

Experimente mit der Ursuppe

Forscher versuchen nachzubrauen, was in der Ursuppe vor der Entstehung der Lebens geschah

von REINHARD BREUER

Es brodelt und schäumt. Hinter einer Glasscheibe in einem Chemielabor in Saarbrücken sieht man in einem Kolben eine bräunliche Flüssigkeit blubbern. Gewärmt wird das Glasgefäß von einer kleinen Kochplatte, wie sie auch in einer Studentenküche stehen könnte. Was da vor sich hin köchelt, hat sich in ähnlicher Form vor fast vier Milliarden Jahren abgespielt.

Die erste halbe Milliarde von Jahren auf der Erde nennen Forscher die „dunkle Epoche“. Denn erste Spuren von Leben lassen sich erst danach in den ältesten Gesteinsproben nachweisen. Doch bereits vor dieser Zeit müssen sich zentrale

lebenserzeugende Prozesse abgespielt haben – vom ersten sich selbst reproduzierenden Molekülsystem bis zu überlebens- und vermehrungsfähigen Zellen.

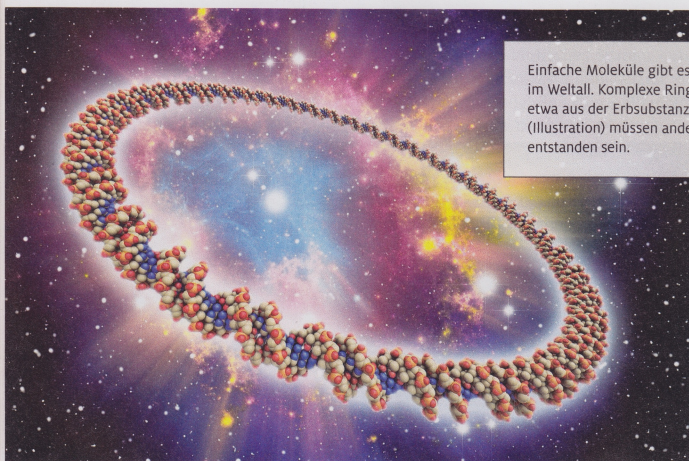
In zwei Forschungsinitiativen wollen Wissenschaftler dieses Problem jetzt im Verbund vieler Fachdisziplinen angehen: bei der Heidelberg Initiative for the Origin of Life (HIFOL) sowie bei der Origins of Life Initiative Munich (OLIM). Während HIFOL sich vorwiegend der geochemischen Entwicklung der Erde sowie der Astrophysik von Exoplaneten widmet, stehen im Mittelpunkt von OLIM Experimente zur autonomen Entwicklung von lebenden Systemen aus Molekülen.

