

BEGABTE BIENEN

Unser Bild vom Insekt als instinktgetriebener Reflexmaschine wankt derzeit gewaltig. Honigbienen treffen Entscheidungen, bauen Erwartungen auf und lernen Regeln, die sie in unterschiedlichen Situationen anwenden.

VON RANDOLF MENZEL

Was meinen Sie: Denkt eine Biene? Angesichts ihres kaum stecknadelkopfgroßen Gehirns mag diese Frage vielleicht absurd klingen. Je weniger das Nervensystem eines Tiers unserem eigenen ähnelt, desto schwerer fällt es sich vorzustellen, wie seine »geistige Innenwelt« aussieht. Doch wenn es darum geht, ob oder wie ein anderes Wesen denkt, sind wir immer auf Spekulationen angewiesen – selbst bei Vertretern unserer eigenen Spezies. Wir beobachten, wie jemand im Supermarkt ein bestimmtes Fertiggericht aus dem Kühlregal herausgreift, und schließen daraus, dass er sich bewusst genau dafür *entschieden* hat, weil er ein bestimmtes Geschmackserlebnis *erwartet*. Die Frau am Tisch gegenüber zückt ihr Portmonee, und wir nehmen an, dass sie *plant*, gleich den Ober um die Rechnung zu bitten.

Vokabeln wie »entscheiden«, »erwarten« oder »planen« beschreiben geistige Prozesse, die wir hinter den beobachteten Taten anderer vermuten, weil wir sie aus dem eigenen bewussten Erleben kennen. Bisher weiß man nur von wenigen Tierspezies – etwa Menschenaffen – sicher, dass sie ein »Selbst«-Bewusstsein besitzen. Dennoch zögern die meisten Kognitionswissenschaftler nicht, diese Begriffe auch für das Verhalten anderer Tiere mit »großen« Gehirnen anzuwenden – etwa für das von Hunden,

Mäusen oder Ratten. Denn ihr Handeln lässt zweifellos auf Hirnprozesse schließen, die sich mit diesen Worten gut fassen lassen. Die Frage, ob diese Vorgänge bewusst ablaufen, bleibt dabei offen.

Bei »niederen« Tieren sieht die Sache anders aus: Von »planenden« Insekten, die sich entscheiden oder gar Erwartungen haben, war bislang unter Wissenschaftlern selten die Rede. Und wenn dies geschah, dann wurde es als anthropomorphe Spekulation abgetan.

DIE BUNTE WELT EINES INSEKTS

In den Miniaturgehirnen von Insekten muss es wohl notgedrungen sehr ökonomisch zugehen. Schließlich nehmen diese wirbellosen Tiere die Welt in vielerlei Hinsicht reichhaltiger wahr als der Mensch mit seinem rund drei Pfund schweren Gehirn. Mit ein paar hunderttausend Nervenzellen – der Mensch besitzt über einhundert Milliarden! – sieht eine Biene mehr Farben als wir, erkennt zudem optische Besonderheiten wie linear polarisiertes Licht und unterscheidet viele Tausende von Düften. Ihre rasanten Flüge steuert sie präzise und mit einer zeitlichen Auflösung, die zehnmal höher ist als das, was das menschliche Auge überhaupt wahrnehmen kann.

Vielleicht ist es gerade diese Perfektion, auf der die Vorstellung vom Insekt als eine Art stereotypem, genetisch vorgeprogrammiertem Roboterwinzling beruht. Um den Anforderungen des Lebens zu genügen, so die Idee, ist das sparsame

Nervensystem des Tierchens für die verschiedensten Aufgaben bereits fest verdrahtet. Als Antwort auf einen bestimmten Reiz würden dann nur noch die richtigen Verbindungen aktiviert, was automatisch jene Reaktion auslöst, die sich in den Jahrmillionen Jahren der Evolution als am erfolgreichsten erwiesen hat.

Doch das Bild vom Reflexautomat Insekt wankt. Insbesondere Verhaltensversuche mit Honigbienen tragen dazu bei, dass Neurobiologen beginnen, Insekten mit anderen Augen zu sehen. Denn *Apis mellifica* – wie dieser Hautflügler auf lateinisch heißt – besitzt nicht nur ein faszinierend leistungsfähiges Gedächtnis. Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe Neurobiologie (Institut für Biologie, FU Berlin) und anderer Forscher zeigen, dass Bienen auch in der Lage sind, Regeln zu lernen, die sie auf verschiedenste Situationen übertragen. Sie lösen Transferaufgaben und wählen Ziele den eigenen Erwartungen entsprechend aus. Dazu nutzen sie ein Ortsgedächtnis, das ähnlich wie das des Menschen und anderer Säugetiere organisiert ist. Die neuen Forschungsergebnisse werfen daher die berechtigte Frage auf, ob wir Prozesse wie Planen, Entscheiden oder Erwarten im neurobiologischen nichtbewussten Sinne nicht auch Insekten zuschreiben müssen.

Zugegeben – eine Fülle von Reizen steuert das Verhalten dieser wirbellosen Tiere recht zuverlässig und starr: Männliche Motten fliegen dem weiblichen Se-

Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.

