

OLAF FRITSCHKE

AUF HEISSER SPUR ZU DEN MOLEKÜLEN DES LEBENS

Mancher mag es heiß – Biomoleküle wie die Erbsubstanz DNA ziehen hingegen eher kühle Regionen vor. Warum chemische Verbindungen überhaupt in einem Temperaturgefälle wandern und wie das beginnende Leben dadurch vielleicht den entscheidenden Konzentrationsschub erfahren hat, erforscht Dr. Dieter Braun mit seiner Emmy-Noether Nachwuchsgruppe am Lehrstuhl für Angewandte Physik.

Es könnte die Wiege allen Lebens sein. Inmitten der ewigen Dunkelheit der Tiefsee reihen sich an den mittelozeanischen Rücken der Weltmeere vereinzelte Oasen biologischer Geschäftigkeit. Weit über hundert Grad heißes Wasser tritt hier an hydrothermalen Quellen aus dem Boden. Reich an Mineralien, die es aus der Erdkruste mitgebracht hat, darunter Verbindungen von Schwefel, Eisen und Kohlenstoff. Sie nähren ein kleines Ökosystem von urtümlichen Bakterien, seltsamen Würmern ohne Verdauungsapparat, augenlosen Spinnenkrabben und spezialisierten Muscheln. Weit ab vom sonst so notwendigen Sonnenlicht treiben chemische Umsetzungen die Lebensvorgänge an. Reaktionen und Umwandlungen, wie sie auch auf der frühen Erde abgelaufen sein könnten. Als die noch junge Erde im Bereich ihrer Oberfläche ein unwirtlicher Ort für das zaghaft entstehende Leben war.

Zu unwirtlich, glauben viele Wissenschaftler und vermuten daher, dass die entscheidenden Schritte von der reinen Chemie zur Biochemie und schließlich den frühesten lebenden Zellen an den heißen Tiefseequellen stattgefunden haben könnten. Die Wärme und die chemischen Substanzen aus dem Untergrund hätten ihrer Ansicht nach eine geeignete Uruppe bereitgestellt, aus welcher zwanglos die Moleküle des Lebens hervorgehen dürften. In entsprechenden Laborversuchen sind unter derartigen Bedingungen bereits etliche Biomoleküle entstanden. In den Urmeeren sollte demnach ähnliches möglich gewesen sein. Wenn da nicht ein entscheidendes Problem wäre: „Alle theoretischen und experimentellen Ansätze zum biochemischen Ursprung des Lebens setzen eine hohe Ausgangskonzentration von Biomolekülen voraus“, sagt Dieter Braun, Leiter der Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe am Lehrstuhl für Angewandte Physik. „Ungeklärt war bislang, welcher natürlich vorkommende Mechanismus dies in den frühzeitlichen Ozeanen hätte ermöglichen kön-

nen, in denen nach geologischem Wissensstand auch die einfachsten Verbindungen stark verdünnt gewesen sein müssen.“

THEORIE UND PRAKTISCHE KÜGELCHEN

Dieter Brauns Team begibt sich rund 3,8 Milliarden Jahre nachdem die Natur es vormachte in den Laboratorien der LMU auf die Spur der lebensschaffenden Vorgänge in der urzeitlichen Tiefsee. Zunächst nicht mit biologisch relevanten Molekülen, sondern an einfacheren Modellen aus winzigen Kunststoffkügelchen, deren Durchmesser im Bereich von millionstel Millimetern liegen. Die Forscher interessierten sich für die Wanderungen von Teilchen in einem Temperaturgradienten. Bereits im Jahr 1856 hatte der Physiologe Carl Ludwig festgestellt, dass gelöste Salze von wärmeren Bereichen abwandern zu kühleren Stellen. Eine zufrieden stellende theoretische Erklärung dieses Thermoeffusion oder Ludwig-Soret-Effekt genannten Verhaltens konnte er jedoch ebenso wenig liefern wie Generationen von Wissenschaftlern nach ihm. Die Kügelchen von Dieter Braun und seinen Mitarbeitern hatten gegenüber Carl Ludwigs Salzen zwei entscheidende Vorteile: Ihre Eigenschaften waren exakt definiert, und sie konnten mit Fluoreszenzfarbstoffen beladen und damit auch bei geringen Konzentrationen vermessen oder einzeln auf ihrem Weg verfolgt werden. Für ein sanftes Temperaturgefälle in den speziellen Messkammern, die nur etwa ein Zehntel so dick waren wie ein menschliches Haar, sorgte der gebündelte Strahl eines Infrarotlasers. In einem Fokus von etwa 25 tausendstel Millimetern erwärmte er die Lösung um zwei Grad. Das erscheint wenig, ist aber genug, um die Flucht der Kügelchen in die kühlere Umgebung auszulösen. Versuchsreihe um Versuchsreihe erhielten die Wissenschaftler auf diese Weise Datensätze vom Verhalten der Kügelchen bei verschiedenen Randbedingungen, die ausreichend genau waren, um damit theoretische Modelle zu überprüfen. Erstmals konnten sie so nachweisen, dass die Gesetze der Thermodynamik bei schwachen Temperaturgradienten auf die Thermoeffusion anwendbar sind. Damit war die Voraussetzung für ein System von mathematischen Gleichungen geschaffen, das die Versuchsergebnisse akkurat beschreibt. Die Kombination von Theorie und Praxis verriet schließlich die antreibende Größe hinter den Teilchenwanderungen: Es ist die Entropie – ein statistisches Maß für die Beliebigkeit, mit der sich die Kügelchen und Moleküle des Lösungsmittels anordnen können. Eingeschränkt wird deren Freiheit durch die elektrischen Anziehungskräfte zwischen den Ladungen der Teilchen und den gelösten Salzen und zusätzlich durch die Tendenz des Wassers, die Kügelchen zu umschließen. Vor allem der erstgenannte ionische Abschirmeffekt dominiert das Geschehen. Damit sind die Wanderungen im Wärmefeld nach über 150 Jahren als Reaktion auf die energetischen Verhältnisse an der Teilchenoberfläche identifiziert. Je größer ein Kügelchen, umso stärker reagiert es deshalb auf das Temperaturgefälle, auch wenn kleine Teilchen schneller ihr neues Fließgleichgewicht finden.

