

# **Lern- und Gedächtnisprozesse im Gehirn: Die Biene als Modellorganismus**



**PD Dr. Ricarda Scheiner**  
**Technische Universität Berlin**  
**Institut für Ökologie**  
**Franklinstr. 28/29, FR 1-1**  
**10587 Berlin**  
**E-mail: Ricarda.Scheiner-Pietsch@TU-Berlin.de**

## Einleitung

Honigbienen faszinieren Forscher seit vielen Jahrzehnten wegen ihres guten Lernvermögens. Im Leben der Bienen spielt die Fähigkeit zu lernen und ein stabiles Gedächtnis zu entwickeln, eine essentielle Rolle, beispielsweise bei der Futtersuche. Bienen müssen sich die Routen zu Futterplätzen schnell und zuverlässig einprägen. Sie müssen aber auch lernen, wie sie auf der Blüte an Nektar und Pollen gelangen. Das Gedächtnis der Honigbienen ist gut angepasst an diese speziellen Lernaufgaben.

Um grundlegende Mechanismen von Lernen und Gedächtnis zu erforschen, lässt man die Bienen unter kontrollierten Laborbedingungen lernen. Das Trainieren bzw. Konditionieren von Bienen unter Laborbedingungen ist relativ einfach und daher auch gut für einen Schulversuch geeignet. Deshalb schließen sich dem fachlichen Teil einige Anregungen zur praktischen Durchführung von Konditionierungsexperimenten mit Bienen in der Schule an.

## Teil I: Lernen und Gedächtnis bei der Honigbiene

### *Die Rüsselreaktion*

Bei der Konditionierung von Honigbienen im Labor nutzt man die Rüsselreaktion (Abb. 1): werden die Antennen einer Biene mit einem Tropfen Zuckerwasser berührt, so streckt die Biene in Erwartung von Futter ihren Rüssel heraus. Dieses Verhalten kann auch beobachtet werden, wenn eine Nektarsammlerin eine Blüte besucht. Sobald sie mit den Antennen den Nektar entdeckt, streckt sie den Rüssel heraus und beginnt, den Nektar aufzusaugen.



Abbildung 1. Rüsselreaktion.

### *Konditionierung von Honigbienen*

Bienen können auf eine ganze Reihe von Reizen konditioniert werden. Am häufigsten trainiert man die Tiere auf Düfte. Diese lernen Bienen sehr schnell und können sie exakt von anderen Düften unterscheiden.

Bei der **klassischen Duftkonditionierung** lernt die Biene, einen Duft mit einer Zuckerwasserbelohnung zu verbinden. Der Duft wird für ca. 5 Sekunden auf die Antennen geblasen. Dabei wird die Antenne der Biene mit einem Tropfen Zuckerwasser berührt. Das

führt zur beschriebenen Rüsselreaktion. Anschließend darf die Biene einen kleinen Tropfen Zuckerwasser trinken. Nach einer einzigen solchen Duftkonditionierung hat ein großer Teil der Bienen bereits gelernt, auf den Duft mit der Rüsselreaktion zu reagieren. Mit diesen klassischen Verhaltensexperimenten untersucht man beispielsweise den Lernverlauf, das Gedächtnis oder die Fähigkeit der Bienen, verschiedene Düfte voneinander zu unterscheiden.

Neben dem Duftsinn haben die Bienen einen ausgeprägten Tastsinn, den sie beim Bau der hauchdünnen Waben benutzen. Mit Hilfe der Rüsselreaktion können Bienen darauf konditioniert werden, sehr feine Oberflächenstrukturen voneinander zu unterscheiden. Bei der sogenannten **taktilen Konditionierung**, die vor wenigen Jahren in unserem Labor entwickelt wurde, müssen die Bienen im Gegensatz zur Duftkonditionierung zusätzlich aktiv werden. Sie müssen mit ihren Antennen eine Oberfläche abtasten, um sich deren Eigenschaften einzuprägen. Dabei sind die Augen der Biene mit schwarzer Farbe übermalt, um das Abtasten zu intensivieren. Die Biene kann mit ihren Antennen zum Beispiel die Oberfläche eines kleinen Plättchens einige Sekunden lang abtasten. Noch während die Biene das Plättchen betastet, wird die Rüsselreaktion an den Antennen ausgelöst. Streckt die Biene daraufhin den Rüssel heraus, darf sie eine kleine Menge Zuckerwasser als Belohnung trinken (Abb. 2). Bereits nach wenigen Konditionierungen hat die Biene gelernt, auf das kleine Plättchen mit der Rüsselreaktion zu reagieren. Bienen lernen auf diese Weise, Plättchen mit verschiedenen Oberflächen, Formen und Größen voneinander zu unterscheiden.