NICHT ZU UNTERSCHÄTZEN
Mit ihrem Mini-Gehirn löst eine
Biene komplexe Lernaufgaben.

xuallockstoff nach, Ameisen folgen bei der Futtersuche den Duftmarkierungen ihrer Artgenossen. Und um in den freien Luftraum zu gelangen, steuern Fluginsekten jede beliebige helle Lichtquelle an und bleiben nicht selten an Straßenlaternen oder hinter einer Fensterscheibe bis zu ihrem Tod gefangen. Diese unflexiblen Reaktionen machen aber nur einen kleinen Teil ihres Verhaltens aus und sind in keiner Weise typisch. Wären Insekten lediglich stereotyp reagierende

Reflexmaschinen, dann müsste ihre Antwort auf einen Umweltreiz stets dieselbe sein und das würde ihre Überlebenschancen stark verringern.

Anpassen und Optimieren durch Lernen und ein lang anhaltendes Gedächtnis spielt bei diesen Lebewesen eine genauso wichtige Rolle wie bei größeren Tieren. Wenn etwa eine Biene Nektar oder Pollen produzierende Blüten entdeckt, erinnert sie sich an deren Farbe und Form, den Duft, den diese ausströmen,

und die Art und Weise wie sie den Blütenkelch manipulieren muss, um möglichst effektiv an das begehrte Gut zu gelangen. Sie lernt, zu welcher Tageszeit die Nektarproduktion einsetzt, ob diese zuverlässig ist und entscheidet schließlich vor dem Hintergrund anderer Erfahrungen, ob der Aufwand an Zeit, Energie und Risiko den Besuch dieser konkreten Pflanze lohnt.

Jedes Mal wenn ein Hinweisreiz wie Farbe, Duft oder Form mit einer ange- ►

▷ nehmen Erfahrung (Nektar, Pollen) verknüpft ist, lernt eine Biene daraus. Wie gut sie sich die Verbindung einprägen kann, hängt wie bei anderen Tieren davon ab, ob Stimulus und Belohnung im richtigen Zeitabstand und in der richtigen Reihenfolge – also zuerst der Hinweisreiz und dann die Belohnung – aufeinander folgen. Aber auch auf die Art des Reizes kommt es an. Beispielsweise können sich Bienen violette und blaue Farben von Natur aus schneller merken als grüne oder gelbe. Die Lernpsychologie hat seit Iwan Pawlow etliche Gesetzmäßigkeiten für das assoziative Lernen aufgestellt. Und erstaunlicherweise gelten alle bisher untersuchten Regeln auch für *Apis mellifica*.

EIGENE VORSTELLUNGEN

So lernt eine Biene problemlos, dass Duft A oder Duft B auf Futter hindeuten, nicht jedoch »AB« – die Kombination beider (Versuchsaufbau zur Duftkonditionierung siehe Kasten unten). Ausschließlich einfache (»elementare«) assoziative Verknüpfungen nach dem Prinzip »Duftmoleküle von A lösen Reaktion X aus« können eine solche Lernleistung nicht erklären. Denn die Antwort dazu müsste auf das AB-Gemisch mindestens so stark ausfallen wie die auf A allein oder B allein, weil die Tiere die einzelnen Duftkomponenten im Gemisch

wahrnehmen. Vielmehr scheint der AB-Mix in der »Vorstellung« der Biene eine ganz eigenständige Qualität zu bekommen: eine im Gehirn erzeugte virtuelle Repräsentation von AB, die verschieden ist von jener der Einzeldüfte A und B.

Wie andere Tiere kann *Apis mellifica* einmal Gelerntes flexibel – dem Kontext angemessen – einsetzen. Beispielsweise bewertet sie ihre Sammelerfahrungen danach, wie erfolgreich sie im Vergleich zu ihren Nestkameradinnen ist, die ebenfalls Futter in den Stock hineintragen. Denn dort angekommen, übergibt sie den Nektar den jungen Bienen im Innendienst, die ihre Ladung umso rascher akzeptieren, je attraktiver sie gegenüber anderen eingehenden Nektarlieferungen erscheint.

Den Blütenstaub hingegen lädt die Sammlerin selbst in die dafür vorbereiteten Pollenzellen ab. Muss sie zu lange nach freien Zellen suchen, schmälert das den Nutzen der Ladung für das Volk und die Kenntnisse über pollenreiche Orte verlieren ihren Wert. In diesem Fall aktiviert eine Biene entweder ihr Gedächtnis für Nektarquellen oder lässt sich von anderen Sammlerinnen zu Flügen an viel versprechendere Futterplätze »abwerben«.

