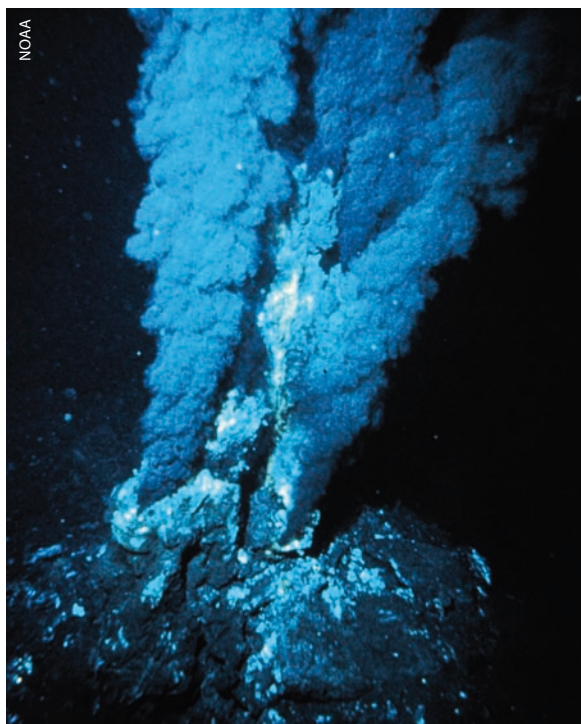


## ■ Leben aus dem Reaktor

**Simulationen zeigen, unter welchen Bedingungen selbstreproduzierende Moleküle entstanden sein könnten.**

**K**urz nach seiner Entstehung herrschten auf unserem Heimatplaneten unwirtliche Bedingungen. Doch schon wenige hundert Millionen Jahre später fanden sich erste Lebewesen auf der Erde. Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum Leben ist die Entstehung selbstreproduzierender Moleküle. Ob sich diese in der Ursuppe spontan gebildet haben, ist bis heute nicht geklärt. Neben Experimenten sind vereinfachte stochastische Modelle ein probates Mittel, physikalisch plausible Szenarien für den Ursprung des Lebens zu entwickeln. Insbesondere könnten kollektive Effekte wie die Thermophorese (Soret-Effekt) in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle gespielt haben. Nun hat eine Münchner Forschergruppe ein stochastisches Modell der Dynamik von RNS in einem hydrothermalen Reaktor vorgestellt [1]. Dieses zeigt, dass die selektive Stabilisierung von Sequenzen durch Basenpaarung effektiv zu einer Dynamik führt, die der von selbstreproduzierenden Molekülen gleicht.

Seit den bahnbrechenden Experimenten von S. L. Miller und H. C. Urey in den 1950er-Jahren, in denen sie untersuchten, welche Produkte chemische Reaktionen unter Bedingungen der Uratmosphäre hervorbringen, wissen wir, dass sich organische Schlüsselmoleküle auf der frühen Erde spontan gebildet haben können [2]. Dazu gehören Aminosäuren, die die Grundbausteine für Proteine bilden, ebenso wie Nukleinsäuren, aus denen die informationstragenden Moleküle aller heute auf der Erde vorkommenden Lebewesen, RNS und DNS, gebildet werden. RNS und DNS sind lineare Polymere, die aus den vier Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) sowie Thymin (T) für die DNS und Uracil (U) für die RNS aufgebaut sind. Die Abfolge der Basen in der DNS einer Zelle enthält wesentliche Informationen über ihren Aufbau und ihre Wech-



**Abb. 1** Hydrothermale Quellen wie dieser „schwarze Raucher“ könnten der Geburtsort des Lebens gewesen sein. Die in Kavitäten des porösen Gesteins um die Quelle herum herrschenden Bedingungen könnten die Entstehung selbstreproduzierender Moleküle ermöglichen.

selwirkung mit der Umgebung. Die DNS bildet einen Doppelstrang, bei dem auf den beiden Einzelsträngen gegenüberliegende Basen A und T sowie G und C Paare formen (hybridisieren). Durch Trennung der Stränge und Komplementierung mit entsprechenden Partnerbasen kann diese Information sich selbst reproduzieren.

