

Darwins „Kleine warme Teiche“ gewinnen an Plausibilität

Viele Modelle aus Astronomie, Geologie, Chemie, Physik und Biologie ergeben ein neues Szenario zur Entstehung des Lebens auf der Erde

Auf dem Weg zu einem Standardmodell der Lebensentstehung

Markus Pössel, Heidelberg

Astronomen der McMaster University (Hamilton, Kanada) und des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg haben ein stimmiges Szenario für die Entstehung von Leben auf der Erde berechnet, das auf astronomischen, geologischen, chemischen und biologischen Modellen basiert. In diesem Szenario formt sich das Leben nur wenige hundert Millionen Jahre, nachdem die Erdoberfläche soweit abgekühlt war, dass flüssiges Wasser existieren konnte. Die wesentlichen Bausteine für das Leben wurden während der Entstehung des Sonnensystems im Weltraum gebildet und durch Meteoriten in warmen kleinen Teichen auf der Erde deponiert. Die neuen Ergebnisse wurden jetzt in den Proceedings der US National Academy of Sciences veröffentlicht.

Wie auf der Erde vor rund 4 Milliarden Jahren das erste Leben entstand, ist eine der großen Fragen der Wissenschaft. Neue Ergebnisse deuten darauf hin, dass Meteoriten dabei eine wesentliche Rolle gespielt haben dürften. Diese Meteoriten landeten in warmen kleinen Teichen auf der Erde und deponierten dort organische Stoffe, welche die Entstehung des Lebens in Form von selbstreplizierenden RNA-Molekülen ermöglichten.

Die Schlussfolgerungen der Astronomen basieren auf einem Modell, das heutiges Wissen zu Planetenentstehung, Geologie, Chemie und Biologie zusammenfasst. Das vielleicht interessanteste Ergebnis der Berechnungen ist, dass

Der Autor:

Der Physiker **Dr. Markus Pössel** promovierte mit einem Thema über Quantengravitation. Er entwickelte das allgemeinverständliche Webportal „Einstein Online“ zu spezieller und allgemeiner Relativitätstheorie. 2007 wurde er mit dem Hanno und Ruth Rolin-Preis für Wissenschaftspublizistik ausgezeichnet. Seit Anfang 2009 ist er Leiter des Hauses der Astronomie, seit 2010 Leiter der Öffentlichkeitsarbeit des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg.



das Leben vergleichsweise früh entstanden sein dürfte: Nur wenige hundert Millionen Jahre, nachdem die Erde ausreichend abgekühlt war, um flüssiges Oberflächenwasser wie Teiche oder Ozeane zuzulassen. Damals trafen ungleich viel mehr Meteorite auf die Erde als heutzutage.

Ben Pearce (McMaster University), der Erstautor der Studie, sagt: „Bis jetzt hatte niemand diese Berechnungen tatsächlich durchgeführt – eine durchaus spannende Situation!“ Sein Kollege und Ko-Autor Ralph Pudritz fügt hinzu: „Weil unser Modell so viele Ergebnisse aus so vielen verschiedenen Bereichen einschließt, ist es erstaunlich, dass alles so schlüssig zusammenhängt. Jeder Schritt unseres Modells führte ganz natürlich zum nächsten. Dass dabei am Ende ein klares Bild herauskam ist für mich ein klares Indiz dafür, dass unser Szenario so falsch nicht sein kann.“

Thomas Henning vom Max-Planck-Institut für Astronomie, ein weiterer Co-Autor, sagt: „Um den Ursprung des Lebens zu verstehen, müssen wir die Erde so verstehen, wie sie vor Milliar-

Lebensentstehung kurzgefasst

- Ein umfassendes Modell mit Wissen zu Planetenentstehung, Geologie, Chemie und Biologie zeigt einen plausiblen Weg zur Lebensentstehung.
- Es vermeidet Probleme von Lebensentstehungs-Modellen bezüglich hydrothormaler Quellen in der Tiefsee.
- Darwins Idee der „kleinen warmen Teiche“ kommen dem Entstehungsprozess wohl näher.
- Kondensationskeime waren demnach RNA-Bausteine aus dem Weltall.
- Die RNA-Bausteine entstanden im Weltall im Umfeld junger Sterne.
- Simulationen ergaben, dass Meteoriten, nicht Staubkörner aus dem Weltall kosmische Kurierboten der Nukleobasen auf die Erde waren.
- Das neue Modell muss weiter geprüft und optimal durch Experimente erhärtet werden

den von Jahren war. Wie unsere Studie zeigt, liefert die Astronomie einen wichtigen Teil der Antwort. Die Details der Entstehung unseres Sonnensystems haben direkte Folgen für den Ursprung des Lebens auf der Erde.“

Die neue Arbeit unterstützt die Hypothese, Leben sei in „kleinen warmen Teichen“ entstanden. Die Zyklen, in denen flache Teilchen erst austrocknen und dann wieder mit Wasser gefüllt werden, begünstigen dabei die Entstehung längerer RNA-Ketten. Die Astronomen konnten zeigen, dass Meteoriten eine ausreichende Menge an Nucleobasen zu Tausenden solcher Teiche auf der Erde transportiert haben könnten, um die Entstehung selbstreplizierender RNA-Moleküle in mindestens einem dieser Teiche anzustoßen.

