

Kropf vollständig füllen wollten.

Es stellte sich heraus, dass die Hummeln bei zunehmender Komplexität der Sammelaufgabe schnell davon abkamen, die Blüten in der suboptimalen Reihenfolge der ursprünglichen Reihenfolge der Entdeckung anzufliegen, stattdessen die Routen schrittweise verbesserten und häufig sogar die optimale Route wählten. Die Insekten optimierten die mittlere Flugdistanz innerhalb der ersten 6-10 Ausflüge sehr deutlich und näherten sich am Ende der 20 protokollierten Ausflüge eng dem kürzesten Flugweg an. Die suboptimale Route der ursprünglich ersten Entdeckung spielte dann nur noch eine sehr untergeordnete Rolle. Offensichtlich lernten die Hummeln aus Versuch und Irrtum und optimierten die Routen sehr schnell. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass sie die am ersten Tag gefundene optimale Route auch noch am zweiten Tag bevorzugt, wenn auch etwas weniger häufig, benutzten. Außerdem wurden zu Beginn des zweiten Tages immer auch ganz neue, alternative Routen gewählt. Das könnte entweder von Gedächtnislücken des kleinen Hummelhirns herrühren oder aber darauf hinweisen, dass die Hummeln die Umgebung am nächsten Morgen erst einmal nach potentiellen neuen Nahrungsquellen abschnappen.

Die Studie wurde in den Medien u. a. mit „Insekten schlagen Supercomputer“ überschrieben, sie hat schon in den Wikipedia-Artikel „Problem des Handlungsreisenden“ Eingang gefunden! Tatsächlich mussten die untersuchten 11 Hummeln im Experiment die optimale Route zwischen 4 künstlichen Blumen (d. h. aus 24 möglichen Routen) wiederholt finden, was sie nach etwa 10 von 20 beobachteten Versuchen mit statistischer Signifikanz in der Mehrzahl schafften. Die optimale Route wurde am ersten Tag von 8 Hummeln im Mittel zu ca. 40% benutzt, am zweiten Tag von 4 Hummeln zu 30%. Statistisch sind die Ergebnisse signifikant, sie zeigen klar, dass nicht einfach die Route der ersten Entdeckung beibehalten wird und dass das kleine Hummel-

hirn sehr lernfähig ist. Die Behauptung, Hummeln hätten auf unerklärliche Weise das Problem des Handlungsreisenden effizienter als Computer gelöst, erscheint allerdings leicht extrapoliert und ist durch die Publikation (noch) nicht gedeckt.

Doch auf jeden Fall stellen die Leistungen der kleinen Hummelhirne beim Optimieren der Nahrungssuche ein weiteres erstaunliches und noch unerklärtes Beispiel für Mustererkennung, Orientierung im Raum und für Lern- und Gedächtnisleistung sogenannter „einfacher“ Lebewesen dar. Das Beispiel der lernfähigen Hummeln ist besonders eindrucksvoll, weil hier eine mathematische Aufgabe gelöst wird. Die Analogie zu menschlicher geistiger Tätigkeit ist offenkundig. Wie ein geistloser, natürlicher Evolutionsprozess den Hummeln diese strategische Fähigkeit zu vermitteln vermag, erscheint dagegen als eine schier unlösbare Aufgabe.

[LIHOREAU M, CHITTKA L & RAINE NE (2010). Travel optimization by foraging bumblebees through readjustments of traplines after discovery of new feeding locations. *Am. Nat.* 176, 744-757.] H.-B. Braun

■ Bakterien mit Arsen-Biochemie

Mikroorganismen besiedeln alle nur denkbaren Lebensräume auf der Erde und nutzen dabei z. T. sehr ausgefallene Stoffwechselwege. Die Fähigkeiten mancher Einzeller, auch unter extremen Bedingungen zu überleben, macht sie zu einem bevorzugten Gegenstand der Erforschung von – und auch Spekulation über – Leben im Weltraum.

Felisa WOLFE-SIMON vom Astrobiology Institute der NASA hat großes Medieninteresse ausgelöst durch die Ankündigung von Untersuchungsergebnissen über eine bislang unbekannte Lebensform im Mono Lake (<http://www.astrobio.net/exclusive/3698/thriving-on-arsenic>). Die vorgestellten Resultate (WOLFE-SIMON et al. 2010) interpretieren die Autoren so, dass die beschriebenen Bakterien Arsen anstelle von Phosphor als Nährstoff nutzen.

