

Wie Bienen lernen

Neue Erkenntnisse über das Gedächtnis im Bienenhirn

Jedem Imker ist klar, dass seine Bienen lernen, sonst würden sie nicht gezielt immer wieder bestimmte Pflanzen anfliegen und zurück zu ihrem Stock finden. Gehirnforscher möchten allerdings auch wissen, wie die Bienen dies genau anstellen. Das Team um Professor Randolph Menzel lässt uns mit den folgenden Einblicken in neueste Ergebnisse erahnen, wie kompliziert diese Forschungen sind.

Wenn Menschen und Tiere etwas lernen, dann bilden sie ein Gedächtnis. Sie speichern die gewonnene Erfahrung und können so ihr Verhalten in ähnlichen Situationen verbessern. Ein Kind merkt zum Beispiel schnell, dass es das gewünschte Spielzeug bekommt, wenn es darum bittet, nicht aber, wenn es einfach nur schreit.

Bienen lernen (fast) wie Menschen

Um in einer ähnlichen Situation auf die Erfahrung zurückgreifen zu können, muss das Gedächtnis wieder aufgerufen werden. Jedes Gedächtnis hat daher drei Zustände:

1. wenn es nach dem Lernen gebildet wird,
2. wenn es im Gehirn als Gedächtnisspur bereitliegt, um aufgerufen zu werden, und
3. wenn es aktiviert wird, um die Wahrnehmung und das Verhalten entsprechend früherer Erfahrung zu steuern.

Gehirnforscher möchten wissen, was im Gehirn während dieser drei Zustände passiert und wie im Nervenetz die Inhalte des Gedächtnisses gespeichert sind. Die Gedächtnisspur im Gehirn kann man daran erkennen, dass sich die Verschaltung der Nervenzellen verändert, also die beteiligten Speicherstellen vor dem Lernen (Zustand 1) und nach dem Lernen (Zustand 3) verschieden sind. Wir wissen bereits, dass es dabei keine prinzipiellen Unterschiede zwischen Tieren und Menschen gibt und dass auch kleine Gehirne wie die der Insekten die drei Zustände des Gedächtnisses im Netz der Nervenzellen niederlegen. Aber was genau passiert dabei, und wie kann man eine Gedächtnisspur sichtbar machen?

Honigbienen bieten sich für solche Untersuchungen besonders an, weil sie sehr gut lernen, weil sie ein lang andauerndes Gedächtnis bilden (lebenslang, z. B. bei Winterbienen mehrere Monate) und weil sie über ein kleines Gehirn mit (nur) einer Million Nervenzellen verfügen. Diese Nervenzellen sind wie die der anderen Tiere

und die des Menschen über Schaltstellen (Synapsen) miteinander verbunden. Viele dieser Nervenzellen kennen wir schon recht genau, manche sogar als einzelne Nervenzellen mit all ihren Verzweigungen (Abb. 1 A). Besonders wichtig in diesem Zusammenhang ist die Kenntnis einer kleinen Gruppe von Nervenzellen (15), die dafür verantwortlich sind, dass bei den Bienen eine Belohnung in einer Duft-Lernsituation zu einem Gedächtnis führt. Abb. 1 B zeigt eine dieser Belohnungsnervenzellen im Bienenhirn mit dem Namen VUMmx1.

Aktivierung von Nervenzellen sichtbar gemacht

Es war eine wichtige Erkenntnis, als wir vor gut 25 Jahren eine erste Gedächtnisspur in den Antennenloben (die Struktur im Bienenhirn, welche die Gerüche verarbeitet) fanden. Diese Gedächtnisspur wird sichtbar an den Veränderungen der Nerven-Verschaltung während des Lernens und an den Aktivitätsmustern der beteiligten Nervenzellen, wenn die Biene an das Duftgedächtnis erinnert wird. Die Veränderung der Verschaltung drückt sich sowohl in einer Verstärkung wie auch in einer Verringerung der Verknüpfung der Nervenzellen aus. Dies führt dazu, dass der gelernte Duft nun besser von anderen Düften unterschieden wird und dass die Aktivierung der Gedächtnisspur zu einer Erwartung der Belohnung führt. Die Biene ändert ihr Verhalten so, dass sie nun die belohnende Situation (z. B. eine Blüte an einer bestimmten Stelle) anfliegt.

