

# Schritte zum Leben

Neue experimentelle Methoden und die Entdeckung erdähnlicher Exoplaneten bieten vielversprechende Ansätze, um der Entstehung des Lebens auf die Spur zu kommen.

Thomas K. Henning

Die Frage nach dem Ursprung des Lebens ist alt und trotz vieler Ansätze noch unbeantwortet. Die Entdeckung extrasolarer Gesteinsplaneten hat das Interesse daran neu entfacht und in einen astronomischen Kontext gestellt. Neue Konzepte, um den Übergang von lebloser zu lebender Materie zu verstehen, erfordern es, physikalische und chemische Perspektiven stärker zu berücksichtigen.

Die Entstehung des Lebens auf der Erde und möglicherweise auf anderen erdähnlichen (terrestrischen) Planeten steht am Ende einer langen Kette von Entwicklungsprozessen im Universum, von der Bildung der Galaxien bis hin zur Entstehung von Sternen und der mit ihnen verbundenen Planetensysteme [1, 2]. Die Entwicklung von Sternen hängt wiederum unmittelbar mit der Kernsynthese der für das Leben notwendigen Elemente zusammen, seien es Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff oder Phosphor und Schwefel. Zusammen mit Wasserstoff bilden sie die Grundelemente für die DNA, welche die Erbinformation trägt, und die in Proteinen vorkommenden Aminosäuren.

Unterdessen deuten viele astronomische Beobachtungen darauf hin, dass die Mehrzahl der Planeten Gesteinsplaneten sind, wie etwa der kürzlich um den sonnennächsten Stern Proxima Centauri entdeckte Planet [3] (Abb. 1). Dieser gehört zu einer Handvoll bislang entdeckter Gesteinsplaneten, die sich in der „bewohnbaren“ Zone befinden (Abb. 2), also dort, wo flüssiges Wasser existieren könnte. Proxima Centauri (Spektralklasse M6) ist allerdings ein sehr aktiver Stern, sodass unklar bleibt, ob tatsächlich Wasser auf dem Planeten existieren kann.

Eine spannende hochaktuelle Frage ist, wie wir aus der Spektroskopie von Planetenatmosphären auf biologische Aktivität schließen können. Diese Frage und wichtige Fortschritte in der Biophysik, Biochemie und makromolekularen Chemie, die grundlegende Einblicke in die Entstehung des Lebens versprechen, haben weltweit zu neuen Forschungsinitiativen geführt, auch in Deutschland (Infokasten).

Die Entwicklung des Universums können wir durch eine Kombination von gezielten Beobachtungen – oft von großen statistischen Stichproben von Galaxien, Sternen und Planeten – mit einem Gerüst physikalischer Gesetze beschreiben. Doch zwischen der Ent-

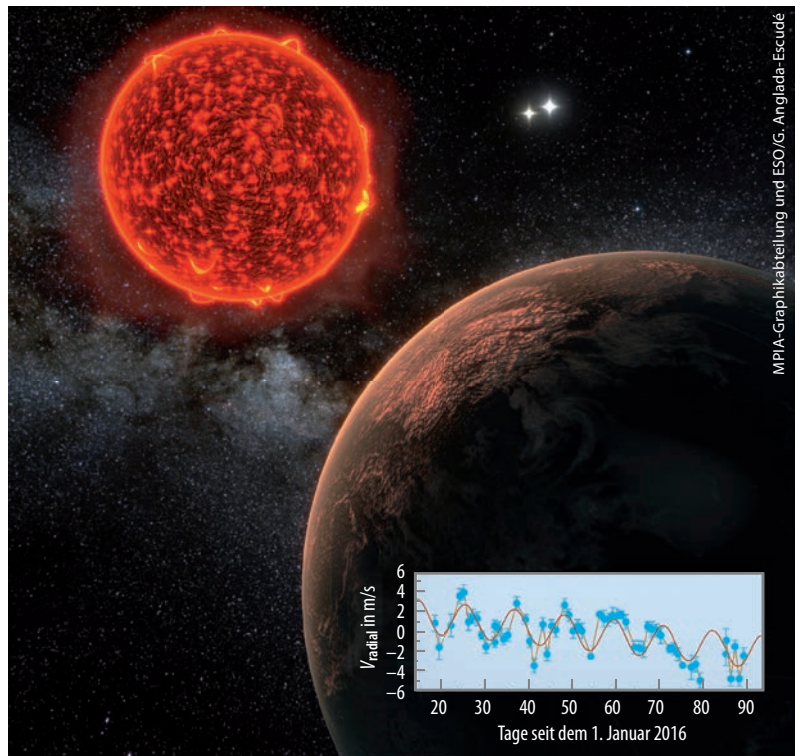


Abb. 1 Um den erdnächsten Stern Proxima Centauri, ein kühler roter Zwergstern, wurde 2016 ein terrestrischer Planet entdeckt. Proxima Centauri b ließ sich indirekt über die gemessene Radialgeschwindigkeitsveränderung des Sterns nachweisen (rote Kurve im Inset) und hat eine Umlaufperiode von 11,2 Tagen. Im Hintergrund sind die beiden Sterne Alpha Centauri A und B zu sehen.