Mit einem berühmten Experiment zeigte Martin Lindauer von der Universität Würzburg (damals Universität München) bereits vor vierzig Jahren, dass

Bienen sich sogar einprägen können, ob zwei Futterstellen zu verschiedenen Tageszeiten Nahrung bieten, etwa jeweils nur zwei Stunden am Vor- oder Nachmittag. Denn in ihren »Schwänzeltänzen« (siehe Bild auf der gegenüberliegenden Seite) übermitteln sie anderen Sammlerinnen zur jeweiligen Zeit nur die Richtung derjenigen Quelle, die gerade Nektar bereithält. Dabei enthüllen Bienen ein beachtliches Zeitgefühl: Bläst man sie mit einem Duft an, den sie vorher mit einer Nahrungsquelle assoziiert haben, tanzen sie sogar mitten in der Nacht. In diesem Fall schwänzeln sie vor Mitternacht für den Nachmittags- und danach für den Vormittagsort! Das bedeutet: Die Tiere speichern zusammen mit dem geografischen Ort der Futterquelle auch gleich die relevante Tageszeit im Gedächtnis ab. Später hängt es dann vom zeitlichen Kontext ab, welche Inhalte sie daraus wieder abrufen.

Verblüffend ist auch die Fähigkeit von *Apis mellifica*, Aufgaben zu meistern, die uns als abstrakte Probleme erscheinen. Unser Mitarbeiter Martin Giurfa (jetzt an der Universität Toulouse) konnte zeigen, dass Bienen kategoriales Lernen und Abstrahieren möglich ist – natürlich ohne dass wir dafür »bewusste« Prozesse annehmen müssten. Belohnt man die Hautflügler auf ständig wechselnden Mustern, die als einzige

DIE VERBINDUNG VON DUFT UND BELOHNUNG

BIENEN LERNEN SCHNELL einen Duft mit Belohnung zu assoziieren. Während sie in einem Röhrchen eingeklemmt sind, stimuliert man ihre Antennen mit einem Tropfen Zuckerlösung. Hungerige Tiere strecken daraufhin ihren Rüssel reflexartig aus. Mit ihm suchen sie nach der begehrten Speise, und ist sie in Reichweite, lecken sie alles gierig auf. Diese unbedingte (ungelernte) Reaktion lässt sich trainieren, indem man das

Nahrungsangebot mit einem Duft verknüpft. Die Tiere werden wenige Sekunden lang, kurz vor der Stimulation der Antennen und dem Nahrungsangebot einem bestimmten Duft ausgesetzt. Bereits nach nur einer solchen »Vorwärtspaarung« (das heißt, zuerst der zu lernende Duftreiz, dann die Belohnung) genügt jetzt bei mehr als der Hälfte der Tiere der Duftreiz allein, um die Rüsselreaktion auszulösen. Einige weitere Lerndurchgänge erhöhen die Wahrscheinlichkeit, das Verhalten beobachten zu können, auf über achtzig Prozent.

UM ZU ÜBERPRÜFEN, ob nicht der Duft an sich die Rüsselreaktion verursacht, kann man im Training die Reizfolge umdrehen, also zuerst die Nahrung und dann den Duft anbieten. Im Test werden die Tiere auf den Duftreiz allein nicht reagieren.

RÜSSEL-ÜBUNG

Die Biene ist so in einem Röhrchen eingeklemmt, dass sie die Zuckerlösung nur erreicht, wenn sie ihren Rüssel vollständig ausfährt.



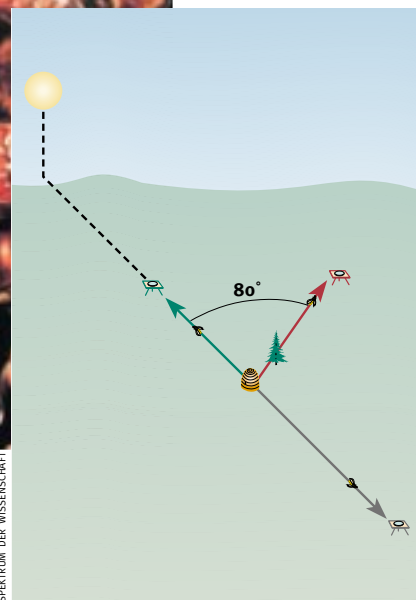
RANDOLF MENZEL



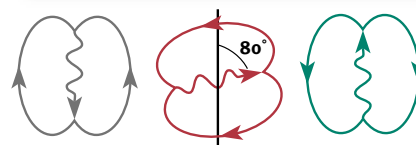
RANDOLF MENZEL

SCHWÄNZELTANZ

Eine erfolgreiche Sammlerin teilt ihren umstehenden Nestgenossen die Lage einer Futterquelle mit. Der Winkel zwischen ihrer Körperrichtung während des Schwänzels (im Mittelstück der Achterfiguren) und der Vertikalen entspricht dem Winkel zwischen der einzuschlagenden Flugrichtung und der Richtung zur Sonne.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT



Achterfiguren beim Bienenanz auf der senkrechten Wabe

gemeinsame Eigenschaft eine »Spiegelsymmetrie« besitzen, dann bevorzugen sie anschließend beliebige spiegelsymmetrische Muster (siehe Kasten S. 78). Das Gleiche leisten sie, wenn Nichtsymmetrie Belohnung verspricht. Bienen sind folglich in der Lage, die übereinstimmende Eigenschaft – Symmetrie oder Nichtsymmetrie – nacheinander präsentierter Muster zu verallgemeinern und einer bestimmten Kategorie zuzuordnen.