Welche komplizierten Prozesse im winzigen Bienenhirn ablaufen, um sich nur einen einzigen Duft – wie den der Zweihäusigen Zauberrübe – zu merken, erforschen Randolph Menzel und sein Team an der Freien Universität Berlin. Foto: Hans Bahmer



Bei diesen Experimenten konnten wir aber nur recht grob die Bereiche erfassen, die in den Antennenloben an der Verschlüsselung und Speicherung des Duftgedächtnisses beteiligt sind. Der Inhalt eines Gedächtnisses ist aber in dem feinen Muster der Verschaltungen niedergelegt. Deswegen haben wir uns in einem nächsten Schritt darum bemüht, die einzelnen beteiligten Nervenzellen während einer Gedächtnisbildung zu verfolgen. Das gelang uns in dem Eingangsbereich des Pilzkörpers. Wir konnten mit einem speziellen Mikroskop in das Gehirn der Bienen hineinschauen und einzelne Nervenzellen des Pilzkörpers so darstellen, dass wir ihre stärkere oder schwächere Aktivierung in Folge des Lernens verfolgen konnten. Dieser Eingangsbereich des Pilzkörpers besteht aus einem dichten Geflecht von vielen tausenden von Nervenzellen. Einige davon waren mit einem Farbstoff so markiert, dass dessen Leuchtstärke die Aktivität dieser Nervenzelle wiedergab. Die Abbildung 2 zeigt eine von vielen Nervenzellen im Pilzkörper mit ihren Verzweigungen und die Aktivitätsmessungen (als Farben dargestellt), die wir von diesen Verzweigungen erhielten. Da nun tausende solcher Nervenzellen dicht gepackt im Eingangsbereich des Pilzkörpers liegen, ergibt sich das Bild der Veränderung, also des Gedächtnisses, wie es auf der rechten Seite der Abbildung 2 dargestellt ist.

Noch weiter ins Detail gegangen

Jede einzelne der tausenden Nervenzellen hat viele Verzweigungen. Es stellt sich die Frage, ob alle Verzweigungen einer bestimmten Nervenzelle eine gleichartige Änderung durch Lernen erfahren oder ob das Muster der Veränderung in den Verzweigungen einer Nervenzelle niedergelegt ist. Dazu haben wir uns die Kontaktstellen (Synapsen) zu den Nervenzellen angeschaut, die ihre Aktivität in die Verzweigungen der Nervenzellen des Pilzkörpers (in Abbildung 2 links dargestellt) einspeisen. Das war methodisch eine sehr anspruchsvolle Untersuchung, weil die Synapsen sehr klein sind und viele hunderttausende davon im Eingangsbereich des Pilzkörpers liegen. Nach der Anfärbung dieser Synapsen in einem kleinen Teil des Pilzkörpereingangs (Abbildung 3 A) und mit Hilfe einer starken Vergrößerung im Mikroskop gelang es uns, das Muster der Verän-