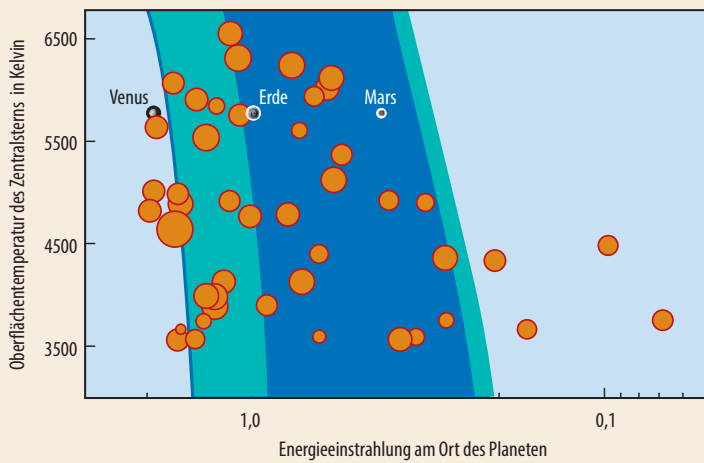
stehung der Erde vor 4,567 Milliarden Jahren und den Hinweisen auf erstes Leben vor etwa 3,5 Milliarden Jahren liegt ein „Dunkles Zeitalter“, in dem das Leben entstanden sein muss. Aber aus diesem Zeitraum besitzen wir heute keine unmittelbaren fossilen Befunde. Insofern kann man die Frage, wie das Leben entstan-

## KOMPAKT

- Physikalisch sind Lebewesen als offene Systeme fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht anzusehen, die einer Darwinschen Entwicklung mit fehlerbehafteter Informationsübertragung unterliegen.
- Noch fehlt aber ein wirklich befriedigendes physikalisches Systemverständnis von Leben.
- Eine wichtige Hypothese für den Übergang von leblosen zu lebendigen Systemen ist die Existenz einer RNA-Welt.
- Dank moderner Analysemethoden lassen sich präbiotische Reaktionen in einer „Ursuppe“ genauer studieren.

Prof. Dr. Thomas K. Henning, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg

NASA Ames/Wendy Stenzes/MPIA-Graphikabteilung



**Abb. 2** Die radiale Ausdehnung der Zone, in der flüssiges Wasser auf einem Planeten vorhanden sein kann (gemessen in der relativen Energieeinstrahlung) hängt von der Effektivtemperatur des jeweiligen Zentralsterns ab (türkis: optimistische Abschätzung; dunkelblau: konservative Abschätzung). Eingezeichnet sind die Positionen von Venus, Erde und Mars und der bis Ende 2016 bekannten 45 extrasolaren Planeten (orange) mit maximal doppelter Erdgröße.

den ist, in den Bereich der reinen Spekulation verweisen, oder man kann versuchen, gezielt Experimente und Theorien zu entwickeln, die aufzeigen, wie aus unbelebter Materie belebte Materie entstehen kann. Dabei geht es am Ende nicht um die Entstehung des Lebens auf der Erde in einer historischen Sichtweise, sondern um die viel allgemeinere Frage, wie sich Leben autonom aus einem System organischer Moleküle entwickeln kann.

### Was ist Leben?

„What is Life?“, so betitelte Erwin Schrödinger sein berühmtes Buch aus dem Jahr 1944. Darin beschäftigte er sich damit, wie wir Gesetze der Chemie und Physik zum Verständnis der Funktionsweise lebender Systeme heranziehen können. Dabei ging es zunächst darum, dass lebende Systeme offene Systeme fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht darstellen. Aus heutiger Sicht wäre hinzuzufügen dass sie einer Darwinschen Entwicklung mit fehlerbehafteter Informationsübertragung unterliegen müssen. Schrödinger postulierte, dass der Träger dieser Information ein „aperiodischer Kristall“ sein sollte, in dem die Information in der Konfiguration kovalenter Bindungen gespeichert ist. Diese Überlegung war zu seiner Zeit nicht vollkommen neu, sie ging aber der Entdeckung voraus, dass die DNA der Träger der Erbinformation in allen uns bekannten lebenden Systemen ist.

Um die Entwicklung selbstreproduzierender Moleküle in einem zyklischen autokatalytischen System zu beschreiben, entwickelten Manfred Eigen, Ruthild Winkler und Peter Schuster das abstrakte Modell des Hyperzyklus – eine zyklische Folge von sich wiederum selbst reproduzierenden Einzelzyklen. Diese Einzelzyklen bestehen aus RNA-Polymeren und Proteinen,

die untereinander gekoppelt sind und kooperieren (siehe [4] für einen Überblick der verschiedenen Erweiterungen des Modells). Dies war ein sehr fruchtbares Modell im Übergangsbereich zwischen chemischer und biologischer Evolution, welches zu vielen Diskussionen angeregt hat, sich aber bis heute nicht experimentell verifizieren ließ.

