

## Was ist Leben und wie ist es entstanden? Molekularbiologische, kosmochemische und geologische Aspekte der Abiogenese

EWALD HEJL\*  
20 Abbildungen

*Abiogenese*  
*Astrobiologie*  
*Homochiralität*  
*Enantiomorphie*  
*Wissenschaftsgeschichte*  
*Exoplaneten*

### Inhalt

Zusammenfassung .....	423
Abstract .....	424
Vorwort .....	424
Einleitung .....	424
Was ist Leben? Thesen, Definitionen und Suchstrategien .....	427
Wesentliche Eigenschaften lebender Organismen .....	429
Das Homochiralitätsproblem .....	432
Hypothesen zum Ursprung des Lebens (Auswahl) .....	441
Der Beitrag der Geowissenschaften .....	444
Schlussbetrachtung .....	445
Dank .....	446
Literatur .....	446

### Zusammenfassung

Das irdische Leben entstand im Zeitraum zwischen etwa 4 und 3,5 Milliarden Jahren vor der Gegenwart. Als Abiogenese oder Urzeugung bezeichnet man die von anorganischen Stoffen ausgehende chemische Evolution, die in diesem Zeitraum zu ersten fortpflanzungsfähigen Organismen geführt haben muss. Das Forschungsgebiet der Astrobiologie umfasst neben der irdischen Abiogenese auch die Suche nach außerirdischem Leben auf bewohnbaren Planeten und Monden in und außerhalb unseres Sonnensystems.

Leben ist durch Stoffwechsel (Metabolismus), Fortpflanzung (Selbstreproduktion) und eine evolutive Variabilität gekennzeichnet. Auf der molekularen Ebene geht es dabei um die endotherme Synthese von Proteinen und anderen Biomolekülen sowie um die Existenz einer zur komplementären Selbstreplikation befähigten Gruppe von organischen Polymeren, in denen der Bauplan für die Proteine einschließlich aller Enzyme gespeichert ist. Bei den uns bekannten Lebensformen handelt es sich dabei um den genetischen Code der Nukleinsäuren – insbesondere um die DNA (Desoxyribonukleinsäure), die gemeinsam mit mRNA (Messenger-RNA) und tRNA (Transfer-RNA) den genetischen Apparat der Eukaryoten bildet.

Unter den Materialeigenschaften uns bekannter Lebensformen nimmt die Homochiralität von Aminosäuren und Zuckern eine herausragende Stellung ein. Lebende Organismen enthalten nahezu ausschließlich L-Aminosäuren (linkshändig) und D-Zucker (rechtshändig). Der Ursprung dieser als ‚biomolekulare Homochiralität‘ bezeichneten Eigenschaft aller irdischen Lebensformen ist unbekannt. Die große Mehrheit der Abiogenese-Forscher nimmt an, dass diese Eigenschaft schon sehr früh auf anorganischem Wege, das heißt in einer prä-RNA-Welt, entstanden ist. Auch interstellare Prozesse, beispielsweise bei der Kondensation von Kometenmaterie, werden dafür in Erwägung gezogen.

Je nachdem in welcher Reihenfolge Homochiralität, selbstreplizierende Polymere und Stoffwechsel entstanden sind, ergeben sich verschiedene Szenarien der Abiogenese. In diesem Übersichtsartikel werden mehrere bekannte Modelle zur Lebensentstehung vorgestellt und im wissenschaftshistorischen Kontext diskutiert. Die Entdeckung von über 4.000 Exoplaneten während der letzten 25 Jahre hat dieser Diskussion neue Impulse gegeben.

\* EWALD HEJL: Fachbereich für Geographie und Geologie der Universität Salzburg, Hellbrunnerstraße 34/III, 5020 Salzburg. ewald.hejl@sbg.ac.at

# What is life and how did it begin? Biochemical, cosmochemical and geological aspects of abiogenesis

## Abstract

Terrestrial life has come into being between 4 and 3.5 billion years ago. Abiogenesis is the chemical evolution from inorganic molecular species to first reproductive living organisms. Besides abiogenesis, the scientific branch of astrobiology also includes the search for extraterrestrial life on inhabitable planets and moons within and outside of our solar system.

Life is characterized by metabolism, reproduction (self-replication) and evolutive variability. On the molecular scale, endothermic synthesis of proteins and other biomolecules as well as the existence of organic polymers with the ability for complementary self-replication are essential requirements. Such self-replicating polymers contain the blueprint for the synthesis of proteins and all kind of enzymes. The genetic apparatus of terrestrial life – especially of eukaryotic organisms – comprises DNA (deoxyribonucleic acid), mRNA (messenger RNA) and tRNA (transfer RNA).

Homochirality of amino acids and sugar is a most prominent feature among the material properties of terrestrial life. Living organisms contain almost exclusively L amino acids (left-handed) and D sugars (right-handed). The origin of this biomolecular homochirality of terrestrial life is still unknown. The vast majority of researchers dealing with abiogenesis assumes that homochirality has been formed very early by inorganic processes or has already emerged in a pre-RNA world. Interstellar processes, as for example during the condensation of cometary matter, have been considered too.

Scenarios for abiogenesis suggest different successions for the appearance of homochirality, self-replicating polymers and metabolism. In this review article, some prominent and already published hypotheses for abiogenesis are briefly explained and discussed in their historical context. The discovery of more than 4,000 exoplanets during the last 25 years has brought an additional stimulus to the abiogenesis question.

## Vorwort

Seit dem Beginn meiner Forschungen zum Ursprung der Homochiralität von Biomolekülen wurde ich von Fachkollegen aus dem Gebiet der Geowissenschaften des Öfteren gefragt, was darunter zu verstehen sei und welchen Stellenwert dieser molekularbiologische Aspekt im Gesamtkontext der chemischen Evolution (Abiogenese) bis zur Entstehung erster Lebensformen denn habe? Mit anderen Worten: Wie ist das Leben auf der Erde entstanden und welche diesbezüglichen Forschungsansätze gibt es? Im Verlauf der sich aus solchen Fragen ergebenden Gespräche stellte ich fest, dass Geologen mit diesem Problemkreis nur wenig vertraut sind, und man bei der Beantwortung oft sehr weit ausholen muss, um zuerst ein allgemeines Verständnis zu schaffen, um dann in weiterer Folge auf einen speziellen Aspekt fokussieren zu können. Der Versuch, Außenstehenden auf allgemein verständliche Weise das Problem der Lebensentstehung aus anorganischen Ausgangsstoffen zu verdeutlichen, scheitert oft an mangelnden Vorkenntnissen. Im Laufe der Zeit reifte in mir der Entschluss, den gesamten Problemkreis der Abiogenese in einem vorwiegend für Geowissenschaftler geschriebenen Übersichtsartikel zusammenzufassen.

Das Problem der chemischen Evolution bis zur Lebensentstehung umfasst vielfältige Aspekte der Astrophysik, Kosmochemie, Thermodynamik, Molekularbiologie und Genetik sowie der Geowissenschaften. Es ist unmöglich, auf allen diesen Gebieten gleichermaßen sachkundig zu sein, die jeweils neueste wissenschaftliche Originalliteratur zu kennen und sie kritisch zu würdigen. Im Falle des Homochiralitätsproblems habe ich mich bemüht, so weit wie möglich auf die mir bekannte Originalliteratur zurückzugreifen. Bei anderen Aspekten, etwa zum Stoffwechsel oder zur Genetik, musste ich zwangsläufig auch einschlägige Sekundärliteratur (z.B. Lehrbücher) zur Rate ziehen, da ein Studium der Originalliteratur hier ins Uferlose geführt hätte. Dieser Übersichtsartikel erhebt daher keinen Anspruch auf wissenschaftliche Originalität. Es handelt sich nur um den Versuch, einer geowissenschaftlich gebildeten Leserschaft die historische Entwicklung und den gegenwärtigen Stand der Forschungen zur Abiogenese möglichst einfach zu erklären.

## Einleitung

Wer die Frage nach dem Ursprung des Lebens stellt, sollte sich zuerst überlegen, welche Eigenschaften ein materielles System haben sollte, um im weitesten Sinn des Wortes als lebendig gelten zu können. Leben zu definieren und in eindeutiger Weise von anorganischen, also nicht-lebendigen Systemen zu unterscheiden, erweist sich jedoch als schwieriges Unterfangen. Über manche Kriterien herrscht in der wissenschaftlichen Fachwelt Einigkeit, über andere jedoch nicht. Vor allem aber lässt sich zeigen, dass es Systeme gibt, die nur manche, aber nicht alle der geforderten Eigenschaften besitzen. Dadurch ergibt sich der Eindruck eines eher graduellen Übergangs von der Welt des rein Anorganischen zur Welt der fortpflanzungsfähigen, in Individuen und Arten gegliederten Organismen, wie sie uns als Pflanzen, Tiere, Pilze oder Bakterien bekannt sind. Als Abiogenese oder Urzeugung bezeichnet man die Entstehung von Lebewesen aus unbelebten Ausgangsstoffen, das heißt die zu ersten fortpflanzungsfähigen Organismen führende chemische Evolution.

Wenn eine praktikable Definition des Lebendigen gefunden ist, kann bezüglich der Lebensentstehung nach dem Wie, dem Wann und dem Wo gefragt werden. Über keinen dieser Aspekte herrscht in der Fachwelt Einigkeit, aber wenigstens der Zeitraum, in dem sich der Übergang von rein anorganischen Prozessen zu zweifellos lebendigen Organismen vollzogen hat, lässt sich grob einengen.

Nachdem sich die Erde vor etwa 4,56 Milliarden Jahren durch Akkretion von Staub und Planetesimalen aus der protoplanetaren Scheibe gebildet hatte, entwickelten sich erste granitische Schmelzen und eine geringmächtige kontinentale Kruste ab ca. 4,4 Milliarden Jahren. Die Gesteine dieser ersten granitischen Kruste sind zwar nicht erhalten geblieben, jedoch ist ihre Existenz durch detritische Zircone in jüngeren Gneisen des Yilgarn-Kratons (Westaustralien) zweifelsfrei belegt. Der älteste jemals datierte Zirkon hat ein U-Pb-Alter von 4.404 +/- 8 Millionen Jahren (WILDE et al., 2001). Anhand seines Sauerstoff-Isotopenverhältnisses ( $d^{18}O$  zwischen 7,4 und 5,0 ‰) und seiner chemischen Zonierung schließen die Autoren dieser Studie auf die Kristallisation aus einem granitischen Magma, das zumindest teilweise aus oberflächlich abgelagerten Vulkan-

ten oder Sedimentgesteinen (engl. *supracrustal rocks*), die mit einer flüssigen Hydrosphäre in Kontakt standen, erschmolzen wurde. Daraus kann indirekt auf die Existenz eines frühen Ozeans geschlossen werden. Da die Erde aber noch bis vor etwa 4 Milliarden Jahren einem intensiven Meteoritenbombardement ausgesetzt war (KOEBERL, 2006) und die dabei freigesetzte Energie vermutlich mehrmals zur weitgehenden oder vollständigen Verdampfung etwaiger Urozeane geführt hat, kann eine kontinuierliche Entwicklung früher Vorformen des Lebens für diesen Zeitraum mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Die ältesten Spuren von Leben sind 3,5 bis 3,7 Milliarden Jahre alt. Es handelt sich dabei um Stromatolithen, zelluläre Fossilien und um so genannte ‚geochemische Fingerabdrücke‘ des Lebens, insbesondere um das  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnis in Grafit, anhand dessen auf die ehemalige Existenz photosynthetischer Organismen geschlossen werden kann. Zelluläre Strukturen mutmaßlicher Cyanobakterien in gebänderten Hornsteinen des Pilbara-Kratons in Westaustralien konnten mittels U-Pb-Zirkonaltern von begleitenden Vulkaniten auf  $3,458 \times 10^9$  Jahre datiert werden (SCHOPF, 1993). Bis zu 3,5 Milliarden Jahre alte Spuren von frühem Leben wurden auch in Sedimentgesteinen des Barberton-Grünsteingürtels in Südafrika nachgewiesen (WALSH & LOWE, 1985; BLAKE et al., 2010). Noch etwa 300 Millionen Jahre ältere biologische Aktivität wurde für die Metasedimente der Isua-Gruppe Westgrönlands anhand des niedrigen  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses in Grafit postuliert (SCHIDLOWSKI, 1988; MOJZSIS et al., 1996). Dieser Befund wurde jedoch später revidiert (LEPLAND et al., 2002), da der Grafit und der ihn umhüllende Apatit offenbar nicht sedimentären Ursprungs sind und das Kohlenstoffisotopenverhältnis auch durch anorganische Prozesse erklärt werden kann.

Die bisherigen Befunde zeigen, dass etwaige Vorformen des Lebens nicht wesentlich älter als 4 Milliarden Jahre sein können, photosynthetisch aktives Leben (vermutlich Cyanobakterien) aber vor 3,5 Milliarden Jahren bereits vorhanden war. Das ergibt eine Zeitspanne von rund 500 Millionen Jahren, in der sich das Leben aus einfachen molekularen Reaktionen bis zum verhältnismäßig komplexen Prozess der Photosynthese entwickelt haben kann. Dieser Zeitraum ist fast gleich lang wie das gesamte Phanerozoikum (Abb. 1).

Die Frage, wie das Leben entstanden ist und in welcher Reihenfolge die dazu führenden Prozesse abgelaufen sind, ist viel schwerer zu beantworten. Hier scheiden sich die Geister. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde vor allem darüber spekuliert, ob zuerst Proteine oder Nucleinsäuren (RNA und DNA) abiotisch, also gewissermaßen ‚von selbst‘ entstanden sind. Das Problem dabei ist, dass die Polymerisation von Aminosäuren zu Polypeptiden und Proteinen eine unter Wasserabspaltung ablaufende endotherme Reaktion ist. Sie läuft nicht spontan ab, sondern benötigt eine chemische Energiequelle, Katalysatoren (Enzyme) und eine Bauanleitung, die in lebenden Zellen im genetischen Code der Nucleinsäuren gespeichert ist. Andererseits werden Enzyme, das heißt katalytisch wirksame Proteine, auch für den Aufbau von Nucleinsäuren benötigt. In lebenden Zellen wird die Synthese von Proteinen und Nucleinsäuren erst durch die jeweils andere Art von Makromolekülen ermöglicht. Proteine und Nucleinsäuren bedingen einander gegenseitig.

Diese Frage nach dem ‚Was kam zuerst?‘ ist kein klassisches Henne-oder-Ei-Problem, das bekanntlich ein Scheinproblem ist. Die jeweils sehr komplexen Proteine und Nucleinsäuren waren aber nicht ‚schon immer‘ vorhanden. Sie können auch nicht spontan und gleichzeitig entstanden sein. Eine der beiden Molekülarten muss sich zuerst entwickelt und den Weg für die andere bereitet haben.

15 Jahre nachdem WATSON & CRICK (1953) die Struktur der DNA-Doppelhelix entdeckt und damit den Schlüssel zur Transkription des genetischen Codes geliefert hatten, spekulierte ORGEL (1968) über das Dilemma einer möglichen Evolution des genetischen Apparats. Im Falle eines frühen Lebens ohne Nucleinsäuren müsse die Bildung kurzer Ketten von Polypeptiden aus einer Art Ursuppe (engl. *primitive soup*) angenommen werden. Diese müssten die Fähigkeit zur komplementären Replikation besessen haben, wobei die positiv oder negativ geladenen, so genannten Reste der Aminosäuren mit jeweils komplementär geladenen Resten eines zweiten Polypeptidstranges eine leicht lösliche Verbindung eingehen. Außerdem müsse die Synthese der komplementären Stränge durch zufällig entstandene Enzyme katalysiert werden. ORGEL (1968) hielt einen solchen Prozess zwar für möglich, aber für unwahrscheinlich. Stattdessen bevorzugte er ein selbstreplizierendes System aus Nucleinsäuren ohne Beteiligung von Proteinen und somit ohne die katalytische Funktion von Enzymen. Kurze Ketten von Nucleotiden (Polynucleotide) sollten dabei als Vorlage (engl. *template*) für die Anlagerung passender Mononucleotide an den Basen des originären Nucleotidstranges dienen und auch ohne Enzyme zur Polymerisierung und Replikation fähig sein. Die geeignete Orientierung der Reaktionspartner könnte eventuell durch Anlagerung an Mineraloberflächen erleichtert worden sein.

Anfang der 1980er Jahre zeigten mehrere Studien, dass manche RNA-Moleküle eine enzymatische Funktion aufweisen und somit die Synthese anderer RNA-Moleküle katalysieren können. In Anlehnung an die aus polymerisierten Aminosäuren aufgebauten Enzyme wurden diese neu entdeckten Katalysatoren aus RNA (Ribonucleinsäure) Ribozyme genannt. Anhand dieser Befunde formulierte GILBERT (1986) seine Hypothese der RNA-Welt. Demnach könnte in einem ersten Stadium der Evolution des Lebens die genetische Informationsübertragung durch RNA-Replikation in einer Nucleotid-Suppe erfolgt sein. Grundlage dieser Replikation ist die bekannte Watson-Crick-Basenpaarung. In dieser RNA-Welt waren zunächst noch keine Proteinkatalysatoren wirksam. In weiterer Folge begannen die RNA-Moleküle, Proteine zu synthetisieren. Zuletzt bildete sich die DNA (Desoxyribonucleinsäure), die in modernen Zellen das eigentliche Speichermedium des genetischen Codes ist. Die RNA-Welt-Hypothese fand bald viele Anhänger und ist heute das vorherrschende Paradigma der Forschungen zum Ursprung des Lebens. Es gibt jedoch auch Kritiker der RNA-Welt und mehrere alternative Modelle zur Abiogenese.

Die Frage nach dem Wo ist nur scheinbar leicht zu beantworten. Da ein biologischer Stoffwechsel und die Replikation von Nucleinsäuren nur unter Beteiligung von flüssigem Wasser möglich sind, lautet ein verbreitetes Vorurteil, das Leben müsse im Meer, also in einem Urozean entstanden sein. In der Weite eines solchen Ozeans wären zufällig entstandene Biomoleküle, wie beispielsweise Aminosäu-

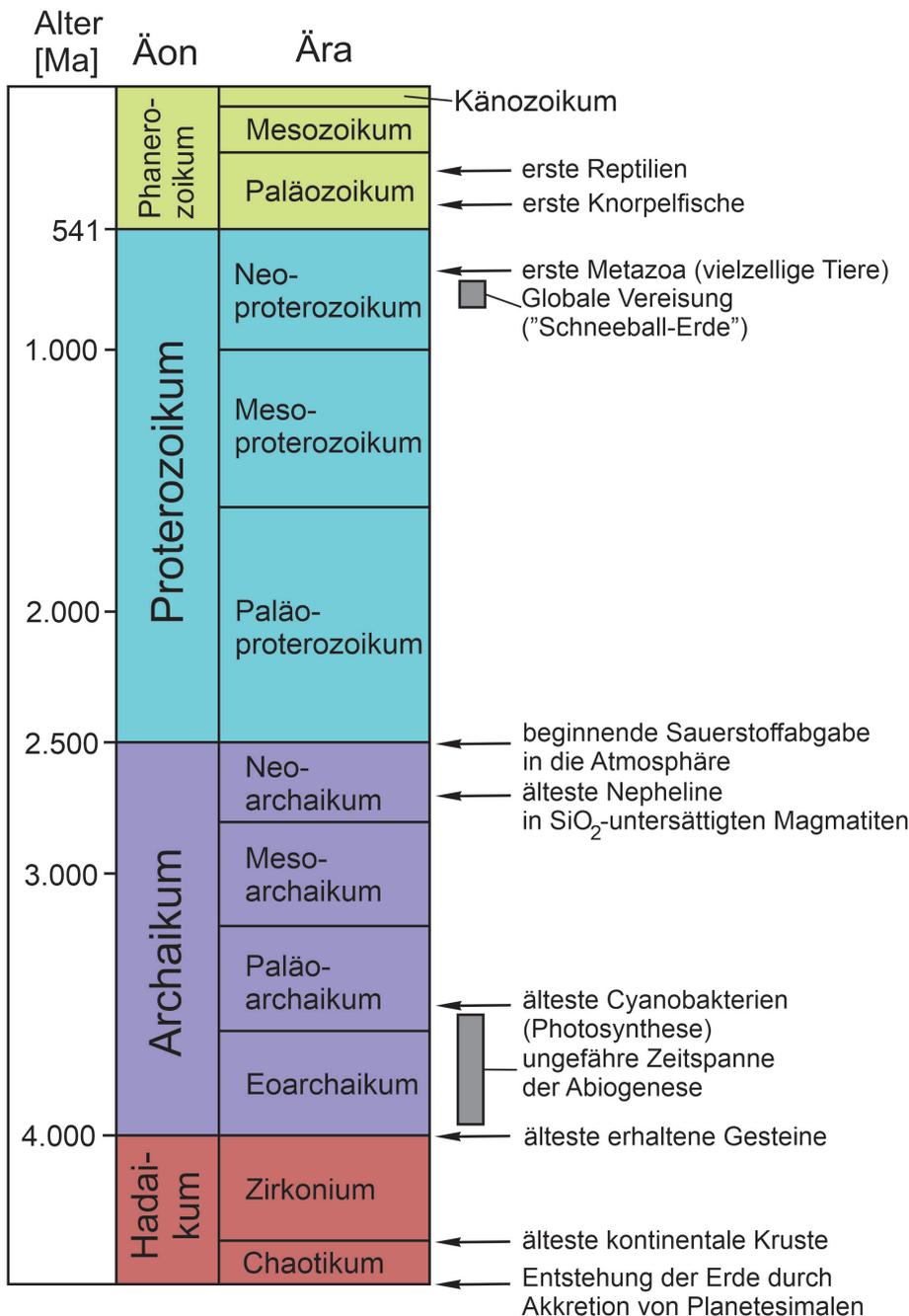


Abb. 1. Gliederung der Erdgeschichte in Äonen (Äonotheme) und Ären (Äratheme) mit maßstäblicher Zeitskala und ausgewählten Zeitmarken.

ren, aber nur in sehr verdünnter Form vorgelegen, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit ihrer Beteiligung an chemischen Reaktionen deutlich verringert hätte. Ein durch Strömungen und Wellengang gut durchmischter Ozean ist auch nicht in der Lage, kleinräumige chemische Gradienten, wie sie für alle Formen des Lebens charakteristisch sind, aufzubauen. Hinzu kommt, dass keine Energiequelle für die Polymerisierung von Aminosäuren oder Nucleotiden zur Verfügung steht. Egal wie lange man mit einem sterilen Kochlöffel in einer stark verdünnten Ursuppe umrührt, die spontane Synthese von Proteinen oder Nucleinsäure ist auf diese Weise nicht möglich.