Simulation der Ureerde

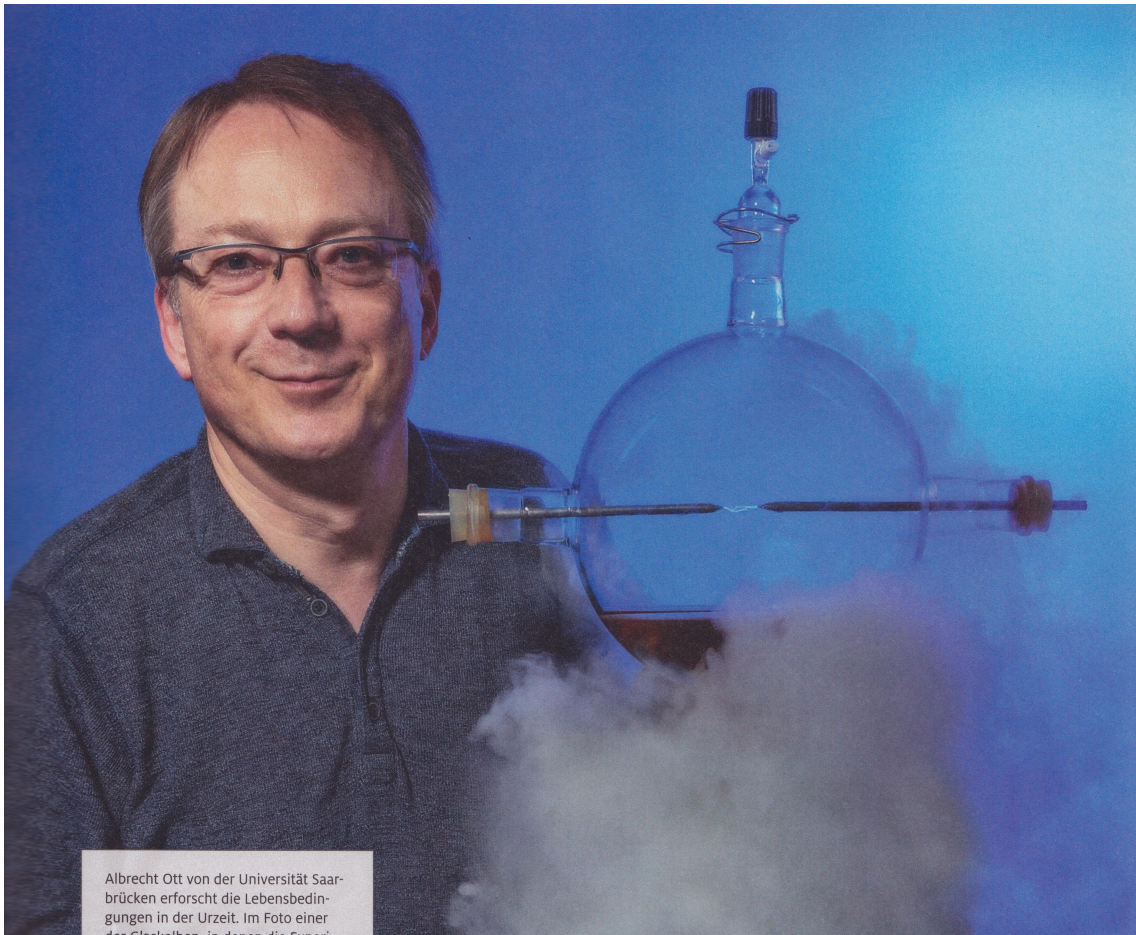
Albrecht Ott hat das Ziel, solche Systeme im Labor zu erschaffen. Sein Gebräu im Glaskolben nennt der Biophysiker von der Universität Saarbrücken „Ursuppe“. Es soll Zustände auf einer gerade erkaltenden Erde simulieren, als sich in der Uratmosphäre gewaltige Gewitter entluden, Meteoriten den jungen Erdkörper bombardierten und Vulkane gewaltige Gasmengen ausstießen.

Ott orientiert sich dabei an Stanley Miller, der 1953 das erste Ursuppen-Experiment publizierte. In ein Gemisch aus Wasser, Methan, Ammoniak und Wasserstoff jagte der damalige Doktorand von Harold Urey an der University of Chicago tagelang elektrische Entladungen. Wie in der hypothetischen Uratmosphäre enthielt das Gemisch keinen Sauerstoff. Miller stellte fest, dass sich zahlreiche Biomoleküle gebildet hatten, darunter viele Aminosäuren – sowohl solche, wie sie auf der Erde vorkommen, aber auch andere, die in heute lebenden Organismen fehlen. „Das war eines der Schlüsselexperimente“, sagt Albrecht Ott. „Damals wurde gezeigt, dass biologische Moleküle spontan entstehen können.“

Millers Experiment veränderte die Erforschung der Anfänge des Lebens. In den Folgejahren wurde es in Variationen wiederholt: mal mit Kohlendioxid, mal mit Stickstoff oder mit UV-Strahlung, aber stets mit ähnlichem Ergebnis. Anderes blieb jedoch ungeklärt: nicht nur die Herkunft der meisten Aminosäuren, sondern auch die Dominanz der linkshändigen



Einfache Moleküle gibt es auch im Weltall. Komplexe Ringe, etwa aus der Erbsubstanz DNA (Illustration) müssen anders entstanden sein.



