

BRODELNDES LEBEN

TEXT: AENEAS ROOCH

50 Wenn eines Tages eine Raumsonde auf dem Saturnmond Enceladus oder einer anderen fernen Welt landet: Würde die Menschheit Leben erkennen, wenn es dort welches gäbe? Die Bausteine des Lebens, Aminosäuren und Nukleobasen, schwirren zumindest reichlich durchs All. Doch welche Zutaten und Umweltbedingungen braucht es genau, damit Leben entsteht? Forschende der Max-Planck-Gesellschaft hoffen, die Antwort bei einem Blick zurück zu finden: Wie wurde einst auf der Erde aus toter Chemie lebendige Biologie?

Was Leben ist, scheint offensichtlich: Ein Bakterium lebt, ein Stein nicht. Doch sobald Fachleute versuchen, eine allgemeingültige Definition zu formulieren, beginnt das Gerangel zwischen Biologie, Chemie, Kosmologie und Philosophie. Ein möglicher Kompromiss ist, drei Kerneigenschaften zu fordern.

Erstens muss Leben einen Stoffwechsel besitzen. Eine lebende Zelle etwa nimmt Energie auf und baut damit komplizierte Moleküle. Zweitens muss eine lebende Entität von ihrer Umgebung zu unterscheiden sein. Moleküle, die herumliegen, sind noch kein Leben, und seien sie auch noch so komplex. Erst wenn sie eine Hülle haben, die sie zusammenhält und das Außen vom Innen trennt, entsteht ein System, das leben kann. Drittens muss das System bei der Fortpflanzung Informationen an Nachkommen weitergeben – ob durch DNA, RNA oder einen ganz anderen Mechanismus –, sonst beginnt jede Generation wieder bei null.

Diese drei Kriterien klingen elegant, werfen jedoch sofort neue Fragen auf. Müssen etwa immer alle Eigenschaften erfüllt sein? Viren besitzen beispielsweise Erbinformationen, aber keinen Stoffwechsel, doch sind sie nicht auch irgendwie lebendig? Und

was genau macht einen Stoffwechsel aus? Könnte eine hypothetische Lebensform auf einem fernen Mond nicht auf ganz andere Art Energie beziehen als Lebewesen auf der Erde? „Ich schaue mir das Leben an, wie es hier bei uns ist, denn es ist das einzige, das wir kennen“, sagt Martina Preiner. Die Chemikerin leitet die Arbeitsgruppe „Geochemische Protoenzyme“ am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg und erforscht, wie Leben auf der Erde entstanden sein könnte.

Ab dem Zeitpunkt, zu dem es die erste funktionierende Mikrobe gab, ist die weitere Geschichte überschaubar: Wie aus kernlosen Einzellern solche mit Zellkern entstanden sind und sich daraus dann Mehrzeller entwickelten, ist zwar nicht lückenlos geklärt, „die Wissenschaft hat da aber viele Ideen und Indizien“, fasst Martina Preiner zusammen. Was aber war davor? Wie ist diese erste funktionierende →

WISSEN AUS

— BIOLOGIE & MEDIZIN

Habemus vitam!
Zumindest glauben
Forschende, dass sich
das Leben beziehungs-
weise erste Stoffwechsel-
reaktionen an hydro-
thermalen Quellen
gebildet haben könnten.
Hier am Iguanas-
Hydrothermalfeld nahe
der Galapagosinseln tritt
Hunderte Grad Celsius
heißes Wasser aus der
Erdkruste aus und führt
gelöste Mineralien mit
sich, die die schwarze
Farbe der Ausgasungen
erklären und sich an den
Schloten ablagern.

Mikrobe entstanden? Hier verlieren sich die Spuren in den Nebeln einer vier Milliarden Jahre entfernten Vergangenheit. Die Forschung nähert sich dieser Vergangenheit von zwei Seiten.

Gestatten, Luca!

