

genannten Indizien auf Wassereis unter der Oberfläche liegen nun Modellierungsergebnisse vor, die auf der Basis detaillierter Messungen des Schwerefeldes von Ceres gemacht wurden. Die Raumsonde *Dawn* ist im Jahr 2018, kurz bevor ihr der Treibstoff ausging, in einem letzten Manöver in geringer Höhe über den berühmten Occator-Krater (Abb. 2) hinweggeflogen und hat dabei sehr genaue Messungen des Schwerefeldes dieses Gebietes gemacht. Diese Messungen wurden ausgewertet und ermöglichen eine detaillierte Modellierung der Dichteverteilung der inneren Schichten um den Krater herum.

Diese Auswertungen legen das Vorkommen flüssigen Wassers unter der Oberfläche nahe. Lange haben die Astronomen gezögert, diese Schlussfolgerung zu ziehen, da ihnen kein Mechanismus bekannt war, wie sich flüssiges Wasser auf einem so kleinen Himmelskörper halten kann. Bei den anderen Eismonden wird als Mechanismus die Gezeitenwirkung der nahe gelegenen Planeten Jupiter und Saturn angenommen, die durch Reibung des Inneren der Monde für die notwendige Wärmeenergie sorgen. Bei Ceres ist aber kein Planet in der Nähe. Die Astronomen setzen nun auf eine mögliche Erklärung, die eine Kombination zweier Faktoren ist: Das Wasser ist extrem salzhaltig, was den Gefrierpunkt deutlich absenkt. Außerdem könnte das Innere des Mondes schwach radioaktiv sein. Ob diese Erklärung ausreicht, ist noch nicht abschließend erforscht. Vielleicht ist Ceres auch einfach jünger als bislang angenommen.

{CARROZZO FC et al. (2018) Nature, formation, and distribution of carbonates on Ceres. *Sci. Adv.* 4:e1701645, <https://advances.sciencemag.org/content/4/3/e1701645> • MARCHI S et al. (2016) The missing large impact craters on Ceres. *Nat. Commun.* 7: 12257 • RAPONI A et al. (2018) Variations in the amount of water ice on Ceres' surface suggest a seasonal water cycle. *Sci. Adv.* 4:eaa03757, <https://advances.sciencemag.org/content/4/3/ea03757> • RAYMOND CA (2020) Impact-driven mobilization of deep crustal brines on dwarf planet Ceres. *Nature Astronomy* 4, p741.] P. Korevaar

■ Neues über Lebensentstehung? Oder von der Überinterpretation einfacher chemischer Systeme

Wie aus unbelebter Materie Leben entstehen konnte, ist eine der großen Fragen der Wissenschaft. Zum einen sind sich selbst vervielfältigende (replizierende) Moleküle für den Übergang von der Chemie zu lebenden Systemen notwendig, zum anderen müssen sie aber auch in einen Stoffwechsel eingebunden sein. Chemische Systeme, die entweder replizieren oder stoffwechselähnliche Reaktionen durchführen, wurden bereits im Labor von Chemikern (gezielt) erzeugt, und einige können sogar bei Zugabe von Chemikalien oder unter veränderten Randbedingungen von einer Funktion zur anderen wechseln. Leben braucht jedoch beides gleichzeitig.

Die niederländische Forschungsgruppe um Sijbren OTTO beschäftigt sich seit über einem Jahrzehnt mit diesen Fragen. OTTO ist nicht daran interessiert, herauszufinden, wie Leben einst entstanden sein könnte, ihn interessiert vielmehr die Frage, ob man das Leben selbst gestalten kann. Dabei ist es ihm gleichgültig, ob es auf DNA, RNA oder Proteinen basiert oder nicht (persönliche Mitteilung). Im Laufe der Zeit hat sich seine Arbeitsgruppe einige ausgeklügelte selbstreplizierende chemische Reaktionen ausgedacht (COLOMB-DELSUC et al. 2015, SADOWNIK et al. 2016). Das von ihnen entwickelte sich replizierende System besteht aus ringförmigen Molekülen, die so konzipiert sind, dass sie in Lösung Stapel bilden. Durch mechanische Beanspruchung (Rühren der Lösung) brechen die Stapel und die Stapelfragmente können jeweils weiterwachsen. Das System stellt eine sehr simple Modellierung der Replikation von biologischen Systemen dar, hat dabei aber den Vorteil, dass es leicht mathematisch beschreibbar ist.

