

# ENTSTEHUNG DES LEBENS

**Berühmtes Experiment**

»Ursuppe« zündet nur im Glaskolben

**Präbiotische Welt**

Vom Gestein zur ersten Zelle

**Hydrothermale Spalten**

In der Tiefe geboren





**Frank Schubert**

E-Mail: [schubert@spektrum.de](mailto:schubert@spektrum.de)

## Liebe Leserinnen und Leser,

die schlechte Nachricht vorweg: Wie das irdische Leben entstanden ist, werden wir wohl nie genau wissen. Die einstigen Zwischenstufen dieses Prozesses existieren längst nicht mehr und dürften auch keine Spuren hinterlassen haben. Jedenfalls kennen wir keine Fossilien präbiotischer Strukturen. Wie auch: Es handelte sich vermutlich um chemische Reaktionsnetze in winzigen Bläschen oder Hohlräumen – was hätte an denen versteinern sollen? Selbst wenn es Fossilien von ihnen gäbe, ließen sie sich wohl nicht von mineralischen Gebilden unterscheiden.

Die gute Nachricht: Wir können uns dem Geheimnis des Lebens nähern, ohne seinen ursprünglichen Werdegang bis ins letzte Detail zu rekonstruieren. Wahrscheinlich gibt es viele Möglichkeiten, wie aus unbelebter Materie ein abgrenzbares System aus chemischen Reaktionen hervorgehen kann, das sich selbst erhält und vervielfältigt und an dem die Evolution anzusetzen vermag. Gelänge es, einen solchen Prozess im Labor ablaufen zu lassen, hätten wir empirisch gezeigt, dass er grundsätzlich möglich ist. Forschungsgruppen rund um den Globus arbeiten daran, und sie machen Fortschritte. Dieses Kompakt stellt Ihnen einige vor.

Herzlich Ihr

Frank Schubert

# Podcast



EVGENY / STOCK.ADOBE.COM (ERSTELLT MIT KI)

## KOMPAKT

**Präbiotische Evolution**

**Spektrum-Podcast**

**Stoffwechsel**

**Metalle**

**Sonnensystem**

**Hydrothermale Spalten**

**Bausteine des Lebens**

**Chemische Evolution**

**Wasser**

**Frühe Erde**

**CISS-Effekt**

**Kosmologie**

**Berühmtes Experiment**

## ENTSTEHUNG DES LEBENS

**04** Vom Gestein zur ersten Zelle

**21** Wo liegt der Ursprung des Lebens?

**24** Urahn aller Lebewesen ernährte sich von Wasserstoff

**28** Starthilfe fürs Leben

**32** Frühes Leben dank Monstergezeiten?

**40** In der Tiefe geboren

**58** Gesteinsklüfte als Sortierstation

**61** Ein riesiger katalytischer Reaktor

**65** Ohne Trockenheit gäbe es wohl kein Leben

**68** Keine Bausteine des Lebens in der Uratmosphäre

**71** Molekülstruktur steuert exotischen Quanteneffekt

**74** Peptide können auch im Weltall entstehen

**78** »Ursuppe« zündet nur im Glaskolben richtig



PRÄBIOTISCHE EVOLUTION

# Vom Gestein

zur  
ersten  
Zelle

VON MARTINA PREINER

**Indem wir aufdecken, was bio- und geologische Phänomene miteinander verbindet, können wir besser verstehen, wie das Leben aus einer abiotischen Umwelt hervorging. Hierfür gilt es, fachübergreifend zusammenzuarbeiten und sich nicht auf einzelne Hypothesen zu versteifen.**

**W**elchen Ursprung hat das Leben auf der Erde? Wer darüber forscht, gerät schnell in einen Widerstreit verschiedener Ansichten. Herrscht doch große Uneinigkeit über das Wo, Was, Wie und Warum jenes Vorgangs, der die biologischen Organismen hervorbrachte. Nur beim Wann ist man sich auf Grund von Fossilienfunden halbwegs einig: 3,5 bis 4 Milliarden Jahre ist es her, dass die ersten lebenden Zellen auf der Erde entstanden sind.