Der erste Ansatz ist die Genetik: Ausgehend von heute lebenden Einzellern rekonstruieren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler den Stammbaum des Lebens. An dessen Ursprung sitzt der hypothetische Vorfahr allen irdischen Lebens, der „Last Universal Common Ancestor“, genannt Luca. Er ist ein theoretisches Konstrukt, das Minimum dessen, was eine funktionierende Zelle eint

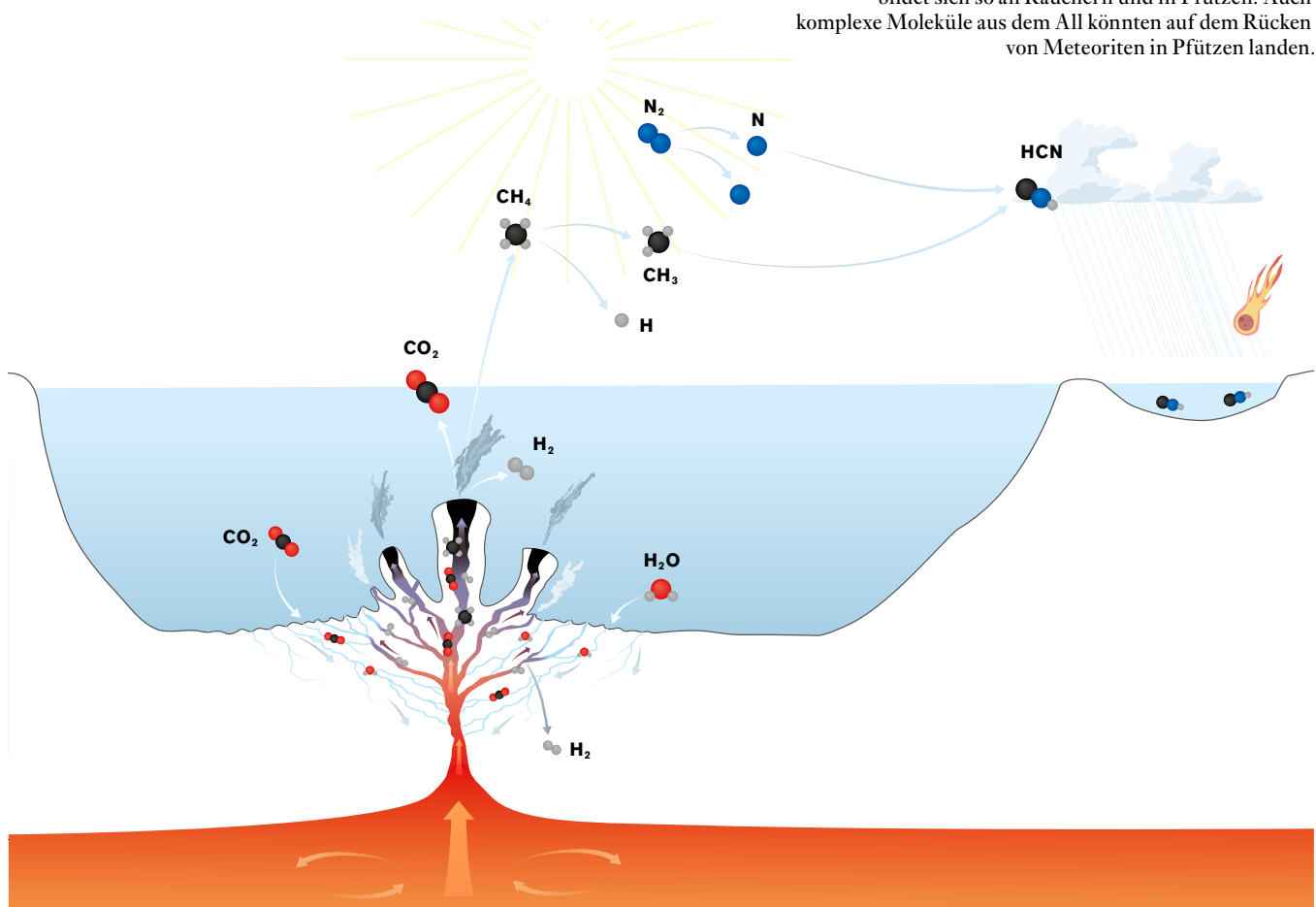
gebraucht haben muss. „Wovon hat Luca gelebt?“, fragt sich Martina Preiner. „Wahrscheinlich von Kohlenstoffdioxid, um an Kohlenstoff zu kommen, wahrscheinlich von Wasserstoff, um Energie und Elektronen zur Verfügung zu haben, wahrscheinlich von Übergangsmetallen wie Eisen, Kobalt und Nickel.“ Einzeller mit genau diesem Stoffwechsel existieren noch heute in Meeressedimenten und Kuhmägen.