Dieser Prozess lässt sich auch im Reagenzglas durchführen, indem die DNS zyklisch erhitzt und abgekühlt wird, um Doppelstränge zu trennen und wieder zu hybridisieren. Bei dieser Polymerasekettenreaktion verdoppelt sich die Anzahl der DNS-Moleküle idealerweise in jedem Zyklus. Allerdings werden im Labor Proteine zugesetzt, die die Komplementierung der Einzelstränge beschleunigen und mit großer Genauigkeit durchführen. Kann dieser Mechanismus der Selbstproduktion in Abwesenheit von Proteinen auch am Anfang des Lebens gestanden haben? Tatsächlich gibt es geologische Formationen, die dieses nahelegen: In der Umgebung von vulkanischen Heißwasserquellen am Grunde des Ozeans findet sich häufig poröses vulkanisches

Gestein (Abb. 1). In den wassergefüllten Poren herrschen Temperaturgradienten, die zwei Effekte haben: Zum einen führen sie zur Thermophorese, die Moleküle nach ihrer Größe trennt [3]. Zum anderen erzeugen sie einen zirkulären Fluss, der Moleküle zyklisch in Gebiete höherer und niedrigerer Temperatur transportiert. Experimente zeigen, dass diese Prozesse zusammengekommen die Konzentration großer Moleküle wie z. B. RNS-Stränge selektiv erhöhen können.

Die Bildung der Base Thymin ist chemisch recht aufwändig, auch sind doppelsträngige DNS-Moleküle verhältnismäßig inert. Daher wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich die ersten selbstreproduzierenden Systeme auf der Basis von RNS gebildet haben [4]. Diese bilden typischerweise keine Doppelstränge, können sich aber durch die Paarung von Basen innerhalb eines RNS-Moleküls in stabile dreidimensionale Strukturen falten. Bemerkenswerterweise haben einige dieser RNS-Strukturen katalytische Eigenschaften. In diesem Fall bezeichnet man sie als Ribozyme. Kürzlich wurde ein Ribozym

aus 189 Basen konstruiert, welches RNS-Moleküle aus bis zu 95 Basen erzeugt [5].

Die Arbeit von Obermayer et al. untersucht nun Prozesse, wie sie in den Anfängen einer „RNS-Welt“ abgelaufen sein können. Motiviert durch die oben erwähnten RNS-Reaktoren in der Nähe von heißen Quellen betrachten die Autoren ein durchmischtes Volumen, in das einzelne Basen A, C, G und U einströmen und aus dem RNS-Moleküle ausströmen (Abb. 2). Die Rate, mit der sie diesen Bereich verlassen, nimmt dabei mit ihrer Länge ab, was dem Effekt der Thermophorese Rechnung trägt. In dem Volumen können sich RNS-Einzelstränge kovalent aneinanderketten oder durch kovalente Bindung von einzelnen Basen an den Enden verlängern. RNS-Moleküle können auch wieder aufbrechen, wobei Bereiche, in denen die Basen gepaart sind, stabiler sind als solche ohne gepaarte Basen. Paarungen sind zwischen Basen desselben wie auch verschiedener Moleküle möglich. Zwei Moleküle verbinden sich spontan zu einem, sodass eine selektive Reproduktion bestimmter Sequenzen – das Herzstück vieler Untersuchungen zum Ursprung des Lebens [6] – nicht stattfindet.

Obermayer et al. simulieren diese Prozesse numerisch und betrachten dabei verschiedene Situationen. Insbesondere unterscheiden sie Fälle, in denen sich RNS-Basen hybridisieren können, von solchen, in denen das nicht möglich ist. Sie

finden, dass die Wahrscheinlichkeit, lange Moleküle zu beobachten, im ersten Fall deutlich höher ist als im zweiten. Weiterhin steigen diese Wahrscheinlichkeit und die Komplexität der entstehenden Moleküle bei niedrigerer Temperatur und höherer Konzentration signifikant an. Es entstehen z. B. haarnadelförmige Strukturen, bei denen das RNS-Molekül eine Schlaufe bildet.

Die Münchner Physiker beschäftigen sich auch mit der Übertragung und Speicherung von Sequenzinformationen im RNS-Pool. Sie betrachten dazu spezielle Folgen von Basen ungeachtet dessen, ob sie Teil eines größeren Moleküls sind oder nicht. Unter Berücksichtigung der Hybridisierung von Basen weisen Motive aus sechs Basen Lebensdauern auf, die etwa eine Größenordnung über der von nichthybridisierten Motiven gleicher Länge liegen. Die entsprechenden RNS-Abschnitte stabilisieren sich und bleiben so über lange Zeit im System präsent. Neben extensiven numerischen Simulationen benutzen die Autoren einen analytischen Ansatz, um einen einfachen stochastischen Erzeugungs-Vernichtungs-Prozess zu definieren, der die Ergebnisse der komplexen Simulationen reproduziert. Überraschenderweise ist dieser Prozess äquivalent zu einem Vorgang, bei dem Moleküle durch Binden an eine Vorlage repliziert werden, ähnlich wie sich DNS durch Komplementierung eines Einzelstrangs dupliziert. Allerdings hat dieser