Albrecht Ott von der Universität Saarbrücken erforscht die Lebensbedingungen in der Urzeit. Im Foto einer der Glaskolben, in denen die Experimente des Biophysikers ablaufen.

darunter. Denn aus chemischen Prozessen entsteht stets ein symmetrisches Gemisch aus links- und rechtshändigen Molekülen. Doch ausschließlich linkshändige Aminosäuren bilden die Bausteine der Proteine. Das ist ein Hinweis auf Selektionsprozesse in der Evolution, bei denen Katalysatoren eine Rolle gespielt haben könnten: Wenn sie nur oder bevorzugt mit linkshändige Aminosäuren interagierten, wären die rechtshändigen rasch irrelevant geworden.

Heiße Quellen und Tümpel

Inzwischen wird Millers Annahme bezweifelt, dass die Uratmosphäre stark reduzierend war, also viel Wasserstoff enthielt. Heute gehen die Wissenschaftler davon aus, dass die frühe Erdatmosphäre hauptsächlich aus Kohlendioxid,

Wasser und Stickstoff bestand. „Man braucht nicht unbedingt eine Uratmosphäre“, meint der Chemiker Ott, „sondern es genügt ein Ort, wo reduzierende Gase austreten, stark erhitzt werden und dann erkalten, sodass sich dann Biomoleküle bilden – etwa heiße Unterwasserquellen oder warme Tümpel.“

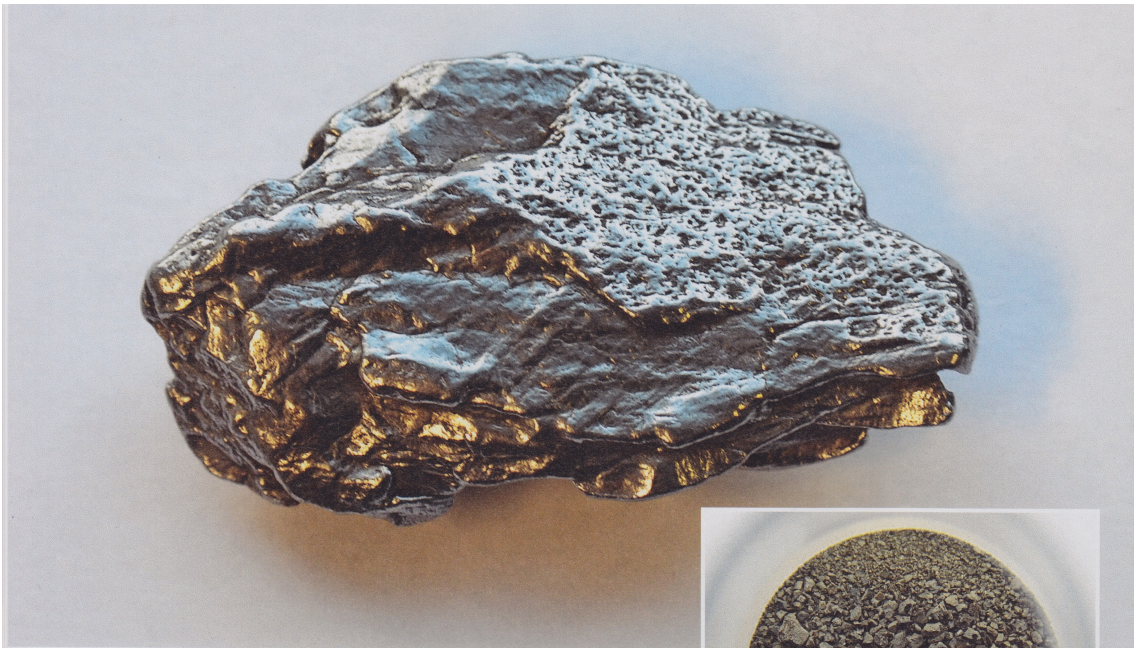
In seinen Neo-Miller-Experimenten will der Forscher einen Schritt weitergehen. „Miller hat ein statisches Experiment

