiumoxyd und zu 12% aus Eisenoxydul. Rechnen wir den in diesen Verbindungen enthaltenen Sauerstoff zusammen, so bekommen wir als Ergebnis, das 46% der gesamten Krustenmasse aus Sauerstoff bestehen. Andererseits zeigt eine Überschlagsrechnung, daß ohne dauernde Neubildung von Sauerstoff, der gesamte Sauerstoffvorrat der heutigen Erdatmosphäre in etwa 3000 Jahren verbraucht sein würde. Nur durch die Tätigkeit der Pflanzen, durch den Vorgang der Photosynthese, wird der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre ständig

erneuert und damit die derzeitige Zusammensetzung der Atmosphäre aufrecht erhalten. Das ist der zwingende Schluß aus diesen einfachen Überlegungen.

Wir müssen annehmen, daß das Leben hier auf der Erde zu einem gewissen Zeitpunkt, zu dem die äußeren physikalischen Bedingungen gegeben waren, selbst entstanden ist. Wir können ihn aus der geologisch erfaßbaren Vergangenheit der Erde auch ungefähr angeben. Es mußte einmal eine feste Erdkruste als Unterlage für die Entstehung eines Urozeans vorhanden sein und dann mußten gewisse Klimabedingungen gegeben sein. Denn alles Leben, das hier auf der Erde existiert, ist an das Vorhandensein von Aminosäuren gebunden. Die Chemie kann aber nachweisen, daß Aminosäuren und noch mehr die aus ihnen gebildeten Eiweißmoleküle nur in einem sehr engen Temperaturbereich existenzfähig sind. Bei zu hoher Temperatur tritt Zerfall ein, die hochkomplizierten Moleküle würden in einfache Bestandteile zerfallen, bei zu niedriger Temperatur hingegen werden chemische Vorgänge stark verlangsamt und abgeschwächt, die erforderliche Energie zum Aufbau hochkomplizierter Verbindungen wäre nicht vorhanden.

Über die Möglichkeit, wie Leben bei geeigneten Voraussetzungen spontan entstehen kann, haben zahlreiche Laboratoriumsversuche der jüngsten Zeit Aufschluß gegeben. Chemische Strukturen, die

wir als lebendig bezeichnen, müssen zwei wichtige Funktionen vollziehen können. Sie müssen einmal aus den Stoffen der Umgebung die für ihre Erhaltung wichtigen Bestandteile entnehmen können, sie müssen also die Fähigkeit besitzen, sich zu ernähren. Dann aber muß es ihnen möglich sein, artgleiche Strukturen aus dem sie umgebenden Material aufzubauen, d. h. sie müssen die Fähigkeit haben, sich fortzupflanzen. Wie diese Vorgänge sich bei den heute vorhandenen organischen Strukturen vollziehen, ist die Molekularbiologie zu erklären bemüht und hat sehr wesentliche Erkenntnisse schon erbracht.

Im Jahre 1951 hat C a l v i n ein aus Kohlensäure und Wasserdampf bestehendes Gasmisch der Einwirkung ultravioletter Strahlung ausgesetzt und gefunden, daß sich nach kurzer Zeit darin einfache organische Verbindungen wie Ameisensäure, Essigsäure und Bernsteinsäure gebildet hatten. S. L. M i l l e r hat 1952 nachgewiesen, daß sich in einem Gemisch von Ammoniak, Methan, Wasserstoff und Wasserdampf unter der Einwirkung elektrischer Entladungen binnen einer Woche ein Gemisch verschiedenster organischer Verbindungen gebildet hatte, unter denen mit Sicherheit auch vier der für die Proteinbildung wichtigen Aminosäuren, der Grundbausteine der organischen Strukturen, festgestellt wurden. Daneben hatte sich aber auch Kohlensäure und freier Stickstoff gebildet.