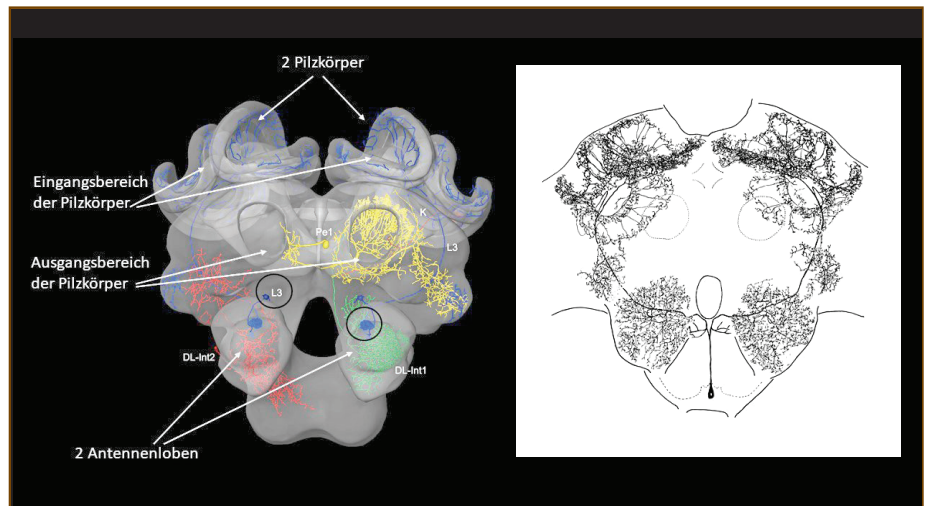


Abb. 1. Das Bienenhirn (A) und die Nervenzelle VUMmx1 für Belohnung (B) Dort, wo die Verzweigungen der Belohnungszellen (in Abbildung 1 B: VUMmx1) mit anderen Nervenzellen verknüpft sind, liegen die Schaltstellen (Synapsen), die das Duft-Gedächtnis bilden. Auf jeder Seite des Gehirns sind das drei Bereiche (Abbildung 1 A), (1) der Eingangsbereich der Duft-Bahn (die beiden Antennenloben), (2) der Eingangsbereich des zentralen Gehirns, der als Pilzkörper bezeichnet wird und wo sich alle Wahrnehmungsbahnen treffen, und (3) der Ausgangsbereich des Pilzkörpers, von wo alle Steuerkommandos ausgehen. Am Duftgedächtnis sind alle drei Bereiche beteiligt und wahrscheinlich auch andere, die wir noch nicht kennen.

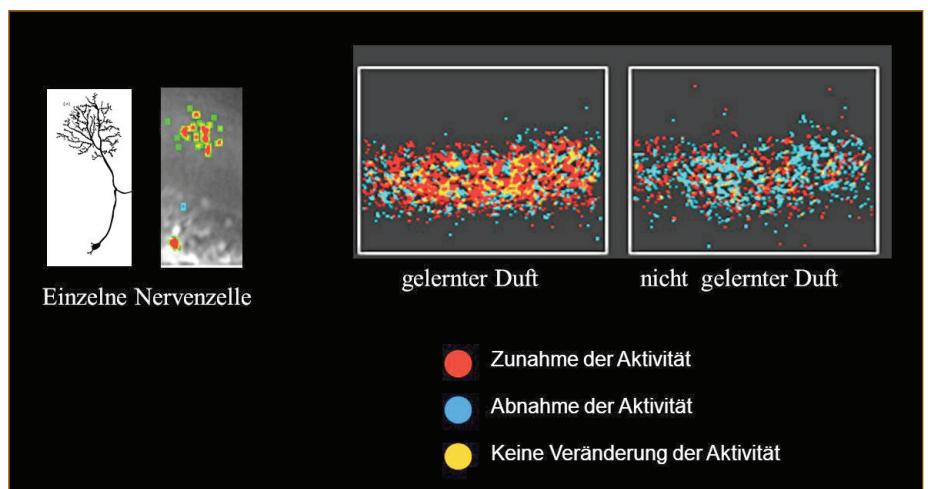


Abb. 2, linke Seite: Eine Nervenzelle des Pilzkörpers mit ihren Verzweigungen und deren Aktivitätsmessung sowie rechte Seite: Darstellung des Gedächtnisses durch Sichtbarmachung der Aktivität von Nervenzellen.