Das Forschungsgebiet ist von zahlreichen, oft sich gegenseitig ausschließenden Hypothesen geprägt, die verschie-

dene Ursprungsorte und -mechanismen postulieren. Tiefseequellen verbinden Fachleute meist mit Stoffwechsel-zuerst-Modellen, die davon ausgehen, das Leben sei ursprünglich aus chemischen Reaktionsnetzwerken hervorgegangen. Tümpel auf der Erdoberfläche hingegen werden üblicherweise mit Information-zuerst-Konzepten assoziiert, laut denen informationstragende Moleküle am Beginn des Lebens standen (siehe »Henne oder Ei?«). Zwar lässt die Forschungsdisziplin solche strikten Trennungen langsam hinter sich, doch was bleibt, ist – mangels Möglichkeiten, empirische Daten aus der Zeit vor vier Jahrmilliarden zu sammeln – eine große Unsicherheit.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die auf diesem Gebiet arbeiten, verfechten einzelne Hypothesen oft recht engagiert, tun sich aber eher schwer da-

---

**Martina Preiner** leitet die Max-Planck-Forschungsgruppe »Geochemische Protoenzyme« am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg.



mit, andere Ansätze in Betracht zu ziehen. Warum ist das so? Zunächst, weil es nur wenige gesicherte Erkenntnisse gibt – außer dass biologische Organismen existieren und sich selbst aufrechterhalten und vermehren. Wir kennen keine Fossilien von präbiotischen Strukturen, also Übergangsstufen zwischen toter und lebender Materie. Wahrscheinlich könnten wir sie auch gar nicht von mineralischen Gebilden unterscheiden. Fachleute haben Mikrofossilien entdeckt, die ziemlich eindeutig von Lebewesen stammen und auf ein Alter von 3,95 bis 3,45 Milliarden Jahren datieren. Aber selbst bei diesen fällt es oft schwer zu beweisen, dass sie tatsächlich das sind, was sie zu sein scheinen. Es handelt sich um kleine hohlraumähnliche Strukturen im Sediment, die praktisch genauso aussehen wie normale Gesteinsporen, selbst mit den besten bildgebenden Verfahren.

Aber vielleicht müssen wir gar nicht in die Vergangenheit reisen: Lassen sich präbiotische Prozesse eventuell »live« auf anderen Himmelskörpern beobach-

ten? In den riesigen Geysiren beispielsweise, die aus dem zugefrorenen Ozean des Saturnmonds Enceladus hervorbrechen, sind einschlägige Moleküle nachweisbar – darunter Aminosäuren, die Bausteine der Proteine. Das heißt aber weder, dass wir dort Leben finden können, noch, dass dort welches entsteht. Abgesehen davon, dass sich nach wie vor nicht eindeutig beantworten lässt, was Leben überhaupt ist. Ein aus meiner Sicht geeigneter Definitionsversuch beschreibt die drei wichtigsten Merkmale des Lebens wie folgt: 1) die Fähigkeit, vererbte Information zu produzieren und weiterzugeben, 2) das Vermögen, Energie aufzunehmen, umzuwandeln und einen Zustand fernab des thermodynamischen Gleichgewichts einzunehmen, und 3) die Befähigung, sich von der Umwelt abzugrenzen, etwa durch Zellmembranen.

Die Indizienlage zum Ursprung des Lebens ist somit verhältnismäßig dünn – und die Möglichkeiten, ihn direkt zu erforschen, erscheinen stark begrenzt. Was

AUF EINEN BLICK

## Rätselhafte Vergangenheit

**01** Zum Ursprung des Lebens gibt es nur wenige gesicherte Erkenntnisse. Fossil- und Gesteinsfunde aus jener Zeit sind rar.

**02** Stammbaumanalysen erlauben es, viele Merkmale der frühesten Lebensformen zu rekonstruieren. Demnach ernährten sich die ersten Einzeller von Wasserstoff und CO<sub>2</sub>.

**03** Sowohl bio- als auch geologische Perspektiven einzunehmen hilft, den Übergangsprozess von unbelebter zu belebter Materie aufzuklären.



den Fachleuten bleibt, sind hypothetische, plausibel erscheinende Szenarien, die sich punktuell empirisch prüfen lassen. Welche Aspekte dabei im Fokus stehen, hängt vom wissenschaftlichen Hintergrund der jeweiligen Forscher ab. Kann man etwa bestimmte Reaktionen der präbiotischen Chemie im Labor erfolgreich reproduzieren, wird man dazu neigen, die dabei getesteten Umgebungsbedingungen auch für die frühe Erde anzunehmen. Umgekehrt postulieren manche Experten einen bestimmten Ort für die Entstehung des Lebens und untersuchen dann, welche chemischen Reaktionen unter den dortigen Bedingungen überhaupt möglich sind.