Der Mono Lake ist ein abflussloser alkalischer Salzsee im Südost-

ten der Sierra Nevada, Kalifornien, USA. Das Wasser des Mono Lake enthält auch hohe Arsenkonzentrationen (durchschnittlich ca. 200 μM ; das entspricht 15.000 μg As pro Liter; die WHO und die EU empfehlen für Trinkwasser 10 $\mu\text{g/l}$). Ausgehend von Seesedimenten dieses Gewässers hatten WOLFE-SIMON und ihre Mitarbeiter Bakterienkulturen angelegt. In Gegenwart von Luftsauerstoff (aerobe Bedingungen) bei pH-Werten von 9,8 wuchsen die Bakterien in einem Nährmedium, dem kein Phosphat zugesetzt war. Außerdem wurden die Mikroorganismen zunehmend höheren Arsenkonzentrationen (Arsenat, AsO_4^{3-}) ausgesetzt (100 μM bis 5 mM).

Die Autoren schreiben, dass ihren Untersuchungen die Hypothese zugrunde lag, dass aufgrund der chemischen Ähnlichkeit zwischen Arsen und Phosphor Phosphat (PO_4^{3-}) gegen Arsenat (AsO_4^{3-}) in der Biochemie der Bakterien ausgetauscht werden könnte. Bereits 2009 hatten WOLFE-SIMON et al. die Idee formuliert, dass in alten, ursprünglichen biochemischen Systemen Arsenverbindungen eine ähnliche Rolle gespielt haben könnten wie heute Phosphor und dass heute noch Spuren solcher Lebensformen nachweisbar sein könnten.

Phosphor spielt vor allem in Form der Sauerstoffverbindung Phosphat (PO_4^{3-}) eine zentrale Rolle im Energiehaushalt (z. B. Adenosintriphosphat, ATP) und in der Biochemie (z.B. Zucker-Phosphat Rückgrat der Nukleinsäuren) von Organismen. Phosphor gehört zu den sechs häufigsten Elementen, die am Aufbau von Lebewesen beteiligt sind.

Arsen steht im Periodensystem der Elemente in der 5. Hauptgruppe direkt unter Phosphor und zeigt damit ähnliche chemische Eigenschaften. WOLFE-SIMON et al. sehen darin auch die Ursache der Giftigkeit (Toxizität) von Arsen (vgl. dessen weit in die Geschichte zurückreichende Anwendung im Zusammenhang mit Vergiftungsmorden). Bei aller chemischen Ähnlichkeit zwischen PO_4^{3-} und AsO_4^{3-} sind die As-Verbindungen deutlich instabiler und werden sehr viel leicht-

ter und schneller durch Hydrolyse gespalten. Das wurde zumindest an vergleichsweise kleinen organischen Arsenat-Estern demonstriert (BAER et al. 1981).

WOLFE-SIMON und ihre Mitarbeiter isolierten Bakterien (GFAJ-1), die sie aufgrund ihrer 16S rRNA-Sequenz als zu den Halomonadaceae gehörende Gammaproteobakterien identifizierten.

Die isolierten Bakterien wachsen in einem Medium ohne PO_4^{3-} -Zugabe in Gegenwart von 40 mM AsO_4^{3-} . Bei PO_4^{3-} -Zugabe wachsen sie schneller und wenn sowohl PO_4^{3-} als auch AsO_4^{3-} fehlen wird kein Wachstum beobachtet. Das Zellvolumen von GFAJ-1-Bakterien, die in Gegenwart von AsO_4^{3-} gewachsen sind, ist 1,5 mal größer verglichen mit Bakterien aus einem Medium mit PO_4^{3-} . Elektronenmikroskopische Aufnahmen lassen in den größeren Bakterienzellen Kompartimente (ähnlich wie Vakuolen) erkennen.

Mit massenspektrometrischen Methoden dokumentieren die Autoren einen hohen intrazellulären Gehalt an Arsen bei vergleichsweise geringen Mengen an Phosphor. Durch Experimente mit radioaktivem $^{73}\text{AsO}_4^{3-}$ konnte die Aufnahme von Arsen in die Zellen bestätigt und dessen Anwesenheiten in Protein-, Lipid- und Nukleinsäure-Fractionen nachgewiesen werden.

In der Publikation präsentieren WOLFE-SIMON et al. (2010) eine Reihe von Hinweisen, dass Arsen von Bakterienzellen aufgenommen wird. Allerdings sind die Befunde dafür, dass Arsen in Nukleinsäuren und Proteine eingebaut wird, zumindest in der bisher vorgelegten Form noch nicht letztlich überzeugend und so wurden nicht nur aufgrund der provokanten Präsentation unmittelbar kritische Fragen gestellt und kontroverse Diskussionen ausgelöst (z. B.: <http://rrresearch.blogspot.com/2010/12/arsenic-associated-bacteria-nasas.html> und http://scienceblogs.com/webeasties/2010/12/guest_post_arsenate-based_dna.php). Inzwischen haben die Autoren im Internet in vorläufiger Form zu einigen Fragen Stellung bezogen (<http://www.universe>

today.com/81783/scientists-from-arsenic-bacteria-paper-respond-to-criticisms/).

