

■■■■ THEMA / MIKROVERHALTENSBIOLOGIE

DER TRICK MIT DEM CHIP

MIKROVERHALTENSFORSCHUNG AN BIENEN

VON SEBASTIAN STREIT, FIOLA BOCK UND JÜRGEN TAUTZ

■■■■ Karl von Frisch und Martin Lindauer haben es an den Honigbienen vorgemacht: hervorragende Beobachtungsgabe, Einfühlungsvermögen in das Objekt ihrer Studien, Papier und Bleistift, Farbe und feinste Malerpinsel, Stoppuhr und Winkelmesser. Mit dieser Ausstattung haben sie eine Wunderbüchse geöffnet, die nichts an ihrer Faszination verloren hat und von der noch Generationen von Forschern profitieren werden.

Aber es sind nicht immer nur neue Ideen, die tiefe Einblicke ermöglichen, sondern oft auch technologische Neuentwicklungen in ganz anderen Bereichen, die es erlauben, alte Fragen neu zu stellen, alte Antworten, wie immer in den Naturwissenschaften nur vorläufig, nochmals aufzugreifen und frische Konzepte zu verfolgen.

So stehen der Verhaltensforschung heute Möglichkeiten offen, von denen man bis vor nicht allzu langer Zeit nur träumen konnte.

Heute lassen sich relevante physikalische und chemische Parameter in einer unglaublichen Präzision messen, individuelle Bienen ein Leben lang automatisch beobachten und feinste Details an Verhaltensaktionen festhalten. Diese neuen Methoden in der Verhaltensforschung haben eine Reihe überraschender Einsichten über die Honigbienen gebracht. Einige hier vorgestellte Beispiele sollen die Verzahnung von Technologien und Erkenntnismöglichkeiten auch in der Verhaltensbiologie verdeutlichen und zugleich unterstreichen, dass der Boden der Wunderbüchse noch lange nicht erreicht ist.

■■■■ DER SCHWÄNZELTANZ, EIN SCHWÄNZELSTAND

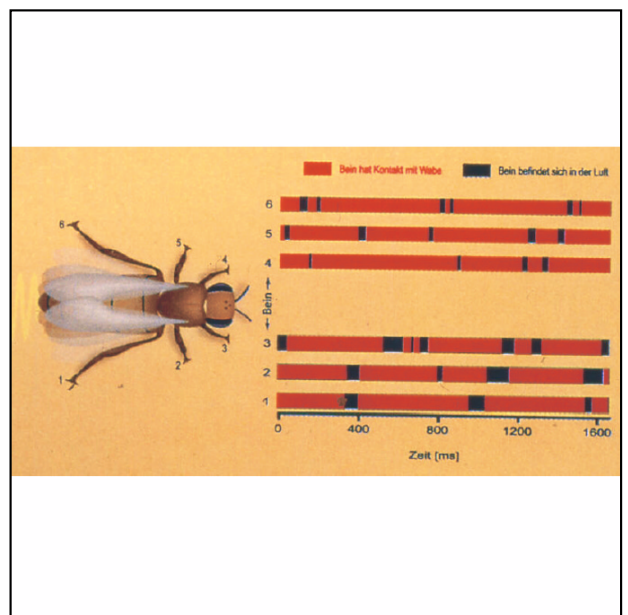
Videoaufzeichnungen haben eine Revolution in der Verhaltensbiologie ermöglicht. Verhalten kann eingefroren und so beliebig oft betrachtet werden, der Zeitverlauf kann umgekehrt werden und es ist möglich, Abläufe, die für das menschliche Auge zu rasch ablaufen, extrem zeitgedehnt zu studieren.

Richtet man dieses Werkzeug auf eine der bekanntesten Bewegungen der Verhaltensbiologie, den Schwänzeltanz der Honigbiene, wird „Mikroverhaltensforschung“ am Bewegungsablauf der Tänzerin möglich. Und man erlebt eine Überraschung: Die Biene zeigt eher einen Schwänzelstand und keinen Schwänzellauf.