Die Frage nach dem Ursprung des Lebens auf der Erde ist eine der grundlegenden Fragen der Wissenschaft. Wir haben zwar noch lange keine definitive Antwort auf diese Frage, aber in den letzten Jahrzehnten haben sich einige interessante Möglichkeiten ergeben. Eine davon wurde in den 1980er Jahren näher ausgearbeitet und postuliert eine „RNA-Welt“: Die genetische Information höherer Organismen wird in der Doppelhelix der DNA-Moleküle gespeichert. Aber es gibt auch eng verwandte Moleküle, RNA (Ribonukleinsäure), die eine herausragende Rolle in modernen Zellen spielen. Insbesondere katalysieren sie in den Zellen bestimmte chemische Reaktionen und sind für die Weiterleitung genetischer Informationen ebenso unentbehrlich wie für die Synthese spezifischer Proteine auf der Grundlage des genetischen Codes. Bei einigen Viren wird für die Speicherung der genetischen Information überhaupt keine DNA verwendet, sondern alle Informationen sind in Virus-RNA kodiert.

DNA und RNA

Die wichtigsten Bausteine von RNA und DNA sind die Nucleotide. In beiden Fällen bestimmt das Muster innerhalb der langen Kette von Nucleotiden die in DNA und RNA kodierte Information. Für DNA wird die Abfolge von Nucleotiden manchmal als Zeichenkette ausgedrückt. Dabei steht jedes Zeichen für eine der vier möglichen Nucleobasen, jede davon charakteristisch

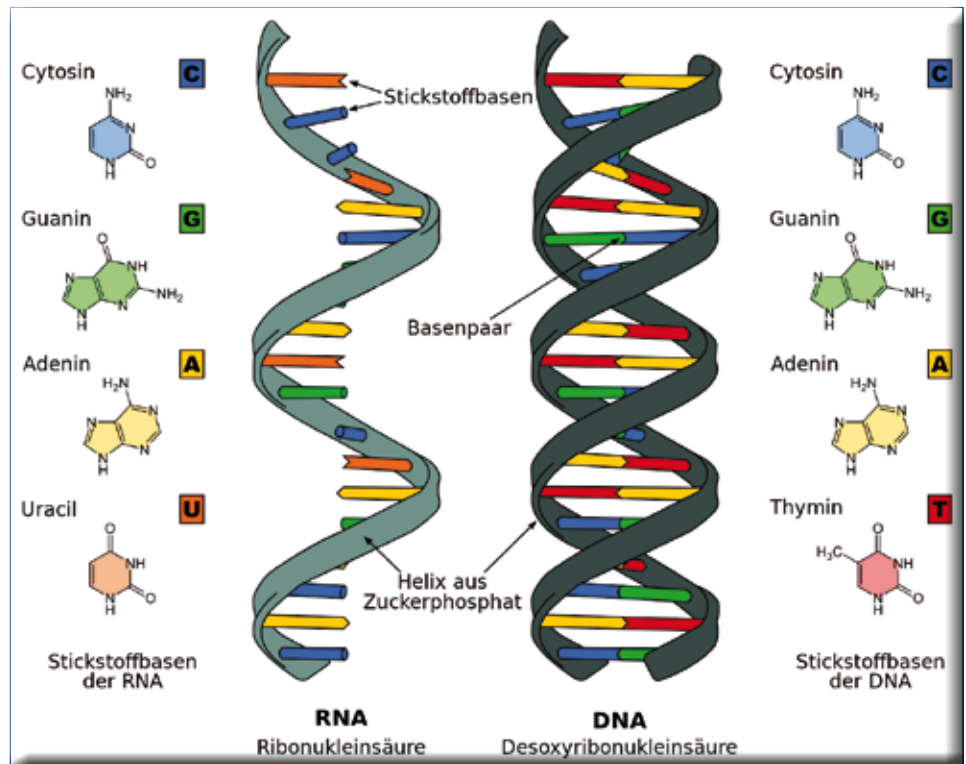


Abbildung 1: Gegenüberstellung eines RNA-Strangs und eines DNA-Doppelstrangs mit Darstellung der jeweiligen Nucleobasen (Abb.: Sponk/Roland1952/MesserWoland).

für ein DNA-Nucleotid: A für Adenin, C für Cytosin, T für Thymin und G für Guanin (CGATT-CACGATTACTACA...).

In RNA-Molekülen wird Thymin durch Uracil, U, ersetzt (Abbildung 1). Ein weiterer Unterschied: Während DNA in der Regel als die bekannte Doppelspirale auftritt, hat die RNA vielfältigere Erscheinungsformen. Am häufigsten sind einzelne Stränge von RNA, die in sich gefaltet sind und dabei recht komplizierte Formen annehmen können.