Aus Methan, Ammoniak und Wasserdampf bildeten sich nach den Versuchen K. Harada bei hoher Temperatur (900—1000°) sogar 14 der 20 Aminosäuren, aus denen sich alle lebendige Substanz aufbaut. Bemerkenswert ist, daß alle diese Ergebnisse nur bei Abwesenheit von Sauerstoff gelangen.

Aber auch in wäßrigen Lösungen konnten auf abiogene Art wichtige und sehr komplizierte organische Verbindungen aus einfachsten Grundelementen, wie Formaldehyd, Kaliumnitrat und Eisensalzen unter der Einwirkung des Sonnenlichtes gebildet werden. Hier konnte selbst in Gegenwart von Sauerstoff die Bildung von Aminosäuren beobachtet werden.

Alle diese Vorbedingungen für die Entstehung lebendiger Substanz waren aber auf der jungen Erde vor etwa 3 Milliarden Jahren durchaus gegeben. Die dünne Kruste wurde durch eine rege vulkanische Tätigkeit immer wieder aufgerissen und in der Umgebung dieser Ausbruchsstellen herrschten sehr hohe Temperaturen. Wurde doch in dieser Zeit ein Großteil des Materials, aus dem die Sialmassen der Kontinente aufgebaut sind, ausgeschieden. Im Urozean gab es gelöstes Methan und Ammoniak, in der Atmosphäre Kohlensäure und natürlich auch Wasserdampf. Diese Atmosphäre war überdies der Schauplatz einer ununterbrochenen, heftigen Gewittertätigkeit. Das Ge-

witter war sozusagen das Klima, also der durchschnittliche Wetterablauf der damaligen Zeit. Es fehlte daher nicht an elektrischen Entladungen. Die Atmosphäre enthielt damals auch keinen freien Sauerstoff. Es war somit die Oberfläche dieser vorzeitlichen Erde ein gewaltiges Laboratorium zur Erzeugung organischer Verbindungen. Hierbei spielte das Meer eine ganz besondere Rolle als Aufbewahrungsort der gebildeten organischen Verbindungen, in dem diese vor dem Angriff der entfesselten Naturgewalten geschützt waren. Tatsächlich bestätigen alle bisherigen Funde auf dem Gebiet der Paläontologie den thalassogenen Ursprung des Lebens.

Bei den modernen Laboratoriumsversuchen waren es nur kurze Zeiträume von einigen Tagen oder einer Woche, um die Bildung komplizierter organischer Verbindungen aus einfachen Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen zu vollziehen. Der Natur stand aber ein Zeitraum von rund zwei Milliarden Jahren zur Verfügung, um die ersten Grundformen organischen Lebens zu schaffen. Denn die ältesten Lebensspuren sind etwa eine Milliarde Jahre alt.

In welcher Weise sich das Leben im einzelnen aus der primitiven Vorstufe höherer organischer Verbindungen entwickelt hat, kann derzeit noch nicht angegeben werden. Sicher ist, daß auf der jungen Erde Aminosäuren gebildet werden konn-

ten; daß aus diesen Proteine gebildet werden können, das haben auch wieder Laboratoriumsversuche gezeigt. Aus diesen Bausteinen mußten dann Strukturen aufgebaut worden sein, die als erste Keime des Lebens anzusehen sind. Auch die Bildung solcher Strukturen ist schon im Laboratoriumsexperiment vielfach gelungen.

Als „lebendig“ im weitesten Sinn dieses Wortes können wir aber nur solche Strukturen bezeichnen, die durch Verarbeitung von Stoffen ihrer Umwelt (durch Stoffwechselprozesse) in der Lage sind, sich identisch oder mit kleinen Modifikationen zu vermehren. Die Bedingungen für die Entstehung solcher primitiv-lebendiger Strukturen war das damalige Weltmeer, das damals als eine für solche Bildungen überaus geeignete „Nährlösung“ angesehen werden darf.