Zur Erhöhung der lokalen Konzentration einfacher Biomoleküle unter präbiotischen Bedingungen wurden verschiedene Szenarien diskutiert und zum Teil auch experimentell untersucht. So wurde zum Beispiel vorgeschlagen, die Polymerisierung organischer Moleküle könne durch orientier-

te Adsorption an Mineraloberflächen ermöglicht worden sein (HAZEN, 2006, und darin zitierte Literatur). Mittels Raster-Tunnelmikroskopie konnte nachgewiesen werden, dass sich die Nucleinsäure-Basen Adenin und Guanin in geordneten zweidimensionalen Strukturen an den Basisflächen von Molybdänlanz (MoS<sub>2</sub>) und Grafit anlagern (SOWERBY et al., 1998). Es konnte auch gezeigt werden, dass sich Aminosäuren durch Anlagerung an Tonminerale lokal anreichern und polymerisieren. Dabei entstehen kurze Peptidketten, das heißt Vorformen von Proteinen (LAHAV et al., 1978). Ein solcher Prozess könnte auch im frühen Archaikum stattgefunden haben, wenn eine wässrige Salzlösung mit Aminosäuren in kleinen Teichen oder Gezeitentümpeln unter Beteiligung von Tonmineralen verdunstet ist. Bei mehrfacher Wiederholung dieses Prozesses wäre eine kleinräumige Anreicherung von Peptiden zu erwarten. Im Labor gelang es sogar, RNA-Nucleotide in wässriger Lö-

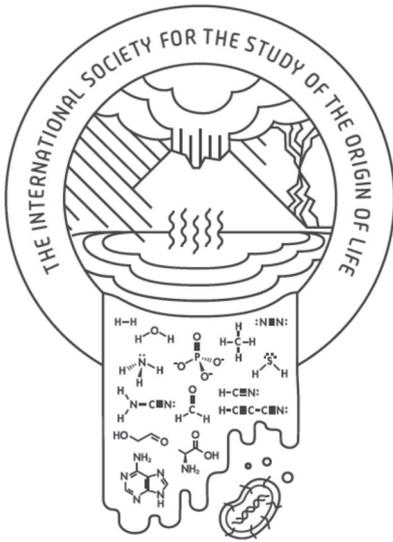


Abb. 2. Emblem der ISSOL (International Society for the Study of the Origin of Life) mit schematischer Darstellung eines hypothetischen Szenarios der Abiogenese.

sung unter Beteiligung von Tonmineralen zu Oligomeren mit einer Länge von bis zu 50 Nukleotiden zusammenzufügen (FERRIS et al., 1996). Das präbiotische Szenario eines ‚kleinen warmen Teiches‘ gewinnt durch diese Experimente an Wahrscheinlichkeit (Abb. 2).

Als Alternative zum ‚kleinen warmen Teich‘ wurden hydrothermale Systeme, insbesondere untermeerische heiße Quellen (HOLM, 1992), sowie von hydrothermalen Lösungen durchströmte Porenräume in marinen Sedimenten (WESTALL et al., 2018) als Geburtsstätten des Lebens zur Diskussion gestellt. Bei diesen möglichen Orten der Lebensentstehung ist immer zu bedenken, dass es sich dabei um geologisch kurzlebige Objekte handelt. Gezeitentümpel und Teiche verlanden durch Sedimenteintrag im Zeitraum von wenigen Jahren bis Jahrhunderten. Größere, von hydrothermalen Wässern durchströmte Spalten und Schlotte – beispielsweise in Vulkangebieten oder an mittelozeanischen Rücken – sind eventuell ein paar tausend Jahre aktiv, aber sicher nicht lange genug, um eine vollständige Evolution von einfachen organischen Molekülen bis zu Organismen mit voll funktionsfähigem genetischem Apparat zu ermöglichen. Stattdessen ist anzunehmen, dass die frühe chemische Evolution an verschiedenen Orten stattfand, wobei die bereits erreichten Syntheseprodukte hinreichend robust waren, um lokale Umweltkrisen zu überstehen und sich an anderer Stelle weiterzuentwickeln.

## Was ist Leben? Thesen, Definitionen und Suchstrategien

Ganz offensichtlich befinden sich lebende Organismen nicht im thermodynamischen Gleichgewicht. Diese Aussage gilt sowohl für den Organismus als Ganzes und seine Beziehung zur Umwelt, als auch für seine lebenden Subsysteme, wie zum Beispiel Organe, Zellen und Organellen im Zytoplasma. Eine Ausnahme bilden allenfalls das Skelettmaterial und andere gewissermaßen tote Ausscheidungen. Der Organismus und seine lebenden Teile bilden ein offenes System, das sowohl chemische Stoffe als auch Energie mit seiner Umgebung austauscht. Mit anderen Worten: Leben ist durch Stoffwechsel (Metabolismus) gekennzeichnet.

MAST et al. (2013) sprechen daher von einem „lebendigen Nichtgleichgewicht“. Demnach könne Leben nur fern vom Gleichgewicht existieren und müsse in der Lage sein, sich durch Stoffwechsel aktiv und dauerhaft vom Gleichgewicht entfernt zu halten. So werden beispielsweise Stoffe mit niedriger Entropie als Nahrung aufgenommen und Stoffwechselprodukte mit höherer Entropie ausgeschieden. Organische Verbindungen mit niedriger Entropie (z.B. Glucose) können auch durch Photosynthese gebildet werden. Wenn diese lokale Entropie-Erniedrigung für einen längeren Zeitraum unterbleibt, nähert sich das System dem Gleichgewicht, werden diverse chemische Gradienten abgebaut und der Organismus stirbt.

Außerdem sollte ein lebendes System in der Lage sein, Information zu speichern, zu vervielfältigen und auf nachfolgende Generationen zu übertragen. Es sollte also die Fähigkeit besitzen, komplette Baupläne zur Synthese organischer Makromoleküle und zur Entwicklung der wesentlichen Merkmale eines Organismus zu tradieren. Diese Selbstreproduktion (Fortpflanzung) wird bei den uns bekannten Lebensformen durch den genetischen Apparat ermöglicht (Abb. 3). Er umfasst das replikationsfähige Speichermedium DNA, das sich bei den Eukaryoten in den Chromosomen des Zellkerns befindet, sowie die Synthese von Messenger-RNA (mRNA) anhand der DNA-Vorlage und zuletzt die Übersetzung (engl. *translation*) der Ba-

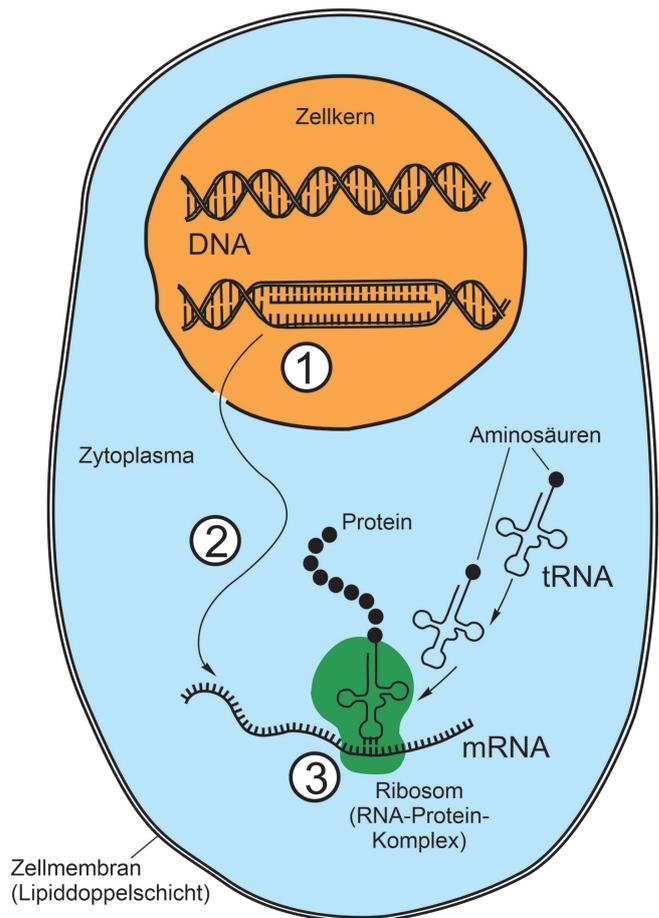


Abb. 3. Schematische Darstellung des genetischen Apparats einer Eukaryotenzelle. 1 = komplementäre Transkription eines Abschnitts der DNA des Zellkerns in Messenger-RNA (mRNA); 2 = Transport der mRNA aus dem Zellkern zu den Ribosomen des Zytoplasmas; 3 = Proteinsynthese in den Ribosomen mittels Transfer-RNA (tRNA).

sensequenz der mRNA mittels Transfer-RNA (tRNA) in eine Abfolge von polymerisierten Aminosäuren. Dieser letzte Schritt der Proteinsynthese findet in den Ribosomen des Zytoplasmas statt. Jeweils drei aufeinanderfolgende Basen der RNA (so genannte Codons) kodieren eine Aminosäure. Da es vier verschiedene Basen der RNA gibt (Adenin, Guanin, Cytosin und Uracil), gibt es 64 (= 4<sup>3</sup>) mögliche Basentriplets. Demgegenüber stehen nur 20 proteinogene Aminosäuren. Das System ist zwar eindeutig, aber redundant. Ein bestimmtes Triplet kodiert nur eine ganz bestimmte Aminosäure, aber jeweils mehrere Triplets können die gleiche Aminosäure kodieren. Alle genannten Teilprozesse (Replikation der DNA, Transkription in mRNA und Übersetzung mittels tRNA) werden durch spezielle Enzyme katalysiert.

Es ist beinahe selbstverständlich, dass sich ein so komplexes System wie der genetische Apparat nur in mehreren Schritten entwickelt haben kann. Demnach müsste es in der Frühzeit der Lebensentstehung viel einfachere Möglichkeiten der Selbstreplikation von Biomolekülen gegeben haben. Auf jeden Fall ist die Eindeutigkeit und Universalität des genetischen Codes ein sehr starkes Argument für die monophyletische Entstehung aller heute bekannten Lebensformen. Sollte es jemals ein konkurrierendes System der Informationsvererbung gegeben haben, müsste es schon sehr früh ausgestorben sein.

Außer einem Stoffwechsel und der Fähigkeit zur Fortpflanzung sollten lebende Systeme auch eine gewisse Variabilität aufweisen, da bei absolut unveränderlicher Weitergabe von Information keine evolutive Anpassung an veränderte Umweltbedingungen möglich wäre.

Leben im weitesten Sinn des Wortes muss daher folgende unabdingbare Kriterien erfüllen (siehe RAUCHFUß, 2005):

1. Stoffwechsel (Metabolismus);
2. Selbstreproduktion, d.h. selbständige Fortpflanzung und Weitergabe von Information;
3. Mutation, d.h. eine gewisse Variabilität als Voraussetzung für Evolution.

Manche Systeme erfüllen nur eine dieser drei Bedingungen und können daher nicht als lebendig gelten. Das oft genannte Beispiel einer Kerzenflamme erfüllt zwar die Bedingung des Stoffwechsels, kann Information aber weder speichern noch weitergeben. Eine brennende Kerze verbrennt Paraffin oder Bienenwachs unter Aufnahme von Luftsauerstoff zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Die Flamme bildet ein offenes System, das weder materiell noch energetisch abgeschlossen ist. Die über den Docht aufgenommenen Wachsmoleküle und deren Reaktionsprodukte verbringen nur Bruchteile einer Sekunde in der Flamme. Bei entsprechendem Angebot an leicht entzündlichen Stoffen kann sich eine Flamme sehr schnell ausbreiten und gewissermaßen vermehren. Diese Art der Vermehrung hat jedoch nichts mit biologischer Fortpflanzung zu tun, da keine Information weitergegeben wird.

Andererseits können Viren zwar Information speichern, sie haben aber keinen eigenen Stoffwechsel. Zur Vermehrung der in ihnen enthaltenen Nukleinsäuren (sowohl DNA als auch RNA) müssen Viren auf den Stoffwechsel einer Wirtszelle zurückgreifen. Man kann daher sagen, dass die viralen Nukleinsäuren zwar zur Replikation, aber nicht zur

Selbstreplikation (engl. *self-replication*) befähigt sind. Viren können daher nicht als lebendig bezeichnet werden.

In einem launigen Kommentar zu verschiedenen Definitionen des Lebens hat der Quantenmechaniker Martin Quack darauf hingewiesen, dass anhand der üblichen wissenschaftlichen Definitionen von Leben nicht entschieden werden kann, ob das Individuum einer Spezies lebt oder tot ist (QUACK, 2014: 279). So müsse zum Beispiel eine sehr alte oder sterilisierte Katze definitionsgemäß als tot gelten, da sie nicht zur Fortpflanzung befähigt sei. Daher sei die allgemeine Definition lebender Systeme (Stoffwechsel, Fortpflanzung und Mutation) nicht auf individuelles Leben anwendbar. Abgesehen von solchen Spitzfindigkeiten ergeben sich gravierende Abgrenzungsprobleme, wenn die frühe Abiogenese oder die Möglichkeit von extraterrestrischem Leben in Betracht gezogen werden.

Auf der Grundlage obiger Überlegungen wurden verschiedene Definitionen von Leben vorgeschlagen. Hier eine kleine Auswahl:

Die ursprüngliche Arbeitsdefinition des Exobiologie-Programms der NASA lautete: „*Leben ist ein sich selbst erhaltendes chemisches System, das zur Darwinischen Evolution fähig ist.*“ (deutsche Übersetzung von RAUCHFUß, 2005).

Eine Definition von LUISI (1998) betont die Bedeutung des Stoffwechsels: „*Leben ist ein System, das sich durch Nutzung externer Energie bzw. Nahrung und durch innere Prozesse der Bildung von Komponenten selbst erhält.*“ (deutsche Übersetzung von RAUCHFUß, 2005).

In einer weiteren Definition von LUISI (1998) wird die Bedeutung der Zellbildung (engl. *compartmentation* oder *encapsulation*) hervorgehoben: „*Leben ist ein System, das durch ein semipermeables Kompartiment eigener Produktion bestimmt ist und sich durch Umsetzung externer Energie bzw. Nahrungsstoffe über einen Prozess der Komponentenbildung selbst erhält.*“ (deutsche Übersetzung von RAUCHFUß, 2005). Das „semipermeable Kompartiment eigener Produktion“ ist nichts anderes als die Zellmembran, die bei Bakterien und Eukaryoten aus einer Lipid-Doppelschicht besteht (Abb. 4). Da Zellmembranen in den ganz frühen Stadien der Selbstreplikation von Biomolekülen möglicherweise nicht vorhanden waren, ist diese Definition problematisch.

KOSHLAND (2002) fügte den bereits genannten Charakteristika des Lebens zwei weitere hinzu, nämlich „Improvisation“ und „Regeneration“. Ein lebendes System sollte in der Lage sein, sein Programm schnell an veränderte Umgebungsbedingungen anzupassen und allfällige Schäden im System auszubessern.

Der schon erwähnte Begriff der Abiogenese bezieht sich auf die chemische Evolution, die zur Entstehung von Lebewesen aus unbelebter Materie, insbesondere auf der Erde, geführt hat. Das Thema der Astrobiologie ist noch weiter gefasst. Diese interdisziplinäre Naturwissenschaft befasst sich nicht nur mit möglichen Prozessen der Abiogenese in der geologischen Vergangenheit unseres Planeten, sondern auch mit der Suche nach anderen bewohnbaren Planeten – in und außerhalb unseres Sonnensystems – sowie nach Spuren von außerirdischem Leben im Allgemeinen.



nach innen zur Mitte der Membran gerichtet sind. Die Synthese der Phospholipide findet im Endoplasmatischen Retikulum und im Golgi-Apparat des Protoplasmas statt. Ihre polare Anordnung in der Zellmembran erfolgt spontan und ist keine unmittelbare Folge der Genexpression. Die Lipidmoleküle ordnen sich so an, dass sie den wässrigen Lösungen außerhalb und im Inneren der Zelle die hydrophile Seite zuwenden. Außer Lipiden enthält die Zellmembran auch Membranproteine, die beispielsweise als Ionenpumpen dazu beitragen, einen bestimmten osmotischen Druck aufrecht zu erhalten. Dadurch werden die Ionenkonzentrationen im Inneren der Zelle stabilisiert. Der Stoffwechsel wird weniger anfällig gegenüber zufälligen Konzentrationschwankungen seiner extrazellulären aquatischen Umwelt.

Da sich einfache Lipid-Doppelschichten (ohne Membranproteine) auch ohne die Anwesenheit von Nukleinsäuren und Proteinen bilden können, wäre es prinzipiell möglich, dass einfache zelluläre Strukturen schon vor den ersten Nukleotiden und Polypeptiden existiert haben. Die frühen Hypothesen zur Abiogenese haben dem Vorgang der Zellbildung eine herausragende Bedeutung beigemessen (OPARIN, 1924, 1936). Nach dem von LUISI & VARELA (1990) vorgeschlagenen Szenario einer Lipid-Welt sollen sich präbiotische Lipide auf der frühen Erde häufig gebildet haben. Im Wasser sollen sie sich spontan zu zellartigen Bläschen zusammengefügt haben, wobei es auch zur Einkapselung von einfachem genetischem Material gekommen sein könnte (siehe auch HAZEN, 2006, und darin zitierte weitere Literatur).

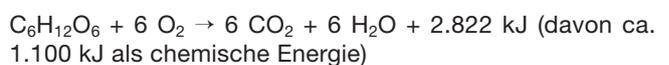
**Ad 2:** Das Energieproblem betrifft den Stoffwechsel (Metabolismus) und die Fähigkeit, Energiequellen für endotherme Reaktionen nutzbar zu machen. Im Gegensatz zu fast allen Gesteinen der Erdkruste und des Erdmantels ist die Trockensubstanz von Lebewesen sauerstoffuntersättigt. So kann beispielsweise die chemische Zusammensetzung eines Granits, eines Basalts oder Ultramafits in Gewichtsprozenten der Oxide angegeben werden. In der Regel genügt es, die Gehalte der metallischen Hauptelemente zu bestimmen und den Sauerstoffgehalt anhand der stöchiometrischen Proportionen zu berechnen, um auf diese Weise eine Analysensumme von fast 100 % zu erhalten. Die wenigen sauerstoffuntersättigten Akzessorien (z.B. Sulfide) fallen nicht ins Gewicht. Der Sauerstoffgehalt von Gesteinen wird daher so gut wie nie gesondert analysiert.

Ganz anders verhält es sich bei organischen Stoffen. Lipide, Kohlenhydrate, Aminosäuren, Peptide, Proteine und Nukleinsäuren sind alle mehr oder weniger stark sauerstoffuntersättigt. Daher können diese Stoffe unter Abgabe von Energie verbrannt werden. Der physiologische Brennwert ist die spezifische Energie (Joule/kg oder kJ/g), die beim Verstoffwechseln von Nährstoffen verfügbar gemacht wird. Bei Lipiden (stark sauerstoffuntersättigt) beträgt er 39 kJ/g, bei den weniger stark sauerstoffuntersättigten Kohlenhydraten und Proteinen beträgt er nur 17 kJ/g. Man könnte daher meinen, der Stoffwechsel von Organismen sei im Prinzip nichts anderes als eine gewöhnliche Verbrennung, bei der die Nährstoffe im Wesentlichen zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O oxidiert werden. Diese These ist jedoch bestenfalls eine Halbwahrheit.

Ebenso könnte man behaupten, dass der Betrieb eines Automobils nichts anderes als eine Verbrennung sei, da verschiedene Kohlenwasserstoffe im Motor mittels Luftsauer-

stoff verbrannt und die Oxidationsprodukte CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O durch den Auspuff ausgeschieden werden. Ein unbegabter Automobilkonstrukteur, der auf die abwegige Idee käme, den Dieselmotor eines Autos durch einen Ölofen zu ersetzen, würde nicht nur seine Arbeitsstelle verlieren, sondern im Falle der Realisierung seines Projekts auch sehr schnell feststellen, dass es im Inneren seines ‚Fahrzeugs‘ im Winter zwar angenehm warm wird, das ‚Auto‘ aber nicht mehr fährt. Wie bei jeder Wärmekraftmaschine geht es beim Betrieb eines Autos nicht in erster Linie darum, die bei der Verbrennung freiwerdende Energie sofort und vollständig in Wärme umzusetzen. Stattdessen soll ein möglichst großer Anteil der Verbrennungsenergie als mechanische Arbeit zur Verfügung gestellt werden. Der mechanische Wirkungsgrad eines Motors ist definiert als das Verhältnis der verrichteten mechanischen Arbeit zur im gleichen Zeitraum umgesetzten Gesamtenergie. Bei einer Dampfmaschine liegt er bei höchstens 10 %, beim Ottomotor bei bis zu 35 % und beim Dieselmotor bei bis zu 45 %. Moderne Gasturbinen erreichen sogar mechanische Wirkungsgrade von knapp über 60 %.

Auch der Stoffwechsel lebender Organismen verwandelt die Energie der Nährstoffe nicht vollständig in Wärme, sondern stellt einen relativ hohen Anteil als chemische Energie zur Verfügung. Die Zellatmung der Eukaryoten führt über mehrere Schritte zur vollständigen Oxidation von Glucose. Dabei liefert ein Mol Glucose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) nach der untenstehenden Summenreaktion insgesamt 2.822 kJ (Gibbs freie Enthalpie), wovon etwa 40 % in Form von ATP (Adenosin-triphosphat) als chemische Energie zur Verfügung gestellt werden. Die restlichen etwa 60 % der Stoffwechselenergie werden als metabolische Wärme frei. Der thermodynamische Wirkungsgrad der Zellatmung ist also ungefähr gleich groß wie der eines Dieselmotors (jeweils ca. 40 %).



Die Zellatmung gliedert sich in drei Teilprozesse (Abb. 5). Sie beginnt mit der Glykolyse im Zytoplasma der Zelle. Dabei wird ein Mol Glucose in zwei Mol Pyruvat (C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub>) umgewandelt. Außerdem werden dabei zwei Mol ATP gebildet. Das Pyruvat wird anschließend in den Citratzyklus (Zitronensäurezyklus) der Mitochondrien eingeschleust. Dieser liefert über das Zwischenprodukt Citrat (Anion der Zitronensäure) CO<sub>2</sub>, NADH, FADH<sub>2</sub> und Coenzym A. Durch Phosphorylierung werden weitere zwei Mol ATP gebildet. Die bei der Oxidation von Glucose bzw. Citrat abgespaltenen Elektronen werden auf NAD<sup>+</sup> und FAD übertragen und mittels NADH bzw. FADH<sub>2</sub> zur Mitochondrienwand transportiert, wo im dritten Schritt der Zellatmung (Endoxidation oder Atmungskette) die Wasserstoffatome von NADH und FADH<sub>2</sub> mittels O<sub>2</sub> zu H<sub>2</sub>O oxidiert werden. Dabei werden weitere 28 Mol ATP gebildet. Durch das Verstoffwechseln eines Mols Glucose werden insgesamt 32 Mol ATP gebildet. Diese stehen als Energieträger für die Synthese organischer Moleküle, für osmotische Arbeit beim aktiven Stofftransport durch Zellmembranen und für die Muskelkontraktion zur Verfügung. Selbstverständlich wird bei diesen Prozessen ein Teil der umgesetzten Energie dissipativ in Wärme umgewandelt. Wesentlich ist jedoch, dass die Energieausbeute der Zellatmung nicht sofort und nicht vollständig als Wärme freigesetzt, sondern teilweise als chemische Energie in Form von ATP zur Verfügung gestellt wird.