**Abbildung 2. Taktiler Konditionierung einer Honigbiene unter Laborbedingungen. Links: Abtasten der Oberfläche. Mitte: Belohnung nach der Rüsselreaktion. Rechts: Konditionierte Reaktion.**

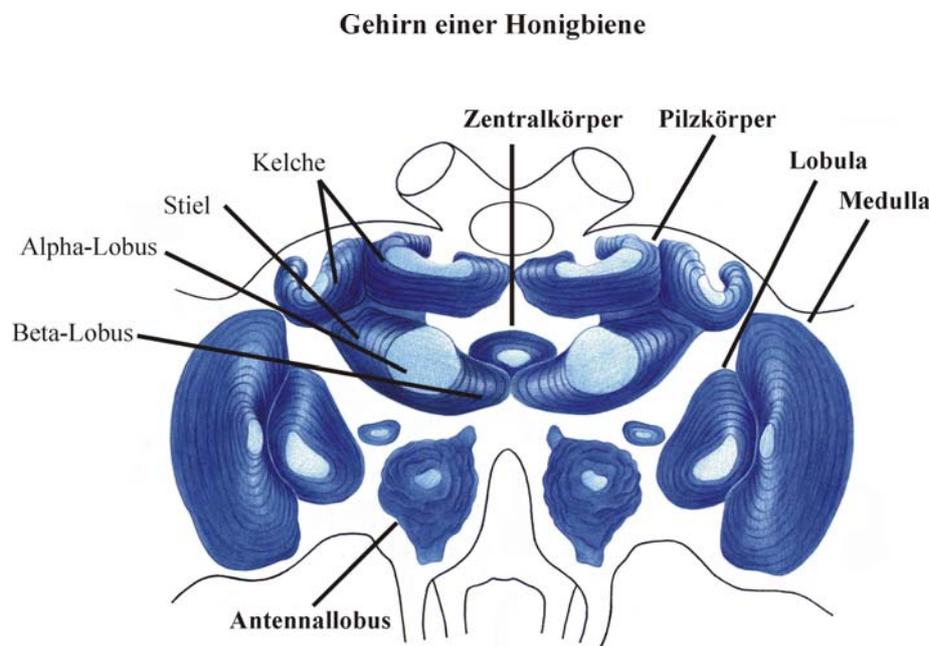
### ***Gedächtnisformen***

Bienen sind nicht nur in der Lage, Düfte, Farben, Formen und Oberflächenstrukturen leicht zu erlernen, sondern sie besitzen auch ein ausgesprochen gutes Gedächtnis dafür. Wird eine Biene beispielsweise nur ein einziges Mal für eine bestimmte Farbwahl belohnt, so merkt sie sich dies einen ganzen Tag. Nach nur drei Belohnungen speichert sie die konditionierte Farbe ihr Leben lang. Dabei laufen verschiedene Prozesse im Gehirn ab. Man unterscheidet deshalb verschiedene Gedächtnisformen. Das **Kurzzeitgedächtnis** wird in den ersten Sekunden und Minuten nach der Konditionierung gebildet und könnte beispielsweise dann aktiv werden, wenn eine Nektarsammlerin auf einem Feld gleichartiger Blüten (z. B. Raps) von einer Blüte zur nächsten fliegt. Das **mittelfristige Gedächtnis** wirkt im Bereich von Minuten bis Stunden und wird vermutlich benutzt, wenn eine Sammlerin nach erfolgter Rückkehr zum Stock erneut eine Futterstelle anfliegt. Das **Langzeitgedächtnis** schließlich hält die gelernte Information über viele Tage hin abrufbereit.

### *Neuronale Grundlagen des Lernens bei Bienen*

Bei der Duftkonditionierung muss das Gehirn der Biene mindestens zwei Reize (z. B. Duft und Zuckerwasser) miteinander verknüpfen. Dafür sind Nervenzellen mit bestimmten Eigenschaften erforderlich. Solche Nervenzellen, die gleichzeitig auf verschiedene Reize reagieren, hat man in den Lernzentren der Biene nachgewiesen. Während das Lernzentrum des Menschen im Bereich des Hippocampus liegt, wird diese Aufgabe bei der Biene von mehreren Gehirnstrukturen übernommen. Diese werden als **Antennalloben** und wegen ihrer Form als **Pilzkörper** bezeichnet (Abb. 3).