Allgemeinere kollektive autokatalytische Netzwerke bestehen aus Reaktionen und Molekülen, wobei jeweils ein Molekül durch wenigstens eine Reaktion gebildet wird und jede Reaktion durch wenigstens ein Molekül durch Katalyse getrieben ist. Diese Netzwerke theoretisch und experimentell zu untersuchen, bleibt ein wichtiges Forschungsfeld, wenn es darum geht, die Entstehung lebender Systeme zu verstehen. Theoretische Untersuchungen deuten darauf hin, dass sich solche Systeme in katalytischen Netzwerken mit hoher Wahrscheinlichkeit „spontan“ bilden können, selbst wenn die Katalyse nicht besonders effizient abläuft [5].

Bei der Annäherung an die Frage „Was ist Leben?“ können wir nicht nur versuchen herauszufinden, was die Physik und Chemie für die Biologie tun kann, sondern wir können uns auch die umgekehrte Frage stellen: Was können wir von dynamischen biologischen Systemen über Physik oder spezifischer über das Verhalten komplexer Systeme lernen? Es gibt mannigfaltige Versuche, lebende Systeme im Unterschied zu nichtlebender Materie zu definieren, etwa über Eigenschaften wie das Vorhandensein von Zellen, Metabolismus, Reproduktion und die Reaktion auf äußere Reize.

Keine dieser Definitionen ist wirklich befriedigend und hilft am Ende wenig, den Übergang zu lebenden Systemen zu verstehen. Daran zeigt sich sehr deutlich, dass uns ein umfassendes „physikalisches“ Systemverständnis lebender Systeme fehlt. Ist der Übergang von nichtlebender Materie zu lebenden Systemen ein Phasenübergang im statistischen Sinne? Und unterscheiden sich biologische Netzwerke qualitativ von ungeordneten Netzwerken in ihrem mathematisch definierten Informationsinhalt? Darauf scheinen erste Untersuchungen tatsächlich hinzudeuten (siehe Diskussion in [6]). Ein Ordnungsparameter bei einem solchen Phasenübergang könnte die „Homochiralität“ sein, die man bei biologischen Systemen beobachtet und die offensichtlich eine Symmetriebrechung darstellt. So liegen die natürlich vorkommenden Aminosäuren in L-Form vor, während die biologisch relevanten Zucker die D-Form besitzen – eine bestimmte Anordnung um das jeweilige Chiralitätszentrum.

### Von der RNA zur DNA

Leben – wie wir es heute kennen – basiert selbst in seiner einfachsten Form auf einer sehr komplexen DNA-Protein-Maschinerie. Die DNA speichert nicht nur die Information über die Proteinsequenz, sondern auch über den Zeitpunkt, wann die Proteine gebildet werden. Die Proteine wirken dagegen als Katalysatoren, unter anderem für die Polymerisierung der DNA.

Diese komplexe Maschinerie kann wohl kaum spontan entstanden sein.

Eine wichtige Hypothese für den Übergang von chemischen zu den heute bekannten biologischen Systemen postuliert die Existenz einer RNA-Welt als Zwischenstufe der Entwicklung von nichtlebender Materie zu lebenden Systemen. In einer solchen RNA-Welt würden die einfacheren RNA-Moleküle als Biopolymere sowohl die Informationsspeicherung und Informationsübertragung als auch die Katalyse übernehmen und letztlich Reproduktion und Lebensfähigkeit erlauben. Die Idee für die Existenz einer solchen RNA-Welt taucht bereits sehr früh bei Francis Crick auf. Die heute etablierte Bezeichnung „RNA-Welt“ geht auf ein Essay des Nobelpreisträgers Walter Gilbert aus dem Jahr 1986 zurück [7], in dem er die Entdeckung der katalytischen Eigenschaften von RNA kommentiert.

Tatsächlich sind viele Bestandteile der Zelle mit der Wirkung von RNA verbunden. Gleichzeitig gelang es zu zeigen, dass RNA als Katalysator (Ribozym) wirken kann (Abb. 3) und Darwinsche Entwicklung mit Reproduktion, Variation und Selektion auf molekularer Ebene im Prinzip möglich ist [8]. Dies geschieht allerdings unter sehr speziellen Laborbedingungen. Daher bleibt die Frage bestehen, ob sich unter den Bedingungen der frühen Erde ein robustes kollektives autokatalytisches Reaktionsnetzwerk herausbilden kann, welches eine Entwicklung erlaubt, nur eine Chiralität hat und schließlich auf die RNA hinführt. Tatsächlich konnten Nilesh Vaidya et al. [9] experimentell nachweisen, dass Mischungen von RNA-Fragmenten, die sich zu selbstreproduzierenden Ribozymen organisieren, spontan kooperative katalytische Zyklen und Netzwerke bilden. Dies zeigt, dass RNA-Populationen tatsächlich größere Komplexität durch Kooperation entwickeln können.

### Material für eine präbiotische Entwicklung

Geht man weiter in der Entwicklung zurück, so sollten die Bestandteile der RNA in ausreichendem Maße und über genügend lange Zeit an den Entstehungsorten des Lebens vorhanden gewesen sein. Die Ribonukleinsäure RNA ist als Polymer ein Polynukleotid, welches aus einer Kette von vielen Nukleotiden aufgebaut ist. Diese Ribonukleotide bestehen ihrerseits wiederum aus Ribose, einem Zuckermolekül mit fünf Kohlenstoffatomen, einem Phosphatrest und einer organischen Nukleobase (Adenin, Guanin, Cytosin oder Uracil).