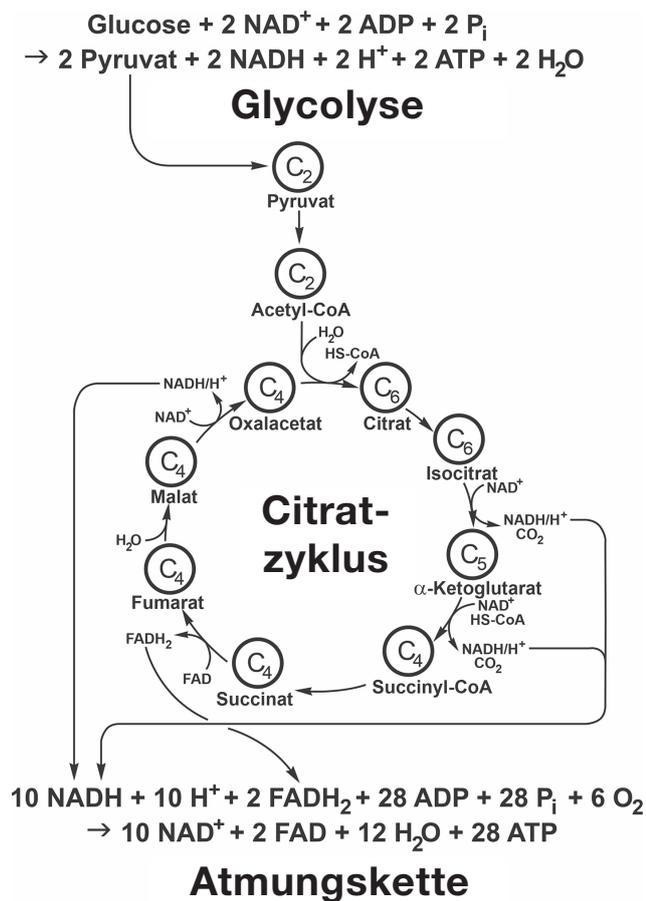


Abb. 5.  
Die Zellatmung am Beispiel der Verstoffwechslung von Glucose. Die drei Teilprozesse der Zellatmung (Glycolyse, Citratzyklus und Atmungskette) liefern insgesamt 32 Mol ATP je Mol Glucose. Außer Pyruvat können auch die Abbauprodukte von Fettsäuren und Proteinen in den Citratzyklus eingeschleust werden.  
ATP = Adenosintriphosphat; ADP = Adenosindiphosphat; P<sub>i</sub> = Phosphorylgruppe PO<sub>3</sub><sup>2-</sup>; NAD<sup>+</sup> und NADH = oxidierte bzw. reduzierte Form von Nicotinamid-Adenin-Dinukleotid; FAD und FADH<sub>2</sub> = oxidierte bzw. reduzierte Form von Flavin-Adenin-Dinukleotid.

Wegen der enormen Bedeutung des Elements Phosphor (P) und insbesondere von Phosphaten für den Aufbau von Nukleinsäuren und als Energieträger (ATP) im Stoffwechsel wurde dem Phosphat-Problem große Aufmerksamkeit gewidmet. Insbesondere die RNA-Welt (GILBERT, 1986) kann ohne Phosphat nicht funktionieren. Die Suche nach Reaktionen zur Synthese von Hochenergie-Phosphaten unter plausiblen präbiotischen Bedingungen der Urerde verlief bisher enttäuschend (siehe RAUCHFUß, 2005, und darin zitierte Literatur). Das mit Abstand häufigste Phosphat der Erdkruste ist das Mineral Apatit (Ca<sub>5</sub>(F,OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). Es ist kaum wasserlöslich und äußerst verwitterungsresistent. Daher wurden andere Phosphatquellen in Betracht gezogen. YAMAGATA et al. (1991) konnten zeigen, dass Basalte bei hohen Temperaturen (> 1.265 °C) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> freisetzen und dass daraus durch partielle Hydrolyse wasserlösliche Polyphosphate gebildet werden können. In einer Fumarole auf der japanischen Insel Hokkaido wurden solche Phosphate in sehr geringer Konzentration nachgewiesen. Trotz dieser bescheidenen Erfolge bleibt die Herkunft wasserlöslicher Phosphate unter den Bedingungen der Urerde noch rätselhaft. Es gibt aber auch Abiogenese-Modelle, welche für die frühesten Stadien der chemischen Evolution kein Phosphat benötigen.

Im deutlichen Gegensatz zur Hypothese der RNA-Welt (GILBERT, 1986) und verschiedenen Ursuppen-Theorien steht die von WÄCHTERSCHÄUSER (1988, 1990a) vorgeschlagene These vom chemoautotrophen Lebensursprung durch Oberflächen-Metabolismus auf den Kristallflächen von Pyrit. Demnach sollen die für den Aufbau organischer Moleküle benötigten Reduktionsäquivalente aus der oxidativen Bildung von Pyrit aus zweiwertigem Eisen (Fe<sup>2+</sup>) und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) stammen. An der positiv geladenen Oberfläche des neugebildeten Pyrits soll CO<sub>2</sub> fixiert und zu anionischen Molekülen reduziert werden. Sie bilden ein zweidimensionales Reaktionssystem, den so genannten Oberflächen-Metabolismus. Aus diesem frühen Stoffwechsel sollen sich erst später replikationsfähige Moleküle wie beispielsweise RNA gebildet haben (*metabolism first*). Dieser theoretische Ansatz benötigt keine präbiotische Ursuppe mit bereits existierenden organischen Molekülen, um einen frühen Stoffwechsel in Gang zu bringen. Weder Enzyme noch ein genetischer Apparat wären für diesen Oberflächen-Metabolismus erforderlich gewesen, sondern erst durch diesen entstanden. Das von WÄCHTERSCHÄUSER (1988, 1990a) formulierte Konzept des Oberflächen-Metabolismus kann daher als Antithese zur RNA-Welt von GILBERT (1986) aufgefasst werden.

Die These des chemoautotrophen Oberflächen-Metabolismus wurde in mehreren Experimenten getestet. So gelang zum Beispiel der Aufbau von Peptidbindungen (HUBER & WÄCHTERSCHÄUSER, 1998) und die Synthese von Pyruvat, das in der Zellatmung heutiger Organismen eine zentrale Rolle spielt (CODY et al., 2000; WÄCHTERSCHÄUSER, 2000).

Metaphorisch gesprochen, gleicht das Energieproblem der Abiogenese dem Versuch, aus Steinen Brot zu machen. Das Ansinnen des Satans, der Messias möge doch Steine in Brot verwandeln, um auf diese Weise seine Allmacht unter Beweis zu stellen, wurde bekanntlich zurückgewiesen (siehe die Evangelien nach MATTHÄUS, Kap. 4, Verse 3–4, und LUKAS, Kap. 4, Verse 3–4). Es bleibt abzuwarten, ob die moderne Abiogenese-Forschung in dieser Hinsicht erfolgreicher sein wird.

**Ad 3:** Das Informationsproblem betrifft die Fähigkeit der Selbstreproduktion ganzer Organismen. Auf molekularer Ebene handelt es sich dabei um die Frage, welche chemischen Prozesse zur komplementären Replikation von organischen Polymeren geführt haben. Die Hypothese der RNA-Welt (GILBERT, 1986) beruht auf der Annahme, dass die erste genetische Informationsübertragung durch RNA-Replikation in einer Nukleotid-Suppe stattfand. Abgesehen vom Problem der anorganischen Polymerisierung (ohne Enzyme) geht es im Kontext dieser Hypothese auch um die Möglichkeit der Synthese von Nukleotiden (Monomere aus einem Basen-, Zucker- und Phosphatanteil) unter geochemisch plausiblen Bedingungen der Urerde. Die dabei auftretenden Probleme waren einer der Hauptkritikpunkte an der RNA-Welt (SHAPIRO, 2000).

Einen radikal anderen Vorschlag zur Entstehung replikationsfähiger Information machte der schottische Chemiker CAIRNS-SMITH (1966, 1985). Seiner Ansicht nach müsse das erste zur Fortpflanzung befähigte Material viel einfacher gewesen sein als die späteren Nukleinsäuren. Es sollte aus Stoffen (z.B. Mineralen) bestanden haben, die auf der Urerde häufig vorkamen. In weiterer Folge sollte dieser erste fortpflanzungsfähige Informationsträger durch einen

anderen, komplexeren Stoff abgelöst worden sein, wobei die gespeicherte Information von der ersten auf die zweite Stoffart übertragen wurde. Diese Informationsübertragung von einem materiellen System zum anderen bezeichnete CAIRNS-SMITH (1985) als „genetische Wachablöse“ (engl. *genetic takeover*). So könnte über mehrere solcher Wachablösen die ursprünglich im Kristallgitter von Mineralen gespeicherte Information auf Nukleinsäuren (z.B. RNA) übertragen worden sein.

Wie aber können mineralische Kristalle Information speichern? Der Informationsgehalt eines idealen Kristalls ist gering. Durch einfache Translation seiner Elementarzelle erhält man die atomaren Punktlagen des gesamten Kristalls. Wenn das Kristallgitter jedoch Baufehler wie beispielsweise Leerstellen, eingelagerte Fremdionen oder Versetzungen aufweist, wird der Informationsgehalt des Kristalls größer. Im Falle eines Schichtsilikats kann jede einzelne Schicht ein bestimmtes Muster von Baufehlern aufweisen. Durch Spaltung und weiteres Wachstum könnte dieses Muster an eine nächste Generation von Schichtsilikaten weitergegeben werden. Daher schlug CAIRNS-SMITH (1985) Tonminerale als erstes replikationsfähiges ‚Genmaterial‘ vor. Die gestapelten Silikatschichten der Tone sind über Wasserstoffbrücken miteinander verbunden und daher leicht voneinander zu lösen. Im wässrigen Milieu ist der Schichtabstand von Montmorillonit vom Elektrolytgehalt des Wassers abhängig. Bei sinkendem Elektrolytgehalt wird die Bindung schwächer und der Kristall zerfällt in Einzelschichten. Diese können wiederum als Wachstumskeime für die Anlagerung neuer Schichten dienen. Bei periodischem Wechsel der Ionenkonzentration im Wasser, zum Beispiel infolge von Dürre und Regenzeiten, kann die Information dieser Matrizen durch oftmalige Spaltung der Silikatschichten und anschließendes Kristallwachstum vervielfältigt werden. Da ein experimenteller Nachweis dieser Art von Informationsübertragung über viele Generationen von Tonmineralen bislang nicht erbracht werden konnte (siehe WEISS, 1981), gilt CAIRNS-SMITH‘ Hypothese vom *genetic takeover* im Fachkreis der Abiogenese-Forschung als die Meinung eines Außenseiters.

## Das Homochiralitätsproblem

Das Wort ‚Homochiralität‘ setzt sich aus den beiden altgriechischen Wörtern *ὁμός* (*homós* = gleich) und *χέρι* (*chéri* = Hand) zusammen. Es bedeutet wörtlich so viel wie Gleichhändigkeit. Ansammlungen von mindersymmetrischen Objekten gleicher Händigkeit werden als homochiral bezeichnet. Das kann zum Beispiel eine Gruppe rechtsdrehender Metallschrauben oder entsprechender Muttern sein. Auch eine Gruppe britischer Automobile mit Rechtssteuerung könnte man als homochiral bezeichnen. In der organischen Chemie bezieht sich die Chiralität auf die Händigkeit von Molekülen ohne Symmetrieebene und ohne Inversionszentrum, das heißt solche, die als rechte oder linke Enantiomere auftreten können. Das sind beispielsweise die meisten Aminosäuren (außer Glycin), Zucker und Terpene. Besteht eine bestimmte chemische Substanz nur aus Molekülen gleicher Händigkeit (z.B. nur aus L-Alanin), wird sie als homochiral bezeichnet. Besteht sie jedoch aus gleichen Anteilen linker und rechter Moleküle (z.B. zu 50 % aus L-Alanin und zu 50 % aus D-Alanin) spricht man von

einem racemischen Gemisch oder Racemat (von lat. *Racemus* = Traube). Der Begriff geht auf die Traubensäure (lat. *acidum racemicum*) zurück, jener Substanz, an deren Salz dem französischen Chemiker Louis Pasteur (1822–1895) im Jahr 1848 erstmals die Trennung eines Racemats in seine beiden Enantiomere gelang (PASTEUR, 1848). Man bezeichnet diesen Vorgang als Racematspaltung.

Bevor wir uns der Händigkeit von organischen Molekülen zuwenden, möchte ich den Begriff der Symmetrie erläutern. Geometrische Symmetrieoperationen sind Umwandlungen, mit denen ein Objekt auf sich selbst abgebildet werden kann, wobei es danach unverändert erscheint. Diese Operationen können auf individuelle Objekte im Raum, auf Abläufe in der Zeit und auf statistische Proportionen größerer Mengen von Einzelobjekten angewendet werden. Wenn die Anwendung einer solchen Operation zu einem vom Ausgangszustand unterscheidbaren Zustand führt, spricht man von einer Asymmetrie des Objekts in Bezug auf diese Operation. In der physikalischen oder kosmischen Wirklichkeit können wir drei Arten von Asymmetrien (bzw. Symmetrien) unterscheiden:

1. zeitliche Asymmetrien;
2. räumliche Asymmetrien;
3. proportionale Asymmetrien (statistische Paritätsverletzungen).

**Ad 1:** Zeitliche Asymmetrien beziehen sich auf irreversible Prozesse, die in Richtung und Gegenrichtung nicht in gleicher Weise ablaufen können. Das sind insbesondere quantenmechanische Prozesse (Zerfallsprozesse) und thermodynamische Prozesse, bei denen Entropie entsteht (Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik).

So kann zum Beispiel die Bewegung eines annähernd reibungslos aufgehängten Pendels mit einer Videokamera dokumentiert werden. Wenn dieses Video anschließend in der Gegenrichtung abgespielt wird, kann das ein Beobachter nicht erkennen, da der Vorgang in Richtung und Gegenrichtung der Zeit gleich ist. Analog gilt das auch für kollisionsfreie Prozesse der Himmelsmechanik. Die Bewegungen der Planeten um die Sonne, die der Monde um die Planeten und die Eigenrotation der Himmelskörper könnten auch in der Gegenrichtung ablaufen.

Ganz anders verhält es sich, wenn eine Kaffeetasse zu Boden fällt und zersplittert, oder wenn man etwas Milch in den Kaffee gibt und anschließend umrührt. Videoaufnahmen dieser Vorgänge, die in der Gegenrichtung abgespielt werden, sind sofort als Unmöglichkeit zu erkennen. Weder können sich die Scherben der Kaffeetasse spontan zusammenfügen, noch können sich Kaffee und Milch spontan entmischen.

**Ad 2:** Räumliche Symmetrien bzw. Asymmetrien beziehen sich auf die äußere Form und innere Struktur materieller Objekte. Durch die Kombination der morphologischen Symmetrieoperationen (Inversionszentrum, Spiegelebene, Drehachsen und Drehspiegelachsen) ergeben sich 32 geometrische Kristallklassen. Durch die Hinzunahme von Translation, Schraubung und Gleitspiegelung ergeben sich insgesamt 230 mögliche Symmetrien von Kristallgittern, die als kristallographische Raumgruppen bezeichnet werden. Elf der 32 Kristallklassen haben weder ein Inversionszentrum noch Spiegelebenen. In diesen elf Kristallklassen können enantiomorphe Kristalle (von altgriechisch

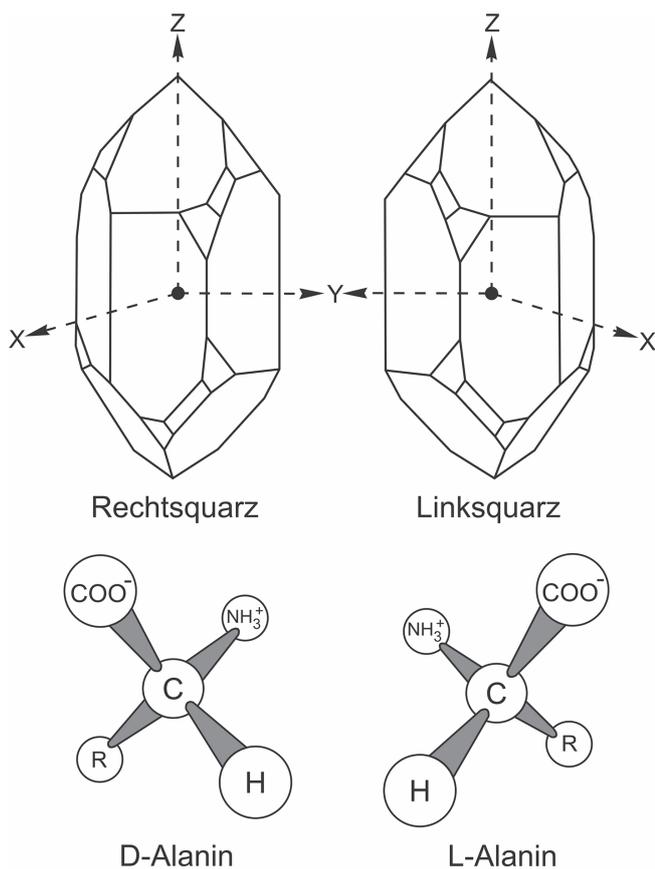


Abb. 6. Chiralität am Beispiel von Rechts- und Linksquarz (oben) sowie der beiden Enantiomere der Aminosäure Alanin. Durch Rotation können die beiden spiegelbildlichen Kristalle bzw. Moleküle nicht in eine kongruente Stellung gebracht werden. In der Kristallographie wird der Begriff Enantiomorphie als Synonym für Chiralität gebraucht.

εναντίον = Gegenteil und μορφή = Gestalt), die sich wie die rechte und linke Hand zueinander verhalten, auftreten. Enantiomorphe Kristalle gegenteiliger Händigkeit können durch Rotation nicht in eine kongruente Stellung (d.h. mit gleicher Orientierung aller Flächen und Kanten) gebracht werden (Abb. 6). Das bekannteste und häufigste enantiomorphe Mineral ist Quarz. Rechtsquarz kristallisiert in der Raumgruppe  $P3_121$  und Linksquarz in der Raumgruppe  $P3_221$ .

Die Symmetrieoperationen der morphologischen Kristallographie werden auch zur Beschreibung der Symmetrie von Molekülen herangezogen. Molekülarten, die weder ein Inversionszentrum noch Spiegelebenen aufweisen, können Enantiomere bilden, das heißt Moleküle, die zwar die gleiche Strukturformel haben, sich aber spiegelbildlich zueinander verhalten (Abb. 6). Enantiomere haben gleiche physikalische Eigenschaften wie zum Beispiel Schmelz- und Siedepunkte, Dichte, Löslichkeit, elektrische Leitfähigkeit usw., interagieren aber auf unterschiedliche Weise mit Enantiomeren anderer Molekülarten und mit lebenden Organismen. Als Beispiel sei hier Limonen aus der Gruppe der Terpene genannt. Es bildet Enantiomere und kommt als Naturstoff in Orangenöl und Zitronenöl vor. Rechts-Limonen riecht nach Orange, während Links-Limonen nach Zitrone riecht. Die Tatsache, dass diese Moleküle mit spiegelbildlicher Struktur unterschiedliche Gerüche hervorrufen, ist auf die Asymmetrie der olfaktorischen Rezeptoren in der Nase zurückzuführen. Diese bestehen nämlich aus

L-Aminosäuren (MEIERHENRICH, 2009). Enantiomere mit unpassender Händigkeit (z.B. L-Glucose oder D-Aminosäuren) können auch nicht verstoffwechselt werden, da die Struktur der gleichfalls asymmetrischen Enzyme auf das jeweils passende Enantiomer abgestimmt ist.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Begriffe ‚links‘ und ‚rechts‘ weder geometrisch definiert, noch verbal abstrahiert werden können – nur ihr Gegensatz lässt sich geometrisch definieren (siehe QUACK, 2014). Die Händigkeit eines Koordinatensystems oder beliebiger chiraler Objekte kann zwar anhand konkreter Beispiele gezeigt, jedoch nicht erklärt werden, ohne dabei Worte mit bereits festgelegter chiraler Bedeutung zu verwenden und ohne sich auf ein Koordinatensystem mit festgelegter Händigkeit zu beziehen. Es gilt die alte Volksweisheit: „Links ist, wo der Daumen rechts ist, und rechts ist, wo der Daumen links ist“. Es wäre daher unmöglich, einer extraterrestrischen Zivilisation zu erklären, was genau L-Aminosäuren oder eine linke Hand sind, ohne dabei eine chemische Probe oder ein materielles Modell zu übermitteln (QUACK, 2014).

**Ad 3:** Proportionale Symmetrien bzw. Asymmetrien beziehen sich auf das Mengenverhältnis von komplementären Objekten oder von komplementären Stoffen (z.B. positive oder negative elektrische Ladung bei sonst gleichen Eigenschaften). Eine grundlegende proportionale Asymmetrie des gesamten Kosmos besteht etwa darin, dass er aus wesentlich mehr Materie als Antimaterie besteht (QUACK, 2014). Ein weiteres Beispiel ist die bereits erwähnte Homochiralität von Biomolekülen. Lebende Organismen enthalten fast nur L-Aminosäuren (linkshändig) und D-Zucker (rechtshändig). Daher wird der Traubenzucker (Glucose) auch als Dextrose bezeichnet (von lat. *Dextra* = rechts).

Eine proportionale Asymmetrie läge auch vor, wenn beispielsweise in einem Sandhaufen Links- oder Rechtsquarz signifikant angereichert wären. Alle bisherigen Untersuchungen zur relativen Häufigkeit von Links- und Rechtsquarz haben jedoch gezeigt, dass diese beiden enantiomorphen Quarzformen sowohl weltweit als auch in hinreichend großen Gesteinsvolumina gleich häufig sind (LEMMLEIN, 1973; PALACHE et al., 1962; FRONDEL, 1978; KLABUNOVSKII & THIEMANN, 2000; KLABUNOVSKII, 2001). Durch die Bildung sekundärer Kristallkeime (engl. *seeding effects*) sind jedoch lokale Anreicherungen von entweder Rechts- oder Linksquarz möglich und wurden auch schon beobachtet (FRONDEL, 1978).

