

zelnukleotid-Polymorphismus) erzeugen. Von Polymorphismus spricht man, wenn ein Gen (bzw. ein entsprechendes Merkmal) in mehreren Ausprägungen (Allelen) vorkommt. Mutationen vergrößern also den Polymorphismus. Bei SNPs betrifft der Polymorphismus nur ein einziges Nukleotid (=Einzelbaustein des Erbmoleküls DNA). Neue SNPs sollten sich dann in der Population durchsetzen, d. h. alternative Sequenzen sollten verschwinden und damit die Vielfalt der SNPs verringert werden. Aber genau das wurde nicht gefunden, es konnten also im *Drosophila*-Genom keine Bereiche identifiziert werden, in denen die erwarteten Effekte (geringerer Polymorphismus) auftraten. In dieser Langzeitstudie mit sich sexuell fortpflanzenden Organismen läuft Evolution gemessen an den Erwartungen in viel geringerem Umfang ab.

Die Autoren prüfen und diskutieren verschiedene Erklärungen für diesen Befund, ohne dass sie selbst eine davon beim derzeitigen Kenntnisstand als überzeugend einstufen. Die Laborbeobachtungen zeigen also, dass Selektion die genetische Variation in sich sexuell fortpflanzenden Populationen nicht wie erwartet reduziert. Bisher gilt als Lehrmeinung, dass Selektion, insbesondere wenn sie stark ist, im Laufe der Zeit zu deutlicher Verringerung des Gen-Polymorphismus, also der genetischen Vielfalt führt. Das konnten BURKE et al. (2010) in ihrer Studie mit den Langzeit-Experimenten an *Drosophila* aber gerade nicht belegen. Das bedeutet, dass mit diesen experimentellen Resultaten der Einfluss von Selektion – bei der natürlichen Selektion handelt es sich um einen zentralen Evolutionsmechanismus – nicht bestätigt werden konnte.¹

Da unter natürlichen Bedingungen die Selektionskriterien weniger stark und nicht über viele Generationen gleichbleibend ausgeprägt sind, kann man davon ausgehen, dass der ursprünglich erwartete Effekt unter Freilandbedingungen noch weniger auftritt wird.

Damit ist ein grundlegender bisher angenommener Mechanis-

mus für die Entstehung neuer Arten durch Selektionsprozesse in Frage gestellt. Weitere Forschung sollte dazu beitragen, die Abläufe besser zu verstehen.

[BURKE MK, DUNHAM JP, SHAHRESTANI P, THORNTON KR, ROSE MR & LONG AD (2010) Genome-wide analysis of a long-term evolution experiment with *Drosophila*. *Nature* doi:10.1038/nature09352; auf einer Internetseite sind Äußerungen von an der Untersuchung beteiligten Wissenschaftlern zusammengestellt: Scientists decode genomes of precocious fruit flies. *ScienceDaily* (2010.09.19) <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/09/100916162537.htm>] H. Binder

¹ Die Zusammenfassung des Beitrags in *Nature* wurde vom Herausgeber bezeichnenderweise mit dem Titel: „Experimental evolution reveals resistance to change“ veröffentlicht.

■ Hummeln lösen das Problem des Handlungsreisenden

Tiere, die Nahrung aus Reservoirs sammeln, welche sich im Laufe der Zeit wieder auffüllen, besuchen die Nahrungsquellen in vorhersagbaren Sequenzen, die „traplines“ genannt werden, analog zu menschlichen Fallenstellern, die ihre Fallen in einer festen Reihenfolge inspizieren. Dieses Verhalten ist im Tierreich weit verbreitet. Dennoch ist wenig darüber bekannt, wie die Tiere diese spezifischen Reihenfolgen entwickeln. Frühere Experimente hatten ergeben, dass sich z. B. Prachtbienen im Wesentlichen an der Reihenfolge der erstmaligen Entdeckung der Nahrungsquellen orientierten, auch

wenn diese zu suboptimalen Sammelstrecken führte.

Sollen die Wegstrecken verkürzt werden, müssen sich die Sammler mit einer kombinatorischen Optimierungsaufgabe herumschlagen, die als „Problem des Handlungsreisenden“ in der Mathematik bekannt ist. Die optimale Route zu finden, wenn mehrere Orte jeweils nur einmal besucht werden sollen, stellt bei zunehmender Zahl zu besuchender Orte eine Aufgabe dar, die exponentiell an Komplexität zunimmt, so dass die Berechnung der beweiskraftigen optimalen Lösung auch Supercomputer an ihre Grenzen bringt.

M. LIHOREAU, L. CHITTKA und N. E. RAINE von der Queen Mary und der Royal Holloway University in London untersuchten, in welcher Reihenfolge Hummeln (*Bombus terrestris*, Dunkle Erdhummel) künstliche Blüten besuchen, die nach und nach so verteilt wurden, dass die Hummeln die Sammelstrecke dynamisch entwickeln mussten. Die jeweils neuen Nahrungsquellen wurden schließlich so platziert, dass sie maximal voneinander entfernt waren, und bei Abfliegen in der Reihenfolge des Erscheinens zu einer deutlich suboptimalen, also unnötig langen Flugstrecke führen mussten. Die Experimentatoren stellten den Hummeln nur soviel Nahrung pro Blüte zur Verfügung, dass diese gezwungen waren, während eines Ausflugs alle Blüten zu besuchen, wenn sie ihren



Abb. 1 Gartenhummel *Megabombus hortorum*. (Foto: Fotolia.com)

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-