Dass Ribose, Phosphatrest und Nukleobasen gemeinsam existieren, ist in keinerlei Weise trivial, denn die meisten Nukleobasen werden in wärmerem Wasser sehr schnell zerstört, und Ribose ist in leicht alkalischen Lösungen instabil. Phosphor kommt zwar in der Erdkruste vor, aber es ist unklar, wie man Phosphatgruppen in wässrigen Lösungen erhalten kann, denn die meisten phosphorhaltigen Mineralien lösen sich nicht in Wasser. Eine in diesem Zusammenhang sehr interessante, seit mehr als hundert Jahren bekannt

te „präbiotische“ Reaktion ist die Formose-Reaktion, bei der Formaldehyd an basischen Katalysatoren selbstkondensiert und am Ende zu einem komplexen Gemisch von Zuckern führt. Die Nukleobase Adenin kann durch Polymerisierung von HCN entstehen ([10] und für eine kritische Bestandsaufnahme [11]). Dabei ist interessant, dass Guanin, Adenin und Uracil in primitiven Meteoriten gefunden wurden, wie dies auch für eine Reihe von Aminosäuren der Fall ist [12]. Die Nukleobasen bilden sich in dieser Umgebung aus HCN, CO und NH<sub>3</sub> unter Anwesenheit von Wasser, was aus der protoplanetaren Scheibe stammt, in der sich die Mutterkörper der Meteoriten bilden. In Meteoriten kommt zudem das phosphorhaltige Mineral Schreibersit vor, das in Wasser Phosphorgruppen freisetzt. Meteoritisches Material ist damit ein interessanter „Materiallieferant“ für die präbiotische Entwicklung.

In kalten Molekülwolkenkernen, den Orten der Sternentstehung, in protoplanetaren Scheiben um junge Sterne und in Kometen ließ sich spektroskopisch die Existenz von molekularem Eis nachweisen, das hauptsächlich aus H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>OH und NH<sub>3</sub> besteht. Dieses Material ist der Bestrahlung durch UV-Licht und den hochenergetischen Ionen der kosmischen Strahlung ausgesetzt. Laborexperimente an Analogmaterial zeigten, dass sich auch unter diesen Bedingungen Aminosäuren (z. B. [13]) und Ribose bilden können [14].

In einer fundamentalen Arbeit konnte die Gruppe um John Sutherland zeigen, dass sich unter präbiotisch plausiblen Bedingungen – bei Anwesenheit von Glycoldehyd, Cyanamid, Glycerinaldehyd und Phosphaten – in einem systemischen Ansatz tatsächlich RNA synthetisieren lässt [15], wobei in

William G. Scott (Department of Chemistry and Biochemistry & The Center for the Molecular Biology of RNA, UC Santa Cruz)

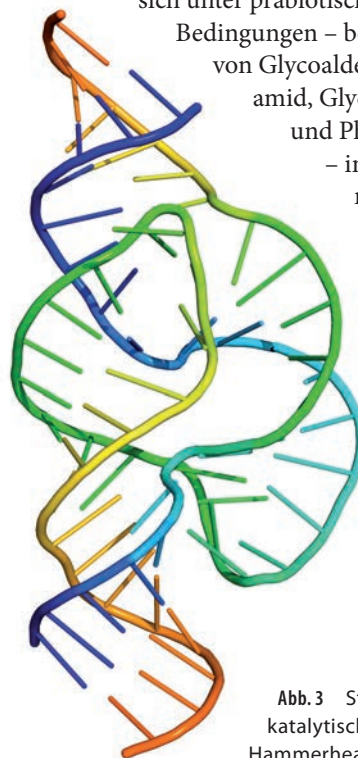


Abb. 3 Struktur eines katalytisch aktiven „Hammerhead“-Ribozyms.

eleganter Weise das Problem der Instabilität von Ribose umgangen wird. Man startet also nicht mit den einzelnen Bestandteilen der RNA, sondern mit einer Mischung von Vorgängermolekülen, die in einem komplexen Reaktionsnetzwerk RNA direkt bilden.



## Auf der frühen, festen Erde

Um die frühe präbiotische Entwicklung nachzuvollziehen, unter der die RNA-Welt oder verwandte Systeme entstanden sind, muss man sich der geochemischen Entwicklung zu der Zeit zuwenden, in der sich die Erde als fester Körper herausbildete.

Unser Sonnensystem entwickelte sich aus einer protoplanetaren Scheibe („Sonnennebel“). Die Erde sowie die anderen terrestrischen Planeten bildeten sich darin sehr wahrscheinlich in einer wasserarmen Zone durch die Gravitationswechselwirkung von „trockenen“ Planetesimalen, d. h. kilometergroßen Kleinkörpern aus Gas und Staub. Wasser kam erst in späteren Phasen der Planetenentstehung auf die Erde, oder nach dem Abschluss der Differenzierungsphase durch Akkretion von wasserreichem Material, in Form von Gesteinsteilchen, Asteroiden oder gestreuten Körpern aus dem Kuiper-Gürtel. Dieser Prozess ist mit Sicherheit mit der Akkretion von makromolekularem, organischem Material verbunden, wie wir es heute in primitiven Meteoriten finden und von dem bereits die Rede war.