Große, nach dem Dauphinéer Gesetz (auch Schweizer Gesetz genannt) verzwilligte Bergkristalle (Zwillingsachse [0001]) bestehen aus um  $180^\circ$  verdrehten, aber nicht gespiegelten Zwillingspartnern gleicher Händigkeit (L+L oder D+D). Jeder dieser verzwilligten Bergkristalle ist intern homochiral. Nach dem Brasilianer Gesetz verzwilligte Quarze (Ebenenzwilling nach dem Prisma II; oftmals in Amethyst) bestehen jedoch zu annähernd gleichen Teilen aus Links- und Rechtsquarz (L+D) und weisen oft polysynthetische Zwillingslamellen auf. In diesem Fall tritt auch kleinräumig keine Homochiralität auf.

In Schriftgraniten können relativ große Bereiche ( $> 5$  cm Durchmesser) mit homochiralem Quarz auftreten (HERITSCH, 1953). Es handelt sich dabei um innige, zum Teil kristallographisch orientierte Verwachsungen von Quarz und Alkalifeldspat in leukokraten plutonischen Gesteinen

(FENN, 1986; XU et al., 2015). Sie treten oft am Rande von Pegmatiten auf. Die charakteristische schriftgranitische Textur bildet sich an der Oberfläche wachsender Feldspatkristalle, wenn diese schneller wachsen als sich das überschüssige  $\text{SiO}_2$  durch Diffusion in der Restschmelze verteilen kann. Mit anderen Worten: Die Wachstumsrate des Feldspats muss größer sein als die Diffusionsgeschwindigkeit von  $\text{SiO}_2$ . Für die dadurch entstehende lokale  $\text{SiO}_2$ -Übersättigung an der Oberfläche des schnell wachsenden Feldspats sind eutektische oder kotektische Bedingungen des Gesamtsystems nicht erforderlich (FENN, 1986). Die zusammenhängenden Lamellen und Stängel aus Quarz mit gleicher kristallographischer Orientierung können infolge verwitterungsbedingter Kaolinisierung des Feldspats und daran anschließender Auswaschung der Tonminerale zu einem Granulat aus homochiralem Quarz zerfallen. Die Entstehung von Bodenbereichen mit chiral angereichertem Quarz liegt im Bereich des Möglichen.

Bei der **biomolekularen Homochiralität** von Aminosäuren und Zuckern handelt es sich einerseits um eine räumliche Asymmetrie der einzelnen Moleküle, die weder ein Inversionszentrum noch Spiegelebenen aufweisen, und andererseits um eine proportionale Asymmetrie der Stoffmengen, da nur jeweils eines der beiden Enantiomere auftritt. Der Ursprung dieser biomolekularen Homochiralität ist eines der ganz großen Rätsel der Abiogenese-Forschung (siehe MEIERHENRICH, 2008; TAKAHASHI & KOBAYASHI, 2019).

Viele Hypothesen zum Ursprung der biomolekularen Homochiralität wurden bereits vorgeschlagen und manche davon auch getestet. Sie beinhalten sowohl stochastische (d.h. zufallsbedingte) als auch physikalisch determinierte Prozesse mit entweder interner oder externer Ursache in Bezug auf die zu bildende oder anzureichernde chirale Substanz. Außerdem wurden sowohl extraterrestrische (interstellare) als auch terrestrische Prozesse in Erwägung gezogen. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten, welche die ohnehin schon vielfältigen Szenarien der Abiogenese um einen weiteren Aspekt bereichern und verkomplizieren.

Ein **stochastischer Ursprung der Homochiralität** kann am Beispiel des Rechts- oder Linksverkehrs auf öffentlichen Straßen verdeutlicht werden. Personen, die in entgegengesetzter Richtung gehen und sich auf einem Weg begegnen, müssen spontan entscheiden, ob sie rechts oder links aneinander vorbeigehen wollen. Das Gehirn interpretiert die Bewegungen des Gegenübers in Bruchteilen einer Sekunde und leitet daraus die geeignete Ausweichbewegung ab. In den weitaus meisten Fällen geschieht das kollisionsfrei. Es ist wichtig, zu verstehen, dass dieser Ausweichprozess keine Symmetrieebene aufweist. Er kann entweder linkshändig oder rechtshändig ablaufen. Auf Gehwegen und in den Gängen öffentlicher Gebäude ist diese Händigkeit nicht genormt. Die Entscheidung geschieht spontan und ist dem Zufall überlassen. Bei einer hinreichend großen Zahl von Vorbeigängen würde man wahrscheinlich feststellen, dass linke und rechte Vorbeigänge ungefähr gleich häufig sind. Ganz wenige Bilddokumente – zum Beispiel auf antiken römischen Münzen – lassen zwar auf lokalen Linksverkehr schließen, jedoch war die Händigkeit des öffentlichen Verkehrs bis in die frühe Neuzeit entweder gar nicht oder nicht einheitlich geregelt. Fußgänger, Reiter oder die Führer von Ochsenkarren entschieden spontan, ob sie den Entgegenkommenden nach

links oder rechts ausweichen wollten. Mit der Zunahme des Wagenverkehrs in Europa entwickelte sich in manchen Gegenden – abhängig von der Bauart der Wagen – regionale Verkehrsgewohnheiten (BERLAKOVICH, 2007). Fallweise gab es auch Dekrete für das gegenseitige Ausweichen von Militärkolonnen. Verbindliche Regeln für den gesamten öffentlichen Verkehr entwickelten sich vor allem im 18. und 19. Jahrhundert, und wurden im 20. Jahrhundert konsolidiert.

Die durch die Motorisierung stark gestiegene Geschwindigkeit und Frequenz des öffentlichen Straßenverkehrs und die damit einhergehende höhere Unfallgefahr machten gesetzliche Regeln erforderlich. Die ursprünglich zufällige Chiralität ‚de facto‘ wurde bald durch eine Chiralität ‚de jure‘ ersetzt. Ab diesem Zeitpunkt stand es den Verkehrsteilnehmern nicht mehr frei, spontan zu entscheiden, ob sie links oder rechts aneinander vorbeifahren wollten. Die Chiralität des Straßenverkehrs wurde zur systemimmanenten Eigenschaft. In Österreich ist das Rechtsfahrgebot durch § 7 Abs. 1 der Straßenverkehrsordnung (StVO) wie folgt geregelt: *„Der Lenker eines Fahrzeuges hat, sofern sich aus diesem Bundesgesetz nichts anderes ergibt, so weit rechts zu fahren, wie ihm dies unter Bedachtnahme auf die Leichtigkeit und Flüssigkeit des Verkehrs zumutbar und dies ohne Gefährdung, Behinderung oder Belästigung anderer Straßenbenützer, ohne eigene Gefährdung und ohne Beschädigung von Sachen möglich ist.“*

Das heute in ganz Kontinentaleuropa geltende Rechtsfahrgebot hat sich vom frühen 19. Jahrhundert bis 1967 allmählich herausgebildet. In Österreich erfolgte diese Entwicklung uneinheitlich und in Etappen. Vor dem Ersten Weltkrieg hatten die Kronländer der Monarchie unterschiedliche Regeln für den Straßenverkehr festgelegt. Während in Salzburg, Ober- und Niederösterreich Linksverkehr galt, fuhr man in Vorarlberg, Tirol und Kärnten rechts. Ab 1915 wurde generell auf Linksverkehr umgestellt. Wegen seiner starken verkehrstechnischen Anbindung an die Schweiz und Deutschland kehrte Vorarlberg schon 1921 wieder zum Rechtsverkehr zurück. 1929 wurde per Bundesgesetz zwar die allgemeine Umstellung auf Rechtsverkehr beschlossen, jedoch von den Bundesländern nur zögernd umgesetzt. Am 2. April 1930 wechselten Nordtirol und der Pinzgau zum Rechtsverkehr, am 15. Juli 1935 auch Osttirol und Kärnten. Der Osten Österreichs blieb vorerst beim Linksverkehr (Abb. 7). Daher musste



Abb. 7. Die Wiener Staatsoper im Jahr 1932, an der Kreuzung von Opernring und Kärntner Straße. Man beachte den damaligen Linksverkehr der Automobile und der elektrischen Straßenbahnen.

an der Salzachtalstraße bei Lend, östlich der Einmündung des Gasteinertals, sowie am Katschberg die Straßenseite gewechselt werden. Nach dem Anschluss Österreichs an Hitler-Deutschland trat für ganz Österreich die deutsche Straßenverkehrsordnung in Kraft. Die Umstellung auf Rechtsverkehr erfolgte aus technischen Gründen (vor allem wegen der Straßenbahn) in Etappen und war am 19. September 1938 auch in Wien abgeschlossen. Das Rechtsfahrgebot wurde nach dem Krieg beibehalten. Als letztes Land Kontinentaleuropas führte Schweden am 3. September 1967 den Rechtsverkehr ein.

Maßgeblich für diese Vereinheitlichung des Straßenverkehrs waren einerseits die gewünschte Unfallvermeidung, aber auch technische und ökonomische Vorteile. Mehrspurige Kraftfahrzeuge sind in der Regel asymmetrisch konstruiert und auf die jeweilige Händigkeit der Verkehrsordnung abgestimmt. Bei Autos, die für den kontinentaleuropäischen oder nordamerikanischen Markt bestimmt sind, befindet sich der Platz des Lenkers mit den Bedienelementen auf der linken Seite, bei Autos, die für den britischen Markt bestimmt sind, jedoch auf der rechten Seite. Analog gilt das auch für Motorräder mit Beiwagen (Abb. 8). Zwar kann mit allen Kraftfahrzeugen auch das jeweils unpassende Straßennetz befahren werden (z.B. kontinentaleuropäische Autos in Großbritannien oder Australien), es ergeben sich dabei aber Nachteile und eine erhöhte Unfallgefahr, da der Lenker dann außen am Fahrbahnrand sitzt und den Gegenverkehr nicht gut sehen kann. Überholvorgänge sind unter solchen Umständen wesentlich gefährlicher. Die Asymmetrie der Fahrzeuge und die Händigkeit der Verkehrswege unterlagen daher einer technischen Koevolution, welche die Entwicklung größerer Gebiete mit einheitlicher Verkehrsordnung begünstigt hat.

Die regionale Verteilung von Ländern mit Rechts- und Linksverkehr (Abb. 9) zeigt, dass der Linksverkehr vor allem auf Inseln (z.B. Britannien, Irland, der japanische und indonesische Archipel, Neuseeland) und in verkehrstechnisch isolierten Kontinentalgebieten überlebt hat. Der australische Kontinent kann als große Insel betrachtet werden. Der indische Subkontinent mit Indien, Pakistan, Bangladesch und Nepal ist durch hohe Gebirgsketten von der Hauptmasse Eurasiens getrennt und nur über wenige Passstraßen auf dem Landweg erreichbar. Das südliche Afrika ist nur durch wenige, zumeist schlechte Straßen mit dem restlichen Afrika verbunden. Gleiches gilt für die Verkehrsanbindung von Guyana und Surinam in Südamerika. Offenbar war der ökonomische und technische Anpassungsdruck an den global deutlich vorherrschenden Rechtsverkehr in diesen isolierten Gebieten gering.

In großen, verkehrstechnisch gut erschlossenen Gebieten wäre die späte Umstellung auf eine andere Chiralität des Straßenverkehrs mit enormen Kosten verbunden. Bei relativ kleinen Inseln halten sich die notwendigen baulichen Maßnahmen noch in einem vertretbaren Kostenrahmen. So wechselte beispielsweise Samoa erst 2009 vom Rechts- zum Linksverkehr, um auf diese Weise billige Gebrauchtwagen aus Australien, Neuseeland und Japan für den heimischen Markt besser nutzen zu können. Im Falle Großbritanniens und Irlands würde die Umstellung auf Rechtsverkehr aber etliche Milliarden Euro oder Pfund kosten, da nicht nur sämtliche Verkehrszeichen ausgetauscht, sondern auch Bodenmarkierungen, Verkehrsampeln, Bahnübergänge, Straßenbahngleise und Autobahn-



Abb. 8. Motorrad (Yamaha) mit Beiwagen als Beispiel für die chirale Koevolution von Fahrzeugen und immobilien Verkehrseinrichtungen (Begrenzungspfosten, Verkehrsschilder, Bodenmarkierungen usw.). Bildquelle: Der Reisende; CC-by-sa 1.0 generic.

kreuze grundlegend umgebaut werden müssten. Wenn ein totaler Kollaps des öffentlichen Lebens vermieden werden soll, müssten diese Änderungen quasi über Nacht oder allenfalls binnen weniger Tage durchgeführt werden. Hinzu käme noch die Notwendigkeit, den gesamten öffentlichen und privaten Fuhrpark binnen weniger Jahre komplett auszutauschen. Bezüglich des britischen Linksverkehrs wurde der ‚Point of no Return‘ längst überschritten. Eine ökonomisch vertretbare Umstellung auf Rechtsverkehr hätte schon viel früher erfolgen müssen. Auch ohne den sogenannten Brexit ist es dafür zu spät. Es ist daher wesentlich einfacher und billiger, den minimalen Krümmungsradius von Salatgurken innerhalb Europas einheitlich zu regeln (Verordnung Nr. 1677/88/EWG) als die Briten auf Rechtsverkehr umzustellen.

Der Grund, weshalb ich die Geschichte des Rechts- und Linksverkehrs so ausführlich geschildert habe, liegt in der Tatsache, dass es sich dabei um einen rein stochastischen, aber selbstverstärkenden Prozess handelt. Ein Lebens- und Wirtschaftsraum mit diesbezüglich einheitlicher Verkehrsordnung hat zwar viele Vorteile gegenüber einem Gebiet mit sehr heterogenen Regeln, aber der Ausgang des Vereinheitlichungsprozesses ist unvorhersehbar. Der heute weltweit vorherrschende Rechtsverkehr ist nicht auf

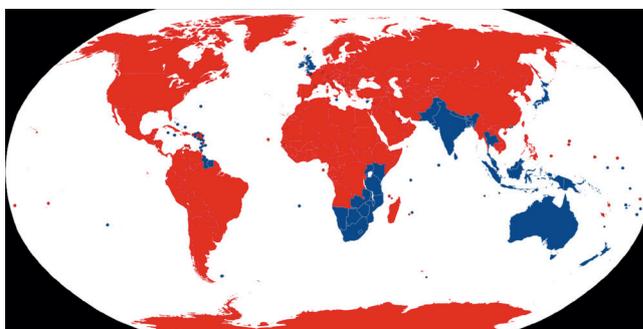


Abb. 9. Globale Verteilung von Rechts- und Linksverkehr auf öffentlichen Straßen (Public-Domain-Grafik, erstellt von Benjamin D. Esham). Gebiete mit vorgeschriebenem Rechtsverkehr in Rot, solche mit Linksverkehr in Blau. Der vorgeschriebene Rechtsverkehr der arktischen und antarktischen Gebiete ist de facto nur an wenigen Stellen realisiert.

natürliche Gegebenheiten zurückzuführen. Weder gibt es auf den britischen Inseln mehr Linkshänder als Rechtshänder, noch ist der Anteil der Rechtshänder auf dem europäischen Festland signifikant höher als woanders. Dass wir in Österreich heute auf der rechten Straßenseite fahren, ist ein rein zufälliges Ergebnis. Es hätte auch anders ausgehen können.

Man könnte nun meinen, dass auch die molekularbiologische Homochiralität aller heute bekannten Lebensformen durch einen ähnlichen stochastischen Prozess entstanden sein könnte, indem frühe replikationsfähige molekulare Strukturen mit gegensätzlicher Chiralität im Wettbewerb miteinander standen und eine der beiden Lebenswelten durch die andere nach und nach verdrängt wurde. Verschiedene solcher Prozesse, bei denen spiegelbildliche Lebensformen in einem sehr frühen Stadium der Evolution in räumlicher Nähe koexistiert haben sollen, wurden in Erwägung gezogen (WALD, 1957; GOLDBERG et al., 1987; BONNER, 1995). Nach diesen biotischen Theorien der Chirogenese sollte es möglich sein, eine homochirale Lebenswelt durch Selektionsprozesse schrittweise aus anorganisch gebildeten Racematen hervorgehen zu lassen. Demnach könnte das Vorhandensein kleiner Mengen von D-Aminosäuren in Bakterienzellen (NAGATA et al., 1998) und in den Zellen verschiedener Eukaryoten (BRÜCKNER & WESTHAUSER, 2003) eventuell als Relikt einer sehr alten spiegelbildlichen Lebenswelt interpretiert werden (siehe MEIERHENRICH, 2008). Allerdings haben experimentelle Befunde gezeigt, dass die Synthese von Polypeptiden und die Selbstreplikation von Polynukleotiden in einer racemischen Umgebung sehr stark gehemmt oder sogar unmöglich sind (IDELSON & BLOUT, 1958; WÄCHTERSCHÄUSER, 1991; BORCHERS et al., 2004). Diese gegenseitige Hemmung der Polymerisierung durch Enantiomere gegenteiliger Chiralität (engl. *enantiomeric cross inhibition*) ist der Grund, weshalb die überwältigende Mehrheit der Abiogenese-Forschenden einen präbiotischen Ursprung der Homochiralität favorisieren. Man nimmt an, dass die ersten Biopolymere in einem Milieu mit starkem Enantiomeren-Überschuss (engl. *enantiomeric excess*) gebildet wurden und dieser Überschuss nicht erst durch organischen Stoffwechsel, sondern schon vorher durch anorganische Prozesse entstanden ist. Demnach sollte schon das allererste Leben auf unserem Planeten homochiral gewesen sein. Eine ‚spiegelbildliche‘ Lebenswelt sollte zumindest auf der Erde nie existiert haben (siehe MEIERHENRICH, 2008). Es ist daher nicht verwunderlich, dass die meisten Hypothesen zur Abiogenese zumindest stillschweigend einen homochiralen molekularen Ausgangszustand annehmen. Das gilt insbesondere für die RNA-Welt-Hypothese von GILBERT (1986). Entsprechende Laborexperimente werden in der Regel nicht mit Racematen, sondern mit enantiomerenreinen Aminosäuren durchgeführt.

Dieser allgemein favorisierte, anorganische Ursprung der biomolekularen Homochiralität eröffnet wiederum verschiedene Denkmöglichkeiten. Er könnte entweder durch eine inhärente Asymmetrie der Materie bedingt sein, oder aber durch einen präbiotischen Zufall verursacht worden sein. Die Frage, welche der beiden Möglichkeiten zutrifft, kann vorerst nicht beantwortet werden, da schlüssige Beweise noch nicht erbracht wurden.

Die **inhärente Asymmetrie der Materie** ist eine relativ späte naturwissenschaftliche Erkenntnis, die alles andere

als selbstverständlich ist. Bekanntlich lieben Physiker jegliche Art von Symmetrie. Das gilt insbesondere für Erhaltungssätze (Energieerhaltung, Impulsgesetz u.a.) und die verbreitete Vorstellung, wonach für jeden konkreten physikalischen Vorgang auch ein exakt gespiegelter Vorgang theoretisch möglich sei. So gibt es beispielsweise keinen Grund anzunehmen, dass ein spiegelbildliches Planetensystem oder ein spiegelbildliches Billardspiel physikalisch unmöglich seien. Dieser Vorstellung zufolge wäre auch ein bis in den subatomaren Bereich exakt gespiegeltes Universum keine theoretische Unmöglichkeit. So dachte man jedenfalls bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts.

Dieses Grundvertrauen der Physiker in die Symmetrie der Naturkräfte wurde im Jahr 1956 erschüttert, als zwei amerikanischen Physikern chinesischer Herkunft am Beispiel des radioaktiven  $\beta$ -Zerfalls der theoretische Beweis für die Asymmetrie der schwachen Kernkraft gelang (LEE & YANG, 1956). Beide wurden 1957, kurz nach dieser bahnbrechenden Entdeckung, mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Der experimentelle Nachweis dieser grundlegenden Asymmetrie ließ nicht lange auf sich warten. Unter der Leitung von Frau Chieng-Shiung Wu (Columbia Universität, New York) wurde  $^{60}\text{Co}$  bis auf 0,01 K abgekühlt und einem starken Magnetfeld ausgesetzt. Dabei wurde der Kernspin der  $^{60}\text{Co}$ -Atome nach dem angelegten Magnetfeld ausgerichtet. Im Falle einer Symmetrie der schwachen Kernkraft wäre zu erwarten gewesen, dass die beim  $\beta$ -Zerfall von  $^{60}\text{Co}$  gebildeten Elektronen mit gleicher Häufigkeit in alle Richtungen emittiert werden. Die Messungen zeigten jedoch, dass die aus dem Atomkern austretenden Elektronen bevorzugt entgegen der Richtung des polarisierenden Magnetfeldes emittiert werden (WU et al., 1957). Damit war der experimentelle Nachweis für die Asymmetrie der schwachen Kernkraft erbracht. Man musste sich nun damit abfinden, dass von den vier Grundkräften nur drei, nämlich die Schwerkraft, die elektromagnetische Wechselwirkung und die starke Kernkraft symmetrisch sind, während die schwache Kernkraft asymmetrisch wirkt. Diese inhärente Asymmetrie einer der vier fundamentalen Kräfte ist für die Asymmetrie des Atomkerns und die chirale Polarisierung der Elektronen in den Elektronenschalen verantwortlich. Sie bedingt auch leicht unterschiedliche Bindungsenergien von Enantiomeren (YAMAGATA, 1966). Allerdings ist diese Energiedifferenz zwischen L- und D-Enantiomeren extrem niedrig. Sie lässt sich zwar berechnen, aber nicht kalorimetrisch messen. Berechnete Energiedifferenzen für die Enantiomere von Aminosäuren liegen in der Größenordnung von  $10^{-14}$  Joule/Mol (MASON & TRANTER, 1983). Zum Vergleich: Die molaren Bildungsenthalpien von Aminosäuren liegen in der Größenordnung von mehreren hundert kJ/Mol. Somit beträgt die berechnete Energiedifferenz zwischen L- und D-Enantiomeren weniger als das  $10^{-19}$ -fache der Bildungsenthalpie (weniger als ein Milliardstel Milliardstel). Es ist nur schwer vorstellbar, wie eine so winzige Energiedifferenz zur Entstehung der biomolekularen Homochiralität beigetragen haben soll. Die bekannten Verfahren zur abiotischen Synthese von Aminosäuren (STRECKER, 1850) sowie das berühmte Experiment von Stanley Miller und Harald Urey (MILLER, 1953; MILLER & UREY, 1959) liefern jeweils Racemate ohne messbare Anreicherung eines der beiden Enantiomere. Wenn die Asymmetrie der schwachen Kernkraft für die bevorzugte Chiralität atomarer Bindungen verantwortlich wäre, würde man auch erwarten, dass bei enantiomorphen Mineralen eine der beiden enan-

tiomorphen Formen häufiger auftritt als die andere. Alle Untersuchungen an Quarz haben jedoch gezeigt, dass Links- und Rechtsquarz weltweit und in ausreichend großen Gesteinsproben gleich häufig sind (LEMMLEIN, 1973; PALACHE et al., 1962; FRONDEL, 1978; KLABUNOVSKII & THIE-MANN, 2000). Diese Befunde sprechen gegen einen signifikanten Einfluss der inhärenten atomaren Asymmetrie auf die relative Häufigkeit bestimmter chiraler Kristalle oder Moleküle.