Die Erhaltung von Lebensstrukturen erfordert einen dauernden Energieverbrauch im Stoffwechsel. Bei den meisten Formen des heutigen Lebens erfolgt diese Energieerzeugung durch Veratmung von Sauerstoff, doch gibt es auch heute noch echte Lebensformen, die ohne Atmung auskommen. Die ursprünglichen Formen des Lebens waren sicherlich anaerob, da ihnen kein Sauerstoff zu Verfügung stand. Einer der wichtigsten Schritte, durch den sich das Leben den Erball eroberte, war die Ausbildung der Photosynthese, durch die es der einen Klasse der Lebewesen, den Pflanzen, mög-

lich wurde, aus der Kohlensäure der dritten Erdatmosphäre den Sauerstoff abzuspalten.

Aber auch eine andere Lebensform, die Tierwelt, entstand damals, die nicht Sauerstoff erzeugt, sondern im Lebensprozeß Sauerstoff verbraucht. Die Photosynthese ist an das Vorhandensein von Chlorophyll gebunden, der tierische Atmungsvorgang an das Vorhandensein von Hämoglobin. Beide Körper sind in ihrem chemischen Aufbau sehr ähnlich, nur sitzt an zentraler Stelle beim Chlorophyll ein Magnesium- beim Hämoglobin ein Eisenatom. Vorstufen für das Chlorophyll und natürlich auch für das sehr verwandte Hämoglobin sind Porphyrine. Bei Laboratoriumsversuchen konnten ebenso die Entstehung von Porphyrinen beobachtet werden, wie das Auftreten von Aminosäuren. Auch Porphyrine mußten daher im Urozean nach Verlauf einer nicht allzu langen Zeit angereichert sein. Es war nur eine Frage der Zeit — und davon stand der Natur genug zur Verfügung — um aus den vorhandenen Vorstufen auch den Chemismus der Photosynthese zu entwickeln.

Mit der Entwicklung der Photosynthese war eine entscheidende Änderung in der Beschaffenheit der die Erde einhüllenden Atmosphäre erfolgt. Sie wurde zur Sauerstoffatmosphäre und damit war die ganze Erdoberfläche zum Lebensraum geworden. Nicht nur das Meer, auch das Festland war dadurch Lebensstätte geworden. Pflanzen und

Tiere konnten sich auf ihm ansiedeln. Soweit es Kohlensäure und Wasser gibt, konnten Pflanzen ihre photosynthetische Tätigkeit entfalten und das Vorhandensein von Sauerstoff gestattete die Entwicklung einer artenreichen, immer höher organisierten Tierwelt. Erst das Vorhandensein von Sauerstoff ermöglichte die Intensivierung der Lebensvorgänge, die wir aus der Betrachtung der Erdgeschichte ableiten können.

Zwei Milliarden Jahre mußten vergehen, bis die ersten komplizierteren Organismen, die wahrscheinlich fast alle noch Einzeller waren, entstanden. Primitive Algenformen mögen auch schon vorhanden gewesen sein. Die Explosion des Lebens erfolgte erst im Kambrium, als die Tiere die Ausbildung fester Schutzskelette gelernt hatten. Erst dadurch war die Entwicklung komplizierterer Lebensformen möglich. Im Silur erscheinen die ersten Wirbeltiere, im Devon, also etwa vor 320 Millionen Jahren wird das Festland durch Pflanze und Tier besiedelt.

Aber erst das Karbon war der Abschnitt in der Geschichte der Erde, in dem die Kohlensäure-Atmosphäre endgültig in die heutige Sauerstoff-Atmosphäre umgewandelt wurde. Damit würde der gewaltige Aufschwung in der Entwicklung der Pflanzenwelt und auch der sogenannte Florensprung, also eine scheinbar diskontinuierliche Entwicklung der Pflanzenwelt, erklärbar. Mit der Voll-

entwicklung der Sauerstoff-Atmosphäre war nunmehr auch der Entwicklung des tierischen Lebens, vor allem auf dem festen Land, und der Eroberung der Luft freie Bahn gegeben. Wir finden hier die ersten fliegenden Rieseninsekten. Das Fliegen setzt eine große Energieentfaltung im Organismus voraus, die nur aus Oxydationsprozessen geleistet werden kann.