Die RNA ist für das Leben, wie wir sie kennen, lebensnotwendig, hat aber darüber hinaus Eigenschaften, die sie zu einem guten Kandidaten für frühere, primitivere Lebensformen machen – lange vor der Entstehung der ersten Zellen, ganz zu schweigen von multizellulären Organismen. Die wichtigste Eigenschaft ist die der Selbstreplikation: RNA kann die richtigen Nucleotide zusammensammeln und zu einer Kopie von sich selbst zusammenfügen.

Frühe RNA-Welt

Das vielversprechendste gegenwärtige Szenario für die Entstehung des Lebens ist die Bildung von Nucleotidketten in Form von RNA, die sich selbst replizieren. Einfache Zellvorläufer entstehen dann, wenn sich Fettsäuren spontan zu Membranen zusammenlagern – eine Reaktion, die in Laborexperimenten bereits beobachtet wurde – und damit kleine, abgeschlossene Taschen bilden,

in deren geschütztem Inneren komplexere chemische Reaktionen ablaufen können. Aus diesen einfachen Ansätzen entwickelten sich im Laufe der Zeit dann komplexere Mechanismen, insbesondere die der DNA-Replikation.

Alle Komponenten dieses Szenarios sind derzeit spekulativ, und für jeden Schritt gibt es alternative Erklärungen und Modelle; auch für die Vorstellung einer RNA-Welt gibt es Alternativen. Aber wir leben in spannenden Zeiten, und es besteht eine realistische Hoffnung, dass sich in den nächsten Jahrzehnten eine Art Standardmodell für die Entstehung des Lebens etablieren wird. Der Fortschritt wird aber nicht nur phantasievolle Szenarien erfordern, sondern konkrete Berechnungen und Experimente, die zeigen, welche Evolutionswege gangbar sind und welche nicht. Fortschritte betreffen dabei unterschiedliche Forschungsgebiete: Zum einen werden immer mehr Hypothesen über den Übergang vom Vorleben zum Leben experimentellen Tests zugänglich, da unser molekularbiologisches Wissen zunimmt. Auf der anderen Seite gibt es spannende neue Entwicklungen an der Schnittstelle von Molekularbiologie und Astronomie.

Abbildung 2: Ein kleiner warmer Teich auf der heutigen Erde, auf dem Bumpass Hell Trail im Lassen Volcanic National Park in Kalifornien. Die kleinen warmen Teiche, in denen das erste Leben entstanden sein könnte, sahen vermutlich nicht unähnlich aus (Foto: B. K. D. Pearce).



In den letzten Jahrzehnten haben die Astronomen nämlich beträchtliche Fortschritte gemacht, um zu verstehen, wie um junge Sterne herum Planetensysteme entstehen. Dieser Wissenszuwachs betrifft auch die Evolutionsgeschichte der Erde und unseres eigenen Sonnensystems. Die neuen Ergebnisse profitieren dabei von der Welle von Entdeckungen neuer Planeten um andere Sterne als die Sonne (Exoplaneten) sowie von direkten Beobachtungen junger Planetensysteme, die erst mit dem Aufkommen der neuesten Teleskopgeneration möglich geworden sind. Modelle der Planetenentstehung, einschließlich der chemischen Evolution neugeborener Planetensysteme, zeigen uns, welche Rahmenbedingungen unsere Erde für die Entstehung von Leben bot, und wie Leben in anderen Planetensystemen hätte entstehen können.

Hydrothermale Quellen in der Tiefsee weniger geeignet zum Start des Lebens

Die neue Studie bringt nun Astronomie und präbiotische Chemie zusammen, um Licht auf die früheste Ära der RNA-Welt zu werfen: die Prozesse, durch die sich kurze RNA-Moleküle zu längeren Molekülen zusammenschließen konnten („Polymerisation“), welche sich dann in einer späteren Phase der chemischen Evolution selbstständig zu vermehren begannen.

Längere RNA-Moleküle herorzubringen ist nicht einfach und erfordert genau definierte Bedingungen. Ein mögliches Szenario sind die ersten Schritte zum Leben in der Nähe hydrothermaler Quellen in der Tiefsee – Risse in der Erdkruste, aus denen Wasser strömt, welches durch die tieferen, heißeren Erdschichten erwärmt wurde. Es stellt sich jedoch die Frage, wie sich unter diesen Bedingungen längere Polymere bilden könnten; die Polymerisation scheint einen Zyklus von nassen und trockenen Bedingungen zu erfordern, wie er im Ozean nun einmal nicht gegeben ist. Ein weiteres Problem ist, wo unter diesen Bedingungen Stickstoff in geeigneter Form zur Verfügung stand, etwa in Form von Molekülen wie Cyanwasserstoff

(HCN) oder Ammoniak, wichtig für die Bildung die Entstehung von Leben, wie wir es kennen.