Der zweite Ansatz, Luca näherzukommen, ist die Chemie: Man beginnt mit einfachen chemischen Verbindungen und versucht durch Berechnungen und Experimente herauszufinden, wie aus ihnen die Urzelle hervorgegangen sein könnte. Stand der Wissenschaft ist: „Wir wissen nicht genau,

wie Luca aussah oder entstehen konnte“, fasst Preiner zusammen. Zwei Denkschulen dominieren die Debatte: die „RNA zuerst“- und die „Stoffwechsel zuerst“-Hypothese.

Die RNA-zuerst-Theorie nimmt an, dass am Anfang informationstragende RNA-Moleküle standen. RNA kann sich selbst reproduzieren und als Katalysator wirken, ist also gleichermaßen Informationsträger und Stoffwechselbeschleuniger. Wenn es ein solches Molekül einmal gibt, so die Idee, kommt alles, was heute unter Stoffwechsel verstanden wird, fast automatisch nach. Chemikerinnen und Chemiker haben inzwischen Wege entdeckt, die beschreiben, wie RNA-Bausteine auf der frühen Erde entstanden sind, bevor es Leben

Chemie der jungen Erde: Aus hydrothermalen Schloten am Meeresgrund entweichen Wasserstoff (H_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Methan (CH_4). H_2 entsteht durch Gesteinsumwandlung (Serpentinisierung) da, wo sich Magma und in die Kruste eindringendes Meerwasser mit gelöstem atmosphärischem CO_2 und N_2 begegnen. In der Atmosphäre reagiert dann CO_2 mit H_2 zu CH_4 . Das UV-Licht der Sonne spaltet CH_4 und N_2 , Regenwasser füllt Tümpel mit neu entstandenen HCN-Molekülen. Organisches Material bildet sich so an Rauchern und in Pfützen. Auch komplexe Moleküle aus dem All könnten auf dem Rücken von Meteoriten in Pfützen landen.



gab. Allerdings sind viele Detailfragen offen, zum Beispiel wie genau sich der komplexe Stoffwechsel, der bei heutigen Lebewesen zu finden ist, aus der RNA gebildet hat.

„Ich kann mir nicht vorstellen, wie aus etwas so Komplexem wie RNA kleinteiligere Elemente eines Stoffwechsels entstehen“, sagt Martina Preiner. Sie forscht an der Stoffwechsel-zuerst-Theorie. Diese Hypothese besagt, dass es kleine chemische Stoffzyklen gab, Abfolgen von chemischen Reaktionen, die ganz von allein mit den Zutaten ablaufen, die eben herumliegen. Sie sind pure Geochemie. Aus diesen Stoffzyklen könnte sich die Genetik entwickelt haben. „Diese Sichtweise erscheint mir plausibel, weil sie kleinteiliger ist: Aus einfacher Chemie wachsen Stoffzyklen heran, die sich allmählich verdichten und verkomplizieren.“ Doch die Wissenschaft weiß nicht, ob ein Ansatz dem anderen überlegen ist. „Der einzige Beweis für den Ursprung des Lebens ist das Leben, wie es heute existiert“, sagt Preiner. Dazu beigetragen haben womöglich beide Mechanismen.