EINE EINFACHE FORM DER ABSTRAKTION

Weitere Experimente zeigten, dass die Tiere die Umkehrung der Aufgabe, etwa nichtsymmetrische Muster als Hinweis zu erkennen, viel schneller lösen, wenn sie den Test auf Spiegelsymmetrie zuvor bereits bestanden haben. Offensichtlich haben sie das abstrakte Prinzip verinnerlicht, nach dem die Lernaufgaben »gestrickt« sind: nämlich eine Mustereigenschaft zu beachten, die nur durch Vergleich von mehreren Mustern erkannt werden kann.

Die beiden für eine solche Leistung notwendigen Prozesse wie Lernen und Erinnern sind nicht strikt voneinander trennbar. Denn das Aufrufen von Informationen aus dem Gedächtnis (etwa um ein kurz zuvor gesehenes Muster mit einem neuen zu vergleichen) bedeutet in diesem Moment bereits neues Lernen. Beides – das gerade Gelernte und das aus dem Alt-Gedächtnis Aufgerufene – speist

das aktuell wirksame und verhaltenssteuernde Arbeitsgedächtnis. Seine Kapazität ist jedoch begrenzt. So kann ein Mensch in der Regel etwa sieben Informationseinheiten (plus/minus zwei) in diesem Kurzzeitspeicher halten.

Der bekannte deutsche Zoologe und Verhaltensforscher Otto Koehler beschäftigte sich zwischen 1926 und 1959 mit der Frage, inwieweit höhere Tiere »zählen« können. Dabei fand er heraus, dass Kolkraben bis zu sieben Fleckmuster, die ihnen gleichzeitig für kurze Zeit präsentiert wurden, nach der Anzahl der Flecken voneinander unterscheiden konnten. Hinsichtlich des Arbeitsgedächtnisses bedeutet dies, dass die Tiere in der Lage waren, sieben visuelle Reize gleichzeitig zu erfassen und zu kategorisieren. Tatsächlich scheint die 7+/-2-Regel zumindest für Affen und Vögel generell zu gelten.

Und wie viele Elemente kann sich eine Biene auf einmal merken? Uwe Greggers aus unserer Arbeitsgruppe hat die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses von *Apis mellifica* getestet. In der Versuchsanordnung sammelt eine Biene an vier künstlichen Blüten, die pro Stunde unterschiedlich viel Nektarersatz abgeben. Die Belohnung, die eine Sammlerin während eines Aufenthalts an einem der vier Zuckerspender erhält, hängt daher von zwei Faktoren ab: der jeweiligen »Produktionsrate« und dem Zeitabstand zu ihrem letzten Besuch an der entsprechenden Blüte.

In dieser Situation passt *Apis mellifica* die Frequenz ihrer Visiten an die Nektarproduktion an, damit sie im Mittel jedesmal etwa gleich viel Saft an einer Blüte auftanken kann. Die Biene entwickelt dabei eine Art »Erwartungshaltung«: Je mehr Belohnung eine Blüte auf Grund ihrer Erfahrung verspricht, desto länger versucht sie daran zu saugen. Findet das Tier nun bei einer Einkehr weniger oder mehr Nektarersatz als bisher vor, adaptiert es seine »Erwartungen« bereits für den nächsten Besuch.

ERWARTUNGEN EINER BIENE

In unseren Versuchen konnten die Bienen bis zu vier Blüten anfliegen und sich danach immer noch daran erinnern, wie die Belohnung an einer bestimmten Blüte von ihrer Erwartung abwich. Bis zu diesem Zeitpunkt vergingen im Mittel zehn Minuten. Wir können also noch nicht sagen, ob die Zeitspanne oder die Zahl der inzwischen abgelaufenen Erfahrungen das Arbeitsgedächtnis begrenzen. Doch eines ist klar: *Apis mellifica* entwickelt für jede der vier Blüten ein getrenntes Arbeitsgedächtnis, das mindestens zehn Minuten anhält und in diesem Zeitraum von bis zu vier zusätzlichen Erfahrungen nicht überdeckt wird.

Weitere aufschlussreiche Versuche zum Arbeitsgedächtnis führte Martin Giurfa zusammen mit Mandyam Srinivasan von der Australian National University in Canberra durch. Dabei verwendeten sie einen Y-förmigen, an der Oberseite durchsichtigen Kasten, in dem sie am Ende einer der beiden Schenkel ein Tröpfchen mit Zuckerlösung platzierten (siehe Bild auf S. 78, unten). Das Eingangsloch lag im »Fuß« des Ypsilon und war mit einem dicken Farbring markiert. Die Belohnung wartete aber erst am Ende einer der beiden Arme, an dem ebenfalls ein Farbring angebracht war. Das Experiment war nun so konzipiert, dass die Versuchsbiene stets nur dann Futter erhielt, wenn sie den Arm wählte, an dessen Ende sich die gleiche »Marke« befand wie am Eingangsloch. Ein anderes Tier hingegen erhielt seine Belohnung, wenn es nicht die gleiche, sondern die anders aussehende Marke anflieg.