Erstaunlicherweise lassen sich die Erkenntnisse von der Thermoeffusion der Kunststoffbällchen direkt auf die Wärmewanderungen des Erbmoleküls DNA übertragen. Obwohl DNA in ihrem Aufbau herzlich wenig mit einer Kugel gemein hat. Vielmehr erinnert das Molekül an eine winzige Strickleiter mit Basenpaaren als Sprossen, in deren Reihenfolge



Bild eines *white smokers*. Im Zentrum dieses so genannten *christmas trees* tritt Wasser mit einer Temperatur von 110 bis 120 Grad Celsius aus. Das umgebende Wasser hat eine Temperatur von drei Grad Celsius.

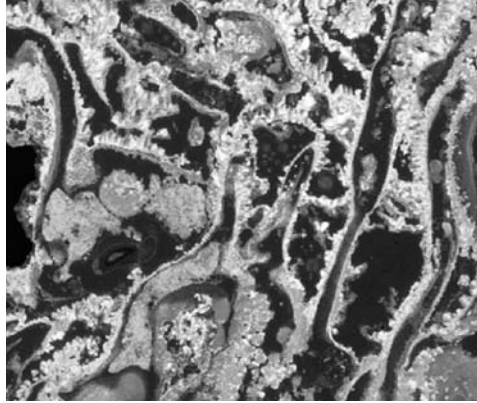
die genetische Information gespeichert ist. Ein länglicher, halbwegs flexibler Faden also. Trotzdem folgte es in den Versuchen den Vorhersagen der gleichen Formeln wie die Kügelchen, was die LMU-Forscher mit DNA-Molekülen von 50 bis 50.000 Basenpaaren Länge nachweisen konnten. Besonders anschaulich wird dies in einem Experiment, bei dem die Wissenschaftler das Wasser mit dem Infrarot-Laser in Form der Buchstaben „DNA“ erwärmt haben. Bei Zimmertemperatur ließ die Thermodiffusion echte DNA-Stränge in der Lösung aus dem warmen Schriftzug hinauswandern, sodass er als dunkler Linienzug inmit-

ten helleren Fluoreszenzlichts erkennbar ist. Wurde die Messkammer aber auf drei Grad Celsius abgekühlt, änderte sich die Richtung der Bewegung, und die Abkürzung leuchtete vor einem dunklen Hintergrund.

Da die Wirkung der Thermodiffusion von der elektrischen Ladung und damit der Länge eines DNA-Fadens abhängt, kann sie dazu benutzt werden, die beiden Größen anhand der Wärmewanderung zu bestimmen. Diese Aufgabe erledigt in biochemischen Laboratorien üblicherweise die Elektrophorese, bei welcher ein elektrischer Gleichstrom Moleküle unterschiedlich schnell durch ein Gel zieht und dabei auftrennt. Eine auf Thermodiffusion beruhende Thermophorese hätte dagegen nicht nur den Vorteil, dass sie mit einer Dauer von zehn Sekunden viel schneller wäre, sondern sie könnte auch sehr geringe Mengen Material untersuchen und würde ganz ohne aufwändiges Gel auskommen. Während in sehr engen Messkammern die Bewegung der Moleküle praktisch alleine auf die Thermodiffusion zurückgeht, fängt bei räumlichen Dimensionen, die sich dem Bereich von Millimetern annähern, auch das Wasser an, sich vermehrt zu bewegen. Diese Konvektion reißt die DNA mit und überlagert dadurch deren eigenes Wanderungsbestreben im Temperaturgefälle. Im Experiment führte die Kombination beider Effekte dazu, dass die DNA sich am Boden der größeren Messkammern in einem sehr kleinen Bereich ansammelt. Offenbar reicht ein schwacher Wärmegradient aus, um lokal die Konzentration von Molekülen zu erhöhen.