Nun beschreibt diese Gruppe in ihrem Modellsystem eine Art „Stoffwechsel“ in Molekülen. Sie beobachteten, dass die von ihnen verwendeten Replikator-Moleküle eine Reaktion katalysieren, bei der

Verbindungen entstehen, die helfen, die eigenen Bausteine des Replikators herzustellen (OTTELÉ et al. 2020). Es zeigte sich, dass die Stapel aus ringförmigen Molekülen (Replikator) eine Reaktion (Abspaltung einer Schutzgruppe von der Aminosäure Glycin) katalysieren, während die einzelnen Bausteine dies nicht können. Das kommt daher, dass im Stapel zusammengelagerte positive Ladungen (Seitenketten) dicht beieinander sitzen, was lokal eine hohe Basizität erzeugt und damit die Entfernung der Schutzgruppe begünstigt. Dazu reichen die positiven Ladungen an den einzelnen ringförmigen Molekülen nicht aus. In einem populären Hinweis auf die aktuellen Arbeiten schreibt KRÄMER (2020): „Es könnte eines der lebens-echtesten chemischen Systeme sein, das je geschaffen wurde, da es zwei der drei wesentlichen Merkmale des Lebens – Replikation, Metabolismus und Abschottung – kombiniert.“

Ist diese Art von Experimenten für das Verständnis des Ursprungs des Lebens auf der Erde, wie wir es kennen, relevant? OTTO schrieb in einem persönlichen E-Mail-Austausch: „Die derzeitigen Systeme werden außerhalb des Labors nicht lange überleben, geschweige denn dort Material zur Reproduktion finden. Die Frage, ob ähnliche [auf begrifflicher Ebene ähnliche, aber auf anderen Molekülen basierende] Systeme spontan entstehen könnten, ist schwieriger zu beantworten. Meiner Meinung nach ist jedoch das spontane Auftauchen [eines solchen Systems] weniger problematisch als das spontane Auftauchen eines Systems, das der heutigen Biochemie ähnelt.“

Tatsächlich verwendet OTTOs Gruppe eine recht großzügige Definition von „Selbstreplikator“, die mit der Replikation von Biopolymeren im Leben nichts zu tun hat. Dennoch soll diese Arbeit zur weiteren Forschung zur Entstehung von Leben aus Nichtleben (Abiogenese) ermutigen. Einige schwerwiegende Einschränkungen für die Anwendung des Begriffs „Selbstreplikator“ auf die Abiogenese seien hier genannt. Erstens: die Ausgangsmonomere (Einzelbauteile; kurze Polypeptide, die mit einem

Benzoldithiol verbunden sind) sind gereinigte, konzentrierte, intelligent ausgewählte Moleküle mit einer intrinsischen Fähigkeit zur Aggregation. Diese Bedingungen sind weit von dem entfernt, was in präbiotischen Umgebungen der jungen Erde erwartet wird. Zweitens verbinden sich die Ausgangsmomere nicht kovalent zu einem Polymer (wie in RNA, DNA oder Proteinen); sie ziehen sich lediglich an, um eine makromolekulare Einheit zu bilden. Mechanische Störungen brechen das wachsende Makromolekül auf, um eine erhöhte Anzahl von Stellen zu ermöglichen, die anschließend die Moleküle wachsen lassen (die Stapelbruchstücke können in Gegenwart ausreichender Mengen an Replikatoren jeweils an beiden Enden weiterwachsen. Dies wird als „Selbst-Replikation“ bezeichnet). Dieser Vorgang gleicht jedoch viel mehr einem Kristallwachstum als der Replikation eines Biopolymers.

Die Neuheit in diesem Artikel besteht darin, dass in der Struktur des aggregierenden Stapels katalytische Fähigkeiten vorhanden sind, die dann die Wachstumsrate dieses Makromoleküls weiter aufrecht erhalten. Wie oben von OTTO selbst anerkannt, unterscheidet sich diese Struktur aber völlig von den Systemen, die in Lebewesen vorkommen. Aber sie soll wenigstens ein Prinzip aufzeigen, das für die Abiogenese erforderlich ist. Die Tatsache, dass diese Arbeit in *Nature Catalysis* veröffentlicht wurde, zeugt davon, wie unkritisch Arbeiten in renommierten wissenschaftlichen Journalen akzeptiert werden, wenn darin der Eindruck erweckt wird, dass irgend ein Beitrag zum Verständnis einer möglichen Lebensentstehung präsentiert wird.

[OTTELÉ J, HUSSAIN AS, MAYER C & OTTO S (2020). Chance emergence of catalytic activity and promiscuity in a self-replicator. *Nature Catalysis* 3, 547–553 • KRÄMER K (2020) Self-replicating molecules show signs of metabolism for the first time. <https://www.chemistryworld.com/news/self-replicating-molecules-show-signs-of-metabolism-for-the-first-time/4012152.article> • COLOMB-DELSUC M, MATTIA E, SADOWNIK JW & OTTO S (2015) Exponential self-replication enabled through a fibre elongation/breakage mechanism. *Nat. Commun.*, doi:10.1038/ncomms8427 • SADOWNIK JW, MATTIA E, NOWAK P & OTTO S (2016) Diversification of self-replicating molecules. *Nat. Chem.* 8, 264–269.] P. Borger