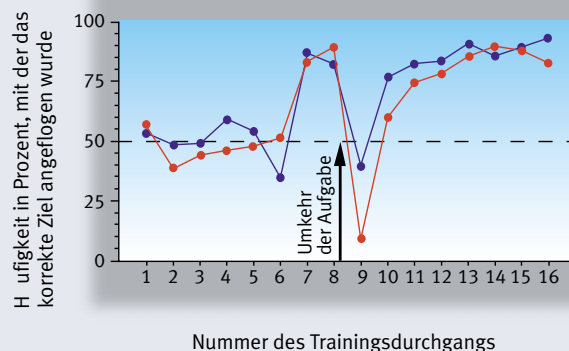
Die getesteten Bienen lösten ihre Aufgabe bald bravurös. Augenscheinlich speicherten sie in ihrem Arbeitsgedächtnis die soeben gesehene Marke, verglichen sie mit einer später wahrgenommenen und wählten dann den entsprechenden Schenkel. Nun stellte sich die spannende Frage: Gelingt es den Tieren auch, diese Lösungsstrategie auf neue Stimuli zu übertragen, also eine Regel ►

EINE FRAGE DER SYMMETRIE

WENN BIENEN MEHRMALS AUF WECHSELNDEN SYMMETRISCHEN MUSTERN Nahrung erhalten, lernen sie, dass die Eigenschaft »Symmetrie« einen Futterhinweis darstellt. Dasselbe Verhalten lässt sich beobachten, wenn die Belohnung wiederholt mit asymmetrischen Reizen verknüpft ist. Für das Training werden den Versuchstieren immer drei Muster gleichzeitig angeboten, wobei nur eines (im Beispiel Reihe »+«, ganz links) zum Futter leitet. Der Lernerfolg wird mit wiederum anderen Testreizen (Doppelreihe unten) gemessen. Im Durchschnitt haben die Bienen das Prinzip bereits nach dem sechsten Trainingsdurchgang »begriffen« (siehe Diagramm). Jetzt bevorzu-



gen sie in etwa achtzig Prozent der Fälle das antrainierte Muster. Wenn diese Tiere plötzlich umlernen sollen, statt Symmetriewahl also auf einmal Assymetriewahl zum Futter führt, genügen ihnen wenige Wiederholungen, um sich auf die entgegengesetzte Regel einzustellen. Offensichtlich haben die Bienen das Prinzip dieser Lernaufgaben erfasst.



THOMAS BRAUN / GEHIRN & GEIST NACH MARTIN GIURFA

▷ anzuwenden in dem Sinne: Wähle stets dasselbe (oder nicht dasselbe), was du gerade gesehen hast?

Um dies zu testen, präsentierten wir den Bienen anstelle der Farbringe unterschiedlich ausgerichtete Streifenmuster. Und tatsächlich: Hatten sie die Aufgabe mit den Farben schon gelernt, so entschieden sie sich bereits beim ersten Versuch zielsicher für das futterweisende Streifenmuster. Die Bienen vermochten die Regel sogar auf ein Duftpaar zu übertragen, wenn sie zuvor die Aufgabe mit einem Farbpaar erfolgreich gemeistert hatten!

Auch solche Leistungen beruhen auf Prozessen, die im Arbeitsgedächtnis ablaufen. Denn das längerfristige Gedächtnis bildet sich noch nicht im Moment des Lernens, sondern erst im Laufe der

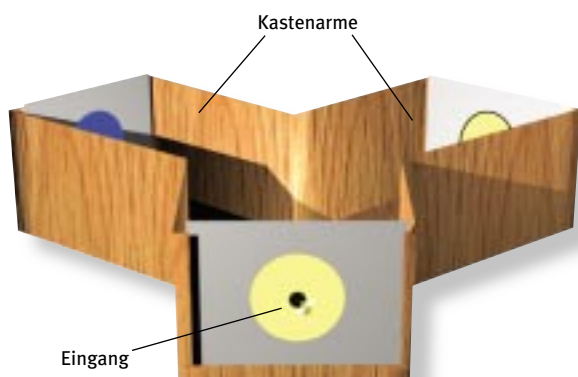
Zeit. Inzwischen ist für viele Tierarten einschließlich Schnecken, Krebsen und Insekten bewiesen, dass der stabilen Einspeicherung mehrere Gedächtnisphasen vorausgehen, die sich darin unterscheiden, wie der Inhalt gespeichert wird, welche Gehirnstrukturen beteiligt sind und wie das aktuelle Verhalten damit gesteuert wird. Wie andere Tiere verfügen Bienen über mindestens drei Gedächtnisformen: Kurz-, Mittel- und Langzeitgedächtnis.