durchgeführt, bei dem er am Ende nachsah, welche Moleküle in seiner Ursuppe entstanden waren.“ Mit heutiger Analytik versucht Ott dagegen, den dynamischen Prozess der Suppenbildung detailliert zu analysieren. „Die Hoffnung dabei ist, eine Suppe kochen zu können, in der molekulare Reproduktion spontan auftritt, also von allein.“ Und er betont: Wenn die Komplexität der Reaktionspfade dabei wächst, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pfad dabei ist, der die Reproduktion vorantreibt – und damit auch die ganze Suppe strukturiert, wodurch er sich zu erkennen gibt.

Interessant ist nämlich, was seinerzeit in Millers Versuch nicht funktionierte: „In dem Gebräu entstanden zwar Biomoleküle, aber keine reproduktive Dynamik, geschweige denn ein sich selbst verstärkendes“

KOMPAKT

- In warmen Tümpeln auf der noch jungen Erde bildeten sich in einem Molekülmix die ersten autokatalytischen chemischen Netzwerke.
- Biomoleküle, die in Meteoriten entstanden sind und auf die Erde trafen, haben wohl zur Entstehung der ersten Zellen beigetragen.



Eisenmeteorite aus dem All (oben) lieferten schon in Urzeiten katalytisch aktive Nanopartikel (im Foto rechts auf Siliziumdioxid), die beim Beginn von Stoffwechselprozessen eine Rolle gespielt haben könnten. Diese Reaktionen untersucht der Münchener Forscher Oliver Trapp (ganz rechts). Das Foto darüber zeigt eine seiner Reaktionskapillaren. Sie ist mit einer Elektrospray-Quelle gekoppelt, die zur Ionisation und Analyse der komplexen Proben mittels hochauflösender Massenspektrometrie dient.



kendes Ökosystem“, sagt Albrecht Ott. Wie also kam es zum Beginn einer Evolution und somit zur natürlichen Selektion, wie sie Charles Darwin beschrieben hat?

Darwin postulierte zunächst nicht das Prinzip „survival of the fittest“ (den Ausdruck prägte 1864 der britische Sozialphilosoph Herbert Spencer), sondern er fragte vielmehr: Wenn Evolution das Überleben des „Fittesten“ wäre, warum gibt es dann so viele Arten? „Das ist das Darwin'sche Paradoxon“, sagt Ott. Es entspricht biochemisch einem System mit mehreren konkurrierenden Molekülarten, die sich zwar gegenseitig „fressen“, also funktionelle Elemente des anderen gewissermaßen für sich missbrauchen, gleichzeitig aber die Diversität der Funktionen dabei erweitern. Somit hätte sich bereits in der Anfangszeit des Lebens eine biologische Vielfalt entwickelt.

„Meiner Meinung nach ist das Leben nicht als ein Lebewesen entstanden, sondern sofort als ein Ökosystem mit unter-

schiedlich spezialisierten Arten. Einer Art allein hätte die Robustheit gefehlt, um langfristig zu überleben“, meint Ott. Und da stehe man schon am Beginn eines Ökosystems: „Mit Nahrungsketten kann sich das junge Leben an sich ändernde Umstände viel besser anpassen. Und auf