Wenn aber die biomolekulare Homochiralität weder durch einen evolutionären Wettbewerb spiegelbildlicher Lebensformen (biotische Theorien), noch durch die inhärente Asymmetrie der Atome (Paritätsverletzung durch die schwache Kernkraft) entstanden ist, bleibt als letzte Möglichkeit nur noch die Interaktion von Racematen oder nicht chiralen Biomolekülen mit externen chiralen Stoffen oder Strahlungen. Für diese **chirale Induktion von außen** kommen mehrere Mechanismen in Betracht.

Chirale Moleküle können durch dauerhafte **Adsorption oder chromatographische Trennung an mindersymmetrischen Kristallflächen** – besonders an solchen mit hohen Miller-Indizes – selektiv angereichert werden. Generell sind die Adsorption und die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Molekülen an Mineraloberflächen auf elektrostatische Wechselwirkungen zurückzuführen, also auf die jeweils pH-abhängigen elektrischen Nettoladungen der Mineraloberfläche und der angelagerten Moleküle (CHURCHILL et al., 2004). Zur chiralen Trennung von Enantiomeren genügen diese Nettoladungen in der elektrischen Doppelschicht jedoch nicht. Zusätzlich ist eine chirale Geometrie der Kristallfläche erforderlich. Auch Kristalle mit einem Symmetriezentrum und/oder Spiegelebenen können Flächen mit chiralen atomaren Mustern aufweisen (HAZEN, 2004, 2006). Allerdings treten diese chiralen Flächen dann paarweise als äquivalente Flächen mit gegenteiliger Händigkeit auf (z.B. in einem Pinakoid oder einem monoklinen Prisma). Mit anderen Worten: In einem polykristallinen Granulat aus nicht-enantiomorphen Kristallen gibt es gleich viele Flächen mit gegenteiliger Händigkeit. Etwaige chirale Separationseffekte an Kristallgrenzen oder Spaltflächen

werden daher schon in einem relativ kleinen Gesteinsvolumen kompensiert. Bei der Infiltration von Racematen in ein polykristallines Granulat aus nicht-enantiomorphen Kristallen kann daher keine chromatographische Separation von Enantiomeren stattfinden. Analog gilt das auch für ein polykristallines Granulat, das zu gleichen Teilen aus linken und rechten Kristallen besteht.

An enantiomorphen Einzelkristallen treten chirale Flächen mit gegenteiliger Händigkeit jedoch nicht paarweise auf. Alle äquivalenten Flächen einer bestimmten Kristallform (Pinakoid, Prisma, Pyramide usw.) besitzen die jeweils gleiche Händigkeit. Der gesamte Kristall besitzt eine chiral unausgewogene, atomare Oberflächenstruktur. Damit aber ein polykristallines Granulat aus enantiomorphen Kristallen einen chiralen Separationseffekt auf Enantiomere ausüben kann, muss eine der beiden enantiomorphen Kristallformen (links oder rechts) im Granulat angereichert sein.

Quarz, Tridymit und Nephelin sind die einzigen enantiomorphen Minerale, die als gesteinsbildende Komponenten relativ häufig in der Erdkruste vorkommen. Alle anderen enantiomorphen Minerale (z.B. Berlinit, Pinnoit, Wardit, Leucophan u.a.) sind wesentlich seltener. Besondere Beachtung verdienen enantiomorphe Zeolithe (DRYZUN et al., 2009). Wie schon weiter oben besprochen, gibt es kleinräumige Vorkommen von homochiralem Quarz (z.B. große Bergkristalle, homochirale Bereiche in Schriftgraniten). Über eine etwaige chirale Anreicherung von Nephelin war bis vor kurzem jedoch nichts bekannt.

BAUMHAUER (1882, 1891) erkannte als erster die Enantiomorphie von Nephelin anhand der Asymmetrie von Ätzfiguren, die mit stark verdünnter Flusssäure erzeugt worden waren. Dieser Befund wurde von TRAUBE (1895) durch Wiederholung der Ätzversuche bestätigt (Abb. 10; siehe auch HEJL, 2016). Bis vor kurzem war über die chiralen Mengenverhältnisse von Nephelin in Gesteinen jedoch nichts bekannt. Dieser Informationsmangel ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Nephelin im Gegensatz zu Quarz optisch nicht aktiv ist und seine beiden enantiomorphen Formen unter polarisiertem Licht oder mit einem Polarimeter nicht unterschieden werden können. Da Nephelin aber aus

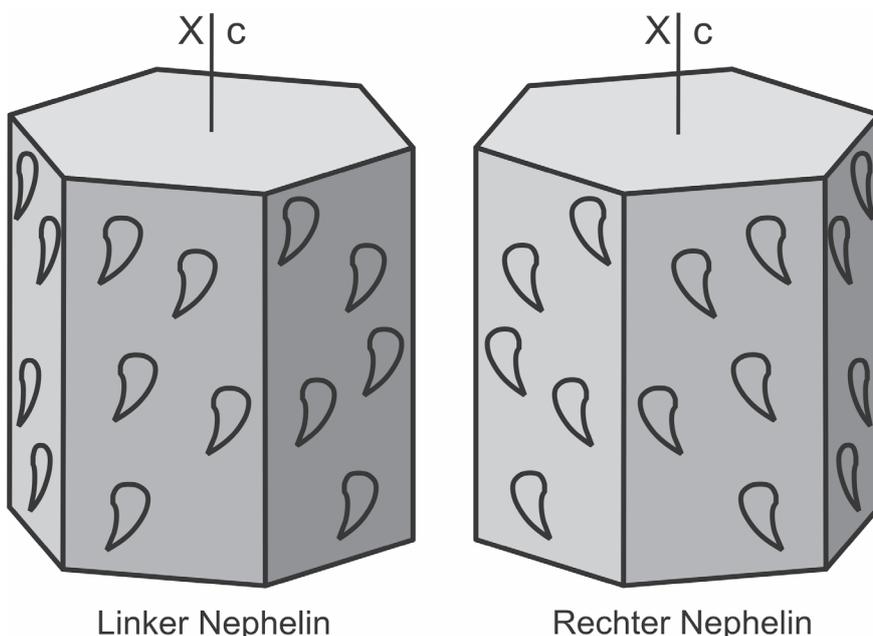


Abb. 10.  
Chirale Ätzfiguren auf Prismenflächen von Nephelin  
(nach HEJL & FINGER, 2018; HEJL, 2016).

sehr niedrigviskosen, alkalischen Schmelzen kristallisiert, besteht die theoretische Möglichkeit einer spontanen Kristallisation von enantiomerenreinem Nephelin durch autokatalytische sekundäre Bildung von Kristallkeimen (engl. *autocatalytic secondary nucleation* oder *seeding*). Ein solcher Prozess wurde bei der Kristallisation von Natriumchlorat  $\text{NaClO}_3$  unter Laborbedingungen beobachtet (KONDEPUDI et al., 1990). Kristalle von  $\text{NaClO}_3$  sind enantiomorph und optisch aktiv. Die beiden Formen (L oder D) sind unter dem Polarisationsmikroskop leicht zu unterscheiden. Wenn die Kristalle aus einer unbewegten wässrigen Lösung ausfallen, bilden sich ungefähr gleich viele rechte und linke Kristalle mit entgegengesetztem optischem Drehvermögen. Wenn die Lösung während der Kristallisation jedoch mit einem Rührwerk bewegt wird, haben mehr als 99 % der gebildeten Kristalle die gleiche Händigkeit. Der enantiomorphe Überschuss (L- oder D-Kristalle) ist jedoch unvorhersehbar und nicht davon abhängig, ob im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn gerührt wurde (KONDEPUDI et al., 1990). Der Versuch wurde mehrfach wiederholt. Später wurden analoge Ergebnisse mit Natriumbromid  $\text{NaBrO}_3$  erzielt (KONDEPUDI & ASAKURA, 2001).

Falls autokatalytische sekundäre Kristallisation auch bei magmatischer Kristallisation auftritt, wäre zu erwarten, dass sich in einem turbulent fließenden, dünnflüssigen Magma chiral angereicherte Kristallkeime bilden können. Da  $\text{SiO}_2$ -reiche Schmelzen eine relativ hohe dynamische Viskosität ( $\eta > 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) haben, fließen sie in der Regel zähplastisch laminar. Daher ist die Entstehung von homochiralem Quarz durch autokatalytische Keimbildung in einer  $\text{SiO}_2$ -reichen Schmelze äußerst unwahrscheinlich. Ganz anders verhält es sich bei Nephelin, der aus  $\text{SiO}_2$ -ärmeren und daher niedrigviskosen Schmelzen ( $\eta < 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) kristallisiert (HESS, 1971, 1980). Aufgrund ihrer niedrigen Viskosität können alkalische Schmelzen wie zum Beispiel Nephelinite und Karbonatite nicht nur laminar, sondern auch turbulent fließen. Der Übergang vom laminaren zum turbulenten Fließen ist von der Dichte ( $\rho$  in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ), der Strömungsgeschwindigkeit ( $v$  in  $\text{m}/\text{s}$ ), dem hydraulischen Radius ( $L$  in  $\text{m}$ ) und der dynamischen Viskosität ( $\eta$  in  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) abhängig und kann durch eine Reynoldszahl ( $Re = \rho \cdot v \cdot L / \eta$ ) charakterisiert werden. Je nach Strömungsgeometrie liegt dieser dimensionslose Schwellenwert zwischen etwa 500 und 2.500. Wenn er überschritten wird, erfolgt der Übergang zum turbulenten Fließen. In basaltischen Schmelzen, die eine höhere Viskosität aufweisen ( $\eta > 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), kann Turbulenz erst bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und in sehr breiten Schloten oder großen Magmenkammern auftreten. Bei extrem niedrig viskosen, alkalischen oder karbonatischen Schmelzen ( $\eta < 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) kann Turbulenz jedoch schon bei Strömungsgeschwindigkeiten von weniger als  $1 \text{ cm}/\text{s}$  und in magmatischen Schloten ab ca.  $10 \text{ m}$  Durchmesser auftreten. Diese Vorhersagen wurden durch vulkanologische Befunde bestätigt (DAWSON et al., 1990; STASIUK & JAUPART, 1997).

Wegen der Möglichkeit des turbulenten Strömens ist die autokatalytische Bildung sekundärer Kristallkeime von Nephelin in  $\text{SiO}_2$ -untersättigten Schmelzen nicht auszuschließen. Demnach wäre auch eine chirale Anreicherung von Nephelin möglich. Zur Überprüfung dieser These haben HEJL & FINGER (2018) Nephelinite und Phonoliten von 13 afrikanischen Alkaligesteinsprovinzen sowie einen Karbonatit von der Insel Alnön östlich von Sundsvall (Schwe-

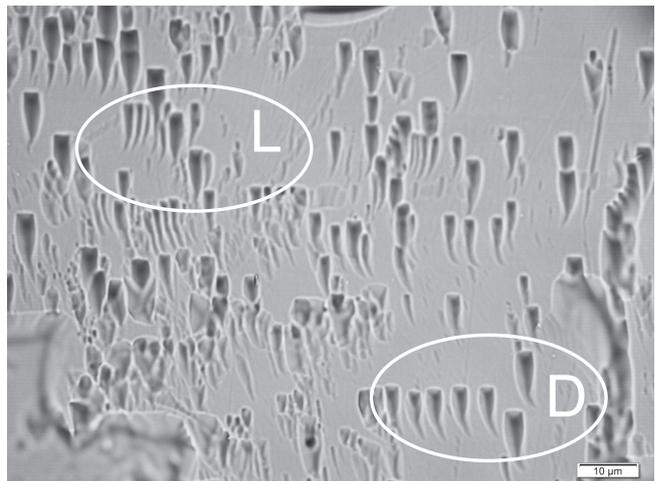


Abb. 11. Linke und rechte Ätzfiguren (L bzw. D) an verzwilligtem Nephelin (Phonolithischer Nephelinit von Kerimasi, Tansania; HEJL & FINGER, 2018).

den) bezüglich der chiralen Proportionen von Nephelin untersucht. Zu diesem Zweck wurde die nicht abgedeckte Oberfläche von Gesteinsdünnschliffen mit verdünnter Flußsäure (1 % HF in wässriger Lösung) 15 bis 25 min bei  $20^\circ \text{C}$  geätzt. Schon zuvor hatte sich gezeigt, dass vier der insgesamt 14 Proben zu wenig oder zu stark alterierten Nephelin enthielten. Vier der verbleibenden zehn Proben hatten ausreichend viele Nephelinkristalle mit gut erkennbaren chiralen Ätzfiguren (Abb. 11). Die statistische Auswertung dieser Nepheline mit Ätzfiguren ergab, dass die meisten Nepheline nicht verzwilligt sind, jedoch Kristalle mit linken und rechten Ätzfiguren (L-Typ bzw. D-Typ) ungefähr gleich häufig sind. In drei der vier statistisch auswertbaren Proben lag der Anteil der vorherrschenden chiralen Form bei maximal 55 %. Nur in einer der vier statistisch auswertbaren Proben wurden etwas mehr Kristalle des D-Typs, jedoch mit niedriger statistischer Signifikanz angetroffen (21 D-Typen, 15 L-Typen). Homochiraler oder chiral stark angereicherter Nephelin wurde in keiner der vier Proben angetroffen.

Abgesehen von diesem negativen Befund an nur vier auswertbaren Proben spricht ein weiteres Argument gegen die chirale Anreicherung von Biomolekülen durch eine chemische Wechselwirkung mit Nephelin.  $\text{SiO}_2$ -untersättigte Gesteine und deren Schmelzen waren im Präkambrium extrem selten, das heißt noch wesentlich seltener als im Phanerozoikum. Die ältesten bekannten Alkaligesteine liegen in der Superior-Provinz Kanadas und haben ein Alter von 2,7 Milliarden Jahren (siehe BLICHERT-TOFT et al., 1996). Sie sind um ungefähr eine Milliarde Jahre jünger als die ältesten bisher bekannten geochemischen Spuren von frühem Leben vor etwa 3,7 Milliarden Jahren (OHTOMO et al., 2014). Das Fehlen von alkalischem Magmatismus im frühen Archaikum wird von BLICHERT-TOFT et al. (1996) auf einen damals viel heißeren Erdmantel zurückgeführt. Dadurch kam es zu einer stärkeren partiellen Aufschmelzung und zu einem wesentlich geringeren Anteil an niedrig temperierten Schmelzen. Da Nephelin im frühen Archaikum anscheinend nicht vorhanden war, kann er als mineralische Ursache der biomolekularen Homochiralität mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden (HEJL & FINGER, 2018).

Quarz, der schon in der frühesten kontinentalen Kruste vor 4,4 Milliarden Jahren vorhanden war (WILDE et al., 2001), hat weitaus bessere Chancen, einen Einfluss auf die Chirogenese früher Biomoleküle gehabt zu haben (BONNER et al., 1974). Systematische Infiltrationsversuche mit racemischen Aminosäuren in homochiralem Quarzsand werden vielleicht neue Indizien liefern. Besondere Beachtung verdienen dabei nukleare Partikelspuren, wie sie durch die natürliche Kernspaltung von  $^{238}\text{U}$  entstehen. Unter den Verwitterungsbedingungen der Urerde könnten diese als Spaltspuren bezeichneten, strahlengeschädigten Bereiche zur Entstehung sehr feiner Kapillarröhren geführt haben (Abb. 12). Die von mir vorgeschlagene Hypothese zur Entstehung der Homochiralität von Biomolekülen (HEJL, 2017) beruht auf dem Prinzip der Flüssigchromatographie, das heißt auf unterschiedlichen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Molekülarten an den Wänden von Kapillarröhren. Wenn solche Röhren in enantiomorphen Kristallen auftreten, sollte eine chirale Trennung von Racematen zu erwarten sein. Zur experimentellen Überprüfung dieser Hypothese wird ein mittels Hydrothermalsynthese hergestellter Quarz-Einkristall bekannter Händigkeit (Abb. 13) im Backenbrecher zerkleinert und mittels Siebung in homochirale Sandfraktionen geteilt. Eine dieser Fraktionen wird mit uranhaltigem Zirkonpulver gemischt und im Reaktor mit thermischen Neutronen bestrahlt. Die aus dem Zirkon austretenden schweren Kernbruchstücke von  $^{235}\text{U}$  bilden nukleare Partikelspuren in den angrenzenden Quarzkörnern. Nach der Bestrahlung wird der Quarzsand mit verdünnter Flusssäure geätzt, um die Partikelspuren an der Quarzoberfläche zu feinen Kapillarröhren zu erweitern. Danach wird der Quarzsand in Infiltrationskolonnen gefüllt und mit stark verdünnten, racemischen Aminosäuren behandelt. Die gewonnenen Filtrate werden dann mittels zweidimensionaler Gaschromatographie in Kombination mit einem Flugzeit-Massenspektrometer (GCxGC-TOF/MS; *two-dimensional gas chromatography coupled to a time-of-flight mass spectrometer*) analysiert, um eine eventuelle chirale Trennung der Aminosäuren nachzuweisen. Die methodischen Grundlagen dieses Verfahrens wurden von MEINERT et al. (2016) und von MYRGORODSKA et al. (2016a, b) beschrieben.

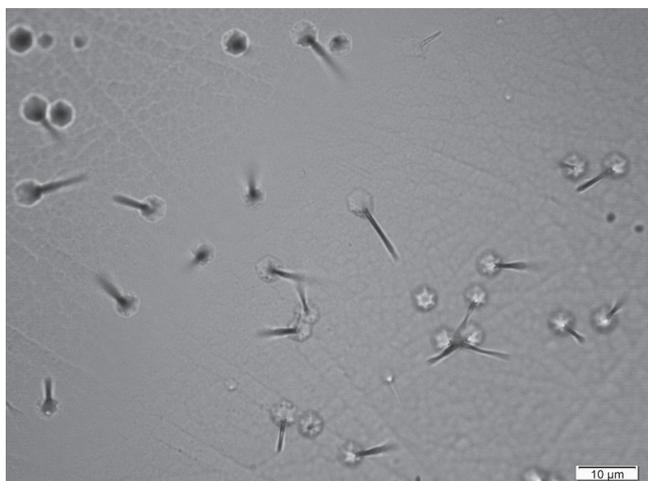


Abb. 12. Geätzte Spaltspuren auf einer Basisfläche von Durango-Apatit. Ätzbedingungen: 5 Gew.-%  $\text{HNO}_3$  für 60 Sekunden bei  $20^\circ\text{C}$ . Das oberflächliche Ende der Spuren ist durch kristallographische Ätzgrübchen gekennzeichnet.



Abb. 13. Mittels Hydrothermalsynthese hergestellter Rechtsquarz (so genannter Z-Barren-Quarz) mit einer Masse von 1,473 kg. Aus diesem unverzwilligten Quarzkristall wird durch Brechen und Sieben homochiraler Sand gewonnen. Dieser wird in weiterer Folge für Infiltrationsversuche mit racemischen Aminosäuren verwendet.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung eines Enantiomenüberschusses besteht in der **Bestrahlung von Aminosäuren mit zirkular polarisiertem Licht**, von dem man weiß, dass es im interstellaren Raum vorkommt (BAILEY et al., 1998; BAILEY, 2000). Diese intensiv diskutierte Möglichkeit der Chirogenese hat im Zuge der Vorbereitungen auf die Europäische Kometenmission Rosetta eine solide wissenschaftliche Fundierung erhalten. Da die Landungseinheit dieser Mission erstmals auf dem Nucleus eines Kometen landen sollte, wurde für Testzwecke interstellares Eis künstlich im Labor erzeugt. Zu diesem Zweck wurden einfache chemische Verbindungen, und zwar  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{NH}_3$  und  $\text{H}_2\text{O}$  bei sehr niedriger Temperatur (12 K) und extrem niedrigem Druck ( $10^{-7}$  mbar) auf einer festen Oberfläche kondensiert. Während der Kondensation wurde das molekulare Gemisch einer für den interstellaren Raum typischen UV-Strahlung ausgesetzt. Deren Wellenlänge lag zwischen 120 und 180 nm. Dieses künstlich erzeugte Kometeneis wurde anschließend chemisch analysiert. Dabei wurden 16 Aminosäuren nachgewiesen (MUÑOZ CARO et al., 2002; MEIERHENRICH, 2008). Wiederholungen dieses Experiments mit geänderten Parametern erbrachten immer wieder die gleichen 16 Aminosäuren in sehr ähnlichen Mengenverhältnissen. Damit war der Nachweis, dass Aminosäuren unter interstellaren Bedingungen entstehen können, erbracht. MEIERHENRICH und sein Team nehmen an, dass proteinogene Aminosäuren durch den Einschlag von Kometen auf die frühe Erde und in deren Urozean gelangten, im wässrigen Milieu an Mineralien adsorbierten und in weiterer Folge durch Polykondensationsreaktionen zur Bildung von Oligopeptiden und Proteinen beitragen (siehe MEIERHENRICH, 2009). Die im künstlichen Kometeneis nachgewiesenen Aminosäuren liefern auch ein Indiz auf das vielleicht erste genetische Material der frühen Erde. Peptidische Nukleinsäure (PNA), deren Rückgrat aus bestimmten Aminosäuren besteht, gilt als möglicher Vorläufer der RNA. Diese PNA-Stränge können sowohl an komplementäre RNA als auch an DNA binden (NIELSEN et al.,



Abb. 14.  
Künstlerische Darstellung der Raumsonde Rosetta mit dem Lander Philae und dem Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko (Public-Domain-Bild der Europäischen Weltraumagentur ESA).



Abb. 15.  
Aus vier Einzelaufnahmen zusammengesetztes Foto des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko vom 19. September 2014. Die Bilder wurden von der Navigationskamera (NAVCAM) der Raumsonde Rosetta aus einer Entfernung von 28,6 km zum Kometenkern aufgenommen. Bildquelle: ESA/Rosetta/Navcam, CC-by-sa IGO 3.0.

1991). Die im künstlichen Kometeneis vorkommenden Diaminosauren sind für die Bildung des PNA-Rückgrats geeignet und daher ein möglicher Schlüssel zur Entstehung einer Prä-RNA-Welt (MEIERHENRICH, 2009).