DREI-PHASEN-GEDÄCHTNIS

Warum verfolgt das Gehirn eine so komplizierte Strategie? Wäre es nicht klüger und sicherer, möglichst zügig alles stabil abzulegen und dann aus immer demselben Speicher abzurufen? Oft wird argumentiert, die zellulären und molekularen

Vorgänge der Gedächtnisbildung seien eben sehr komplex, das brauche seine Zeit. Und während Nervenzellkontakte – die Synapsen – verändert, neu gebildet oder abgebaut werden, sollte zumindest ein vorläufiges Gedächtnis zur Verfügung stehen. Wir wissen aber inzwischen, dass alle notwendigen Prozesse recht schnell, in weniger als einer Stunde ablaufen können. Die Bildung eines stabilen Gedächtnisses dauert hingegen Tage oder gar Wochen. Wird die Gedächtnisbildung vielleicht aus guten Gründen in die Länge gezogen?

Möglicherweise sind die aufeinander folgenden Phasen an verschiedene Aufgaben angepasst, die sich einem Tier in seinem natürlichen Lebensrhythmus stellen. Für die Biene lässt sich diese Idee gut überprüfen. Während ei-



Paare von Markierungen



DAS KONZEPT DER GLEICHHEIT

Eine Biene lernt, dass sie nach Passieren des gelb markierten Eingangs am Ende des ebenfalls gelb markierten Kastenarms Futter findet. Die Regel »wähle stets das, was du gerade gesehen hast« kann sie übertragen. Denn tauscht man die Farben durch Muster aus, entscheidet sie auf Anhieb richtig. Ebenso kann sie die Regel »wähle nicht zweimal dasselbe« lernen und übertragen.

THOMAS BRAUN / GEHIRN & GEIST NACH RANDOLF WENZEL

Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.

nes Nektarsammelflugs muss sie sich viele verschiedene Blütenmerkmale wie Farbe oder Duft in schneller Abfolge einprägen. Hierfür setzt sie ihr Kurzzeitgedächtnis ein. Zurück im Stock wird der Nutzen der mitgebrachten Ladung bewertet, was die gerade gemachte Lernerfahrung modifiziert. Dazu halten die Tiere das Gelernte im Mittelzeitgedächtnis.

Erst wenn sich die so gespeicherten Gedächtnisinhalte in einigen aufeinander folgenden Tagen bewährt haben und die Angebotslage auf dem Blütenmarkt kein Um- und Neulernen verlangt, wird ein frühes Langzeitgedächtnis angelegt. Ein spätes, erst nach mehreren Tagen einsetzendes Langzeitgedächtnis mag vor allem für die ganz stabilen Erinnerungen zuständig sein, etwa die Lage, die visuellen Merkmale oder den Geruch des heimatischen Stocks. Aber auch diese Gedächtnisinhalte dürfen nicht in Marmor gemeißelt werden. Schließlich schwärmen Bienenvölker aus, wenn ihnen ihre Behausung zu klein geworden ist, und es sind gerade die erfahrenen Tiere, die sich gemeinsam mit der alten Königin eine neue Heimat suchen.

Noch eine andere Frage lässt sich am besten an sozialen Insekten wie Bienen, Hummeln, Wespen oder Ameisen erschließen – Tieren, die immer wieder zu ihrer Kolonie zurückkehren: Wissen Insekten, wo sie sind, wenn sie in der Gegend herumfliegen oder -laufen? Oder anders gefragt: Können sie von jedem Ort aus,

an dem sie sich gerade befinden, ein Ziel auswählen und direkt ansteuern? Findet eine Biene Blüten, an denen sie sich volltanken kann, dann fliegt sie danach schnurgerade auf dem kürzesten Weg nach Hause. Da sie das zu jedem Zeitpunkt ihres Sammelflugs tun kann, »weiß« sie offenbar stets, wo sie sich befindet. Genauso verhalten sich Ameisenarten, die sich nicht nach Duftspuren orientieren – etwa die hochbeinige Wüstenameise *Cataglyphis*: Entdeckt sie auf ihren schleifenförmigen Suchläufen ein totes Insekt, kann sie von jedem beliebigen Ort aus direkt zum versteckten Eingang ihres Nestes zurückkehren.

AUSGEPRÄGTER SINN FÜR ORIENTIERUNG

Bienen und Ameisen orientieren sich am Stand der Sonne – und bei bedecktem Himmel am spezifischen Polarisationsmuster des blauen Himmelslichts. Dabei verwenden sie eine Art Autopilot: Sobald sie das Nest verlassen, speichert dieser alle Richtungskomponenten der zurückgelegten Wegstrecken. Deren Längenabschnitte misst sie mit den Augen und beides gemeinsam speichert sie als Vektor im Arbeitsgedächtnis. Doch erstaunlicherweise finden Bienen selbst dann schnell zurück, wenn man sie in ein dunkles Kästchen setzt und an irgendeiner Stelle im Umkreis von etwa einem Kilometer um ihren Stock freilässt. Erst mit der Entwicklung eines speziellen Radarsystems, mit dem sich

AUF POLLENSUCHE

Bienen besitzen vermutlich ein kartenartig organisiertes Landschaftsgedächtnis, das es ihnen ermöglicht, auf verschiedenen Wegen lohnende Nahrungsquellen gezielt anzusteuern.

der Flug komplett aufzeichnen lässt, konnte das Phänomen genau untersucht werden (siehe Kasten auf S. 80). Denn damit ließ sich beobachten, dass die Bienen nach einigen Suchschleifen direkt zum Stock zurücksteuerten. Wie lange die Tiere vorher umherschweiften, hing offenbar vor allem von der Nahrungsreserve ab, die sie dabei hatten. War der Proviant knapp, wurde der gerade Rückflug sogar prompt eingeleitet.

