

Evolutionsbiologie: Veröffentlichung in Science Advances Die zwei Ursprünge des Lebens

6.8.2026 - Arne Claussen | Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Wie entstand das früheste Leben und wie entwickelte es sich? Mit diesen fundamentalen Fragen befassen sich die Biologinnen und Biologen am Institut für Molekulare Evolution der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (HHU). In einer internationalen, von Düsseldorf geleiteten Studie, die nun in der Fachzeitschrift Science Advances erschien, stellen die Forschenden vor, wie in den Urlebewesen die für den Stoffwechsel notwendigen chemischen Reaktionen abliefen und woher die dafür notwendige Energie kam. Sie fanden dabei heraus, wie sich die zwei ursprünglichen Lebensformen in ihrer Entwicklung trennten.

Auf was stößt ein hypothetischer Zeitreisender, der sich vier Milliarden Jahre in die Vergangenheit begibt und die ersten Zellen beobachtet, die in Hydrothermalquellen auf der Erde entstanden? „Er sähe, wie zwei sehr unterschiedliche Zelltypen entstehen – Pionier-Bakterien und -Archaeen –, die die ersten Versuche unternehmen, außerhalb der Grenzen der Hydrothermalquelle zu leben“, sagt die Biologin Natalia Mrnjavac, Doktorandin am Institut für Molekulare Evolution. Sie ist Erstautorin einer neuen Studie in „Science Advances“.

In dieser Fachzeitschrift berichten Mrnjavac und ein internationales Team von Forschenden, wie sie Genome, Proteinstrukturen und chemischen Reaktionen untersuchten, die Aufschluss über die allerfrühesten Phasen der mikrobiellen Evolution geben, noch bevor es freilebende Zellen gab. „Diese Vergleiche lassen uns in jene Phase der Evolution blicken, in der sich der durch Enzyme katalysierte Stoffwechsel aus spontanen, durch Metalle in der Erdkruste katalysierten Reaktionen entwickelte“, so Prof. Dr. William Martin, Leiter des Düsseldorfer Instituts und Letztautor der Studie.

Der Ansatz des Teams unterscheidet sich von bisherigen Untersuchungen zur frühesten Evolution: Die Forschenden betrachteten die Gesamtheit der chemischen Reaktionen, mit denen Zellen die Bausteine des Lebens (Aminosäuren, RNA-Basen und Vitamine) aus Verbindungen herstellten, die auf der frühen Erde vorhanden waren: Wasserstoffgas, Ammoniak und Kohlendioxid. Die Gesamtheit dieser 420 chemischen Reaktionen wird als Stoffwechsel bezeichnet. Die chemischen Reaktionen selbst gibt es auch in den heutigen Zellen – sie sind „universell konserviert“ –, wie auch der genetische Code.

Martin: „Überraschenderweise sind die Enzyme, die diese Reaktionen katalysieren, nicht über die evolutionäre Kluft hinweg konserviert, die Bakterien und Archaea trennt. Wir fanden heraus, dass LUCA („last universal common ancestor“), der letzte gemeinsame Vorfahr aller Zellen, nur Enzyme für etwa die Hälfte der Stoffwechselreaktionen besaß. Die andere Hälfte wurde von Metallen in der Umwelt katalysiert“, sagt Martin.

„Metalle, die natürlicherweise in hydrothermalen Quellen vorkommen, können eine überraschend große Anzahl von Enzymen im Stoffwechsel ersetzen“, sagt der Koautor Dr. Harun Tüysüz, Chemiker am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung und am IMDEA Materials Institute in Madrid.

„Je genauer wir hinschauen, desto deutlicher erkennen wir, dass die frühe biochemische Evolution eine Mischung aus enzymatischen und metallischen Katalysatoren war. LUCA hatte einen hybriden Stoffwechsel, der zur Hälfte metallkatalysiert und zur Hälfte enzymatisch ablief“, so Prof. Dr. Joseph Moran von der Universität Ottawa in Kanada, der zu Metallen bei zur Katalyse von Stoffwechselreaktionen als Ersatz für Enzyme und Cofaktoren forscht.

Dem Autorenteam gelang es erstmals, vier Phasen der frühen Evolution der Katalyse zu rekonstruieren: es begann mit rein metallischen Enzymen, es folgte der Metall-Enzym-Hybrid in LUCA, und schließlich spaltete sich die Evolution in zwei Zweige auf, die zu den Vorfahren der Bakterien- und Archaeen-Entwicklungslinien führten. In diesen Entwicklungslinien entstanden neue Enzyme. Sie ersetzten die anorganischen Katalysatoren, die zu Beginn der Evolution des Stoffwechsels noch von der Umgebung bereitgestellt wurden.