Warme Teiche als Alternative

Eine attraktive Alternative für den Geburtsort des frühen Lebens auf der Erde sind „kleine warme Teiche“: seichte, stehende Gewässer, in denen sich Chemikalien konzentrieren und unter wesentlich günstigeren Bedingungen miteinander reagieren können als in der Tiefsee (Abbildung 2). Das gilt insbesondere für Teiche mit Wänden aus Ton oder anderen Mineralien, die bestimmte chemische Reaktionen begünstigen. Ein wichtiges Merkmal solcher Teiche sind Kreisläufe mit nasen und trockenen Phasen. Die entsprechenden Teiche würden immer einmal wieder austrocknen. Dabei werden die chemischen Inhaltsstoffe gehörig konzentriert, was Bindungen zwischen den Nukleotiden begünstigt. Später würde sich der Teich wieder mit Wasser füllen. Solche Zyklen dürften für die chemischen Reaktionen in solchen Teichen eine ganz entscheidende Rolle spielen. Der Ausdruck „kleiner warmer Teich“, „warm little pond“, geht übrigens auf eine der frühesten Spekulationen über den Ursprung des Lebens zurück: einen Brief von Charles Darwin an den Botaniker Joseph Hooker aus dem Jahr 1871 (siehe Kasten).

Vor vier Milliarden Jahren dürften warme kleine Teiche allerdings noch vergleichsweise selten gewesen. Damals machten Ozeane einen sogar noch größeren Teil der Erdoberfläche aus als heute, und die ersten Kontinente, bestehend aus magmatischen Gesteinen aus dem Erdmantel wie beispielsweise Basalte tauchten gerade erst auf. Gewaltsame Vulkanausbrüche waren an der

Tagesordnung, und die Atmosphäre wurde fast vollständig von vulkanischen Gasen dominiert. Woher könnten unter diesen Umständen die organischen Moleküle stammen, mit denen die Evolution der RNA-Welt ihren Ausgang nahm?

Brief von Charles Darwin an den Botaniker Joseph Hooker, geschrieben am 1. Februar 1871

My dear Hooker,

I return the pamphlets, which I have been very glad to read. It will be a curious discovery if Mr. Lowne's observation that boiling does not kill certain moulds is proved true; but then how on earth is the absence of all living things in Pasteur's experiment to be accounted for? I am always delighted to see a word in favour of Pangenesis, which some day, I believe, will have a resurrection. Mr. Dyers paper strikes me as a very able Spencerian production.** It is often said that all the conditions for the first production of a living organism are now present, which could ever have been present. But if (& oh what a big if) we could conceive in some warm little pond with all sorts of ammonia & phosphoric salts – light, heat, electricity & C present, that a protein compound was chemically formed, ready to undergo still more complex changes, at the present day such matter would be instantly devoured, or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed.*

Henrietta makes hardly any progress, & God knows when she will be well.

I enjoyed much the visit of you four Gentlemen, ie after the Saturday night, when I thought I was quite done for.

Yours affecy C. Darwin

Mein lieber Hooker,

Ich gebe die Arbeitsblätter zurück, die ich sehr gern gelesen habe. Es wird eine merkwürdige Entdeckung sein, wenn Mr. Lownes Beobachtung, dass das Kochen bestimmte Schimmelpilze nicht tötet, sich als wahr erweist*; aber wie um alles in der Welt ist dann das Fehlen aller Lebewesen in Pasteurs Experiment zu erklären? Ich freue mich immer, ein Wort zugunsten der Pangenesis zu sehen, die eines Tages, glaube ich, eine Auferstehung erfahren wird. Herr Dyers Papier scheint mir eine sehr fähige spencerianische Produktion zu sein.**

Es wird oft gesagt, dass jetzt alle Bedingungen für die erste Produktion eines lebenden Organismus vorliegen, die jemals vorhanden gewesen sein könnten. Aber wenn (oh, was für ein großes wenn) wir in einem warmen kleinen Teich mit allen Arten von Ammoniak- und Phosphorsalzen – Licht, Wärme, Elektrizität & C mit dabei – vorstellen könnten, dass eine Proteinverbindung chemisch gebildet wurde, bereit, noch komplexer zu werden, würde diese Materie heute sofort verschlungen oder absorbiert werden, was vor der Entstehung von Lebewesen nicht der Fall gewesen wäre.

Henrietta macht kaum Fortschritte, und Gott weiß, wann es ihr gut gehen wird. ((Henrietta Emma Darwin war Darwins erstes, 1843 geborenes Kind (von sieben Kindern) und hatte zu jener Zeit Masern))

Ich habe den Besuch von Ihnen vier Herren sehr genossen, d.h. nach der Samstagnacht, als ich dachte, dass ich ziemlich fertig war.

Mit freundlichen Grüßen C. Darwin

*Benjamin Thompson Lowne kochte Sporen von *Penicillium glaucum* und legte sie dann in versiegelte Röhrchen; er fand heraus, dass myceliale Filamente produziert wurden, nachdem die Röhrchen 24 Stunden lang an einem warmen Ort gelassen worden waren. Sein Papier wurde in der Januar-Ausgabe 1871 des Journal of the Quekett Microscopical Club veröffentlicht. In den 1860er Jahren hatte Louis Pasteur mit der spontanen Erzeugung experimentiert. Er fand heraus, dass eine gekochte Lösung aus Zucker und Hefe auf unbestimmte Zeit steril blieb, sei es in einem verschlossenen Kolben oder in einer nicht verschlossenen Schwanenhalsflasche, der atmosphärischen Staub fernhält.