Vom Karbon angefangen finden wir auf der Erde eine explosive Entfaltung des Lebens und vor allem eine deutliche Akzeleration in der Entwicklung neuer, stets höher organisierter Lebensformen.

Nach der hier kurz skizzierten Entwicklung würde der Übergang zur Sauerstoff-Atmosphäre also vor etwa einer Milliarde Jahre begonnen haben und vor etwa 250 Millionen Jahren beendet gewesen sein.

Das Leben selbst, das eine Erscheinungsform der Materie ist, hat sich in diesem Zeitraum den ihm gemäßen Lebensraum geschaffen. Die vierte Atmosphäre der Erde ist biogenen Ursprungs.

In unseren Laboratorien konnten durch verhältnismäßig einfache Versuche wichtige Bausteine des Lebens synthetisch erzeugt und eine Reihe von Lebensvorgängen erklärt werden. Auch die Photosynthese konnte durch entsprechende Versuche geklärt werden. Aus sechs Molekülen Kohlensäure und sechs Wassermolekülen entsteht dabei ein Zuckermolekül (Glukose) und sechs Sauerstoff-

moleküle, wobei der abgespaltene Sauerstoff teilweise den Wasserstoffmolekülen entstammt. Die erforderliche Energie wird unmittelbar der Sonnenstrahlung entnommen. Hierbei wird im Gegensatz zur direkten Kohlensäurebildung durch Photolyse, die für die Entstehung der dritten Erdatmosphäre herangezogen wurde, nichtmehr die an der Erdoberfläche wenig energiereiche Ultraviolettstrahlung verwendet, sondern die Strahlung aus dem sichtbaren Teil des Spektrums.

Innerhalb des Sonnensystems ist die Erde der einzige Planet, der als Lebensträger bezeichnet werden kann. Wir dürfen annehmen, daß Lebensträger auch Sauerstoffträger sein müssen. Auf den äußeren Planeten reicht die Sonnenstrahlung nicht aus, eine Kohlensäure-Atmosphäre als Vorstufe zur Sauerstoff-Atmosphäre zu erzeugen. Bei den inneren Planeten hat Mars wahrscheinlich vorübergehend eine Sauerstoff-Atmosphäre besessen. Doch war wegen seiner geringeren Masse diese Atmosphäre zu dünn, die Entwicklung höherer Lebensformen zu ermöglichen und der größte Teil des Sauerstoffs wurde zur Erzeugung von Oxyden in der Kruste des Planeten verbraucht. Die rote Färbung seiner Oberfläche ist vermutlich auf die Bildung von Eisenoxyden zurückzuführen.

Der Venus stand für die Entwicklung des Lebens größenordnungsmäßig die gleiche Zeit zur Verfügung wie der Erde. Spektroskopische Unter-

suchungen zeigen, daß in der Venusatmosphäre Kohlensäure und Kohlenmonoxyd, sowie Wasserdampf enthalten sind. Eine Sauerstoffatmosphäre ist aber mit Sicherheit auszuschließen. Wir können daher auch nicht annehmen, daß sich auf der Venusoberfläche höher entwickelte Organismen befinden. Der Grund ist wohl in der zu starken Sonnenstrahlung zu suchen. Die Schätzungen für die Oberflächentemperatur der Venus schwanken zwischen 80° und 300° . Bei solchen Temperaturen können aber komplizierte organische Verbindungen nicht bestehen.

Nach dem derzeitigen Stand unseres Wissens ist die Erde der einzige Lebensträger innerhalb des Sonnensystems. Gerade im Bereich unserer Erde waren die astrophysikalischen Voraussetzungen für die Entwicklung der Materie zu Lebensformen gegeben, aber das Leben selbst mußte in einer langen Entwicklung den ihm gemäßen Lebensraum erst schaffen, nämlich die Sauerstoff-Atmosphäre, in der es zu seinen höheren Formen und bis zur Entwicklung des Bewußtseins fortschreiten konnte.