Wie aber kann Kometenmaterie zur biochemischen Homochiralität beitragen? Auch dazu gibt es analytische und

experimentelle Befunde. Gaschromatographische Untersuchungen an kohligen Chondriten haben gezeigt, dass Aminosäuren in diesen Meteoriten vorhanden sind. In allen Proben wurde ein Überschuss an L-Enantiomeren nachgewiesen (PIZZARELLO et al., 2003). Da die untersuchten Meteorite aber von terrestrischen Fundstellen stammen, kann nicht mit letzter Sicherheit entschieden werden, ob die in Ihnen vorhandenen Aminosäuren tatsächlich aus dem interstellaren Raum stammen, oder ob es sich um eine spätere bakterielle Kontamination handelt. Daher wurden Racemate ausgewählter Aminosäuren im französischen Synchrotron-Zentrum SOLEIL mit künstlich erzeugtem, zirkular polarisiertem Licht bestrahlt. Auf diese Weise konnte in der Aminosäure Leucin ein Enantiomerenüberschuss von 2,6 % induziert werden (MEIERHENRICH et al., 2005). Dieser und andere experimentelle Befunde belegen, dass chiral angereicherte Aminosäuren im interstellaren Raum und insbesondere in Kometenmaterie vorhanden sein können (MODICA et al., 2014). Solange dieser eventuelle Enantiomerenüberschuss aber nicht in-situ an einem echten Kometen gemessen worden ist, kann die Frage, ob die Aminosäuren im Kometeneis chiral nur leicht angereichert sind oder in homochiraler Form vorliegen, nicht beantwortet werden.

Diesbezüglich wurden große Hoffnungen in die Kometenmission Rosetta der Europäischen Weltraumagentur ESA gesetzt (siehe MÖHLMANN & ULAMEC, 2014). Ziel der Mission war die Erforschung des im Jahr 1969 entdeckten Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko, der zur Jupiter-Gruppe kurzperiodischer Kometen gehört. Da die Kometen dieser Gruppe kurze Umlaufzeiten von weniger als elf Jahren haben und ihr größter Sonnenabstand (Aphel) in der Nähe der Jupiterbahn liegt, sind sie für Raumsonden noch gut erreichbar. Die aus einem Orbiter und einem Lander bestehende, ungefähr 3.000 kg schwere Sonde wurde am 2. März 2004 mit der Trägerrakete Ariane 5G+ vom Weltraumzentrum Kourou in Französisch-Guyana gestartet. Nach insgesamt vier Swing-By-Manövern an Erde und Mars und nach den Vorbeiflügen an den Asteroiden Steins und Lutetia wurde die Sonde am 8. Juni 2011 in den ‚Schlafmodus‘ (engl. *deep space hibernation*) versetzt, um die Energiereserven der Batterien zu schonen. Am 20. Januar 2014 erwachte Rosetta planmäßig aus diesem ‚Winterschlaf‘. Mitte September 2014 wurde eine elliptische Umlaufbahn in etwa 30 km Entfernung vom Kometen erreicht. Bis zum 10. Oktober wurde der Abstand der Umlaufbahn zum Kometen schrittweise bis auf 10 km verringert, um eine genaue Oberflächenkartierung mit weniger als 3 m Auflösung zu ermöglichen (Abb. 14, 15).

Nachdem schon am 15. September 2014 zwei mögliche Landeplätze ausgewählt worden waren, erfolgte der Abwurf des nur 100 kg schweren Landers Philae am 12. November 2014. Der Lander besteht aus einem dreibeinigen Landegestell und einem Korpus mit zwei Verankerungsharpunen, Solarzellen, zwei Batterien (eine davon wieder aufladbar), Antennen, Panoramakameras, einem Probenbohrer und mehreren Messinstrumenten (BIBRING et al., 2007; MEIERHENRICH, 2015). Besondere Beachtung verdient das COSAC-Instrument (*COmetary SAMpling and Composition*), das für die Analyse von Bodenproben und flüchtigen Komponenten vorgesehen war (GOESMANN et al., 2007; MEIERHENRICH, 2015). Es umfasst einen Gaschromatographen mit enantioselektiven stationären Phasen

und ein Massenspektrometer (TOF-MS), wodurch es in der Lage ist, organische Moleküle zu erkennen, quantitativ zu analysieren und deren chirale Zusammensetzung zu bestimmen. COSAC ist das erste Gerät dieser Art, das jemals in den Weltraum geschickt wurde.

Ungefähr sieben Stunden nach seiner Ablösung vom Orbiter setzte der Lander Philae am 12. November 2014, um 15:34 Uhr (Weltzeit UTC) erstmals auf dem Kometen auf. Da sich die Harpunenverankerung beim ersten Bodenkontakt nicht ausgelöst hatte und die Eisschrauben an den Füßen des Landers ebenfalls keine Fixierung bewirken konnten, prallte der Lander wegen der geringen Gravitation des Kometen noch zweimal in das All zurück und kam erst um 17:32 Uhr (Weltzeit UTC) in endgültiger Position zum Stillstand. Schon 25 Minuten nach seinem ersten Bodenkontakt konnte COSAC im ‚Schnüffelmodus‘ (engl. *sniffing mode*) 16 Molekulararten identifizieren (GOESMANN et al., 2015), darunter auch acht Verbindungen mit Stickstoff ( $\text{HCONH}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{NCO}$ ,  $\text{HCN}$  u.a.). Wie sich zwei Jahre später durch Beobachtungen vom Orbiter herausstellte, liegt Philae in Schräglage im Schatten einer Wand, an einer Stelle, die während des 13-stündigen Kometentages nur 1,5 Stunden lang von der Sonne beschienen wird. Der Energiegewinn der Solarzellen reichte nicht aus, um die Batterien zu laden und die Betriebsspannung der Geräte aufrecht zu erhalten. Daher brach der Funkkontakt zu Philae am 15. November 2014 ab, als die Sonde in den Standby-Modus geschaltet hatte. Nach siebenmonatiger Funkstille wurde am 13. Juni 2015 ein letztes Datenpaket übertragen. Danach brach der Funkkontakt zu Philae endgültig ab. Am 30. September 2016 wurde der Orbiter auf dem Kometen kontrolliert zum Absturz gebracht, nachdem er noch mehrere hochauflösende Bilder der Kometenoberfläche zur Erde übertragen hatte.

Obwohl das COSAC-Experiment wegen der unzureichenden Energieversorgung nicht vollständig durchgeführt werden konnte, war die Kometenmission Rosetta insgesamt ein sehr großer Erfolg – schon allein wegen der vielen vom Orbiter übertragenen Daten. Auch mehr als 80 % des für den Lander Philae vorgesehenen Messprogramms wurden ausgeführt und zur Erde übertragen (BOEHNHARDT et al.,

2017). Leider scheiterte der Versuch, die organischen Moleküle im Eis unter der oberflächlichen Staubschicht des Kometen zu analysieren. Daher bleibt die Frage nach einem eventuellen Enantiomerenüberschuss von Aminosäuren im Kometeneis bis auf weiteres unbeantwortet.

## Hypothesen zum Ursprung des Lebens (Auswahl)

In den beiden vorigen Kapiteln wurden die Eigenschaften lebender Systeme und die sich daraus ergebenden Anforderungen für die Szenarien der Abiogenese skizziert. Zur Veranschaulichung der auf den ersten Blick verwirrenden Vielzahl von Möglichkeiten soll Abbildung 16 dienen. Zu den unabdingbaren Voraussetzungen für Leben in der uns bekannten Form gehören Stoffwechsel (Metabolismus), Fortpflanzung (komplementäre Replikation) und verschiedene Materialeigenschaften, unter denen die Homochiralität eine herausragende Stellung einnimmt. Im Felderdiagramm von Abbildung 16 entspricht die Schnittmenge ABC diesem Zustand des Lebens: Die gegenwärtig lebenden Organismen haben einen Stoffwechsel, können sich fortpflanzen und sind weitestgehend homochiral. Das Feld BC entspricht einem hypothetischen Zustand mit Stoffwechsel und Fortpflanzung, jedoch (noch) ohne Homochiralität, wie er von den biotischen Theorien der Biogenese im Frühstadium der Abiogenese angenommen wird (WALD, 1957; GOLDBERG et al., 1987; BONNER, 1995). Das Feld AC steht für fortpflanzungsfähige homochirale Strukturen ohne eigenen Stoffwechsel (z.B. Viren). Das Feld AB steht für homochiralen Stoffwechsel ohne Fortpflanzung, also ohne replikationsfähiges genetisches Material.

Da die Systemeigenschaften A (Homochiralität), B (Stoffwechsel) und C (Fortpflanzung) höchstwahrscheinlich nicht gleichzeitig in Erscheinung getreten sind, erhebt sich die Frage, in welcher Reihenfolge sie erworben wurden, also auf welchem Weg das Feld ABC erreicht wurde. Zu berücksichtigen sind auch die allgemeinen Rahmenbedingungen für Leben, wie zum Beispiel flüssiges Wasser, das

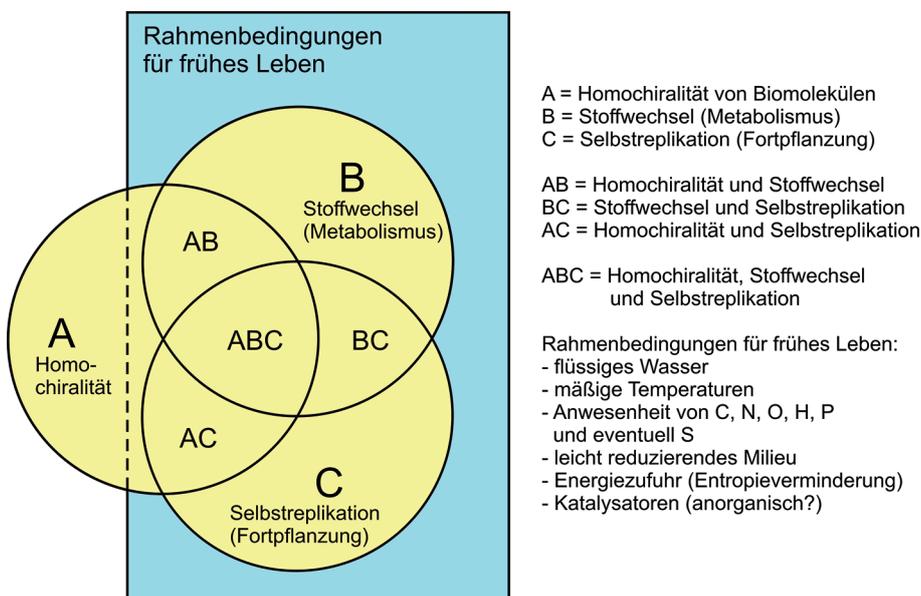
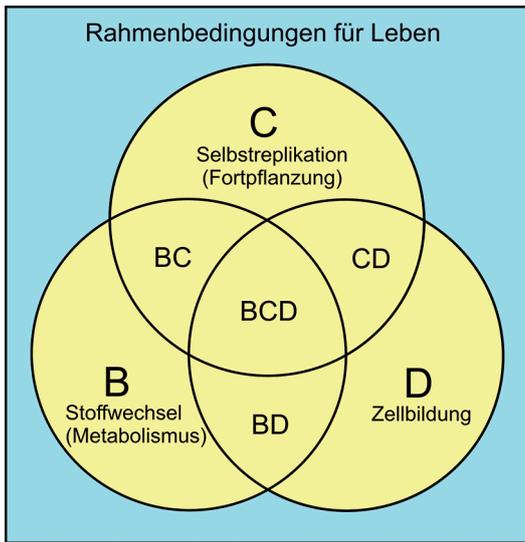


Abb. 16. Schema zur Verdeutlichung hypothetischer Szenarien der Abiogenese.



- B = Stoffwechsel (Metabolismus)  
 C = Selbstreplikation (Fortpflanzung)  
 D = Zellbildung
- BC = Stoffwechsel und Selbstreplikation  
 CD = Selbstreplikation und Zellbildung  
 BD = Stoffwechsel und Zellbildung
- BCD = Stoffwechsel, Selbstreplikation und Zellbildung (das uns bekannte Leben von Bakterien, Pilzen, Pflanzen und Tieren)
- Rahmenbedingungen für Leben:  
 - flüssiges Wasser  
 - mäßige Temperaturen  
 - Anwesenheit von C, N, O, H, P, S, K, Ca, Mg, Na, Cl und Se  
 - Homochiralität  
 - Energiezufuhr (Entropieverminderung)  
 - Katalysatoren (Enzyme!)

Abb. 17. Schema zu den Hypothesen der Abiogenese unter Einbeziehung der Zellbildung. Anders als in Abbildung 16 wird in diesem Schema eine bereits existierende (eventuell präbiotische) Homochiralität von Biomolekülen angenommen.

ausreichende Vorhandensein bestimmter chemischer Elemente, Energiequellen und Katalysatoren. Stoffwechsel und Fortpflanzung sind ohne diese Rahmenbedingungen nicht möglich. Die Homochiralität könnte jedoch schon früher, unter den lebensfeindlichen Bedingungen des interstellaren Raumes entstanden sein (BAILEY et al., 1998; BAILEY, 2000; MUÑOZ CARO et al., 2002; MEIERHENRICH, 2008; MEINERT et al., 2016). Daher liegt das Feld A in Abbildung 16 nicht zur Gänze innerhalb dieser für das Leben geforderten Rahmenbedingungen.

Unter der Annahme einer schon früh aufgetretenen biomolekularen Homochiralität und unter Hinzunahme des Problems der Zellbildung (*compartmentation*) ergeben sich weitere Kombinationsmöglichkeiten und verschiedene Wege, auf denen der Zustand (A)BCD erreicht werden kann (Abb. 17). Ob die aus Lipiden bestehenden Zellmembranen schon sehr früh oder erst in einem Spätstadium der Abiogenese gebildet wurden, ist umstritten.

Zum besseren Verständnis der historischen Entwicklung der Abiogenese-Forschung stelle ich einige prominente Vertreter dieses Faches und ihre Modelle zum Ursprung des Lebens vor. Mit dieser Auswahl wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

**Alexander Iwanowitsch Oparin** (1894–1980): Der in der russischen Stadt Uglitsch, ungefähr 200 km nördlich von Moskau geborene Alexander Iwanowitsch Oparin (Abb. 18) ist der Urvater der Abiogenese-Forschung, da er sich als erster Chemiker spekulativ mit diesem Problem befasst hat. Nach einem Studium an der Moskauer Universität wurde er Assistent am Institut für Pflanzenphysiologie. Nach dreijährigen Studienaufenthalten in West- und Mitteleuropa kehrte er 1925 nach Moskau zurück und wurde 1929 Professor für Biochemie. Außerdem erfüllte er verschiedene Funktionen in der staatlichen Zuckerindustrie und am Technischen Institut für Nahrungsmittelproduktion. Ab 1946 war er Direktor des Instituts für Biochemie.

Seit den frühen 1920er Jahren beschäftigte sich Oparin mit den chemischen Ursprüngen des Lebens und veröffentlichte seine Hypothese 1924 erstmals in Buchform. Seine in russischer Sprache publizierten Werke (OPARIN, 1924, 1936) erschienen in mehreren Auflagen und wurden in viele Sprachen übersetzt – darunter auch deutsch und

Abb. 18. Alexander Iwanowitsch Oparin (1894–1980), der geistige Vater der ersten Ursuppen-Hypothese. Das von ihm vorgeschlagene Szenario der Abiogenese beruhte auf der Annahme einer stark reduzierenden Uratmosphäre aus Methan, Ammoniak, Wasserstoff und etwas Schwefelwasserstoff.



englisch. Oparins Vorstellungen zur Lebensentstehung lassen sich wie folgt zusammenfassen: Auf der physikalisch-chemischen Ebene besteht kein grundsätzlicher Unterschied zwischen belebter und unbelebter Materie. Die Uratmosphäre der Erde bestand aus Methan, Ammoniak, Wasserstoff und etwas Schwefelwasserstoff, besaß daher stark reduzierende Eigenschaften. Durch Blitzentladungen und andere anorganische Energiequellen entstanden unter reduzierenden Bedingungen erste organische Moleküle, sammelten sich im Urozean und bildeten die so genannte Ursuppe. In weiterer Folge sollten eine Kolloidchemie und erste von Lipidmembranen umgebene Zellen entstanden sein. Vier Jahre nach dem Erscheinen des ersten Buches von Oparin in der Sowjetunion veröffentlichte der britische Biologe John Burdon Sanderson Haldane (1892–1964) einen ganz ähnlichen Vorschlag bezüglich einer stark reduzierenden Uratmosphäre (HALDANE, 1928). Daher gingen diese ersten Ursuppentheorien als Oparin-Haldane-Hypothese in die Wissenschaftsgeschichte ein. Das Problem der Informationsübertragung (Genetik) wurde in dieser Hypothese jedoch nicht berücksichtigt.

Bemerkenswert ist, dass sowohl Oparin als auch Haldane überzeugte Marxisten waren. Haldane war Mitglied der Kommunistischen Partei Großbritanniens und war mehrere Jahre Herausgeber des „Daily Worker“, der Zeitschrift der britischen KP. Den Glauben an den Marxismus verlor er erst 1950, als der von Josef Stalin (1878–1953) protegierte Agrarwissenschaftler Trofim Denissowitsch Lysenko (1898–1976) mit unwissenschaftlichen Methoden den Lamarckismus zu rehabilitieren versuchte und anders-

denkende Biologen brutal verfolgt wurden (CASTI, 1990: 104–105). Es steht außer Zweifel, dass die Oparin-Haldane-Hypothese unter der herrschenden Ideologie des dialektischen Materialismus in der damaligen Sowjetunion auf fruchtbaren Boden fiel, und Oparin davon forschungspolitisch profitierte. Dennoch kann der Einfluss seiner Ideen auf die Abiogenese-Forschung nicht hoch genug eingeschätzt werden. So ist beispielsweise das berühmte Experiment von MILLER & UREY (1959; MILLER, 1953) der Versuch einer experimentellen Überprüfung dieser Hypothese. Spätere und heutige Ursuppenmodelle nehmen jedoch eine CO<sub>2</sub>-Atmosphäre mit allenfalls schwach reduzierenden Eigenschaften an.

Um Alexander Oparin ranken sich viele Mythen. Er soll die bemerkenswerte Fähigkeit besessen haben, sich zwischen einer Flasche Cognac und einer Flasche Wodka zu Tisch zu setzen und nach beendeter Mahlzeit zwischen zwei leeren Flaschen zu sitzen (CASTI, 1990: 105). Solche und ähnliche Anekdoten sind vermutlich stark übertrieben, denn Alexander Oparin erreichte das für russische Verhältnisse hohe Alter von 86 Jahren und blieb bis kurz vor seinem Tod wissenschaftlich aktiv. Er wurde vielfach ausgezeichnet und geehrt: Als Mitglied der Sowjetischen Akademie der Wissenschaften (seit 1934) wurde er fünfmal mit dem Leninorden ausgezeichnet, erhielt den Ehrentitel ‚Held der Sozialistischen Arbeit‘ (1969), den Leninpreis (1974) und die Lomonosov-Goldmedaille (1979). Oparin ist einer der wenigen sowjetischen Wissenschaftler, die auch außerhalb der kommunistischen Länder sehr angesehen waren. Er war seit 1966 Mitglied der Deutschen Akademie der Wissenschaften und wurde für seine Verdienste um die Popularisierung der Wissenschaft 1976 von der UNESCO mit dem Kalingapreis ausgezeichnet. Die wissenschaftliche Gesellschaft der Abiogenese-Forscher ISSOL (*International Society for the Study of the Origin of Life*) mit Sitz in Washington, D.C., verleiht die Oparinmedaille als höchste Auszeichnung für herausragende Forschungsleistungen zum Verständnis der chemischen Evolution. Seit 1980 wurden insgesamt acht Forscher damit ausgezeichnet.

**Erwin Schrödinger** (1887–1961): Als Physiker und Mitbegründer der Quantenmechanik ist der in Wien geborene Erwin Schrödinger den meisten Österreicherinnen und Österreichern gut bekannt. Der Umstand, dass er auf den von 1983 bis 1998 im Umlauf befindlichen 1.000 Schilling-Banknoten abgebildet war, hat diese Bekanntheit sehr gesteigert. Schon 1933 hatte Schrödinger den Nobelpreis für Physik erhalten. Weitaus weniger bekannt sind seine Ansichten zur Funktion lebender Systeme. Nachdem er 1943 am Trinity College in Dublin öffentliche Vorträge zum Thema „Was ist Leben?“ gehalten hatte, veröffentlichte er diese ein Jahr später in Buchform unter dem Titel „*What is life? The physical aspect of the living cell*“ (SCHRÖDINGER, 1944). Besonderes Augenmerk widmete er dem Problem der Entropieverminderung in lebenden Organismen, die im Gegensatz zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu stehen scheint. Dieser Widerspruch ist jedoch nur ein scheinbarer, da Lebewesen offene Systeme sind. Sie entnehmen ihrer Umwelt negative Entropie (Ordnung) als Nahrung, um dem eigenen thermodynamischen Verfall entgegenzuwirken. Durch die Nahrungsaufnahme und den Stoffwechsel verringert sich die körpereigene Entropie, während gleichzeitig die Entropie der Umwelt und die des Gesamtsystems zunehmen. Letzteres steht im Einklang

mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Da die Struktur der DNA-Doppelhelix erst etwa zehn Jahre später geklärt wurde (WATSON & CRICK, 1953), konnte Schrödinger noch nichts über die chemische Natur der Gene und den Prozess der Informationsübertragung aussagen. Er wies jedoch darauf hin, dass sich dieser Code für den Bauplan des Organismus in den Chromosomen befinden müsse.

**Leslie Orgel** (1927–2007): Die von ihm formulierte Regel „*Evolution is cleverer than you are*“ ist als Orgels Regel bekannt geworden. Der in London geborene und seit 1964 in San Diego (Kalifornien) als Molekularbiologe tätige Chemiker Leslie Orgel war ein Anhänger jener Ursuppenhypothesen, die ein erstes selbstreplizierendes System aus Nucleinsäuren ohne Beteiligung von Proteinen und Enzymen annehmen (ORGEL, 1968). Damit war er ein Wegbereiter der später formulierten RNA-Welt-Hypothese von GILBERT (1986).

**Manfred Eigen** (1927–2019): Als wissenschaftliches Mitglied und späterer Direktor des Max-Planck-Instituts für physikalische Chemie in Göttingen entwickelte Manfred Eigen kinetische Methoden zur Untersuchung von schnellen chemischen Reaktionen. 1967 wurde er dafür mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet. Später beschäftigte er sich mit Enzymreaktionen und der Mutationshäufigkeit von Nucleinsäuren. Die von ihm vorgeschlagenen Hyperzyklen sind ein Modell für die präbiotische Entstehung replikationsfähiger chemischer Systeme (EIGEN & SCHUSTER, 1979; EIGEN, 1971). Sie bestehen aus mehreren Einzelzyklen aus RNA und Proteinen, die sich in gegenseitiger Abhängigkeit produzieren und katalysieren. Dieses Modell gehört zur Gruppe der Ursuppenhypothesen. Wegen der synchronen Entstehung von Nucleinsäuren und Polypeptiden ergibt das den Weg A → ABC, sofern präbiotische Homochiralität stillschweigend angenommen wird.