KONZENTRIERT ZU GROSSEN MOLEKÜLEN

Genau solch ein Effekt fehlte bislang, um die Synthese größerer Biomoleküle an den hydrothermalen Quellen der Tiefsee zu erklären. Dort ist das Gestein sehr porös. Winzige Röhrchen mit Durchmessern von einigen Zehntel Millimetern durchziehen das Material. Das aufsteigende heiße Wasser aus der Tiefe und der kalte Ozean sorgen für ausdauernde Temperaturgradienten in diesen Miniaturtunneln. Im Prinzip sollte es also auch in den Poren Bereiche geben, wo sich Moleküle im thermischen Gefälle ansammeln. Die Hohlräume in den Gesteinen sind allerdings experimentell sehr schwer zugänglich und die erhofften Konzentrationsgradienten empfindlich gegen Störungen. Jede Präparation oder Mess-



Ein Schnitt durch das Gestein einer hydrothermalen Quelle zeigt ein feines Netzwerk von länglichen Kammern.

sonde würde mit hoher Wahrscheinlichkeit die gesammelten Daten von vornherein unbrauchbar machen. Um die wahren Verhältnisse in den Poren zu ergründen, hat die Gruppe von Dieter Braun deshalb in einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit Physikern, Biochemikern und Geologen aus der Schweiz und den USA einen anderen Weg gewählt. Da sie die Gesetze kennen, nach denen sich Moleküle in einem Temperaturgradienten bewegen, simulierten sie die Abläufe am Computer.

Und tatsächlich akkumulierten in den virtuellen Poren wichtige Bausteine des Lebens. Neben DNA testeten die Wissenschaftler auch die verwandte RNA und Nukleotide genannte Einzelbausteine dieser Erbmoleküle. In der RNA sehen viele Forscher eines der wichtigsten Moleküle am Beginn des Lebens, da sie anders als die DNA nicht nur Informationen speichern, sondern auch selbst chemische Reaktionen initiieren und katalysieren kann. Allerdings setzt diese „RNA-Welt“-Hypothese relativ hohe Konzentrationen an Bausteinen voraus. Die wären dank Konvektion und Thermodiffusion in den Poren zu finden. Bei einem Temperaturgradienten von 30 Grad, wie er durchaus im Übergang zwischen dem etwa 350 Grad heißen Tiefenwasser und dem drei Grad kalten Ozean herrschen dürfte, reicht ein fünf Millimeter langes Röhrchen aus, um Nukleotide auf das 1.200-fache zu konzentrieren. Mehrere miteinander verbundene Poren könnten sogar Faktoren im Milliardenbereich erreichen.

Die genaue Geometrie der Hohlräume hat dabei nur wenig Auswirkungen auf die Ansammlung. Viel mehr kommt es auf die Länge und den Öffnungsdurchmesser an. „Eine optimale Konzentration der RNA wird in Poren mit einer Breite von 0,15 Millimetern und einer Länge von etwa 40 Millimetern erreicht“, sagt Dieter Braun. Wird es enger, steigt vor allem die Dichte großer Moleküle, die in einer Art molekularer Falle stecken. „Dabei sammeln sich die Moleküle in einem Bereich an, der etwa der Größe moderner Zellen entspricht“, erklärt er. Die thermischen Wanderungen könnten somit die Ursuppe in den Tiefseeporen aufkonzentriert haben – vielleicht so weit, dass erste biochemische Prozesse ablaufen und sich einfache Protozellen entwickeln konnten. „Auch wenn unsere Ergebnisse keinen hinreichenden Beweis für den Ursprung des Lebens bei den hydrothermalen Quellen liefern können“, formuliert Dieter Braun vorsichtig, „sind wir der Lösung dieses Rätsels möglicherweise ein großes Stück näher gekommen.“

Dr. Dieter Braun ist seit 2003 Leiter einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Emmy-Noether-Gruppe am Lehrstuhl für Angewandte Physik der LMU.

dieter.braun@physik.lmu.de

<http://www.biophysik.physik.uni-muenchen.de/Braun/index.htm>