Doch wie fanden die Entführten den Weg zurück? Ihr Autopilot kommt dafür nicht in Frage, da die Biene im dunklen Kästchen keinen Sonnenkompass verwenden und keine Strecken messen kann. Wahrscheinlich haben die Tiere bereits als junge Bienen während ihrer ersten Erkundungsflüge um den Stock herum ein Landschaftsgedächtnis erworben. Doch wie ist dieses strukturiert?

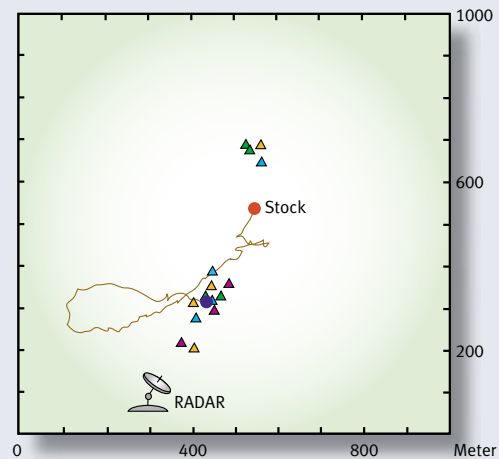
Im Normalfall beginnen und enden alle Flüge am Heimatstock. Der Autopilot teilt der Biene stets den kürzesten Weg zum Stock mit, er kennt also den entsprechenden Rückkehrvektor. Daher könnte es sein, dass die Biene beim

BIENEN IM FLUG VERFOLGEN

Ein RADARSTRAHL wird von sämtlichen Gegenständen in der Umgebung reflektiert, weshalb mit der herkömmlichen Radarortung eine winzige, fliegende Biene nicht zu erkennen ist. Ihren Flug aufzuzeichnen wurde erst möglich, als Joe Riley vom National Resources Institute in Malvern (England) das so genannte »harmonische« Radarsystem entwickelte.

Das Tier bekommt dafür eine winzige Antenne auf den Rücken geklebt. Diese absorbiert die Energie des Radarpulses von einem ersten Radarschirm und wandelt sie in einen Puls kürzerer Wellenlänge um, den sie dann nach allen Richtungen abstrahlt. Das Signal wird von einem zweiten Radarschirm aufgefangen, der sich mit dem ersten synchron dreht und der für den ursprünglichen Radarstrahl und reflektierte Wellenlängen unempfindlich ist.

In ebenem Gelände kann eine Biene im Umkreis von etwa einem Kilometer registriert werden. Rechts ist die Flugspur einer Biene gezeigt, die wenige hundert Meter von ihrem Heimatstock freigelassen wurde.

**HEIMWÄRTS**

Ein Biene steuert nach einer Suchschleife zum Stock. Dabei orientiert sie sich an auffälligen Landmarken (Dreiecke).

THOMAS BRAUN / GEHIRN & GEIST NACH RANDOLF MENZEL

- ▷ Überfliegen auffälliger Umgebungsmerkmale den jeweiligen Rückkehrvektor mit bestimmten Landmarken assoziiert. In diesem Fall bestünde ihr Ortsgedächtnis aus einer Fülle von Vektoren, die alle an den wiedererkennbaren Landmarken »angeheftet« sind und zum Stock ihres Volkes weisen.

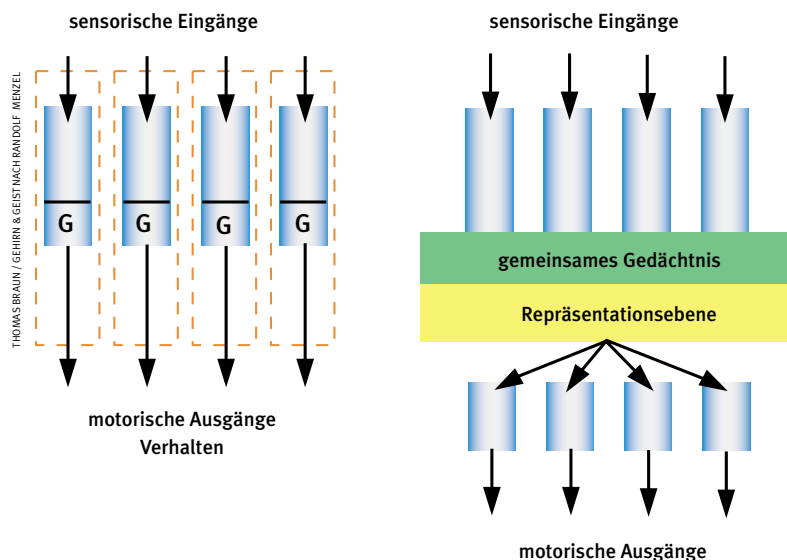
Doch lässt sich diese Hypothese in dieser Ausschließlichkeit nach wie vor aufrechterhalten? Für den Test wurden Bienen darauf trainiert, eine weit vom Nest entfernte Futterstelle anzufliegen. Dann steckte man sie in ein Kästchen und setzte sie an einem anderen Ort innerhalb des ihnen bekannten Bereichs von etwa einem Kilometer um den Stock