**Alexander Graham Cairns-Smith** (1931–2016): Der schottische Chemiker und Molekularbiologe Cairns-Smith ist einer der radikalsten Kritiker der RNA-Welt und anderer Ursuppenhypothesen. In seinem Buch „*Seven Clues to the Origin of Life*“ (CAIRNS-SMITH, 1985), das 1993 auch in deutscher Übersetzung erschienen ist, vertritt er die Ansicht, dass Tonminerale das erste replikationsfähige ‚Genmaterial‘ gewesen seien. Erst später sei die in ihnen gespeicherte Information auf organische Stoffe wie beispielsweise Nucleinsäuren übertragen worden. Wegen weitgehend fehlender experimenteller Befunde wird diese Hypothese des *genetic takeover* von der Mehrzahl der Abiogenese-Forschenden abgelehnt. Das erste Auftreten von Homochiralität steht bei dieser Hypothese nicht im Vordergrund, fortpflanzungsfähige mineralische Information soll aber schon vor dem ersten Stoffwechsel aufgetreten sein. Das entspräche den beiden alternativen Wegen C → AC → ABC oder C → BC → ABC.

**Walter Gilbert** (\*1932): Er ist der Begründer der RNA-Welt-Hypothese (GILBERT, 1986; Abb. 19), wonach in einem frühen Stadium der Abiogenese die genetische Informationsübertragung durch RNA-Replikation in einer Nucleotid-Suppe erfolgt sein soll. Demnach wäre Nucleinsäure schon vor den ersten Polypeptiden und Proteinen entstanden (*information first*). Als Professor für Biochemie in Harvard entwickelte Walter Gilbert Methoden zur Bestimmung der Basensequenz in Nucleinsäuren und wur-



Abb. 19.  
Walter Gilbert (\*1932), der Begründer der RNA-Welt-Hypothese (Public-Domain-Bild der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika).

de dafür 1980 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Seine RNA-Welt-Hypothese ist das von vielen, insbesondere US-amerikanischen Abiogenese-Forschern bevorzugte Szenario der Urzeugung in einem ‚kleinen warmen Teich‘. Präbiotische Homochiralität wird dabei stillschweigend vorausgesetzt. Unter Berücksichtigung eventueller Prä-RNA-Welten entspricht diese Hypothese dem Weg  $A \rightarrow AC \rightarrow ABC$ .

**Christian de Duve** (1917–2013): Der belgische Biochemiker und Zellforscher Christian de Duve erhielt 1974 für seine Forschungen zur Funktionsweise der Zellen den Nobelpreis für Medizin. Die von ihm formulierte Hypothese der Thioester-Welt (DE DUVE, 1995) versucht zu erklären, woher die für den Aufbau von Biomolekülen erforderlichen Reduktionsäquivalente, das heißt die für die Reduktion benötigten Elektronen stammen, wenn die Uratmosphäre nicht selbst stark reduzierend war. Die durch Sonnen-UV-Strahlung präbiotisch gebildeten Thioester (Ester mit einem oder zwei Schwefelatomen) liefern den für die Reduktion von  $\text{CO}_2$  und anderen oxidierten Bestandteilen der Uratmosphäre benötigten Wasserstoff. Durch die Reaktion mit Phosphat entstehen in weiterer Folge die molekularen Bausteine der RNA-Welt. Somit ist die Thioester-Welt von De Duve ein Modell für eine mögliche Prä-RNA-Welt. Da in diesem Modell ein chemoautotropher Stoffwechsel schon vor der komplementären Replikation von Genmaterial entstanden sein soll, ergibt das den Weg  $A \rightarrow AB \rightarrow ABC$ , sofern präbiotische Homochiralität angenommen wird.

**Günter Wächtershäuser** (\*1938): Der Münchner Patentanwalt und Honorarprofessor für evolutionäre Biochemie Günter Wächtershäuser entwickelte in den 1980er Jahren seine Theorie der Eisen-Schwefel-Welt (WÄCHTERSHÄUSER, 1988, 1990a, b, 2000), wonach ein Oberflächen-Metabolismus auf den Kristallflächen von Pyrit die Reduktionsäquivalente für die Synthese organischer Moleküle zur Verfügung gestellt haben soll (*metabolism first*). Die Eleganz dieser Theorie liegt in dem Umstand, dass für diesen ersten Stoffwechsel kein Phosphat benötigt wird und die Homochiralität der ersten Biomoleküle eventuell auf die chirale Geometrie der involvierten Kristallflächen zurückzuführen ist, also zugleich mit dem ersten Stoffwechsel entstanden sein könnte. Replikationsfähiges Genmaterial hätte sich erst später gebildet. Wegen der möglicherweise synchronen Entstehung von Stoffwechsel und Homochiralität entspricht die Theorie von Wächtershäuser dem Weg  $AB \rightarrow ABC$ .

## Der Beitrag der Geowissenschaften

Diskussionen zum Problemkreis der Abiogenese und diesbezügliche Forschungen werden von Biochemikern und Molekularbiologen dominiert. Das gilt besonders für Fragen der Genetik, der Proteinsynthese und des frühen organischen Stoffwechsels. Andererseits haben auch Physiker zum besseren Verständnis der Energiebilanzen lebendiger System beigetragen (SCHRÖDINGER, 1944; MAST et al., 2010, 2013). Besonders das Homochiralitätsproblem war und ist eine interdisziplinäre Streitfrage. Forscher verschiedenster Disziplinen, wie zum Beispiel Elementarteilchenphysiker, Astrophysiker, Kometen- und Meteoritenforscher, Chemiker, Zellbiologen und Physiologen haben versucht, dieses Rätsel zu lösen, ohne dabei eine allgemein akzeptierte Antwort zu finden. Seit mehr als 170 Jahren (PASTEUR, 1848) ist dieses Problem ungelöst.

In einem unlängst erschienenen Buch über mögliche Ursprünge der biomolekularen Homochiralität (FUJIKI, 2019) befassen sich 16 Einzelbeiträge mit möglichen Szenarien der Chirogenese. Von den insgesamt über 45 Autorinnen und Autoren sind mehr als die Hälfte Chemiker, gefolgt von Elementarteilchenphysikern, Materialwissenschaftlern, Astrophysikern, Molekularbiologen und zwei Geowissenschaftlern (Ewald Hejl & Fritz Finger). Der interdisziplinäre Charakter dieses Forschungsthemas mit physikalisch-chemischem Schwerpunkt ist evident. Der Beitrag der Geowissenschaften ist einstweilen noch gering, zeigt jedoch eine steigende Tendenz. Ein gutes Beispiel für die Bedeutung der Geowissenschaften ist die Europäische Kometenmission Rosetta, die von 2014 bis 2016 den Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko erforscht hat (MÖHLMANN & ULAMEC, 2014). Der aus Salzburg stammende Projektleiter der Landungseinheit Philae heißt Stephan Ulamec und ist ausgebildeter Geophysiker. Im Rahmen seiner Tätigkeit für die ESA beschäftigt er sich mit Analysen von Kometenmaterial und mit der Planung zukünftiger Raumfahrtprojekte zu Kometen und Asteroiden.

Wie schon eingangs erwähnt, konnte der Zeitraum, in dem die irdische Abiogenese stattfand, anhand geowissenschaftlicher Befunde auf die Zeit vor ca. 4 bis 3,5 Milliarden Jahren eingengt werden. Isotopengeologische, geochemische, petrologische und paläontologische Methoden sind für die Erforschung der Frühzeit des Lebens auf der Erde unverzichtbar. Ohne die dadurch gewonnene, faktische Evidenz wäre es nie möglich, die Abiogenese und deren Rahmenbedingungen zu verstehen. Auch die Astrobiologie, die sich mit der Suche nach außerirdischem Leben im Allgemeinen und auf erdähnlichen Exoplaneten im Besonderen beschäftigt, benötigt geowissenschaftliche Erkenntnisse und Methoden. An der Entwicklung spezieller Detektoren für Raumsonden, die auf fremden Himmelskörpern nach Spuren von Leben suchen, werden auch Mineralogen und andere Geowissenschaftler beteiligt sein (siehe GIRI et al., 2018). Manche Experimente und Hypothesen zur Chirogenese und zur Abiogenese im Allgemeinen basieren auf mineralogischem und petrologischem Fachwissen (CAIRNS-SMITH, 1966, 1985; WÄCHTERSHÄUSER, 1988; HEJL & FINGER, 2018). Da eine allgemein akzeptierte Lösung des Homochiralitätsproblems noch nicht gefunden wurde und eine terrestrische Chirogenese nicht ausgeschlossen werden kann, sind diesbezügliche Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Geowissenschaften durchaus möglich.

## Schlussbetrachtung

Bis auf weiteres müssen wir akzeptieren, dass die Erde der einzige Planet ist, von dem wir sicher wissen, dass er Leben beherbergt. Die schon eingangs erwähnte Einheitlichkeit des genetischen Codes und des genetischen Apparats (bestehend aus DNA, mRNA und tRNA) in allen bekannten Organismen ist ein sehr starkes Argument für die monophyletische Entstehung des irdischen Lebens. Etwas konkurrierende Systeme waren entweder nie vorhanden oder sind schon sehr früh – eventuell in einer Prä-RNA-Welt – ausgestorben. Ob der genetische Apparat und andere molekularbiologische Grundstrukturen des irdischen Lebens in gesetzmäßiger, nahezu unausweichlicher Weise entstanden sind oder das Ergebnis eines extrem unwahrscheinlichen (seltenen) Zufalls sind, lässt sich nicht schlüssig beantworten. Wir wissen nicht, ob der genetische Apparat nur auf der Erde einheitlich ist oder ob er im wahrsten Sinn des Wortes universell, also auch auf anderen Himmelskörpern und in fernen Galaxien realisiert ist.

Eine ganz ähnliche Unsicherheit behaftet die biomolekulare Homochiralität. Wenn es stimmt, dass diese auf eine inhärente Asymmetrie der Materie zurückzuführen ist, würde man die gleiche molekularbiologische Asymmetrie (nur L-Aminosäuren und D-Zucker) im gesamten Kosmos erwarten, also auch bei extraterrestrischem Leben, das unabhängig von jenem der Erde entstanden ist. Im Falle einer stochastischen Entstehung der Homochiralität wäre jedoch zu erwarten, dass es im Universum ungefähr gleich viele Lebewelten mit jeweils rechten oder linken Enantiomeren einer bestimmten Molekülart gibt.

Trotz dieser großen Unsicherheiten sollte nicht der Eindruck entstehen, dass bezüglich der Abiogenese und des außerirdischen Lebens alles möglich ist und man eigentlich gar nichts weiß. Es gibt relativ viele Szenarien, die schon beim heutigen Wissensstand mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können. So kann zum Beispiel in einer Welt, die nur aus Wasserstoff und Helium besteht, keine Kohlenstoffchemie, ja nicht einmal Wasser entstehen, und ohne Phosphor können sich keine Nukleinsäuren bilden. Daher scheiden die Atmosphären der Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun als Orte der Lebensentstehung mit sehr großer Wahrscheinlichkeit aus. Ähnlich wie die Sonne besteht Jupiter fast nur aus Wasserstoff und Helium (rund 75 Gew.-%  $H_2$ , 24 Gew.-% He). Methan, Ammoniak und Elemente höherer Ordnungszahl sind nur in Spuren vorhanden (RAUCHFUß, 2005). Bemerkenswert ist der sehr geringe Wassergehalt, der weniger als das  $10^{-4}$ -fache des molaren  $H_2$ -Gehalts beträgt (NIEMANN et al., 1996; YOUNG et al., 1996). Die Wolken des Jupiters bestehen vor allem aus gefrorenem Ammoniak, jedoch nicht aus kondensiertem Wasser oder Eis.

Aus gleichem Grund können auch die Kugelsternhaufen im Halo der Milchstraße als Orte der Lebensentstehung ausgeschlossen werden (Abb. 20). Sie bestehen aus sehr alten Sternen, deren Material nicht aus rezyklierten Elementen ehemaliger Supernovae hervorgegangen ist, sondern sich schon unmittelbar nach dem Urknall gebildet hatte. Daher bestehen die Sterne der Kugelsternhaufen praktisch nur aus Wasserstoff und Helium. Sollten sie von Planetensystemen umgeben sein, könnte es sich dabei nur um Gasplaneten handeln, die gleichfalls nur aus Wasserstoff und Helium bestehen.



Abb. 20. Kugelsternhaufen M80 im Sternbild Skorpion (Public-Domain-Bild der NASA, The Hubble Heritage Team). Die in diesem Sternhaufen enthaltenen, hunderttausenden Sterne und deren eventuell vorhandene Gasplaneten bestehen praktisch nur aus Wasserstoff und Helium. Gesteinsplaneten und Leben können in Kugelsternhaufen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Die Suche nach extraterrestrischem Leben wird sich daher auf so genannte Gesteinsplaneten (engl. *rocky planets*) oder Monde konzentrieren müssen. Sie bestehen zu einem großen Teil aus Silikaten und enthalten alle lebensnotwendigen Elemente. Außerdem sollten flüssiges Wasser (eventuell ein Ozean) und eine Atmosphäre vorhanden sein. Zu den Kandidaten in unserem Sonnensystem gehören der Mars in seiner Frühzeit, sowie der Jupitermond Europa und der Saturnmond Titan (siehe RAUCHFUß, 2005 und darin zitierte Literatur).

Die Entdeckung des ersten Exoplaneten (51 Pegasi b) in einem Orbit um einen sonnenähnlichen Stern gelang im Jahr 1995 dem Schweizer Astronomen Michel Mayor von der Universität Genf (MAYOR & QUELOZ, 1995). 2019 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik. Exoplaneten sind planetare Himmelskörper, die um einen anderen Stern als die Sonne kreisen. Dieser erste von Mayor entdeckte Exoplanet ist jedoch ein Gasplanet, der für einen Umlauf um das Zentralgestirn nur vier Tage benötigt. Mit der Transitmethode wurden in den folgenden Jahren jedoch weitere Exoplaneten entdeckt. Bei dieser Methode werden mittels präziser Photometrie die periodischen Helligkeitsabsenkungen beim Vorbeizug eines Planeten vor dem Zentralgestirn gemessen. Bis zur Jahrtausendwende wurden bereits mehr als 50 Exoplaneten entdeckt – darunter auch ein paar erdähnliche Planeten, deren Bahnen in der habitablen Zone eines Planetensystems liegen. Es konnte gezeigt werden, dass nicht nur sonnenähnliche Sterne (Gelbe Zwerge, d.h. Hauptreihensterne der Spektralklasse G), sondern auch die wesentlich häufigeren Roten Zwerge von erdähnlichen, das heißt steinigen Planeten umkreist werden. Damit hat sich das Suchgebiet für außerirdisches Leben enorm vergrößert.

Den ganz großen Durchbruch brachte das im Jahr 2009 gestartete Weltraumteleskop Kepler, das bis 2013 mehr als 2.000 neue Exoplaneten nachweisen konnte. Bis heute sind mehr als 4.000 Exoplaneten in mehr als 3.000 Planetensystemen bekannt. Rund ein Viertel dieser Exoplaneten liegen in der habitablen Zone und nicht wenige erfüllen die Grundvoraussetzungen für einen Planeten mit Leben (steinige Zusammensetzung mit schweren chemischen Elementen, Wasser, Atmosphäre). Wenn der vom Weltraumteleskop Kepler untersuchte Ausschnitt des Sternenhimmels auf die gesamte Galaxis hochgerechnet wird, ergibt das mehrere Milliarden von Planeten, auf denen sich eventuell Leben entwickeln konnte. Dabei sind die vielen Milliarden fremden Galaxien außerhalb unserer Milchstraße noch gar nicht berücksichtigt. Da man aber nicht weiß, ob die Abiogenese ein einzigartiger, seltener, häufiger oder sehr häufiger Vorgang auf erdähnlichen Planeten ist, erlaubt auch diese große Zahl potenziell bewohnbarer Planeten noch keine seriöse Schätzung der Anzahl extraterrestrischer Lebewelten. Faktische Evidenz für Leben kennen wir einstweilen nur von der Erde. Mit einem einzigen Planeten kann man keine Statistik machen. Erst die Entdeckung von außerirdischem Leben oder eine entsprechende chemische Signatur in der Atmosphäre von Exoplaneten würde die Informationslage entscheidend verbessern.

Noch wesentlich schwerer zu beantworten ist die Frage nach der Existenz außerirdischer intelligenter Zivilisationen, die unter dem Kürzel SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) bekannt geworden ist. Zur Berechnung der anzunehmenden Anzahl derzeit existierender Zivilisationen in unserer Galaxis, die zu interstellarer Kommunikation befähigt sind, wurde die Drake-Formel entwickelt (siehe CASTI, 1990; RAUCHFUß, 2005). Sie umfasst acht Faktoren, von denen nur vier semiquantitativ bekannt sind, und zwar die Sternentstehungsrate, der Anteil der Sterne mit Planetensystem, der Anteil der Sterne mit bewohnbaren Zonen und die mittlere Anzahl der Planeten je Planetensystem mit günstigen Bedingungen für die Lebensentstehung. Der Größenwert der anderen vier Faktoren ist unbekannt. Wir kennen weder die Wahrscheinlichkeit, mit der sich Leben auf geeigneten Planeten bildet, noch den Anteil der Lebewelten, die zu intelligentem Leben führen. Auch der relative Anteil von Zivilisationen, die zu interstellarer Kommunikation befähigt sind, und die durchschnittliche Zeitspanne, die sie tatsächlich dafür aufwenden, sind unbekannt. Wenn

man bedenkt, dass die drahtlose Telegraphie erst um das Jahr 1895 von Guglielmo Marconi (1874–1937) erfunden wurde, und man die seither verstrichenen 125 Jahre durch das Alter der Erde ( $4,55 \cdot 10^9$ ) dividiert, erhält man  $2,75 \cdot 10^{-8}$ . Das ist die Wahrscheinlichkeit mit der man bei einer zufälligen Beprobung der Erde in ihrer bisherigen Geschichte intelligentes Leben, das zumindest theoretisch zu interstellarer Kommunikation befähigt ist, angetroffen haben könnte. Die Wahrscheinlichkeit, nur Cyanobakterien zu finden, ist ungefähr 10 Millionen Mal größer. Man mag hier zwar einwenden, dass unsere Zivilisation noch länger existieren wird und wir erst am Anfang einer sehr langen und grandiosen Entwicklung stehen, aber das ist nicht sicher.

Martin Quack von der ETH Zürich ist der Ansicht, dass man zuerst nach terrestrischer Intelligenz suchen und sich erst später dem SETI-Programm zuwenden sollte. Quack im O-Ton: „*One could argue that rather than addressing the very difficult project of a search for extraterrestrial intelligence, one should start with a “Search for Terrestrial Intelligence” (STI). Indeed, I have done personal researches in this direction. I have searched with political and religious leaders, scientists, university administrations, and so forth and was consistently disappointed. No terrestrial intelligence to be found anywhere.*“ (QUACK, 2014: 281).

Zu ganz ähnlichen Schlüssen kommt der emeritierte Professor für Geografie an der Universität Salzburg, Helmut Riedl, im Jahr 2012, indem er dem akademischen Zeitgeist bezüglich seiner Bildungsideale, seiner oftmals zu eng fokussierten Forschungsleistungen und der Überbewertung diverser Rankings eine unzureichende Selbstreflexion attestiert (RIEDL, 2012). Mit diesen ernüchternden Befunden möchte ich meine Ausführungen zur chemischen Evolution und zum Ursprung des Lebens abschließen.

## Dank

Mein Dank gilt dem Wissenschaftsfonds FWF (Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung, Sensengasse 1, 1090 Wien) für die Förderung des Forschungsprojektes P 30444-N28 (Fission tracks in enantiomorphic minerals as a putative key to biomolecular chirogenesis).

## Literatur

- BAILEY, J. (2000): Astronomical sources of circularly polarized light and the origin of homochirality. – *Origins of life and evolution of the biosphere*, **31**, 167–183, Heidelberg (Springer).
- BAILEY, J., CHRYSOSTOMOU, A., HOUGH, J.H., GLEDHILL, T.M., MCCALL, A., CLARK, S., MÉNARD, F. & TAMURA, M. (1998): Circular polarization in star-forming region: Implications for biomolecular homochirality. – *Science*, **281**, 672–674, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- BAUMHAUER, H. (1882): Ueber den Nephelin. – *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, **6**, 209–216, Berlin (de Gruyter).
- BAUMHAUER, H. (1891): Ueber die Krystallisation des Nephelin. – *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, **18**, 611–618, Berlin (de Gruyter).
- BERLAKOVICH, J. (2007): Rechtsfahrordnung: Fahren wir auf der falschen Seite? – *Die Presse*. <https://amp.diepresse.com/349088>
- BIBRING, J.-P., ROSENBAUER, H., BOENHARDT, H., ULAMEC, S., BIELE, J., ESPINASSE, S., FEUERBACHER, B., GAUDON, P., HEMMERICH, B., KLETZKINE, P., MOURA, D., MUGNUOLO, R., NIETNER, G., PÄTZ, B., ROLL, R., SCHEUERLE, H., SZEGÖ, K., WITTMANN, K. & PHILAE PROJECT OFFICE AND THE ENTIRE PHILAE TEAM 9 (2007): The Rosetta Lander („Philae“) investigations. – *Space Science Reviews*, **128**, 205–220, Heidelberg (Springer).
- BLAKE, R.E., CHANG, S.J. & LEPLAND, A. (2010): Phosphate oxygen isotopic evidence for a temperate and biologically active Archaean ocean. – *Nature*, **464**, 1029–1032, London (Macmillan Publishers).
- BLICHERT-TOFT, J., ARNDT, N.T. & LUDDEN, J.N. (1996): Precambrian alkaline magmatism. – *Lithos*, **37**, 97–111, Amsterdam (Elsevier).