Heute geht man davon aus, dass die frühe Erdatmosphäre nur leicht reduzierend war und hauptsächlich aus  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  und zu geringen Anteilen aus  $SO_2$  bestand [16]. Dagegen finden sich bei allen Riesenplaneten des Sonnensystems und beim größten Saturnmond Titan stark reduzierende Atmosphären, die aus  $H_2$ ,  $CH_4$  und möglicherweise  $NH_3$  bestehen. Titan belegt, dass unter den genannten Bedingungen leicht komplexe organische Verbindungen entstehen können. Dies ist bei schwach reduzierenden Atmosphären zumindest schwieriger. Das Bombardement der Erde mit meteoritischem Material, welches bereits Ribose und Nukleobasen enthält, könnte hier einen Ausweg bieten.

Nach der Verfestigung der Erdkruste stellt sich eine sehr vielfältige Oberflächentopologie der Erde ein, die für die Entstehung von Leben mit großer Sicherheit von Bedeutung war. Hier lassen sich verschiedene

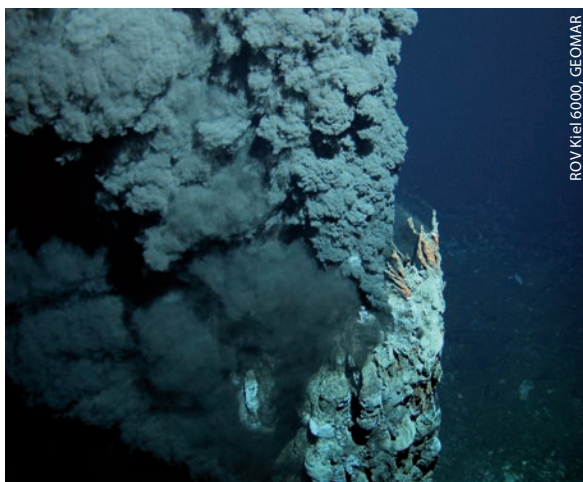


Abb. 4 Bei „Schwarzen Rauchern“, hier in einem hydrothermalen Feld im Mittelatlantik, tritt heißes Wasser durch ein mit Röhren versehenes mineralisches Material aus und mischt sich mit kaltem Umgebungswasser. Dabei werden Partikel abgetrennt, welche die „Rauchwolke“ bilden.

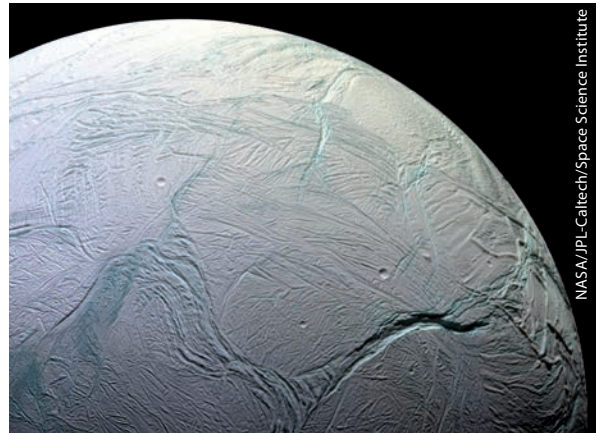


Abb. 5 Der Saturnmond Enceladus gehört zu den Orten in unserem Sonnensystem, die für die Suche nach biologischer Aktivität erfolgversprechend sein könnten.

mögliche „Habitate“ definieren und die mögliche Chemie in entsprechenden Systemen gezielt untersuchen. Isotopenuntersuchungen an Zirkonen – dem mit etwa 4,4 Milliarden Jahren ältesten heute identifizierbaren Mineral – zeigen, dass diese bereits zu jener Zeit mit flüssigem Wasser wechselwirkten und die Erde eine stabile Hydrosphäre besaß.

Von besonderem Interesse als „wässrige Systeme“ sind die hydrothermalen Unterwasserschloten (Abb. 4) sowie hydrothermale warme Seen. Unterwasserschloten und poröses Gestein können interessante Gradientensysteme (Temperatur, pH-Wert, chemische Zusammensetzung) erzeugen, die sich experimentell untersuchen lassen [17]. Wenn hydrothermale Seen periodische Trocken-Wasser-Phasen durchlaufen, wird das Material konzentriert, und die chemischen Systeme dieser Seen können mit UV-Strahlung wechselwirken. Im Falle der hydrothermalen Seen kann der Eintrag von meteoritischem Material tatsächlich eine komplexe präbiotische Chemie triggern. Hinzu kommt, dass in diesen Umgebungen Fe/FeS-Systeme oder Ton mit Mineralien wie dem Schichtsilikat Montmorillonit als Katalysatoren zur Verfügung stehen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass überzeugende Hinweise auf hydrothermale Reservoirs, die unter der Oberfläche liegen, auch bei dem Saturnsatelliten Enceladus gefunden wurden (Abb. 5).