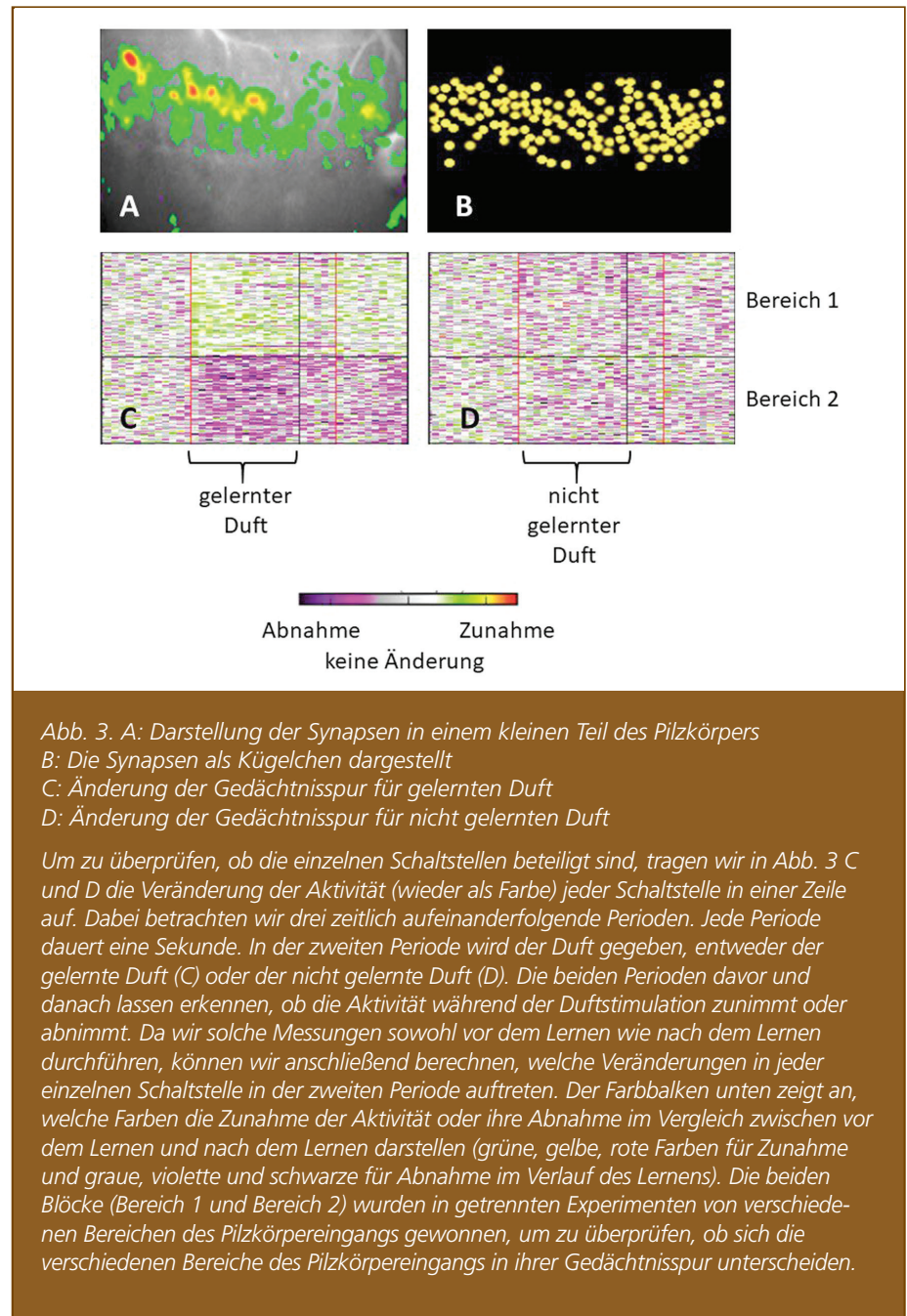
Das Duftgedächtnis für den gelernten Duft besteht also tatsächlich in einer größeren Zahl von aktivierten Nervenzellen, wenn das Gedächtnis aufgerufen wird (rot dargestellt). Der nicht gelernte Duft dagegen führt zu einer größeren Zahl weniger stark aktivierter Nervenzellen (blau dargestellt). Bemerkenswert sowohl für den gelernten wie für den nicht gelernten Duft ist aber, dass es auch Nervenzellen gibt, die eine andere Veränderung ihrer Aktivität aufweisen (Abnahme für den gelernten Duft und Zunahme bei dem nicht gelernten Duft). Darüber hinaus gibt es auch für beide Lerninhalte Nervenzellen, die ihre Aktivität nicht ändern (gelb dargestellt). Der Gedächtnisinhalt (hier der belohnte Duft bzw. der nicht belohnte Duft) wird also durch die vom Lernen erzeugte Aktivitätsänderung von Nervenzellen gespeichert, wobei der Gedächtnisinhalt auf dem Muster der Zunahmen, Abnahmen oder Nicht-Veränderungen ihrer Aktivität beruht.

derungen als Gedächtnisspur für gelernte Düfte auch für diese winzigen Schaltstellen sichtbar zu machen (Abbildung 3 C und D).