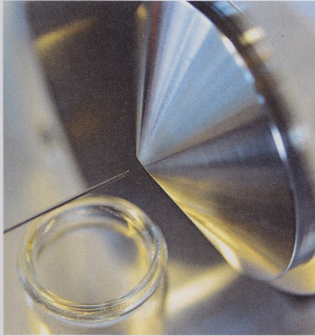
Das Leben ist nicht als ein Lebewesen entstanden, sondern als Ökosystem

der Urerde müssen die Bedingungen, gelinde gesagt, turbulent gewesen sein.“

Albrecht Ott berichtet: „Wir haben Polymere entdeckt, die wichtig sind in Bezug auf die molekulare Reproduktion.“ In seiner Labor-Ursuppe bildeten sich spontan kleine Membranen aus Polyethylenglykol (PEG), ergänzt um eine Kohlenkette. Chemisch entspricht das einem

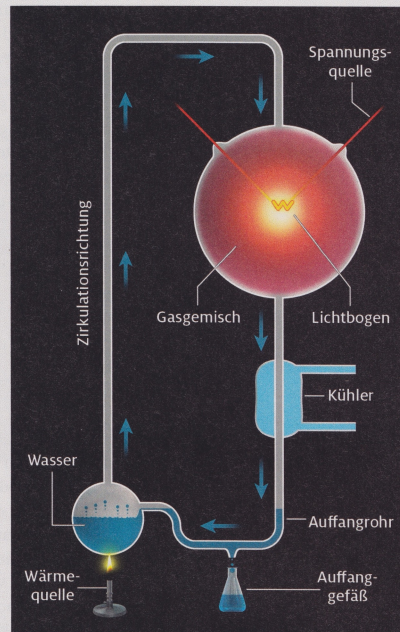
Tensid, ähnlich wie es in Seifenblasen vorkommt. Das PEG-Molekül gehört zu den häufigsten organischen Katalysatoren. „Wenn diese spontan in großer Zahl und passender Struktur entstehen, muss man sich fragen, wie das passieren kann und was sie bewirken.“ In wässriger Lösung bildet sich das PEG jedenfalls nicht von selbst, das benötigt für seine Synthese wiederum selbst einen Katalysator.

Doch Katalysatoren entstehen in der Ursuppe: „Wir haben beobachtet, wie immer wieder spontan welche entstehen. Aber sie unterscheiden sich häufig von Fall zu Fall“, sagt Ott. Je nach Testlauf hat seine Suppe offenbar die Möglichkeit, ganz unterschiedlich und flexibel zu reagieren – womöglich eine notwendige Eigenschaft, die das Leben gehabt haben muss, um auf der Urerde zu bestehen. „Nichtreproduzierbarkeit und Instabilität unserer Ursuppen-Experimente wären dann nicht ein Problem, sondern sogar ein Vorzug.“



Das Pionier-Experiment

Stanley Miller simuliert 1952 zusammen mit Harold Urey im Labor der University of Chicago eine hypothetische frühe Erdatmosphäre und wies nach, dass sich darin zahlreiche organische Moleküle bildeten – darunter Bausteine des Lebens. Ausgangspunkt war ein Gasgemisch aus Wasser, Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Kohlenmonoxid, das erhitzt und elektrischen Entladungen ausgesetzt wurde. Dabei entstanden viele verschiedene Aminosäuren. Inzwischen ist das Experiment mit zahlreichen Abwandlungen und teilweise anderen Resultaten oft wiederholt worden. Neuerdings wird angenommen, dass die Uratmosphäre hauptsächlich aus Stickstoff und Kohlendioxid bestand.



Ott's Forschergruppe beobachtete, wie sich in der Ursuppe spontan eine Wasser-Öl-Grenzschicht bildete – ähnlich wie eine Ölschicht auf einem Waldtümpel. Das Interessante an den Ölfilm-Membranen ist, dass sie wasserabstoßende (hydrophobe) und wasseranziehende (hydrophile) Schichten enthalten. Im hydrophoben Teil können unter Ausschluss von Wasser Reaktionen ablaufen, die es sonst nicht gäbe.