Die meisten von uns hören erstmals in der Schule von dem Thema. Oft zeigen Lehrerinnen und Lehrer hierbei den Apparat, mit dem die US-amerikanischen Chemiker Stanley Miller und Harold Urey in den 1950er Jahren experimentierten. Deren Versuche basierten auf den Lehren des sowjetischen Biochemikers Alexander Oparin und des



**STROMATOLITHE** | Diese Sedimentgesteine stellen Relikte einstiger Mikrobenkolonien dar. Sie entstehen in schleimigen Biofilmen, etwa durch Einfangen von Sedimentpartikeln und Ausfällen von Kalziumkarbonat. Manche sind Jahrmilliarden alt.



britischen Biologen John Burdon Sanderson Haldane, die beide eine Ursuppe postulierten, aus der das Leben herausgekommen sei. Miller und Urey demonstrierten: Die einfach aufgebauten Substanzen Methan, Ammoniak und Wasserstoff reagieren in wässrigen Lösungen unter Einwirkung elektrischer Entladungen zu organischen Molekülen wie Ameisen- und Essigsäure sowie verschiedenen Aminosäuren. Ein brillantes Experiment, das Fachleute in zahlreichen abgewandelten Formen wiederholt haben. Später im Lehrplan ist häufig von der RNA-Welt-Hypothese die Rede: RNA-Moleküle, die sowohl Informationen trugen als auch Stoffwechselreaktionen katalysierten, hätten am Anfang gestanden und aus ihnen seien zwei maßgebliche Komponenten des Lebens hervorgegangen.

### **Ein Miteinander diverser Molekülsorten**

Die RNA-Welt-Hypothese, erstmals beschrieben Mitte der 1980er Jahre, war lange Zeit sehr prominent. Sie hat die (bio-)

chemische Forschung maßgeblich inspiriert: Heute kennen wir so viele präbiotische Synthesewege für RNA-Bausteine, dass manche Fachleute behaupten, die Frage nach dem Ursprung des Lebens sei eigentlich geklärt. Die RNA-Welt-Hypothese liefert zwar eine Antwort darauf, wie der Informations- und der Stoffwechselteil des Lebens anfangs zusammenhingen. Sie kann aber nicht erklären, woraus das komplexe Stoffwechselnetzwerk der Lebewesen hervorging, an dem viel einfachere Moleküle als RNAs mitwirken. Offensichtlich trifft die alte Vorstellung, es habe bei der Entstehung des Lebens wichtige und weniger wichtige Substanzen gegeben, so nicht zu. Eher mussten viele verschiedene Molekülsorten zusammenwirken, um einen Zustand fernab des thermodynamischen Gleichgewichts zu erzeugen.

Im 20. und frühen 21. Jahrhundert standen chemische Synthesewege im Zentrum dieses Forschungsgebiets. Daraus gingen wertvolle Erkenntnisse hervor; allerdings rückte die Chemie der-

art weit in den Vordergrund, dass sie zu verdecken begann, worauf man eigentlich hinauswollte: das Leben selbst. Man fokussierte sich darauf, wie auf präbiotisch »plausible« Weise einzelne Biomoleküle entstehen. Dazu reproduzierten die Fachleute spezifische chemische Reaktionen und suchten nach den geologischen Bedingungen, die konkrete Stoffumwandlungen ermöglichen. Das ist eine nachvollziehbare Herangehensweise, vor allem angesichts des Mangels an konkreten Anhaltspunkten auf diesem Forschungsgebiet. Aber wer der Komplexität des Lebens und seines Ursprungs gerecht werden möchte, muss mehr als nur eine wissenschaftliche Disziplin heranziehen.

Ein Fachgebiet, das bei alledem eine eher untergeordnete Rolle spielte, ist ausgerechnet die Biologie, die Wissenschaft von der belebten Materie. Leben ist eines der komplexesten Phänomene, das wir kennen; allein die Zahl der irdischen Mikrobenspezies beläuft sich auf schätzungsweise drei Billionen. Die schiere