In einer sehr umfangreichen genetischen Studie hat die Gruppe um den Düsseldorfer Mikrobiologen William F. Martin rekonstruiert, unter welchen Bedingungen die Urform der Lebewesen, der so genannte LUCA (Last Universal Common Ancestor), tatsächlich gelebt hat [18]. Der chemisch angetriebene Stoffwechsel dieses kernlosen Einzellers beruhte dabei wohl auf  $CO_2$ ,  $H_2$  und  $N_2$ . Die Daten legen nahe, dass diese Lebewesen in hydrothermalen Unterwasserschloten gelebt haben. Dies bedeutet natürlich nicht, dass wir jetzt wissen, wo und wie Leben entstanden ist, die Untersuchungen liefern uns aber dennoch interessante Informationen über einen frühen Metabolismus.

Im Laufe der weiteren Entwicklung der Erdatmosphäre zeigt sich die dramatische Wechselwirkung von

biologischer Aktivität und geochemischen Vorgängen. Ein besonderes Beispiel ist die teilweise Vereisung der Erde („Snowball Earth“) in zwei erdgeschichtlichen Epochen: zu Beginn (vor 2,4 bis 2,2 Milliarden Jahren) und am Ende (vor 700 bis 600 Millionen Jahren) des Proterozoikums, das die biologischen Systeme überleben mussten. Gleiches gilt für den am Ende durch Photosynthese und geochemische Entwicklung hervorgerufenen starken Anstieg an Sauerstoff vor etwa 2,3 Milliarden Jahren, der oft auch als Sauerstoffkatastrophe bezeichnet wird, da Sauerstoff für die damaligen anaeroben Lebewesen giftig war.

### Die Ursuppe im Labor

Obwohl die diskutierten theoretischen Konzepte für unser Verständnis der Entstehung des Lebens sicherlich von großer Bedeutung sind, kommt es am Ende darauf an, dass wir experimentell nachweisen, wie die verschiedenen Schritte über die RNA-Welt bis hin zur DNA-Protein-Welt ablaufen können. Dabei konzentrieren sich viele Arbeiten auf die Synthese der RNA-Bestandteile, wie wir sie schon betrachtet haben. Historisch war es wohl der russische Biochemiker Alexander Oparin, der in seinem Buch „The Origin of Life“ aus dem Jahr 1924 erstmals argumentierte, dass N-, C-, O-enthaltende Moleküle aus der Atmosphäre ausgerechnet sind und in Ozeanen komplexe Kolloidaggregate gebildet haben, in denen dann das Leben entstand. In weiteren Arbeiten galten das Sonnenlicht sowie Katalysatoren als wichtige Elemente der Chemie der Ursuppe. Der amerikanische Geochemiker Harold Urey spekulierte Anfang der 1950er-Jahre, dass die frühe Erdatmosphäre stark reduzierend war ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ) und die Bildung organischen Materials erlaubte. Sein Student, Stanley Miller, führte 1953 das so genannte Miller-Urey-Experiment durch (Abb. 6). Da-

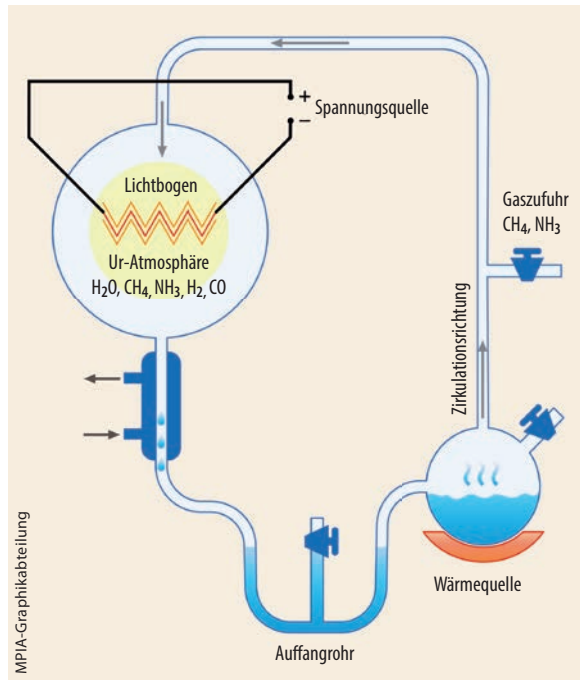


Abb. 6 Beim Miller-Urey-Experiment wurde untersucht, inwieweit sich in einer künstlichen Ur-Atmosphäre Biomoleküle erzeugen lassen.

bei gelang es in einer solchen Atmosphäre zusammen mit elektrischen Entladungen und unter Anwesenheit von Wasser, neben einer großen Vielfalt bioorganischer Moleküle die Hälfte der für die Proteine notwendigen Aminosäuren zu synthetisieren.