Bevor Biochemiebücher erweitert werden und über ursprüngliche Lebensformen diskutiert wird, sollten noch eindeutige und belastbarere Belege vorgelegt werden. In Computermodellen lassen sich Atome einfacher in Bio-Makromolekülen austauschen, als dies biochemisch in Organismen realisiert werden kann. Jüngst haben FEKRY et al. (2011) auf die kinetischen Herausforderungen hingewiesen, die ein Organismus überwinden muss, wenn er mit labilem As-Diester-DNA-Rückgrat existieren will. TAWFIK & VIOLA (2011) haben publizierte biochemische Erkenntnisse über Arsenat und Phosphat nutzende Enzyme zusammengefasst und diskutiert. Man darf auf den weiteren Verlauf der Diskussion und neue Untersuchungen gespannt sein.

[BAER CD, EDWARDS JO & RIEGER PH (1981) Kinetics of the hydrolysis of arsenate (V) triesters. Inorg. Chem. 20, 905-907; FEKRY MI, TIPTON PA & GATES KS (2011) Kinetic consequences of replacing the internucleotide phosphorous atoms in DNA with arsenic. Chem. Biol. 6, 127-130; TAWFIK DS & VIOLA RE (2011) Arsenate replacing phosphate: alternative life chemistries and ion promiscuity. Biochem. 50, 1128-1134; WOLFE-SIMON F, DAVIES PCW & ANBAR AD (2009) Did nature also choose arsenic? Int. J. Astrobiol. 8, 69-74; WOLFE-SIMON F, SWITZER BLUM J, KULP TR, GORDON GW, HOEFT SE, PETT-RIDGE J, STOLZ JF, WEBB SM, WEBER PK, DAVIES PCW, ANBAR AD, OREMLAND RS (2010) A bacterium that can grow by using Arsenic instead of phosphorus. Scienceexpress 10.1126/science.1197258] H. Binder

■ Erbsenlaus-Bakterien-Symbiose auf molekularer Ebene untersucht

Die Kooperation (Symbiose) zwischen Erbsenlaus (*Acyrtosiphon pisum*) und Bakterien ist seit vielen Jahrzehnten bekannt und detailliert beschrieben (SCHERER 2007). Die Erbsenlaus gehört zu den Blattläusen (*Amphidoidea*). Ihr Genom ist sequenziert (IAGC 2010), ebenso das Genom von *Buchnera aphidicola*, eines in *A. pisum* symbiotisch lebenden Bakteriums (PEREZ-BROKAL et al. 2006).

Buchnera und Erbsenläuse leben in echter Symbiose, d. h. beide sind aufeinander angewiesen und kön-

nen ohne den Partner nicht existieren und sich nicht fortpflanzen. Die Bakterien leben in den Blattläusen in spezialisierten Zellen, den Bakteriocyten.

Proteine gehören zu den elementaren Komponenten aller Organismen; die zu ihrer Synthese notwendigen Aminosäuren müssen entweder mit der Nahrung aufgenommen oder mithilfe des eigenen Stoffwechsels (Anabolismus) hergestellt werden. Für Tiere sind von den 20 Aminosäuren, die typischerweise am Aufbau von Proteinen beteiligt sind, 10 essentiell, d. h. sie können diese nicht selbst produzieren.

Blattläuse durchstechen Pflanzengewebe oder bohren hinein und ernähren sich von Pflanzensäften. Diese wässrigen Lösungen enthalten aber wenig Stickstoff und auch der Anteil an essentiellen Aminosäuren ist ausgesprochen gering. HANSEN & MORAN (2011) haben nun die Nutzung (Expression) von Genen in den Bakteriocyten im Vergleich zu anderen Gewebezellen in Erbsenläusen untersucht, indem sie jeweils die RNA analysierten. Da die RNA direkt an der Erzeugung der für die Biosynthese notwendigen Enzyme beteiligt ist, liefert sie Informationen über Stoffwechselwege und deren Intensität. Daneben nutzten die Autoren noch weitere Stoffwechselanalysen sowie die bekannten Genomdaten.

Es zeigte sich, dass aus dem Genom der Erbsenlaus (*A. pisum*) von den 11089 Genen in den Bakteriocyten 85,7% genutzt werden gegenüber 86,9%, die in anderen Körperzellen exprimiert werden. 404 Gene waren in den Bakteriocyten vermehrt genutzt, während 996 im Vergleich zu anderen Zellen aus dem Gewebe *A. pisum* herunterreguliert waren.

Im Genom von *Buchnera* sind zwar die meisten Gene für die Biosynthese der essentiellen Aminosäuren vorhanden, einzelne allerdings fehlen ebenso wie die meisten Gene für die nicht essentiellen Aminosäuren. HANSEN & MORAN fanden nun heraus, dass 26 Gene, die an der Biosynthese von Aminosäuren beteiligt sind, in den