**Die Arbeit von William Turner Thiselton-Dyer (ein englischer Botaniker, 1843-1928) „On spontaneous generation and evolution“ erschien in der 1870er Oktoberausgabe des Quarterly Journal of Microscopical Science. Thiselton-Dyer zitierte Herbert Spencers Prinzipien der Biologie (Herbert Spencer (1820-1903) war ein englischer Philosoph und Soziologe) häufig in seiner Arbeit und stimmte Spencers Ansicht zu, dass sich das Leben aus nicht lebender Materie in langsamen Stufen entwickelte.

Junge Sterne produzieren Lebensbausteine

Eine plausible, vielleicht überraschende Antwort ist, dass die Bausteine für das erste Leben auf der Erde direkt aus dem Weltall stammen dürften. Die Scheiben aus Gas und Staub, die junge Sterne umgeben, enthalten beträchtliche Mengen an Ammoniak (NH_3) und Blausäure (HCN); beides Moleküle, welche den für die Bildung von Nucleobasen notwendigen Stickstoff liefern können. Eisbedeckte Staubpartikel in den äußeren Bereichen solcher Scheiben erweisen sich als erstaunlich produktive chemische Mini-Laboratorien. Tatsächlich zeigen Laborexperimente hier auf der Erde, wie sich Moleküle, die sich auf den eisigen Oberflächen solcher Staubkörner ansammeln, bei der Bestrahlung der Körner mit UV-Licht zu Nucleobasen verbinden; die Umgebung junger Sterne bietet dafür genau die richtigen Voraussetzungen (Abbildung 3).

In entsprechenden Experimenten konnte gezeigt werden, wie drei der fünf Nucleobasen (Uracil, Cytosin und Thymin) unter solchen Bedingungen spontan entstehen. Chemische Analysen an Meteoriten zeigen, dass diese in der Tat

beträchtliche Mengen von drei der fünf Nucleobasen (Guanin, Adenin und Uracil) enthalten. Auch dafür, wie diese Nucleobasen während der Entstehung des Sonnensystems im Inneren der „Elternkörper“ der Meteoriten, nämlich in großen Asteroiden, synthetisiert werden, gibt es Modellrechnungen.

Meteoriten und Staubteilchen als kosmische Kurierdienste

Zurück zu den kleinen warmen kleinen Teichen. Diese bieten ideale Bedingungen für komplexere RNA-Moleküle, aber woher kommen die Grundbausteine, die Nucleobasen im Teich überhaupt? Die Chemie der umgebenden Atmosphäre, dominiert von Kohlendioxid (CO_2), Stickstoffgas (N_2), Schwefeldioxid (SO_2) und Wasser (H_2O), ist in dieser Angelegenheit wenig hilfreich. Unter den Bedingungen auf der frühen Erde („schwach reduzierende Atmosphäre“) wird selbst der gelegentliche Blitzschlag, wie im berühmten Miller-Urey-Experiment zu den Ursprüngen organischer Moleküle, keine nennenswerte Menge an Nucleobasen produzieren.

Abbildung 3: Vorstufen chemischer Verbindungen für die Bildung von RNA wurde in den Gaswolken um junge Sterne herum gefunden. In dem Zweisternsystem IRAS 16293-2422 fand man 2012 Glykolaldehyde, die Bausteine für eine RNA-Kette bilden können. Das Sternensystem befindet sich etwa 400 Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Ophiuchus. Abbildung (a) zeigt die sternbildende Region von Rho Ophiuchi im infraroten Licht, wie es der Wide-field Infrared Explorer (WISE) der NASA zeigt. IRAS 16293-2422 ist das rote Objekt in der Mitte des kleinen Quadrats. Das eingesetzte Bild ist ein künstlerischer Eindruck von Glykolaldehydmolekülen, der die molekulare Struktur von Glykolaldehyd zeigt. Im Juni 2017 berichteten Astronomen über das Dreifachstern-System IRAS 16293-2422, das man ebenfalls im Sternbild Ophiuchus findet. Die Sterne in diesem System haben eine ähnliche Masse wie die Sonne, befinden sich aber noch im Anfangsstadium der Bildung. In ihrem Umfeld entdeckte man Methylisocyanat. Das ist eine giftige Chemikalie; sie entwich bei der Katastrophe von Bhopal 1984, gilt aber auch als ein Baustein für replikationsfähige Moleküle. Abbildung (b) ist eine künstlerische Darstellung der molekularen Struktur von Methylisocyanat in der Nähe der Säuglingssterne von IRAS 16293-2422 (Abbildungen: (a) ESO/Digitized Sky Survey 2/L. Calçada; (b) ESO/L. Calçada & NASA/JPL-Caltech/WISE-Team).