Die Chemikerin interessiert sich für ein Detail der Stoffwechsel-zuerst-Theorie. Eine Zelle, die von ihrer Umwelt getrennt ist, braucht einen Austausch zwischen Innen und Außen, um aus ihrer Umgebung Energie abzuzapfen. Zu den ältesten Strukturen des Lebens, die das ermöglichen, zählen Lipidmembranen. „Doch Luca hatte sie noch nicht zur Verfügung. Wie hat die Urzelle also Energie aus ihrer Umgebung gewonnen?“, fragt sich Martina Preiner. Vielleicht liegt die Antwort in Gesteinsporen, in winzigen Hohlräumen in frühem, eisenhaltigem Silikatgestein, welches an sogenannten Rauchern auftritt. Das sind Schlote in der Tiefsee, aus denen heißes Wasser austritt. „Dort können grundlegende Stoffwechselreaktionen Lucas von alleine ablaufen“, sagt Preiner. Eine Erklärung wäre diese: Das poröse Gestein ist wie ein Kochtopf für einen solchen Stoffwechsel. Wasser reagiert mit dem im Gestein vorhandenen Eisen zu Wasserstoffgas (H_2). Mineralien, die sich in dem porösen Gestein befinden, darunter Eisenerze und Nickel-Eisen-

Verbindungen, beschleunigen die Reaktion von H_2 mit CO_2 , so wie im Stoffwechsel von Luca. Ähnliche Zutaten finden sich heute auch in modernen Enzymen.

Diese Reaktionen zwischen CO_2 und H_2 in Wasser auf Mineraloberflächen haben auch Martina Preiner und andere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Laborexperimenten beobachtet. Über Nacht ent-

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Martina Preiner vom Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie und Klaus Paschek vom Institut für Astronomie erforschen zwei Hypothesen, die erklären, wie Leben auf der jungen Erde entstanden sein könnte.

Preiner untersucht einfache Stoffwechselzyklen in der Umgebung hydrothermalen Quellen am Meeresgrund, Paschek die frühe Bildung von RNA-Molekülen in feuchten Tümpeln an der Oberfläche. Meteoriteneinschläge in solche Pfützen könnten für einen chemischen Boost gesorgt haben.

Wahrscheinlich waren damals beide Prozesse am Werk. Auch wenn noch kein Leben jenseits der Erde nachgewiesen wurde, können die Voraussetzungen, wie flüssiges Wasser, auch auf anderen Planeten und Monden existieren. Erste Hinweise gibt es etwa beim Saturnmond Enceladus.

standen so dieselben organischen Moleküle, die auch das Rückgrat von Lucas Stoffwechsel ausmachen: Ameisensäure, Essigsäure, Pyruvat. Diese können sich mit Ammoniak – auch mithilfe von Mineralien – zu Aminosäuren, also den Bausteinen von Proteinen, weiterentwickeln. Damit ist der Weg hin zu den ersten Nucleobasen nicht weit, aus denen sich das Erbgut aufbaut.

Die Gesteinsporen bieten einen weiteren Vorteil: Sie schaffen eine feuchte, aber nicht nasse Umgebung. „Wasser ist für Leben zwar unverzichtbar, doch bei der Herstellung von Leben ist Wasser auch im Weg“, sagt Martina Preiner. Denn zu viel Wasser spült die Moleküle weg, bevor sie zusammenfinden. Im Gestein um die Raucher jedoch wird viel Wasser chemisch gebunden. Die Poren, gerade einmal wenige Nanometer groß, sind dadurch feucht genug, damit Chemie stattfinden kann, aber hinreichend trocken, um empfindliche Moleküle nicht auseinanderzureißen. „Dieses Milieu, in dem sich also nass und trocken abwechseln, ermöglicht unterschiedliche chemische Reaktionen nacheinander und könnte damit ein Schlüsselfaktor für die Entstehung von Leben gewesen sein.“