„In einigen unserer Ursuppen-Experimenten haben wir zellförmige Aggregate entdeckt: kleine Tensidklumpen von etwa zehn Nanometer Größe.“ Bei ihnen haben sich die hydrophoben Teile zusammengeschlossen und kleine, abgeschlossene Reaktionskammern gebildet, sagt Ott. „Viele biologischen Reaktionen können ja im Wasser nicht ablaufen wegen der Hydrolyse, die eine Polymerisation der Moleküle verhindert. Aber in einer hydrophoben Umgebung klappt das eben schon.“ In solchen Minikammern liefen plötzlich

viele, sonst unmögliche Prozesse ab – etwa, wenn Ionen wie in normalen Zellen zwischen innen und außen ausgetauscht werden. „Für positiv geladene Ionen kann die Ölfilm-Membran als Transportvehikel dienen.“

„Unter den Aggregaten, die wir in unseren Experimenten nachgewiesen haben, tauchen sehr wahrscheinlich sogenannte Mizellen auf“, erläutert Ott. Diese zellenartigen Gebilde haben Hüllen aus Lipiden, wie sie auch in Membranen natürlicher Zellen enthalten sind. „Wir haben zwar keine Lipide in der Grenzschicht beobachtet, dafür aber andere hydrophil-hydrophobe Moleküle.“ Daher spricht man besser von Emulsionströpfchen. „Von Protozellen sind wir aber noch weit entfernt“, meint Ott.

Wie schon Stanley Miller baut auch Albrecht Ott darauf, dass seine Ursuppen-Rezepte „ausreichen, um eine Selbstreproduktion irgendwann von allein zu liefern“. Jedoch sei das nicht ausgemacht,

die Labor-Ursuppe könnte ja durchaus molekular zu arm sein, um die gesamte präbiotische Evolutionskette eigenständig zu durchlaufen.

Biomoleküle aus dem All

Astrophysiker gehen davon aus, dass einst zahlreiche Meteoriten auf die junge Erde einschlugen und im Gepäck Biomoleküle mit sich schleppten. Bildeten Meteoriten also eine Starthilfe, die auch bei Ursuppen-Tests im Labor berücksichtigt werden muss?

„Werden Staubteilchen von Wassereis ummantelt und UV-Strahlung ausgesetzt, dann entstehen auch komplexere biochemische Verbindungen“, sagt Thomas Henning, Direktor am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Das ist in protoplanetaren Staubscheiben und Kometen der Fall. Henning beschäftigt sich damit, welche frühen Bedingungen auf Planeten herrschten und warum ausge-rechnet die Erde arm an Elementen wie

Wasserstoff, Kohlenstoff oder Stickstoff ist. „Was viele überraschen mag: Die Erde ist ein wasserarmer Planet.“ Das klingt befremdlich, doch der gesamte Wasseranteil der Erde beträgt tatsächlich nur 0,003 Prozent. „Eigentlich gibt es kaum Wasser auf der Erde. Das sieht für uns nur anders aus, weil sich ein großer Teil davon auf der Oberfläche angesammelt hat“, sagt Henning. „Wir wissen, dass die Erde von Meteoriten mit organischem Material und Wasser bombardiert wurde. Darunter waren viele Nucleobasen: einfache Bestandteile von Makromolekülen wie Nucleinsäuren und Strängen in den Erbmolekülen RNA und DNA.“

Welche Wirkung hätte das auf die Darwin'schen Tümpel? Diese Frage analysierte der Heidelberger Astrophysiker 2017 zusammen mit Kollegen vom Origins Institute der McMaster University im kanadischen Hamilton. Das Ergebnis: Zyklen, bei denen solche Kleingewässer immer wieder austrocknen und volllaufen, beschleunigen eine rasche Polymerisation. Diese Kettenbildung der Nucleobasen führt zu größeren Gebilden, insbesondere den Nucleinsäuren und der RNA.