herum aus. Überraschenderweise entschied sich ein Teil der Bienen jedoch nicht zum Stock zurückzufiegen. Stattdessen steuerte er die Futterquelle an. Das wäre den Tieren aber nicht möglich gewesen, wenn sie nur über eine heimwärts gerichtete Vektorkarte verfügen würden.

Solche Studien belegen, dass Bienen ein kartenartig strukturiertes Landschaftsgedächtnis besitzen, in dem mehr als nur der heimliche Stock verzeichnet ist. Und wie beim Menschen sind solche Landmarken offenbar nicht nur als unterscheidbare und wieder erkennbare Objekte charakterisiert, sondern auch in ihrer relativen Lage zueinander gespeichert.

Die gesammelten Ergebnisse aus den Lern- und Orientierungsversuchen legen nahe, dass Insektengehirne sehr viel leistungsfähiger, flexibler und integrativer arbeiten als bisher angenommen. Wie könnte also ein neues, angemessenes Modell aussehen, das die Kognition von Insekten beschreibt?

Die herkömmliche Vorstellung ging von isolierten, elementaren Verhaltensmodulen aus (Bild unten links). Etwa: der oben erwähnte Autopilot beim Navigieren, das Bestimmen des Sonnenazimuts aus dem Polarisationsmuster eines Stücks blauen Himmels, das Ritual der Tanzkommunikation, mit dem Bienen ihren Artgenossen Richtung und Entfer-

**INTEGRATIONSMODELL**

Die linke Abbildung illustriert die herkömmliche Vorstellung von der Organisation eines Insektengehirns – verschiedene Verhaltensmodule, die nach Bedarf aktiviert werden und jeweils ein eigenes Gedächtnis beanspruchen. Nach einem alternativen Modell (rechts) wird das Verhalten über ein gemeinsames Gedächtnis und eine Repräsentationsebene gesteuert, die dem Insekt neue und flexible Reaktionen erlaubt.

nung eines wichtigen Ortes mitteilen, das Assoziieren eines Flugvektors mit einer Landmarke und auch das jeweils getrennte Lernen und Einspeichern von Farb-, Muster- und Duftsignalen. Die Aufgabe des Nervensystems bestünde dann darin, das richtige Modul zu aktivieren und die anderen zu unterdrücken. Ein solches Netzwerk würde mit der Zahl der Module und den möglichen Interaktionen zwischen ihnen jedoch schnell sehr komplex.

Zudem können wir in den Experimenten beobachten, dass Bienen Kategorien bilden und Lernregeln auf andere Situationen zu übertragen vermögen, sogar wenn dazu unterschiedliche Sinne – etwa Geruchs- und Sehsinn – benötigt werden. Würde all dies über Modulverknüpfungen gelöst, wären dieselben Inhalte vielfach parallel gespeichert, was den notwendigen Speicherumfang der Gedächtnisse extrem vergrößern würde.

AUSPROBIEREN OHNE HANDELN

Wir schlagen daher vor, eine Ebene der Integration in diesen kleinen Gehirnen anzunehmen, die analog zu den Konzepten, die für große Gehirne entwickelt wurden, »Repräsentationsebene« genannt wird. Was hier im Gehirn abläuft, kann man am besten als »inneres Tun« oder »Ausprobieren ohne Handeln« bezeichnen – ohne dass Tiere diese Prozesse bewusst erleben.

Die beschriebenen Verhaltensexperimente lassen auf die Existenz einer solchen Ebene schließen. Die Frage, *wie* Repräsentationen im Gehirn beim Menschen und beim Tier aufgebaut werden, gehört zu den großen Rätseln der Hirnforschung. Aber vielleicht sind Studien an Insektengehirnen ganz besonders gut geeignet, dieses Geheimnis zu lüften. ◀

RANDOLF MENZEL, Professor am Institut für Biologie, Abteilung Neurobiologie, der Freien Universität Berlin erhielt für seine Forschung den Leibnizpreis und den Körberpreis für Europäische Wissenschaft.



Literaturtipps

Giurfa, M., Eichmann, B., Menzel, R.: Symmetry Perception in an Insect. In: *Nature* 382, 1996, S. 458–461.

Giurfa, M. et al.: The Concepts of Sameness and »Difference« in an Insect. In: *Nature* 410, 2001, S. 930–933.

Menzel, R., Giurfa, M.: Cognitive Architecture of a Mini-Brain: the Honeybee. *Trends in Cognitive Sciences* 5, 2001, S. 62–71.

Anzeige