Meteoriten, die auf die Erde fallen, sind da schon eine deutlich ergiebiger Quelle. Damals, vor etwa 4 Milliarden Jahren, war der Meteoritenbeschuss der Erde zwischen 100 Millionen und 100 Milliarden Mal intensiver als heute. Pro Jahr regneten zwischen einer Billion und einer Billiarde Kilogramm an Meteoritenmaterial auf die Erdoberfläche hernieder und deponierten dort geschätzte 2000 Kilogramm an unversehrten Kohlenstoffverbindungen, welche die kosmische Reise unbeschadet überstanden hatten.

Hinzu kommt ein Strom interplanetarischer Staubpartikel, die direkt auf die Erdoberfläche gelangen und ebenfalls die auf ihrer Oberfläche entstandenen chemischen Verbindungen mitbringen. Diese viel weniger spektakuläre Transportmechanismus ist beeindruckend effektiv und liefert geschätzte 60 Millionen Kilogramm intakter Kohlenstoffverbindungen pro Jahr.

Meteoriten-Lieferungen für warme Teiche: quantitative Rechnungen

Ein Szenario zu entwerfen, in dem Meteorite oder Staubpartikel Nucleobasen in kleinen warmen Teichen deponieren ist schön und gut. Aber eine wirkliche Erklärung liefert solch ein Modell nur, wenn es auch durch quantitative Daten gestützt wird.

Pearce und seine Kollegen haben für dieses Szenario ein detailliertes Modell berechnet. Aus einer rekonstruierten Geschichte der Einschlagkrater des Mondes leiteten sie drei mögliche Szenarien für Meteoriten-Bombardements der Erde ab – ein spätes Bombardementmodell, in dem ein heftiges meteoritisches Bombardement erst etwa 3,9 Milliarden Jahren vor unserer Zeit einsetzt, und zusätzlich zwei weitere Modelle, beide mit einem früheren Bombardements-Beginn rund 4,5 Milliarden Jahre vor unserer Zeit, je eines für die minimale und maximale Menge an deponiertem Meteorit-Material, die mit den Beobachtungsdaten vereinbar ist.

Anschließend berechneten die Forscher die Wahrscheinlichkeit, dass die kleinen warmen Teiche mit einem beträchtlichen Anteil an Kohlenstoff enthaltenden Meteoriten (kohlige Chondriten) „geimpft“ wurden. Konkret brechen diese Meteoriten, die ursprünglich zwischen etwa 20 und 40 Meter Durchmesser haben, beim Durchqueren der Erdatmosphäre in kleine Stücke auseinander. Die Astronomen berechneten die Wahrscheinlichkeit, dass solche kleinen Stücke in der Nähe eines warmen kleinen Teiches auf der Erde landen würden (zwischen 1 und 10 Meter Teichdurchmesser), nahe genug für einen Teil ihres organischen Materials, um in den Teich zu gelangen. Für diese Berechnung mussten die

Forscher die Anzahl der warmen kleinen Teiche schätzen; dazu gingen sie davon aus, dass solche Teilchen auf den Landmassen der Erde ungefähr so häufig sind wie heute; allerdings gab es den entsprechenden geologischen Entwicklungsmodellen insgesamt deutlich weniger Landfläche als heutzutage. Vorsichtshalber wiederholten die Forscher ihre Berechnung sowohl für zehnmal so viele Teiche als auch für ein Zehntel so viele Teiche. Das Ergebnis ist, dass Tausende von feuchten kleinen Teichen auf diese Weise „geimpft“ und mit Lebensbausteinen versorgt worden wären.

Simulieren, was in kleinen warmen Teichen passiert

Was passiert mit den Nucleobasen, die per Meteorit oder Staubteilchen in einem solchen Teich angekommen sind? Eine ganze Reihe davon werden verloren gehen. Im Wasser des Teiches können sich Nucleobasen schlicht auflösen (Hydrolyse). Ein Teil des Wassers sickert durch Poren in der Basaltbasis des Teiches und nimmt dabei Nucleobasen mit, die anschließend natürlich an keinen weiteren chemischen Reaktionen im Teich teilnehmen. Während der Trockenphasen, wenn der Teich ausgetrocknet ist und seine Chemikalien als Sedimente abgelagert werden, spaltet die UV-Strahlung der Sonne Nucleobasen in einfachere Verbindungen (Photo-Dissoziation) – es sei denn, diese Nucleobasen werden zusätzlich durch eine Sedimentschicht geschützt (Abbildung 4).

Wenn einerseits fortwährend Nucleobasen verlorengehen, andererseits mit einer bestimmten Rate neues Material im Teich deponiert werden, ist klar, dass nur eine quantitative Rechnung zeigen kann, ob unter solchen Umständen in hinreichend vielen Teilchen hinreichend viele Nucleobasen übrig bleiben, um längere RNA-Ketten zu bilden.