In ihrem Simulationsmodell verknüpfen die Forscher die Evolution der jungen Erde mit der komplexen präbiotischen Chemie in dieser Umgebung. Die Tümpel entstanden, während sich Kontinente im

Urmeer bildeten. Den Biomolekülen, die gerade mit den Meteoriten frisch gelandet waren, ging es dabei an den Kragen. Zum einen versickerten die Nucleobasen in den Wassertümpeln. In den Trockenzeiten wurden sie dagegen von der harten UV-Strahlung der Uratmosphäre zerlegt.

Das Resultat ist verblüffend: „Wir haben festgestellt, dass die Synthese der Nucleotide und ihre Polymerisation zu RNA

In wenigen Wochen lassen sich Hunderttausende Reaktionen testen

ziemlich rasch stattgefunden haben muss“, sagt Henning. Das sei innerhalb eines oder allenfalls weniger Feucht-Trocken-Zyklen geschehen, vermutlich schon vor etwa 4,17 Milliarden Jahren. Im Unterschied zum Miller-Experiment sind das Reaktionen, die auch schon zuvor in primitiven Meteoriten abliefen: in den kohlig Chondriten. Dabei wurden bereits Biomoleküle produziert, die danach auf der Erde landeten.

Typisch für diese Meteoriten ist die Formose-Reaktion. Entdeckt im Jahr 1861 von dem russischen Chemiker Alexander Butlerow, gilt sie schon lange als eine

Schlüsselreaktion bei der Lebensentstehung. Sie produziert unter Mithilfe von Katalysatoren aus Formaldehyd, einer Methan-Verbindung, ein Gemisch aus Zucker-Molekülen. Dabei bilden sich unter anderem Pentosen – eine Grundlage der RNA, dem Träger der genetischen Information, in der präbiotischen Phase der Evolution.

Die Formose-Reaktion

Für Oliver Trapp ist die Formose-Reaktion höchst aktuell. Der Chemiker von der Ludwig-Maximilians-Universität München ist auch Fellow am MPI für Astronomie und kooperiert eng mit Thomas Henning. Als Katalysator verwenden Trapp und seine Kollegen ein in Meteoriten vorkommendes Mineral: das Schreibersit. Es enthält Eisen und Phosphor und wurde nach dem österreichischen Naturforscher Karl Franz Anton von Schreibers (1775 bis 1852) benannt. Bei Kontakt mit Wasser lösen sich Phosphor-Verbindungen aus dem Mineral, die in der Formose-Reaktion aktiv werden.

„Ich denke, dass diese Reaktion unter den kosmischen Umständen bevorzugt wird“, meint Trapp. Er untersucht im Labor die Verbindung zwischen der Chemie in Meteoriten und dem, was später in den Tümpeln auf der Urerde passiert sein könnte. Das schließt irdische Umweltfaktoren mit ein: Tag-und-Nacht-Zyklen, Schwankungen der Lufttemperatur, häufige Wechsel zwischen Feuchte und Trockenheit, Einflüsse durch die reduzierende Atmosphäre. „Wir testen verschiedene Modelle einer Uratmosphäre – mit sehr hohem Atmosphärendruck, wie er einst geherrscht haben muss“, sagt Trapp. Der Input aus dem All sieht für ihn so aus: „Wenn ein Meteorit in die Atmosphäre eintritt, dann erhitzt er sich und ein Teil verdampft zu Nanopartikeln.“ Diese mikroskopisch kleinen Teilchen sind hoch reaktiv, reagieren mit Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid und produzieren dabei auch organische Verbindungen – „unser chemisches Grundinventar“.

Was auf der Urerde danach folgte und von dem Münchener Chemiker im Labor hypothetisch nachgestellt wird, könnte bei der Erforschung der präbiotischen Lebensentstehung einen Meilenstein darstellen. Ähnlich wie Albrecht Ott in Saar-



Wie sich auf der Urerde die ersten Lebensformen gebildet haben, gehört zu den großen Rätseln der Wissenschaft.



brücken entwickelt auch Trapp seine Version einer Miller-Ursuppe. Doch im Unterschied dazu setzt er auf chemische Reaktionen, die von Katalysatoren ermöglicht und beschleunigt werden.