Es regnete Blausäure

Während Martina Preiner untersucht, wie sich erste biochemische Verbindungen in porösem Gestein entwickeln, erforscht Klaus Paschek am Max-Planck-Institut für Astronomie im Labor und am Computer eine andere Möglichkeit: Leben aus Abgasen. Die junge Erde war von einem riesigen Ozean bedeckt, unter Wasser brodelten die Raucher und spuckten heißes und mineralreiches Wasser, Wasserstoff und Methan aus. Die Gase stiegen in die Atmosphäre auf und stießen dort auf das UV-Licht der jungen Sonne. „Die UV-Strahlung war damals energiereicher als heute“, sagt Paschek. „Da ist dann Fotochemie abgelaufen und hat aus den Gasen unseren Lieblingsbaustein hergestellt: HCN, also Blausäure. Mit Regen ist die Blausäure dann auf die Erde in kleine Tümpel und Pfützen gespült worden, wo immer wieder Wasser verdunstet und durch Regen nachgekommen ist.“ Die Nass-Trocken-Zyklen in diesen sogenannten Darwin'schen Pfützen ähneln denen, die sich im Gestein der Raucher abgespielt haben könnten. Solche warmen, schmutzigen Pfützen bieten ein ideales Umfeld für einfache chemische Zutaten, um sich zu etwas Neuem und Komplexem zusammenzuschließen. Ob Tiefseegestein →

FOTO: KATRIN BINNER / MPG

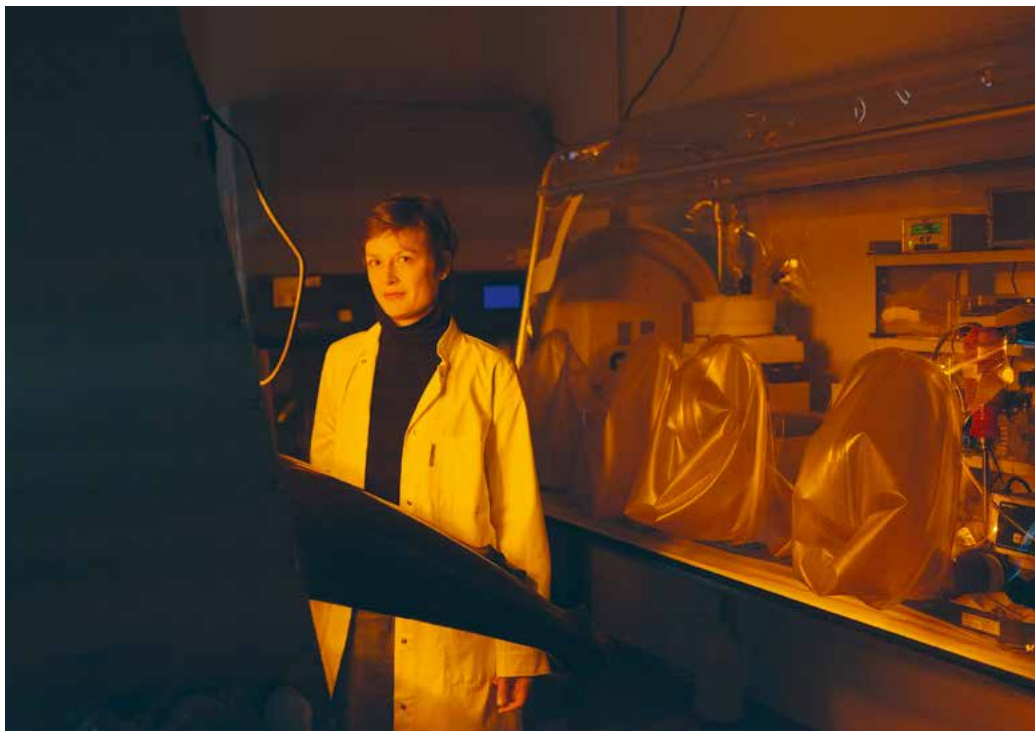


FOTO: ANNA ZIEGLER / MPG



54

oder Pfützen an der Oberfläche – die zwei mutmaßlichen Entstehungsorte des Lebens haben also Gemeinsamkeiten.