Mrnjavac: „Wir beobachten Fälle, in denen die Vorfahren der Bakterien und Archaeen unabhängig voneinander strukturell unterschiedliche Enzyme entwickelten, mit denen sie aber dieselbe essentielle Stoffwechselreaktion katalysieren. Solche parallelen Erfindungen ebneten möglicherweise den Weg für die unabhängige Entstehung freilebender Bakterien und Archaeen.“

Eine zentrale Frage ist auch, woher die frühen Lebewesen ihre Energie nahmen, um die Stoffwechselreaktionen voranzutreiben. Heute liefert das komplexe Molekül ATP diese Energie, doch ATP muss von Enzymen gebildet werden, die es damals in den hydrothermalen Quellen nicht gab. „Wir haben eine neue Energiequelle metabolischen Ursprungs identifiziert: Phosphit und Palladium“, sagt Manon Schlikker, Doktorandin in Düsseldorf. Das Metall Palladium kommt natürlicherweise in hydrothermalen Quellen vor und es ist ein hervorragender Katalysator. „Wenn wir Phosphit, eine ebenfalls dort vorkommende Phosphorverbindung, mit organischen Verbindungen des Stoffwechsels zur Reaktion bringen, entstehen im Wasser metabolische sogenannte Phosphorylierungsreaktionen. Phosphit und Palladium können also ATP und Enzyme ersetzen – eine neue und wichtige Erkenntnis, um die frühe Evolution zu verstehen“, so Schlikker.

Die Studie ist die erste gezielte Untersuchung des als Stoffwechsel bezeichneten Reaktionskomplexes, eines hochgradig verzweigten Netzwerks aus 420 Reaktionen, in dem viele Verbindungen an mehreren Reaktionen beteiligt sind. An der mathematischen Beschreibung dieses Netzwerks wirkten Prof. Dr. Mike Steel von der neuseeländischen University of Canterbury und Prof. Dr. Daniel Huson von der Universität Tübingen mit. Sie entwickelten eine neue Methode, um Stoffwechselreaktionen von den einfachsten bis zu den komplexesten zu ordnen. Steel: „Wir konnten mathematisch nachweisen, dass es eine eindeutige Reihenfolge gibt, in der die Stoffwechselreaktionen geordnet werden können. Somit konnten wir einen Algorithmus zur Ordnung der Reaktionen im Netzwerk entwickeln.“

Die Frage nach dem Ursprung des Lebens gehört zu den fundamentalsten Fragen der menschlichen Existenz. Um zu verstehen, wie die ersten Zellen auf der Erde überlebten, trägt die neue Studie einen wichtigen Teil bei. Prof. Martin: „Die neuen Daten lassen nur einen Schluss zu: Bakterien und Archaea haben den Übergang von den Hydrothermalquellen zum freilebenden Zustand unabhängig voneinander vollzogen, wobei nur freilebende Zellen wirklich lebendig sind. Um es auf den Punkt zu bringen: Es gibt einen Ursprung des genetischen Codes, aber zwei Ursprünge des Lebens.“

An der Studie beteiligt waren neben Forschenden der HHU auch solche der Universitäten in Canterbury (Neuseeland), Marburg, Rostock, Konstanz, Ottawa (Kanada), Straßburg und Tübingen, des Max-Planck-Instituts für Terrestrische Mikrobiologie in Marburg und des Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung in Mülheim/Ruhr sowie des IMDEA Materials Institute in Madrid (Spanien).

Hintergrund: Bakterien und Archaeen

Biologen unterteilen Lebensformen in zwei Kategorien: Eukaryoten – hochentwickelte Zellen mit einem Zellkern – und die urzeitlicheren Zelllinien ohne Zellkern: die Prokaryoten. Zu den Prokaryoten gehören die beiden ursprünglichen Lebenslinien: Bakterien und Archaeen. Viele Prokaryoten können unter extremen Bedingungen wie hohen Temperaturen oder in sauren oder alkalischen Umgebungen überleben. Viele von ihnen leben an hydrothermalen Quellen auf dem Meeresboden, wo nach einigen Theorien das Leben entstanden sein soll.

Originalpublikation

Natalia Mrnjavac, Nadja K. Hoffmann, Manon L. Schlikker, Maximilian Burmeister, Loraine Schwander, Carolina García García, Max Brabender, Mike Steel, Daniel H. Huson, Sabine Metzger, Quentin Dherbassy, Bernhard Schink, Mirko Basen, Joseph Moran, Harun Tüysüz, Martina Preiner, William F. Martin; Intermediate stages in the origin of metabolism at a phosphorylating hydrothermal vent; Science Advances 12, eaef3128 (2026)

DOI: 10.1126/sciadv.aef3128

<https://www.hhu.de/die-hhu/presse-und-marketing/aktuelles/pressemeldungen-der-hhu/news-detailansicht/die-zwei-urspruenge-des-lebens>