Die Antennalloben sind in beiden Gehirnhälften angelegte Strukturen, die mit den Antennen der Biene verbunden sind (Abb. 3). Jeder Antennallobus besteht (ähnlich einer Himbeere) aus ca. 160 Untereinheiten, den sogenannten Glomeruli. Ihre Informationen erhalten die Glomeruli von den Duft-Rezeptoren auf der Antenne. In jedem Antennallobus sind Tausende von Nervenzellen eng miteinander verknüpft. Außerdem sind die Antennalloben mit anderen Gehirnstrukturen, z. B. den Pilzkörpern, verbunden. Auch die Pilzkörper bestehen aus vielen tausend Nervenzellen. Antennalloben und Pilzkörper spielen eine entscheidende Rolle für die Bildung des Kurzzeitgedächtnisses. Werden sie kurz nach der Konditionierung ausgeschaltet, kann die Biene kein Gedächtnis bilden. Die Pilzkörper sind jedoch nur für die Bildung des Duftgedächtnisses von Bedeutung. Experimente haben gezeigt, dass sie für das taktile Lernen eine untergeordnete Rolle spielen. Selbst Bienen, bei denen große Teile der Pilzkörper fehlten, konnten gut taktil lernen.



**Abbildung 3. Schematische Zeichnung des Bienenhirns.**

## Teil II: Konditionierung von Honigbienen (Schulversuch)

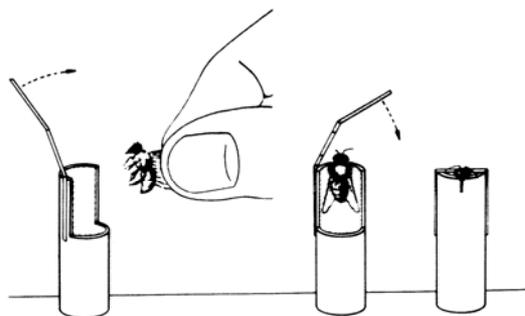
Die Konditionierung von Honigbienen im Labor kann auch im Schulversuch untersucht werden, da die Bienen gut unter diesen Bedingungen lernen, und viele verschiedene Parameter gemessen werden können, um die Lern- und Gedächtniseigenschaften der Bienen zu beschreiben. Die Schüler erhalten auf diese Weise Einblicke in die Funktionsweise natürlicher neuronaler Netze. Im Folgenden werden die Duftkonditionierung und die taktile Konditionierung erläutert. Möglich wäre in diesem Rahmen eine Zusammenarbeit mit dem Mathematiklehrer, um die gewonnenen Daten statistisch zu analysieren.

### Material

für beide Konditionierungen	für die taktile Konditionierung	für die Duftkonditionierung
Honigbienen (vom Imker) Röhrcchen (siehe Abb. 4, z. B. aus alten Filzstiftkappen) stabiles Klebeband Pinzette Kühlschrank zum Herunterkühlen der Bienen 2ml-Spritzen mit Kanülen Papiertaschentücher Waage Haushaltszucker Leitungswasser Stoppuhr	schwarze Acrylfarbe (zum Bemalen der Komplexaugen) taktile Plättchen mit verschiedenen Formen/Größen/Oberflächen Halterung für Plättchen	Duftstoffe (z. B. Nelkenöl aus der Apotheke) 10ml-Spritze Pipette 0-10 µl Abzug

### Methoden

Honigbienen werden einzeln am Stockeingang abgefangen (bzw. von einem Imker besorgt). In einem Kühlschrank werden sie heruntergekühlt, bis sie beinahe bewegungslos sind. In diesem Zustand kann man sie, ohne dass man gestochen wird, mittels einer Pinzette in einem Röhrcchen befestigen. Dabei wird jede Biene so eingesetzt, dass sie die Antennen und den Rüssel frei bewegen kann (Abb. 4). Ein Streifen Klebeband zwischen Kopf und Thorax und ein weiteres über dem Abdomen fixieren die Biene und schützen den Experimentator vor den Stichen. Für die taktile Konditionierung werden die Komplexaugen mit schwarzer Farbe übermalt. Die Verhaltensversuche sollten frühestens eine halbe Stunde nach Befestigung der Bienen begonnen werden. Diese Vorbereitungen sollten vielleicht vom Lehrer noch vor der Unterrichtsstunde durchgeführt werden.



**Abbildung 4. Befestigen der Biene im Röhrchen.**

Als Belohnung für die Lernversuche dient eine Zuckerlösung, die aus Leitungswasser und Haushaltszucker hergestellt werden kann. Eine 30%ige Zuckerlösung hat sich gut bewährt als Belohnung, da sie für die Bienen sehr attraktiv ist und die Tiere gleichzeitig nicht zu sehr sättigt. Diese Zuckerlösung wird in die 2ml-Spritze gefüllt. Eine davor gesetzte Kanüle sorgt für die Bildung eines kleinen Tropfens.