Es zeigte sich, dass jede Schaltstelle ein eigenständiger Bereich der Gedächtnisspur ist, also das Muster der Veränderung dieser Schaltstellen – nicht nur der getrennten Nervenzellen – den Inhalt der Gedächtnisspur speichert. Um dies zu erkennen, muss man sich mit den beiden Teilabbildungen C und D in Abbildung 3 ausführlich beschäftigen. Dabei muss man immer wieder auf den Farbbalken schauen, um die in einer Farbskala dargestellte Veränderung der Duftantwort zwischen vor dem Lernen und nach dem Lernen in jeder der vielen einzelnen Schaltstellen (übereinanderliegende Zeilen) zu erkennen. Zum Beispiel sieht man in C für den gelernten Duft, dass im Bereich 1 alle dicht beieinanderliegenden Schaltstellen ihre Aktivität verstärken, während im Bereich 2 die meisten Schaltstellen ihre Aktivität reduzieren. Schaut man sich die gleiche Periode für den nicht gelernten Duft an (D), dann sieht man, dass die Schaltstellen in beiden Bereichen keine Änderung aufweisen. Ein sehr genauer Vergleich ergibt darüber hinaus sehr viele Belege für die Eigenständigkeit der einzelnen Schaltstellen und darüber, wie das Muster dieser Änderungen den Gedächtnisinhalt speichert.

Was bringen diese Erkenntnisse?

Viele Ergebnisse der Gehirnforschung haben inzwischen nachgewiesen, dass Gedächtnisinhalte in den Gehirnen auch anderer Tiere und im menschlichen Gehirn in solchen Mustern der Veränderungen von Schaltstellen gespeichert sind. Bei der Fruchtfliege *Drosophila* konnte das mit gleich guter Auflösung gezeigt werden. Aber in großen Gehirnen war dies bisher so nicht möglich, weil die beteiligten Nervennetze nicht ohne Störung mit dem Mikroskop gemessen werden können. Aus den Befunden an Bienen gewinnt man eine Vorstellung, wie die riesige Zahl von Gedächtnisinhalten im Gehirn niedergelegt werden kann. Jede Nervenzelle verfügt über ca. 10.000 Schaltstellen (Synapsen) mit anderen Nervenzellen. Wenn ein Gehirn wie das der Biene über eine Million Nervenzellen verfügt und Gedächtnisinhalte im Muster der veränderten Schaltstellen gespeichert sind, dann können schier unbegrenzte Mengen solcher Muster gebildet werden. Ähnliche Gedächtnis-



inhalte haben ähnliche und überlappende Muster, unähnliche werden eher verschiedene Nervenzellen mit deren Schaltstellen betreffen. Wenn einige tausend Schaltstellen ein Muster ausmachen und nur einige wenige davon verschieden sein müssen, um ein neues Muster zu erzeugen, dann ergibt sich eine riesige Bibliothek von verschiedenen Mustern, die jeweils einem Gedächtnisinhalt entsprechen. Unser menschliches Gehirn mit seinen millionenfach mehr Nervenzellen als das der Biene kann daher eine unvorstellbar große Zahl von Gedächtnisinhalten speichern. Wie eingangs erwähnt, hat das Gedächtnis drei Zustände: Gedächtnis bilden, speichern und abrufen. Wir ha-

ben uns hier auf das Speichern konzentriert. Ob ein Gedächtnis durch Lernen gebildet wird und ob es dann auch wieder abgerufen werden kann, sind weitere Fragen, mit welchen sich die Gehirnforschung beschäftigt. Auch hier helfen die Befunde an Bienen, besser zu verstehen, was sich dabei im Netzwerk der Nervenzellen abspielt. So stören bestimmte Umweltgifte das Abrufen aus dem Gedächtnis bei Bienen. Ob dies in vergleichbarer Weise auch für den Menschen zutrifft, lässt sich nun gezielt untersuchen.

Prof. Dr. Randolph Menzel
 menzel@neurobiologie.fu-berlin.de