Experimente wie die von Miller und Urey gewinnen heute wieder an Bedeutung, erlauben doch moderne massenspektroskopische Methoden mit hoher Auflösung sowie Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC) eine wesentlich bessere Analyse der Systeme und ihrer Reaktionskinetik. Als Beispiel seien hier die Experimente im Labor von Albrecht Ott in Saarbrücken genannt (Abb. 7). Dieser Gruppe gelang es, die spontane Bildung einer Wasser-Öl-Grenzfläche in einer „Ursuppe“ zu beobachten [19, 20] Dabei wiesen sie ein auf Polyethylenglycol (PEG) basierendes Polymer-Tensid-Molekül nach, das vermutlich an der Grenzschicht synthetisiert wurde. Diese Grenzschicht kann eine Hydrolyse umgehen, die in reinem Wasser die Polymerisation unmöglich macht. Das entdeckte Molekül wirkt nicht nur emulgierend, PEG ist auch ein universeller, organischer Katalysator. In einer Phasentransferreaktion kann PEG positiv geladene Elemente aus einer hydrophilen in eine hydrophobe Phase transportieren, wo sie dann wasserfrei reagieren können – es fungiert dann quasi als ein primitives „Coenzym“. Wie bereits angemerkt, war die frühe Erdatmosphäre viel weniger reduzierend, als Harold Urey sich dies vorgestellt hatte. Daher kann die Synthese der für die RNA notwendigen Bausteine schwieriger sein. Sie hätten durchaus durch den Eintrag von Meteoritenmaterial in warme Seen transportiert worden sein können.

Aufbauend auf dem Resultat der Sutherland-Gruppe, dass sich unter präbiotischen Bedingungen in einer kooperativen Chemie aktivierte Pyrimidin-

### FORSCHUNGSINITIATIVEN

Die **Heidelberg Initiative for the Origins of Life (HIFOL)** wurde 2014 etabliert und stellt eine informelle Forschungsplattform von Instituten der Heidelberger Universität, der Max-Planck-Institute für Astronomie und Kernphysik sowie des HITS dar. Ein besonderer Schwerpunkt der interdisziplinären Forschung liegt in der Charakterisierung von extrasolaren Planeten und ihrer Entstehung sowie der geochemischen Entwicklung der Erde: [www.mpia.de/HIFOL](http://www.mpia.de/HIFOL)



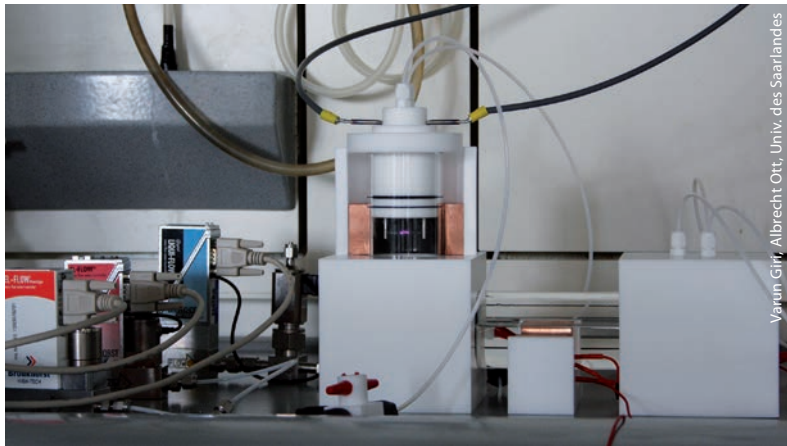
Die **Origins of Life Initiative Munich (OLIM)** wurde 2015 gegründet. Dabei handelt es sich um ein interdisziplinäres



Forschungsnetzwerk von Instituten der beiden Münchner Universitäten und den Max-Planck-Instituten für Biochemie und extraterrestrische Physik. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt des Netzwerkes sind

experimentelle Untersuchungen zur autonomen Entwicklung von lebenden Systemen aus Molekülen: [www.biosystems.physik.lmu.de/olim](http://www.biosystems.physik.lmu.de/olim)





Varun Giri, Albrecht Ott, Univ. des Saarlandes

**Abb. 7** Für die Untersuchung einer „Ursuppe“ heizt ein Kupfermantel (im Schnitt gezeigt) den Reaktor mit Funkenstrecke (Mitte) auf rund 180 °C. Die Gase NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>O gelangen durch Flusskontroller (links) und Zuleitungen (oben) in den Reaktor. Die dort durch Funken produzierten Moleküle strömen

über das horizontale, halb mit Wasser gefüllte Glasrohr, das zwischen den beiden Teflonblöcken fixiert ist. Die Rohrlänge lässt sich beliebig variieren. Der rechte Teflonblock besitzt Anschlüsse zur Probenentnahme. Ziel dieses Aufbaus ist herauszufinden, ob sich im Glasrohr eine räumliche Struktur bildet.

Nukleotide bilden können, gelang es auch zu zeigen, dass der Übergang von RNA zu DNA chemisch keine wirkliche Hürde darstellt [21] und dass es in einer HCN/H<sub>2</sub>S-Chemie möglich ist, RNA, Proteine und Lipid-Vorgänger gemeinsam herzustellen. Allerdings ist noch offen, wie sich unter diesen Bedingungen auch autokatalytische Netzwerke herausbilden, die Darwinsche Entwicklung zeigen und sich schließlich zu homochiralen Systemen entwickeln.

Zunehmend ist akzeptiert, dass ein System aus RNA als Informationsträger und Katalysator und aus Peptiden als Kofaktoren ein wichtiger Zwischenschritt ist, der schließlich auf die DNA-Protein-Welt führt. Peptide sind organische Moleküle, die Bindungen zwischen der Carbonylgruppe einer Aminosäure und der Aminogruppe einer zweiten Aminosäure enthalten. Lange Peptidketten führen schließlich zu Proteinen. Dabei bezeichnet man als Kofaktoren solche Verbindungen, die zusätzlich zu einem Enzym vorhanden sein müssen, um die Katalyse einer chemischen Reaktion zu ermöglichen. Das entscheidende nächste Problem ist es, einen Prozess zu identifizieren, der von den Peptiden zu Proteinen mit ihren spezifischen Faltungseigenschaften führt. Dies wird ein spannendes Forschungsfeld der nächsten Jahre bleiben.