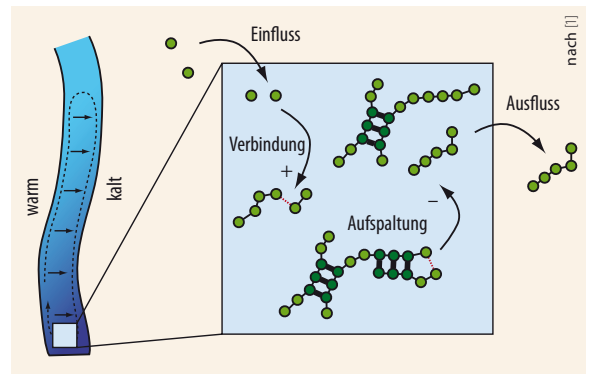


Abb. 2 Bei dem betrachteten RNS-Reaktor führen Konvektion und Thermophorese in einer Kavität zu Bereichen mit erhöhter RNS-Konzentration. In diesen Bereich fließen einzelne Nucleotide A, C, G, U ein, reagieren dort und bilden komplexere Moleküle. Durch Hybridisierung werden einige dieser Strukturen gezielt stabilisiert.

eine Effizienz von maximal 30 Prozent, sodass ein exponentielles Wachstum der entsprechenden Moleküle nicht zu beobachten ist. Nichtsdestoweniger lässt sich mittels der Bildung komplementärer Basenpaare ein „Sequenzgedächtnis“ erzeugen.

Die Bedeutung dieser Beobachtung liegt darin, dass komplexe RNS-Strukturen wie oben erwähnt enzymatische Funktionen haben können. Viele bekannte Ribozyme enthalten Strukturelemente, die auch in den Simulationen von Obermayer et al. auftreten. Durch ihre verhältnismäßig lange Lebensdauer erhöht sich so die Wahrscheinlichkeit, Moleküle zu erzeugen, die im Prinzip zur eigenen Reproduktion führen können. Unter welchen Bedingungen das tatsächlich geschieht, ist allerdings noch weitgehend unklar und erfordert weitere Untersuchungen. Die Arbeit von Obermayer et al. zeigt aber, dass plausible Antworten auf die Frage nach dem Ursprung des Lebens in greifbare Nähe rücken.

Karsten Kruse

## KURZGEFASST

### ■ Einheit trotz Abstoßung

Britische Physiker haben Kaliumatome in einer optischen Falle gekühlt und mittels eines Magnetfelds eine Abstoßung zwischen den Atomen induziert. Abhängig von der Abstoßung haben sie gemessen, bei welcher Temperatur die Atome in ein Bose-Einstein-Kondensat übergehen. Überraschendes Ergebnis: Die Abstoßung hebt die Übergangstemperatur um einige Prozent an! Die Kollisionen zwischen den Atomen führen zu einer Umverteilung der Impulse und erleichtern den Übergang zu einem einzigen Impulszustand.

R. P. Smith et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 250403 (2011)

### ■ Bakterien im Windschatten

Wie Radfahrer im Windschatten profitieren auch Fische und Vögel davon, sich im Schwarm fortzubewegen. Bakterien schwimmen ebenfalls in Schwärmen, doch war bislang unklar, ob sie davon einen Vorteil haben. Nun ist es japanischen Wissenschaftlern gelungen, eine quasi-dreidimensionale Geschwindigkeitskarte eines Tropfens aufzunehmen, in dem sich bewegliche *E. Coli*-Bakterien befinden. Dabei haben sie herausgefunden, dass sich Bakterien in der Gruppe bis zu dreimal schneller fortbewegen als alleine.

T. Ishikawa et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 028102 (2011)

- [1] B. Obermayer, H. Krammer, D. Braun und U. Gerland, Phys. Rev. Lett. **107**, 018101 (2011)
- [2] S. L. Miller, Science **117**, 528 (1953)
- [3] P. Baaske, F. M. Weinert, S. Duhr, K. H. Lemke, M. J. Russel und D. Braun, Proc. Natl. Acad. Sci USA **104**, 9346 (2007)
- [4] C. R. Woese, The Genetic Code, Harper & Row, New York (1968)
- [5] A. Wochner, J. Attwater, A. Coulson und P. Holliger, Science **332**, 209 (2011)
- [6] M. Eigen und P. Schuster, Naturwissenschaften **64**, 541 (1977)

Prof. Dr. Karsten Kruse, Theoretische Biologische Physik, Universität des Saarlandes, 66123 Saarbrücken