Lebens-Booster aus dem Weltall

„Vielleicht gab es bei den Pfützen noch einen Booster aus dem Weltall“, sagt Klaus Paschek. „Ein Bruchstück eines Asteroiden könnte in eine Darwin’sche Pfütze eingeschlagen sein und Bausteine des Lebens mitgebracht haben.“ Asteroiden sind nämlich nicht nur tote Gesteinsbrocken: Viele von ihnen wurden im frühen Sonnensystem durch radioaktiven Zerfall von innen aufgeheizt, und in manchen von ihnen gab es flüssiges Wasser. In solchen warmen, wasserreichen Gesteinen entstanden – so die Hypothese – aus einfachen Molekülen, etwa der Blausäure HCN oder Ammoniak, komplexere organische Stoffe, darunter sogar Vorläufer von RNA-Bausteinen und Zucker.

Die Tatsache, dass Biomoleküle auch im All entstehen, zeige, wie natürlich sich solche Moleküle zusammenfügen, so Martina Preiner.

Ein anderer Teil der organischen Verbindungen ist wahrscheinlich noch viel früher in der protoplanetaren Scheibe entstanden, in der sich Sonne und Planeten geformt haben: Staubkörner, überzogen mit Wasser- und Methanol-Eis, wurden von UV-Licht bestrahlt und chemisch verändert. Hier haben sich demnach chemische Grundstoffe gebildet, die sich dann auch in Asteroiden wiederfanden.

Bricht nun ein Meteorit aus einem Asteroiden heraus und fällt in eine Pfütze auf der jungen Erde, bringt er einen Cocktail an Chemikalien mit: Bausteine von DNA und RNA, einfache Zucker und einiges mehr, aus denen die ersten biologischen Moleküle entstanden sind. „Unsere Theorie ist unkonventionell“, gibt Klaus Paschek zu. In einer warmen Pfütze haben dann vielleicht terrestrische und kosmische Chemie zusammenge-

funden und aus toter Materie einen ersten Hauch von Leben geformt.

„Aus einem Molekül wie HCN lässt sich im Prinzip fast alles kochen, was eine Zelle braucht“, sagt Paschek, und sowohl das Weltall als auch die junge Erde konnten die nötigen Zutaten liefern – in Asteroiden, in hydrothermalen Quellen, in warmen Tümpeln. Die Atmosphärenchemie auf der Erde hatte dabei allerdings einen entscheidenden Vorteil: „Während Meteoriteneinschläge Einzelereignisse waren, punktuelle Chemiekicks, haben Vulkane beständig Gase in die Atmosphäre gepumpt, UV-Strahlen Reaktionen in Gang gesetzt und Regengüsse die Ergebnisse in Pfützen herabtransportiert.“ Die Geochemie hat also stetigen Nachschub an Zutaten geliefert. Da war es dann auch nicht so tragisch, wenn eine Handvoll frühen Lebens Opfer garstiger Umweltbedingungen wie eben der starken UV-Strahlung geworden ist. Martina Preiner glaubt ohnehin, dass alle frühen Bausteine von der Erde kommen mussten:



Links: Martina Preiner nach Feierabend im Labor am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, wo sie die brodelnde Chemie der frühen Erde erforscht.

Rechts: Am Max-Planck-Institut für Astronomie schützt sich Klaus Paschek (rotes T-Shirt) vor einem UV-Laser, der künstlich erzeugte Moleküle anregt, wie sie im All entstehen könnten. Michael Hermann (Mitte) und Tushar Suhasaria treffen Vorbereitungen, um diese Moleküle zu analysieren.