In der Astrophysik wird die spektroskopische Charakterisierung der Atmosphären erdähnlicher Planeten ein wichtiges Ziel der kommenden Jahrzehnte sein [22]. Die Beobachtung von Biomarkern in einer statistisch relevanten Menge von Exoplaneten wird schließlich die Entstehung und Entwicklung biologischer Systeme in einen planetaren Kontext stellen. Unter Biomarkern verstehen wir dabei die kombinierte Anwesenheit von Sauerstoff, Ozon, Wasserdampf, Kohlenmonoxid und Methan in Planetenatmosphären, aber auch die Existenz der als roten Kante bezeichneten spektralen Signatur. Sie bedeutet eine sehr starke Änderung im Reflexionsvermögen im nahen Infrarot, die ein Indiz

für eine mit Vegetation bedeckte Planetenoberfläche ist. Die Prinzipien der Entstehung des Lebens weiter aufzudecken und die gekoppelte Entwicklung von lebenden Systemen und ihren planetaren Umgebungen besser zu verstehen, wird die Suche nach Biomarkern befruchten und dabei helfen, falsch positive Funde zu identifizieren. Wichtige Fortschritte beim Verständnis des Übergangs von unbelebter Materie zu lebenden Systemen können wir durch gezielte Laborexperimente erwarten, welche die geochemischen Randbedingungen auf diesen Planeten einbeziehen.

**Danksagung**

Ich danke Albrecht Ott (Universität Saarbrücken) und Oliver Trapp (LMU München) für die kritische Durchsicht des Artikels.

**Literatur**

- [1] H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond und Th. Henning (Hrsg.), *Protostars and Planets VI*, Univ. of Arizona Press, Tucson (2014)
- [2] T. S. Woodruff III und J. A. Baross (Hrsg.), *Planets and Life*, Cambridge University Press, Cambridge (2007)
- [3] A. Anglada-Escudé et al., *Nature* **536**, 437 (2016)
- [4] N. Szostak, S. Wasik und J. Blazewicz, *PLOS Comput. Biol.* **12** (4) (2016), doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004853
- [5] W. Hordijk, J. Hein und M. Steel, *Entropy* **12**, 1733 (2010)
- [6] L. Cronin und S. I. Walker, *Science* **352**, 1174 (2016)
- [7] W. Gilbert, *Nature* **319**, 618 (1986)
- [8] T. A. Lincoln und G. F. Joyce, *Science* **323**, 1229 (2004)
- [9] N. Vaidya et al., *Nature* **491**, 72 (2012)
- [10] J. Oro, *Nature* **191**, 1193 (1961)
- [11] L. E. Orgel, *Orig. Life Evol. Biosph.* **34**, 361 (2004)
- [12] Z. Martins et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **270**, 130 (2008)
- [13] G. M. Muñoz Caro et al., *Nature* **416**, 403 (2002)
- [14] C. Meinert et al., *Science* **352**, 208 (2016)
- [15] M. W. Powner, B. Gerland und J. D. Sutherland, *Nature* **459**, 239 (2009)
- [16] D. Trail, E. B. Watson und N. D. Tailby, *Nature* **480**, 79 (2011)
- [17] Ch. Mast, F. M. Möller und D. Braun, *Physik Journal*, Oktober 2013, S. 29
- [18] M. C. Weiss et al., *Nature Microbiology* **1**, 1 (2016)
- [19] E. Wollrab et al., *Orig. Life Evol. Biosph.* **46**, 149 (2016)
- [20] S. Scherer et al., *Orig. Life Evol. Biosph.*, in press (2017)
- [21] D. J. Ritson und J. D. Sutherland, *J. Mol. Evol.* **78**, 245 (2014)
- [22] L. Kaltenegger, *Physik Journal*, Februar 2012, S. 25

**DER AUTOR**

**Thomas K. Henning** (FV Extraterrestrische Physik) ist Geschäftsführender Direktor des Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA) in Heidelberg und leitet dort die Abteilung für „Planeten- und Sternentstehung“. Er ist außerdem Honorarprofessor für Astronomie an der Universität Heidelberg und Professor für Astrophysik an der Universität Jena, die zusammen mit dem MPIA eine gemeinsame Laborastrophysikgruppe betreibt. Henning beschäftigt sich mit der Physik und Chemie protoplanetarer Scheiben sowie der Suche nach Exoplaneten und der Charakterisierung ihrer Atmosphären. Er ist federführend an großen astronomischen Instrumentierungsprojekten für das James Webb Space Telescope und die Europäische Südsternwarte beteiligt. Im Jahr 2014 etablierte er zusammen mit dem Chemiker Oliver Trapp (LMU/MPIA) die „Heidelberg Initiative for the Origins of Life“. In seiner Freizeit interessiert er sich für Philosophie, Literatur und moderne Kunst des 20. Jahrhunderts.



M. Pössel