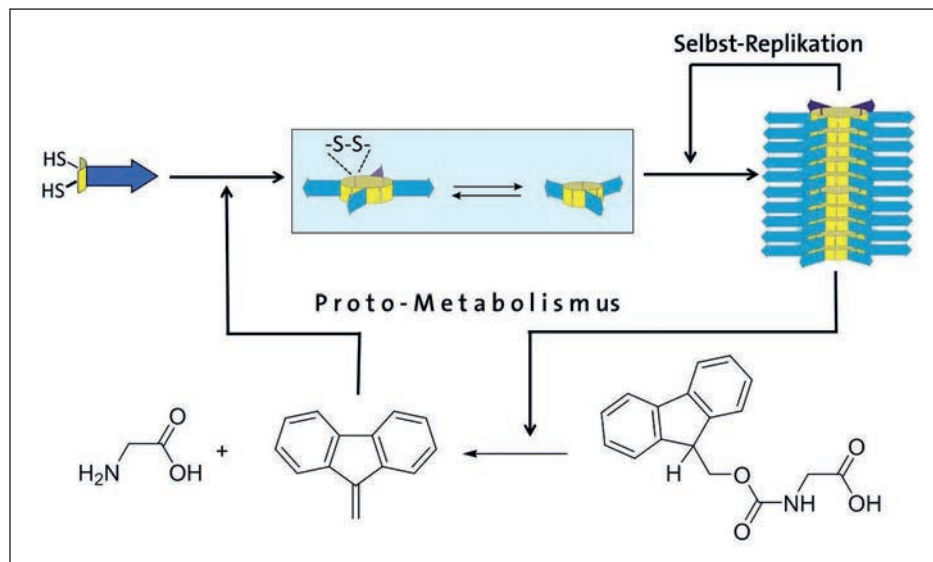


Abb. 1 OTTOs selbstreplizierendes System aus sechsgliedrigen Ringen (Hexameren) hat einen einfachen „Metabolismus“, bei dem es die Bildung eigener Bausteine aus Peptiden (blau) mit einer aromatischen Dithiolgruppe (gelb) katalysiert. Aus sechs Bausteinen bilden die Ringe schließlich Stapel. Diese Stapel wachsen und vervielfältigen sich durch Zerkleinerung, was zur Replikation der Hexameren führt.

■ Proteine in Meteoriten – heiße Spur außerirdischer Lebewesen?

Gegenwärtig ist eine große Mehrheit der Wissenschaftler davon überzeugt, dass Leben vor ca. drei Milliarden Jahren auf der Erde durch kleinschrittige chemische Vorgänge entstanden ist (chemische Evolution). Diese Annahme kann als moderne Urzeugungshypothese bezeichnet werden. Um dieses theoretische Konzept zu untermauern, werden im Rahmen der als „präbiotische Chemie“ bezeichneten Forschungsdisziplin viele Anstrengungen unternommen, solche Prozesse mittels Simulationen im Labor nachvollziehen zu können – wenn auch bisher ohne Erfolg.

Ein anderer Forschungszweig, der auf der modernen Urzeugungshypothese beruht, ist die Suche nach Spuren außerirdischen Lebens: die Astrobiologie. Denn wenn angenommen wird, dass Leben auf der Erde ausschließlich durch physikalisch-chemische Vorgänge entstanden ist, dann sollte das auch auf anderen Planeten möglich sein. Diese Erwartungshaltung drückte CAIRNS-SMITH vor fast vierzig Jahren wie folgt aus: „Es scheint auch, dass synthetisches (Alien-) Leben eine Perspektive für die nahe Zukunft ist.“ Als mögliche heiße Spur werden Funde von Aminosäuren in Meteoriten angesehen.

Doch sind solche Funde bei weitem nicht ausreichend, um als Indiz für außerirdisches Leben zu gelten, da einige Aminosäuren auch in Abwesenheit von Lebewesen aus einfachen anorganischen Molekülen entstehen können.

Kürzlich behauptete die Forschungsgruppe um Julie McGEACH von der US-amerikanischen Harvard-Universität, zum ersten Mal Proteine in Meteoritengestein nachgewiesen zu haben. Die Forscher extrahierten kleine Bruchstücke des im Jahr 1990 in Algerien gefundenen Meteoriten Acfer 086 mit einem 3-Komponenten-Lösungsmittelgemisch (Chloroform, Wasser, Methanol) und analysierten die Extrakte mittels Massenspektrometrie. Mit dieser Technik können Moleküle mit sehr geringer Massendifferenz voneinander unterschieden werden. Anhand der aus den Spektren erhaltenen Daten leiteten McGEACH et al. ab, dass in den Proben als Hauptkomponente ein Molekül der Masse 2320 Dalton enthalten ist. Aus Spektren, die unter verschiedenen Bedingungen erhalten wurden, gewannen die Forscher Informationen über Fragmente dieses Moleküls, die während des massenspektrometrischen Experiments gebildet werden. So wurden Rückschlüsse auf plausible molekulare Bausteine, aus denen das große Molekül bestand, gezogen. Demnach soll es sich