„Selbst wenn wir Aminosäuren oder Nucleobasen von Asteroiden aus dem All bekommen haben, hätte das Leben hier auf der Erde schon von Anfang an einen Weg finden müssen, das Zeug selbst zu bauen, unabhängig von externen Zulieferern. Leben ist die Interaktion der Bausteine im Stoffwechsel, nicht die Summe der Moleküle selbst.“

Könnte ein solcher Meteoriteneinschlag in eine warme Pfütze vielleicht auch auf einem anderen Planeten oder Mond stattfinden und Leben hervorbringen? Zumindest bräuchte es dort flüssiges Wasser und somit eine Atmosphäre. Auf der Erde sorgt der Druck der Gasglocke über dem Erdboden für flüssiges Wasser. Sonneneinstrahlung lässt Teile des Meerwassers verdampfen und der Luftaustausch zwischen Gegenden unterschiedlichen Atmosphärendrucks führt zu Winden, die den Wasserdampf davontragen, ehe er wiederum zu Regen kondensiert. Solche Nass-Trocken-Zyklen funktionieren also nur auf erdähnlichen Planeten.

Bisher hat kein Teleskop flüssiges Wasser auf Gesteinsplaneten gefunden, die so groß sind, wie die Erde. Entweder ist die Erde also wirklich besonders, oder Forschende hatten bei den bisher untersuchten Planeten schlichtweg Pech. Leichter zu finden sind aufgrund ihrer hohen Masse Supererden, also Gesteinsplaneten, die schwerer sind als die Erde. Viele von ihnen dürften geologisch aktiver sein und auch Atmosphären besitzen. Es gibt immerhin Hinweise auf Wasserdampf in der Atmosphäre solcher Planeten, dieser wäre auch messbarer als flüssiges Wasser, aber sicher sind sich die Forschenden noch nicht. Mehr Klarheit könnte das Extremely Large Telescope bringen, das in wenigen Jahren als das größte Auge der Erde auch Exoplanetenatmosphären studieren wird. Sofern es dort also Wasser gibt, könnten die Prozesse, die Klaus Paschek untersucht, ablaufen.

Recht sicher finden sich flüssiges Wasser sowie Spurenelemente des Lebens aber auch an unwirtlicheren Orten, wie etwa unter dem dicken Eispanzer des Saturnmondes Enceladus. Die Raumsonde Cassini hat in den Wasserdampf- und Eisfontänen dieses Mondes organische Moleküle nachgewiesen. Diese könnten mit protoplanetaren Staubkörnern oder Asteroidenbruchstücken dorthin gelangt sein. Und es scheint hydrothermale Quellen am Grund eines Wasser-Ozeans im Inneren Enceladus zu geben, die den durchgehenden Eis-

panzer des Mondes durchbrechen. Hier treffen Wasser, Gestein und Energie zusammen, eine Grundlage für Leben, wie es Martina Preiner erforscht.

„Ich glaube, es gibt einfache Mikroben deshalb auch woanders“, mutmaßt Klaus Paschek, „komplexe Lebensformen aber wohl eher nicht, auf der Erde hat es schließlich auch 4,5 Milliarden Jahre bis zum *Homo sapiens* gedauert.“ Auch Martina Preiner hält außerirdisches Leben für möglich: „Ich bin optimistisch, dass wir auf dem Mars Vorläufer von Leben finden könnten.“

Biologie gegen Chemie, RNA gegen Stoffwechsel, hydrothermale Quellen gegen Darwin'sche Pfützen – Klaus Paschek sieht dabei keinen Favoriten: „Die Entstehung des Lebens ist so unwahrscheinlich, dass die Natur vermutlich jeden verfügbaren Vorteil genutzt und alles verwendet hat, was sie kriegen konnte.“ Vielleicht gibt es also nicht die eine Ursuppe, sondern verschiedene. Möglicherweise entwickelten sich verschiedene Vorstufen des Lebens zur gleichen Zeit nebeneinander, mehrere Lucas, von denen nur eine Linie überlebte? Vielleicht ist die Menschheit also nicht einzigartig, sondern nur eines von vielen Ergebnissen der gleichen kosmischen Experimente, und irgendwo arbeitet gerade ein neuer Stoffwechsel daran, seine eigene Version dieser Zufallsgeschichte zu beginnen. ←