Auch diese Rechnung haben Pearce und seine Kollegen durchgeführt – angesichts des unsicheren Wissens über die frühe Erde mit einer ganzen Reihe von Variationen an Umweltbedingungen, trockenere und feuchtere, heißere und kühlere. Diese Bedingungen beeinflussen nicht zuletzt, wie schnell oder langsam sich die Nucleobasen zu RNA-Ketten zusammenfinden.

Bausteinlieferung: Meteore, nicht Staubkörner

Das erste interessante Ergebnis der Studie ist, dass Meteore, nicht interplanetare Staubkörner, die Hauptquelle für jene Nucleobasen sind, wel-

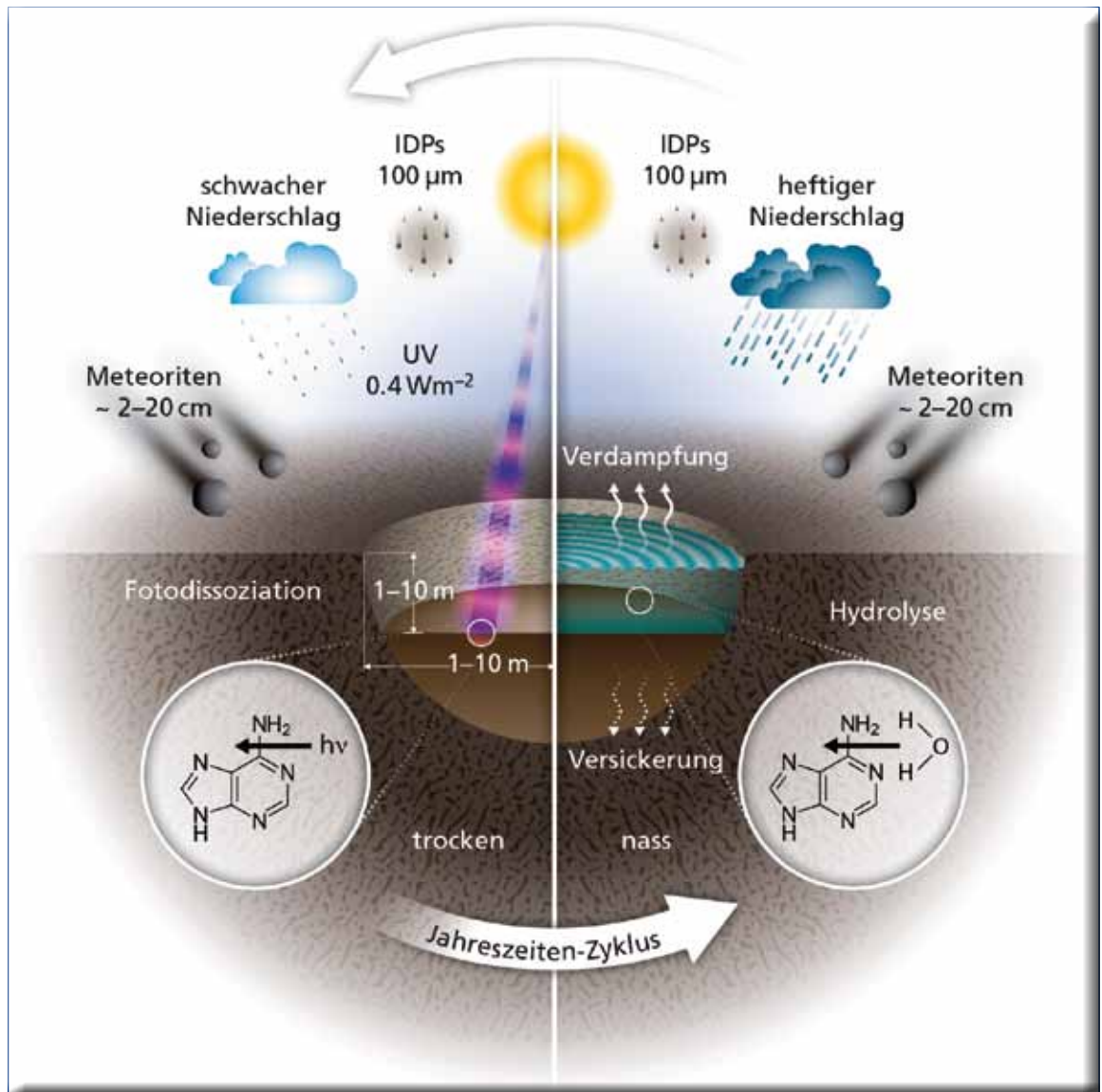


Abbildung 4: Schematische Darstellung der verschiedenen Einflüsse auf chemische Verbindungen in kleinen warmen Teichen im Wasser und während der Trockenphase: Materialnachschub durch Meteoriten und interplanetare Staubkörnern, Versickerung, Verdunstung, Wiederbefüllung durch Niederschlag, Hydrolyse komplexerer Moleküle und Photodissoziation durch UV-Photonen der Sonne (Abb.: McMaster University).

che die verschiedenen widrigen Bedingungen überleben. Der Grund dafür ist schlicht, dass die gleichmäßige Ablagerung von Staubkörnern in direktem Wettbewerb zu den Mechanismen des Nucleobaseverlustes steht, wie Versickerung und Photodissoziation. Meteoriten hingegen deponieren jeweils auf einen Schlag beträchtliche Menge an Nucleobasen. Das führt zumindest für eine kürzere Zeit zu höheren Nucleobasen-Konzentrationen im Teich.