Während der **Duftkonditionierung** sitzt die Biene vor dem Abzug. Die 10ml-Spritze wird mit einem Stück Papiertaschentuch, das mit einer definierten Menge Duft (z. B. Nelkenöl) getränkt ist, gefüllt. Die Biene wird nun mit Hilfe der Spritze für ca. 3 Sekunden mit Duft beblasen. Noch während die Biene den Duft riechen kann, werden ihre Antennen mit einem Tropfen des Zuckerwassers berührt. Sobald die Biene den Rüssel herausstreckt, wird sie mit einem Tropfen Zuckerlösung belohnt. Erst beim Trinken der Zuckerlösung sollte die Duftreizung beendet werden, weil eine zeitliche Überlappung von Duft und Zuckerwasser Voraussetzung für eine erfolgreiche Konditionierung ist. Bereits nach wenigen Paarungen von Zuckerwasser und Duft, die in einem zeitlichen Abstand von 5 Minuten erfolgen sollten, zeigt die Biene die konditionierte Rüsselreaktion auf eine Duftreizung. Vor der Konditionierung sollte die Spontanreaktion auf den Duft allein getestet werden. Weiterhin sollte überprüft werden, ob die Biene tatsächlich den Duft oder aber nur den Luftzug gelernt hat, indem die Biene zur Kontrolle nur mit Luft beblasen wird. Nach der Konditionierung kann das Abklingen der konditionierten Reaktion, die sogenannte Extinktion, gemessen werden. Hierbei wird wiederholt der Duft geboten, die Biene bekommt aber keine Zuckerwasserbelohnung zwischendurch. Man kann auch untersuchen, bei welchen zeitlichen Abständen zwischen den einzelnen Duftreizungen die Bienen am besten lernen oder wie sich unterschiedliche Zuckerkonzentrationen auf den Lernerfolg auswirken.

Bei der **taktilen Konditionierung** wird das Plättchen wie in Abb. 2 vor der Biene angebracht. Während der Konditionierungen wird das Plättchen in die Reichweite der Antennen gebracht, zwischen den Konditionierungen muss es aber aus deren Abtastbereich entfernt werden. Während einer Konditionierungsphase kann die Biene das Plättchen mit ihren Antennen für ca. 3 Sekunden abtasten. Dann wird die Rüsselreaktion ausgelöst durch einen Tropfen Zuckerwasser, der an die Antennen gehalten wird. Die Biene kann eine kleine Menge Zuckerwasser zur Belohnung trinken. Auch hierbei gilt: die Darbietung des konditionierten Plättchens muss zeitlich überlappen mit der Belohnung. Wie beim Duftlernen genügen in der Regel wenige Trainingsdurchgänge, um die konditionierte Rüsselreaktion zu beobachten. Es hat sich auch hier ein Abstand der einzelnen Konditionierungen von 5 Minuten bewährt. Auch vor diesem Experiment sollte die Spontanreaktion auf das Plättchen getestet werden. Gelangt ein Tropfen Zuckerwasser aus Versehen an das Plättchen, so muss dieses mit Wasser gereinigt und anschließend getrocknet werden. Lernverlauf, Extinktion der konditionierten Reaktionen und die Fähigkeit der Bienen, zwischen verschiedenen Größen oder Oberflächenstrukturen zu unterscheiden, können untersucht werden.

## Weiterführende Literatur

### *Duflernen*

**Bitterman ME, Menzel R, Fietz A, Schäfer S. 1983.** Classical conditioning of proboscis extension in honeybees (*Apis mellifera*). J Comp Physiol 97(2):107-119.

### *Taktiler Lernen*

**Erber J, Kierzek S, Sander E, Grandy K. 1998.** Tactile learning in the honeybee. J Comp Physiol A 183(6):737-744.

### *Lernen bei unterschiedlicher Belohnung*

**Scheiner R, Erber J, Page RE. 1999.** Tactile learning and the individual evaluation of the reward in honey bees (*Apis mellifera* L.). J Comp Physiol A 185 (1): 1-10.

**Scheiner R, Kuritz-Kaiser A, Menzel R, Erber J. 2005.** Sensory responsiveness and the effects of equal subjective rewards on tactile learning and memory of honeybees. Learn & Mem 12: 626-635.

### *Neuronale Grundlagen des Lernens bei Bienen*

**Hammer M. 1993.** An identified neuron mediates the unconditioned stimulus in associative olfactory learning in honeybees. Nature 366: 59-63.

**Hammer M. 1997.** The neural basis of associative reward learning in honeybees. Trends Neurosci 20: 245-252.

**Scheiner R, Weiß A, Malun D, Erber J. 2001.** Learning in honey bees with brain lesions: how partial mushroom-body ablations affect sucrose responsiveness and tactile antennal learning. Animal Cognition 3: 227-235.

### *Gedächtnis bei Bienen*

**Menzel R 1968.** Das Gedächtnis der Honigbiene für Spektralfarben. Z vgl Physiol (60): 82-102.

**Menzel R. 1999.** Memory dynamics in the honeybee. J Comp Physiol A 185(4): 323-340.

**Menzel R, Müller U. 1996.** Learning and memory in honeybees: From behavior to neural substrates. Rev Neurosci (19): 379-404.