- BOEHNHARDT, H., BIBRING, J.-P., APATHY, I., AUSTER, H.U., FINZI, A.E., GOESMANN, F., KLINGELHÖFER, G., KNAPMEYER, M., KOFMAN, W., KRÜGER, H., MOTTOLA, S., SCHMIDT, W., SEIDENSTICKER, K., SPOHN, T. & WRIGHT, I. (2017): The Philae lander mission and science overview. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, **375**, 1–20, London (Royal Society).
- BONNER, W.A. (1995): Chirality and life. – *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, **25**, 175–190, Heidelberg (Springer).
- BONNER, W.A., KAVASMANECK, P.R., MARTIN, F.S. & FLORES, J.J. (1974): Asymmetric adsorption of alanine by quartz. – *Science*, **186**, 143–144, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- BORCHERS, A.T., DAVIS, P.A. & GERSHWIN, M.E. (2004): The asymmetry of existence: do we owe our existence to cold dark matter and the weak force? – *Experimental Biology and Medicine*, **229**, 21–32, Thousand Oaks, California (SAGE Publishing).
- BRÜCKNER, H. & WESTHAUSER, T. (2003): Chromatographic determination of L- and D-amino acids in plants. – *Amino Acids*, **24**, 43–55, Heidelberg (Springer).
- CAIRNS-SMITH, A.G. (1966): The origin of life and the nature of the primitive gene. – *Journal of Theoretical Biology*, **10**, 53–88, Amsterdam (Elsevier).
- CAIRNS-SMITH, A.G. (1985): Seven clues to the origin of life. A scientific detective story. – XII + 131 S., Cambridge (Cambridge University Press).
- CASTI, J.L. (1990): Verlust der Wahrheit – Streitfragen der Naturwissenschaften. – 688 S., München (Droemersch Verlagsgesellschaft Th. Knauer Nachf.).
- CHURCHILL, H., TENG, H. & HAZEN, R.M. (2004): Correlation of pH-dependent surface interactions forces to amino acid adsorptions: implications for the origin of life. – *American Mineralogist*, **89**, 1048–1055, Chantilly, Virginia, USA (Mineralogical Society of America).
- CODY, G.D., BOCTOR, N.Z., FILLEY, T.R., HAZEN, R.M., SCOTT, J.H., SHARMA, A. & JODER, H.S. (2000): Primordial carbonylated iron-sulfur compounds and the synthesis of pyruvate. – *Science*, **289**, 1337–1340, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science). <https://dx.doi.org/10.1126/science.289.5483.1337>
- DAWSON, J.B., PINKERTON, H., NORTON, G.E. & PYLE, D.M. (1990): Physicochemical properties of alkali carbonatite lavas. Data from the 1988 eruption of Oldoinyo Lengai, Tanzania. – *Geology*, **18**, 260–263, Boulder, Colorado (Geological Society of America).
- DE DUVE, C. (1995): Aus Staub geboren: Leben als kosmische Zwangsläufigkeit. – 549 S., Heidelberg (Spektrum).
- DRYZUN, C., MASTAI, Y., SHVALB, A. & AVNIR, D. (2009): Chiral silicate zeolites. – *Journal of Materials Chemistry*, **19**, 2062–2069, Cambridge (Royal Society of Chemistry). <https://dx.doi.org/10.1039/b817497k>
- EIGEN, M. (1971): Self-organization of matter and the evolution of biological macromolecules. – *Naturwissenschaften*, **58**, 465–523, Heidelberg (Springer).
- EIGEN, M. & SCHUSTER, P. (1979): The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. – 92 S., Berlin (Springer).
- FENN, P.M. (1986): On the origin of graphic granite. – *American Mineralogist*, **71**, 325–330, Chantilly, Virginia (Mineralogical Society of America).
- FERRIS, J.P., HILL, A.R., LIU, R. & ORGEL, L. (1996): Synthesis of long prebiotic oligomers on mineral surfaces. – *Nature*, **381**, 59–61, London (Macmillan Publishers).
- FRONDEL, C. (1978): Characters of quartz fibers. – *American Mineralogist*, **63**, 17–27, Chantilly, Virginia (Mineralogical Society of America).
- FUJIKI, M. (Ed.) (2019): Possible Scenarios for Homochirality on Earth. – 306 S., Basel (MDPI).
- GILBERT, W. (1986): The RNA world. – *Nature*, **319**, 618, London (Macmillan Publishers).
- GIRI, C., JIA, T., CLEAVES, H.J., USUI, T., BODAS, T., CARR, C., CHEN, H., FUJII, Y., FURUKAWA, Y., GENDA, H., GILLAMS, R.J., HAMA-NO, K., KAMEDA, S., KRISHNAMURTHY, R., MEINERT, C., MERINGER, M., PAKNIKAR, K., RAJAMANI, S., SHIVAJI, S., STEELE, A., TANIGUCHI, M., YABUTA, H. & YAMAGISHI, A. (2018): Life-detection technologies for the next two decades. – White paper submitted to the National Academy of Sciences in support of the Astrobiology Science Strategy for the Search for Life in the Universe, arXiv:1810.06026 [astro-ph.EP].
- GOESMANN, F., ROSENBAUER, H., ROLL, R., SZOPA, C., RAULIN, F., STERNBERG, R., ISRAEL, G., MEIERHENRICH, U., THIEMANN, W. & MUÑOZ CARO, G.M. (2007): COSAC, the cometary sampling and composition experiment on Philae. – *Space Science Reviews*, **128**, 257–280, Heidelberg (Springer).
- GOESMANN, F., ROSENBAUER, H., BREDEHÖFT, J.H., CABANE, M., EHRENFREUND, P., GAUTIER, T., GIRI, C., KRÜGER, H., LE ROY, L., MACDERMOTT, A.J., MCKENNA-LAWLOR, S., MEIERHENRICH, U.J., MUNOZ CARO, G.M., RAULIN, F., ROLL, R., STEELE, A., STEININGER, H., STERNBERG, R., SZOPA, C., THIEMANN, W. & ULAMEC, S. (2015): Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry. – *Science*, **349**/6247, aab0689, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science). <https://dx.doi.org/10.1126/science.aab0689>
- GOLDBERG, S.I., CROSBY, J.M., LUSEM, N.D. & YOUNES, U.E. (1987): Racemic origins of the stereochemically homogeneous biosphere. Biased stereoselectivities in the formation of oligomeric peptides. – *Journal of the American Chemical Society*, **109**, 823–830, Washington, D.C. (ACS).
- HALDANE, J.B.S. (1928): The Origin of Life. – *Rationalist Annual*, **148**, 3–10, London.
- HAZEN, R.M. (2004): Chiral crystal faces of common rock-forming minerals. – In: PÁLYI, G., ZUCCHI, C. & CAGLIOTI, L. (Hrsg.): *Progress in Biological Chirality*, Chapter 11, 137–151, New York (Elsevier).
- HAZEN, R.M. (2006): Mineral surfaces and the prebiotic selection and organization of biomolecules. – *American Mineralogist*, **91**, 1715–1729, Chantilly, Virginia (Mineralogical Society of America).
- HEJL, E. (2016): First observation of etched uranium fission tracks in nepheline by Hermann Traube (1895)? – *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, **162**, 83–90, Wien.
- HEJL, E. (2017): Are fission-tracks in enantiomorphic minerals a key to the emergence of homochirality? – *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, **194**, 97–106, Stuttgart (Schweizerbart).
- HEJL, E. & FINGER, F. (2018): Chiral proportions of nepheline originating from low-viscosity alkaline melts. A pilot study. – *Symmetry*, **10**, 410, Basel (MDPI). <https://dx.doi.org/10.3390/sym10090410>
- HERITSCH, H. (1953): Die Verteilung von Rechts- und Linksquarzen in Schriftgraniten. – *Tschermak's Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **3**, 115–125, Wien (Springer).
- HESS, P.C. (1971): Polymer model of silicate melts. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **35**, 289–306, Amsterdam (Elsevier).
- HESS, P.C. (1980): Polymerization model for silicate melts. – In: HARGRAVES, R.B. (Hrsg.): *Physics of Magmatic Properties*, 3–48, Princeton (Princeton University Press).
- HOLM, N.G. (1992): Why are hydrothermal systems proposed as a plausible environment for the origin of life? – In: HOLM, N.G. (Hrsg.): *Marine Hydrothermal Systems and the Origin of Life*, 5, Dordrecht (Kluwer).

- HUBER, C. & WÄCHTERSCHÄUSER, G. (1998): Peptides by activation of amino acids with CO on (Ni,Fe)S surfaces: implications for the origin of life. – *Science*, **281**, 670–672, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science). <https://dx.doi.org/10.1126/science.281.5377.670>
- IDELSON, M. & BLOUT, E.R. (1958): Polypeptides. XVIII. A kinetic study of the polymerization of amino acid N-carboxyanhydrides initiated by strong bases. – *Journal of the American Chemical Society*, **80**, 2387–2393, Washington, D.C. (ACS).
- KLABUNOVSKII, E. (2001): Can enantiomorphic crystals like quartz play a role in the origin of homochirality on earth? – *Astrobiology*, **1**, 127–131, New Rochel, NY (Mary Ann Liebert).
- KLABUNOVSKII, E. & THIEMANN, W. (2000): The role of quartz in the origin of optical activity on Earth. – *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, **30**, 431–434, Heidelberg (Springer).
- KOEBERL, C. (2006): The record of impact processes on the early Earth – a review of the first 2.5. billion years. – In: REIMOLD, W.U. & GIBSON, R.L. (Hrsg.): *Processes of the Early Earth*, Geological Society of America Special Paper, **405**, 1–22, Boulder (Geological Society of America).
- KONDEPUDI, D.K. & ASAKURA, K. (2001): Chiral autocatalysis, spontaneous symmetry breaking, and stochastic behavior. – *Accounts of Chemical Research*, **34**, 946–954, Washington, D.C. (American Chemical Society).
- KONDEPUDI, D.K., KAUFMANN, R.J. & SINGH, N. (1990): Chiral symmetry breaking in sodium chlorate crystallization. – *Science*, **250**, 275–276, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- KOSHLAND, D.E. (2002): The seven pillars of life. – *Science*, **295**, 2215, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- LAHAV, N., WHITE, D. & CHANG, S. (1978): Peptide formation in the prebiotic era: Thermal condensation of glycine in fluctuating clay environments. – *Science*, **201**, 67–69, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- LEE, T.D. & YANG, C.N. (1956): Question of parity conservation in weak interaction. – *Physical Review*, **104**, 254–258, College Park, Maryland (American Physical Society).
- LEMMLEIN, G.G. (1973): *Morphology and Genesis of Crystals*. – 327 S., Moskau (Nauka Publisher). [auf Russisch]
- LEPLAND, A., ARRHENIUS, G. & CORNELL, D. (2002): Apatite in early Archean Isua supracrustal rocks, southern West Greenland: its origin, association with graphite and potential as a biomarker. – *Precambrian Research*, **118**, 221–241, Amsterdam (Elsevier).
- LUISE, P.L. (1998): About various definitions of life. – *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, **28**, 613–622, Heidelberg (Springer).
- LUISE, P.L. & VARELA, F.J. (1990): Self-replication micelles: A chemical version of minimal autopoietic system. – *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, **19**, 633–643, Heidelberg (Springer).
- MASON, S.F. & TRANTER, G.E. (1983): The parity-violating energy difference between enantiomeric molecules. – *Chemical Physics Letters*, **94**, 34–37, Amsterdam (Elsevier).
- MAST, C., OSTERMAN, N. & BRAUN, D. (2010): Disequilibrium first: the origin of life. – *Journal of Cosmology*, **10**, 3305–3314, Cambridge, Massachusetts (Cosmology Science Publishers).
- MAST, C., MÖLLER, F.M. & BRAUN, D. (2013): Lebendiges Nichtgleichgewicht. Unter welchen physikalischen Bedingungen kann Leben entstehen? – *Physik Journal*, **12/10**, 29–35, Weinheim (Wiley-VCH).
- MAYOR, M. & QUELOZ, D. (1995): A Jupiter-mass companion to a solar-type star. – *Nature*, **378**, 355–359, London (Macmillan Publishers).
- MEIERHENRICH, U.J. (2008): *Amino Acids and the Asymmetry of Life*. – XII + 241 S., Heidelberg (Springer).
- MEIERHENRICH, U.J. (2009): Spuren aus dem Weltraum: Aminosäuren und die Entstehung des Lebens. – *Chemie in unserer Zeit*, **43**, 204–209, Weinheim (Wiley-VCH). <https://dx.doi.org/10.1002/ciuz.200900482>
- MEIERHENRICH, U.J. (2015): Comets and their Origin: The Tool to Decipher a Comet. – XXX + 352 S., Weinheim (Wiley-VCH).
- MEIERHENRICH, U.J., NAHON, L., ALCARAZ, C., BREDEHÖFT, J.H., HOFFMANN, S.V., BARBIER, B. & BRACK, A. (2005): Asymmetric vacuum UV photolysis of the amino acid leucine in the solid state. – *Angewandte Chemie – International Edition*, **44**, 5630–5634, Weinheim (Wiley-VCH).
- MEINERT, C., MYRGORODSKA, I., DE MARCELLUS, P., BUHSE, T., NAHON, L., HOFFMANN, S.V., LE SERGEANT D’HENDECOURT, L. & MEIERHENRICH, U.J. (2016): Ribose and related sugars from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogs. – *Science*, **352**, 208–212, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- MILLER, S.L. (1953): A production of amino acids under possible primitive earth conditions. – *Science*, **117**, 528–529, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- MILLER, S.L. & UREY, H.C. (1959): Organic compound synthesis on the primitive earth. – *Science*, **130**, 245–251, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- MODICA, P., MEINERT, C., DE MARCELLUS, P., NAHON, L., MEIERHENRICH, U.J. & LE SERGEANT D’HENDECOURT, L. (2014): Enantiomeric excess induced in amino acids by ultraviolet circularly polarized light irradiation of extraterrestrial ice analogs: a possible source of asymmetry for prebiotic chemistry. – *Astrophysical Journal*, **787**, 1–11, Washington, D.C. (American Astronomical Society).
- MÖHLMANN, D. & ULAMEC, S. (2014): *Raumsonde Rosetta: Die abenteuerliche Reise zum unbekanntem Kometen. Das Buch zur Mission*. – 159 S., Stuttgart (Franckh-Kosmos Verlag).
- MOJZSIS, S.J., ARRHENIUS, G., MCKEEGAN, K.D., HARRISON, T.M., NUTMAN, A.P. & FRIEND, C.R.L. (1996): Evidence for life on Earth before 3800 million years ago. – *Nature*, **384**, 55–59, London (Macmillan Publishers).
- MUÑOZ CARO, G.M., MEIERHENRICH, U.J., SCHUTTE, W.A., BARBIER, B., ARCONES SEGOVIA, A., ROSENBAUER, H., THIEMANN, W.H.-P., BRACK, A. & GREENBERG, J.M. (2002): Amino acids from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogues. – *Nature*, **416**, 403–406, London (Macmillan Publishers).
- MYRGORODSKA, I., MEINERT, C., MARTINS, Z., LE SERGEANT D’HENDECOURT, L. & MEIERHENRICH, U. (2016a): Quantitative enantioseparation of amino acids by comprehensive two-dimensional gas chromatography applied to non-terrestrial samples. – *Journal of chromatography, A*, **1433**, 131–136, Amsterdam (Elsevier).
- MYRGORODSKA, I., JAVELLE, T., MEINERT, C. & MEIERHENRICH, U.J. (2016b): Enantioselective gas chromatography in search of the origin of biomolecular asymmetry in outer space. – *Israel Journal of Chemistry*, **56**, 1016–1026, Weinheim (Wiley-VCH).
- NAGATA, Y., FUJIWARA, T., KAWAGUCHI-NAGATA, K., FUKUMORI, Y. & YAMANAKA, T. (1998): Occurrence of peptidyl D-amino acids in soluble fractions of several eubacteria, archaea and eukaryotes. – *Biochimica et Biophysica Acta*, **1379**, 76–82, Amsterdam (Elsevier).
- NIELSEN, P.E., EGHOLM, M., BERG, R.H. & BUCHARDT, O. (1991): Sequence-selective recognition of DNA by strand displacement with a thymine-substituted polyamide. – *Science*, **254**, 1497–1500, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- NIEMANN, H.B., ATREYA, S.K., CARIGNAN, G.R., DONAHUE, T.M., HABERMAN, J.A., HARPOLD, D.N., HARTLE, R.E., HUNTEN, D.M., KASPRZAK, W.T., MAHAFFY, P.R., OWEN, T.C., SPENCER, N.W. & WAY, S.H. (1996): The Galileo probe mass spectrometer: composition of Jupiter’s atmosphere. – *Science*, **272**, 846–849, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).

- OHTOMO, Y., KAKEGAWA, T., ISHIDA, A., NAGASE, T. & ROSING, M.T. (2014): Evidence for biogenic graphite in early Archean Isua metasedimentary rocks. – *Nature Geoscience*, **7**, 25–28, London (Nature Publishing Group).
- OPARIN, A.I. (1924): Der Ursprung des Lebens [in russischer Sprache: *Происхождение жизни*]. – 270 S., Moskau (Moskovskiy Rabochii).
- OPARIN, A.I. (1936): Die Entstehung des Lebens auf der Erde [in russischer Sprache: *Возникновение жизни на Земле*]. – 495 S., Moskau (Verlag der Akademie der Wissenschaften der UdSSR).
- ORGEL, L.E. (1968): Evolution of the genetic apparatus. – *Journal of Molecular Biology*, **38**, 381–393, Amsterdam (Elsevier).
- PALACHE, C., BERGMANN, G.B. & FRONDEL, C. (1962): Relative frequencies of left and right quartz. – In: FRONDEL, C. (Hrsg.): *The System of Mineralogy*, **17**, New York (John Wiley & Sons).
- PASTEUR, L. (1848): Recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire. – *Annales de Chimie et de Physique*, 3<sup>e</sup> série, **24**, 442–459, Paris.
- PIZZARELLO, S., ZOLENSKY, M. & TURK, K.A. (2003): Nonracemic isovaline in the Murchison meteorite: Chiral distribution and mineral association. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**, 1589–1595, Amsterdam (Elsevier).
- QUACK, M. (2014): On biomolecular homochirality as a quasi-fossil of the evolution of life. – *Advances in Chemical Physics*, **157**, 247–291, Hoboken, New Jersey (John Wiley & Sons). <https://dx.doi.org/10.1002/9781118959602.ch18>
- RAUCHFUß, H. (2005): *Chemische Evolution und der Ursprung des Lebens*. – XII + 401 S., Berlin–Heidelberg (Springer).
- RIEDL, H. (2012): *Wider den Zeitgeist*. – 112 S., Wiener Neustadt (Selbstverlag H. Riedl).
- SCHIDLÓWSKI, M. (1988): A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks. – *Nature*, **333**, 313–318, London (Macmillan Publishers).
- SCHOPF, J.W. (1993): Microfossils of the Early Archean Apex chert: new evidence of the antiquity of life. – *Science*, **260**, 640, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science). <https://dx.doi.org/10.1126/science.260.5108.640>
- SCHRÖDINGER, E. (1944): *What is life? The physical aspect of the living cell*. – 194 S., Cambridge (Cambridge University Press).
- SHAPIRO, R. (2000): The homopolymer problem in the origin of life. – *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, **30**, 243–244, Heidelberg (Springer).
- SOWERBY, S.J., EDELWITH, M. & HECKL, W.M. (1998): Self-assembly at the prebiotic solid-liquid interface: Structures of self-assembled monolayers of adenine and guanine bases formed on inorganic surfaces. – *Journal of Physical Chemistry*, **102**, 5914–5922, Washington, D.C. (American Chemical Society).
- STASIUK, M.V. & JAUPART, C. (1997): Lava flow shapes and dimensions as reflections of magma system conditions. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **78**, 31–50, Amsterdam (Elsevier).
- STRECKER, A. (1850): Ueber die künstliche Bildung der Milchsäure und einen neuen, dem Glycocollo homologen Körper. – *Annalen der Chemie und Pharmacie*, **75**, 27–45, Heidelberg. <https://dx.doi.org/10.1002/jlac.18500750103>
- TAKAHASHI, J. & KOBAYASHI, K. (2019): Origin of terrestrial bioorganic homochirality and symmetry breaking in the universe. – *Symmetry*, **11**, 919–929, Basel (MDPI). <https://dx.doi.org/10.3390/sym11070919>
- TRAUBE, H. (1895): Beiträge zur Kenntnis des Nephelins und des Davyns. – *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Palaeontologie*, IX Beilage-Band, 466–479, Stuttgart.
- WÄCHTERSCHÄUSER, G. (1988): Before enzymes and templates: theory of surface metabolism. – *Microbiology Reviews*, **52**, 452–484, Washington, D.C. (American Society for Microbiology).
- WÄCHTERSCHÄUSER, G. (1990a): Evolution of the first metabolic cycles. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **87**, 200–204, Washington, D.C.
- WÄCHTERSCHÄUSER, G. (1990b): The case for the chemoautotrophic origin of life in an iron-sulphur world. – *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, **20**, 173–176, Heidelberg (Springer).
- WÄCHTERSCHÄUSER, G. (1991): Biomolecules: The origin of the optical activity. – *Medical Hypotheses*, **36**, 307–311, Amsterdam (Elsevier).
- WÄCHTERSCHÄUSER, G. (2000): Life as we don't know it. – *Science*, **289**, 1307–1308, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).
- WALD, G. (1957): The origin of optical activity. – *Annals of the New York Academy of Sciences*, **69**, 352–368, New York (Wiley).
- WALSH, M.M. & LOWE, D.R. (1985): Filamentous microfossils from the 3,500-Myr-old Onverwacht Group, Barberton Mountain Land, South Africa. – *Nature*, **314**, 530–532, London (Macmillan Publishers).
- WATSON, J.D. & CRICK, F. (1953): *Molecular Structure of Nucleic Acids: A structure for Deoxyribose Nucleic Acid*. – *Nature*, **171**, 737–738, London (Macmillan Publishers).
- WEISS, A. (1981): Replikation und Evolution in anorganischen Systemen. – *Angewandte Chemie*, **93**, 843–845, Weinheim (Wiley-VCH).
- WESTALL, F., HICKMAN-LEWIS, K., HINMAN, N., GAUTRET, P., CAMPBELL, K.A., BRÉHÉRET, J.G., FOUCHER, F., HUBERT, A., SORIEUL, S., DASS, A.V., KEE, T.P., GEORGELIN, T. & BRACK, A. (2018): A hydrothermal-sedimentary context for the origin of life. – *Astrobiology*, **18/3**, 259–293, New Rochel, New York (Mary Ann Liebert). <https://dx.doi.org/10.1089/ast.2017.1680>
- WILDE, S.A., VALLEY, J.W., PECK, W.H. & GRAHAM, C.M. (2001): Evidence for detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. – *Nature*, **409**, 175–178, London (Macmillan Publishers).
- WU, C.S., AMBLER, E., HAYWARD, R.W., HOPPES, D.D. & HUDSON, R.P. (1957): Experimental test of parity conservation in beta decay. – *Physical Review*, **105**, 1413–1415, College Park, Maryland (American Physical Society).
- XU, H., ZHANG, J., YU, T., RIVERS, M., WANG, Y. & ZHAO, S. (2015): Crystallographic evidence for simultaneous growth in graphic granite. – *Gondwana Research*, **27**, 1550–1559, Amsterdam (Elsevier).
- YAMAGATA, Y. (1966): A hypothesis for the asymmetric appearance of biomolecules on earth. – *Journal of Theoretical Biology*, **11**, 495–498, Amsterdam (Elsevier).
- YAMAGATA, Y., WATANABE, H., SAITOH, M. & NAMBA, T. (1991): Volcanic production of polyphosphates and its relevance to prebiotic evolution. – *Nature*, **352**, 516–519, London (Macmillan Publishers).
- YOUNG, R.E., SMITH, M.A. & SOBECK, C.K. (1996): Galileo Probe: In-situ observations on Jupiter's atmosphere. – *Science*, **272**, 837–838, Washington, D.C. (American Association for the Advancement of Science).