Wie sich herausstellt, reicht die kürzere Zeit mit höheren Konzentrationen bereits aus, dass die Nucleobasen längere RNA-Moleküle bilden können. Diese wiederum gehen nicht so leicht verloren wie ihre kürzeren Verwandten. Insbesondere versickern längere RNA-Moleküle aufgrund ihrer Größe nicht durch typische Ba-

salt-poren. So können längere RNA-Moleküle, haben sie sich einmal gebildet, überleben, um anschließend an komplexeren chemischen Reaktionen teilzunehmen – und den Ausgangsstoff dafür liefern Meteorite, nicht der stetige, aber schwache Strom an einfallenden Staubpartikel aus dem Weltraum.

Warum Leben sich vergleichsweise schnell gebildet haben dürfte

Das Ablagerungsmodell hat interessante Konsequenzen für die Zeitskalen, auf denen Leben entstanden ist. Im Laufe der Zeit nimmt die Meteoritenrate nämlich schnell ab – für Leben, das aus deponiertem Meteoritenmaterial entstanden

ist, gibt es damit nur ein vergleichsweise kurzes Zeitfenster. Die meisten der Nucleobasen-Lieferungen durch Meteoriten müssen ziemlich früh angekommen sein, bis etwa 4,17 Milliarden Jahre vor unserer Zeit. Demnach müsste sich die RNA-Welt auch schon früh gebildet haben, nämlich 200 bis 300 Millionen Jahre, nachdem sich die Erdoberfläche ausreichend abgekühlt hatte, um flüssiges Wasser zuzulassen – also Ozeane und Seen an der Erdoberfläche.

Wir sind, wie gesagt, noch weit davon entfernt, ein vollständiges, widerspruchsfreies und allgemein anerkanntes Modell für die Entstehung von Leben auf der Erde gefunden zu haben. Die jetzt von Pearce und seinen Kollegen veröffentlichte Berechnung dürfte aber bereits ein wichtiges Teil des Puzzles sein. Sie liefert den Nachweis, dass Meteoriten eine wichtige Rolle dabei gespielt haben dürften, um die Bausteine des Lebens auf die Erde zu bringen, und sie legt nahe, dass längere RNA-Stücke vergleichsweise früh in der Erdgeschichte entstanden sein dürfte. Damit wird das Szenario der Entstehung von Leben in kleinen, warmen Teichen deutlich gestärkt gegenüber dem konkurrierenden Szenario hydrothermaler Quellen in der Tiefsee.

Auf dem Weg zu einem Standardmodell der Lebensentstehung benötigen wir all die quantitativen Analysen, die in die Arbeit eingingen: Berechnungen, die unser Wissen über die Geologie der frühen Erde, die chemischen Bedingungen, die Eigenschaften der beteiligten Moleküle und astronomische Informationen über die Eigenschaften von Meteoriten und interplanetaren Stäuben miteinander verbinden, um uns zu sagen, welche der hypothetischen Schritte von einfachen Chemikalien bis hin zu selbstproduzierenden lebenden Zellen möglich sind und welche nicht.

Wir leben diesbezüglich in einer spannenden Zeit – dass solch eine quantitative Analyse nun erstmals möglich ist, verdanken wir Fortschritten auf vielen Gebieten: von der Mikrobiologie über die Suche nach Exoplaneten bis hin zu Beobachtungen planetarer Kinderstuben bei anderen Sternen. Nur dank all dieser Fortschritte können wir Spekulationen durch quantitative Analysen ersetzen.

Dmitry Semenow vom Max-Planck-Institut für Astronomie gibt jetzt den Stab an die Experimentatoren weiter: „Basierend auf dem, was wir über die Planetenbildung und die Chemie des Sonnensystems wissen, haben wir ein konsistentes Szenario für die Entstehung des Lebens auf der Erde vorgeschlagen. Wir haben plausible physikalische und chemische Informationen über die Bedingungen geliefert, unter denen das Leben hätte entstehen können. Jetzt sind die Experimentatoren an der Reihe, herauszufinden, wie das Leben unter diesen ganz spezifischen frühen Bedingungen tatsächlich entstanden sein könnte.“ **CLB**

Quelleninformation

Die hier beschriebene Arbeit ist als B. K. D. Pearce et al., „Origin of the RNA World: The Fate of Nucleobases in Warm Little Ponds“ am 28. August 2017 in den Proceedings der National Academy of the United States of America veröffentlicht worden. Die beteiligten Forscher sind Ben K. D. Pearce (McMaster University), Ralph E. Pudritz (McMaster University, Max-Planck-Institut für Astronomie und Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg), Dmitri Semenov und Thomas K. Henning (beide Max-Planck-Institut für Astronomie).