„Wir entwickeln ein chemisches Netzwerk, das so aufgebaut ist, dass es katalytisch angetriebene thermische Reaktionen und gleichzeitig auch lichtgetriebene Reaktionen enthält.“ Das Experiment findet in kleinen Kapillaren statt. In jeder Stufe werden alle Produkte und Produktionsraten gemessen. Dabei variieren die Forscher physikalische Parameter und chemische Katalysatoren. „So lassen sich in wenigen Wochen Hunderttausende von Reaktionen durchtesten“, sagt Trapp. „Das hätte früher Jahre gedauert.“

Selbstoptimierung der Katalyse

In Oliver Trapps Experimenten optimieren sich die chemischen Reaktionen von selbst. Inzwischen hat er ein autokatalytisches System im Labor erzeugt, das Züge einer Evolution aufweist. „Mit der Formose-Reaktion wollen wir den Katalysator in einem molekularen Netzwerk sich selbst evolutionär entwickeln lassen“, sagt Trapp. „Mithilfe der Bausteine erzeugen wir erst einmal rein statistisch eine ganze Bibliothek verschiedener Katalysatoren.“

Heiße thermale Quellen und Geysire wie im Yellowstone-Nationalpark in den USA sind natürliche Labore für Verhältnisse, wie sie auf der Urerde geherrscht haben könnten. Hier strömen Gase wie Schwefelwasserstoff, Schwefeldioxid und Wasserdampf aus dem Erdinneren, die wohl für die Chemie und Energiezufuhr der ersten Lebensformen von Bedeutung waren.

Einer dieser Katalysatoren ist dann der effektivste und kinetisch schnellste. Das bedeutet, dieser „fitteste“ Stoff treibt die Reaktionsraten auf die Spitze. „Erstaunlicherweise haben wir beobachtet, dass dieser jeweils beste Katalysator seine eigenen Bausteine, also sich selbst, modifizieren und optimieren kann.“ Das ist ungewöhnlich. Üblicherweise, so lernt man in der Schule, beschleunigen Katalysatoren chemische Reaktionen, bleiben dabei aber selbst unverändert – nur die anderen Moleküle wandeln sich um.

„In unseren Evolutionsexperimenten entwickelt sich der jeweils beste Katalysator“, erläutert Oliver Trapp. Das sei bei normalen Reaktionen natürlich nicht erwünscht. „Hier aber ist es genau das, was wir herbeiführen können.“ Auf der Urerde sei das wohl nicht anders gewesen.

Am Schluss wird der selektivste und aktivste Katalysator von der Kaskade an Netzwerken ausgewählt. Die Besonder-

heit ist, dass sich der Katalysator nicht nur selbst modifiziert. Er kann auch die Formose-Reaktion katalysieren und so Biomoleküle wie Aminosäuren und Nucleotide erzeugen – vielleicht sogar die großen Polymere RNA und DNA.

Ob und wie das geht, das untersuchen die Chemiker zurzeit. Offen ist zum Beispiel, ob sich dabei tatsächlich die Arten von RNA oder DNA bilden, die im irdischen Leben vorkommen. „Wir prüfen bereits, welcher Zucker bevorzugt aus so einer Mischung entsteht, um diese Nucleotide aufzubauen“, sagt Trapp. „Wenn man einen Prozess anstoßen kann, der Katalysatoren optimiert, dann hätte man die Anfänge einer echten chemischen Evolution gefunden.“

Der Astrophysiker Thomas Henning ist begeistert: „Wenn sich dieser Befund erhärtet, wäre das eine Revolution in der Chemie. Es würde bedeuten, dass man selbstoptimierende, katalytische Systeme im Labor herstellen kann!“ ■



REINHARD BREUER ist habilitierter Astrophysiker und regelmäßiger Autor in bild der wissenschaft.