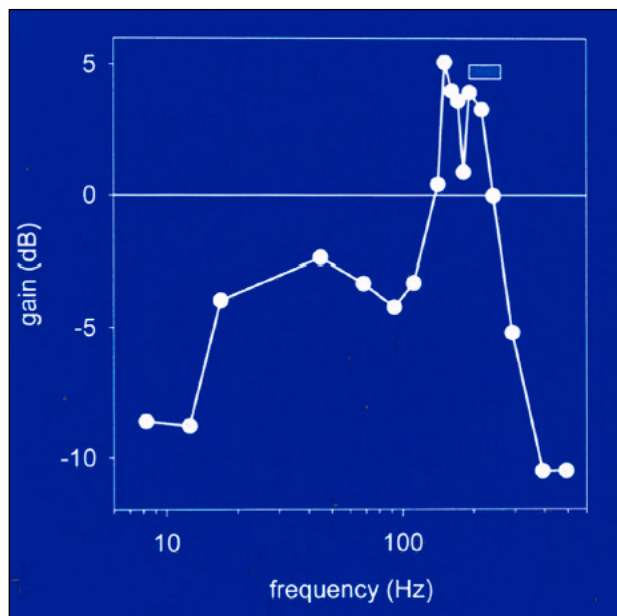
Der Stand ist perfekt in Tänzen, deren Schwänzelphase bis zu einer Sekunde andauert (wodurch Flugstrecken von etwa 100 Metern kodiert sind). Eine mit etwa 1,5 Sekunden schon sehr lange Schwänzelstrecke (entspricht einem Sammelflug von etwa einem Kilometer Entfernung), aufgenommen per Zeitlupe, lässt erkennen, dass sich die Tänzerin während der Schwänzelstrecke des Schwänzeltanzes so fest und so lange es ihr möglich ist, mit allen 6 Beinen auf dem Tanzboden festhält. Dabei bewegt sie den Körper etwas 15-mal pro Sekunde von Seite zu Seite (schwänzeln) und schiebt sich über den ruhenden Füßen vorwärts. Wenn einzelne Beine dabei zu weit gestreckt werden oder ihren festen Halt verlieren, werden sie kurzzeitig hochgehoben, nach vorne bewegt und erneut verankert.



□ □
ABB. 1: SCHWÄNZELTANZ A LA LEHRBUCH



□ □
 Abbildung 2: Die Schwänzelstrecke eines „Tanzes“, der die Flugstrecke zu einer Futterstelle kodiert (hier etwa 1,5 Kilometer), besteht eher in einem „Schwänzelstand“ als einem „Schwänzellauf“. Bild: B. Bujok, beegroup Würzburg.



Ist man einmal auf diese Art der Vorwärtsbewegung in der Schwänzelsstrecke aufmerksam gemacht, lässt sie sich auch mit bloßem Auge ohne technische Hilfsmittel sehen. Man muss nur darauf achten, dass man freien Blick auf die Füße der Tänzerin hat. Die Konsequenz dieser Verhaltensweise ist eine maximale Übertragung der Schwingungsenergie der Biene auf die darunter liegende Wabe. Eine maximale me-

□ □

Abbildung 3: Abstimmung zwischen den Schwingungs-Übertragungseigenschaften einer Bienenwabe und der Grundfrequenz im Schwänzeltanz (diese ist mit einem kleinen grauen Balken über der Frequenzkurve eingezeichnet).

chanische Kopplung zwischen Tänzerin und Wabe ist wichtig, da die Kommunikation in absoluter Dunkelheit des Bienenstockes abläuft, die ja eine visuelle Beobachtung des Schwänzels unmöglich macht, sondern die Bienen vor allem mechanische Signale einsetzen lässt.

■■■■ DAS „COMB-WIDE-WEB“ DER BIENENWABE

Die Entdeckung von Kommunikationssignalen und deren Weiterleitung hängt mehr als jeder andere Aspekt der Verhaltensforschung von den zur Verfügung stehenden Detektionsmethoden ab. Ein Instrument, das die vibratorisch-akustische Welt besonders bei kleinen Tieren rasant erschlossen hat, ist das Laser-Doppler-Vibrometer (LDV), das von dem dänischen Biologen Axel Michelsen als Pionier zum ersten Mal für das Studium von Trommelfellbewegungen bei Insekten eingesetzt worden ist. Das Prinzip dieser Messtechnik besteht darin, dass ein Laserstrahl, der von einer schwingenden Oberfläche reflektiert wird, durch die Bewegung der Oberfläche eine Verschiebung der Wellenlänge erfährt (Doppler-Verschiebung), die noch Schwingungen erfasst, die in der Größe des Durchmessers eines Wasserstoffatoms liegen.

Richtet man den Strahl eines LDV-Systems auf die verdickten Ränder leerer Zellen einer Wachswabe, erkennt man, dass die Waben die

Schwingungen als horizontale Verschiebungen des Netzes, gebildet aus diesen Zellrändern, weiterleiten. Bestimmt man die Abhängigkeit der Güte der Schwingungsweiterleitung von der Schwingungsfrequenz, zeigt sich, dass es genau die Frequenz ist, die eine Tänzerin während der Schwänzelsphase erzeugt, die am besten weitergeleitet wird.

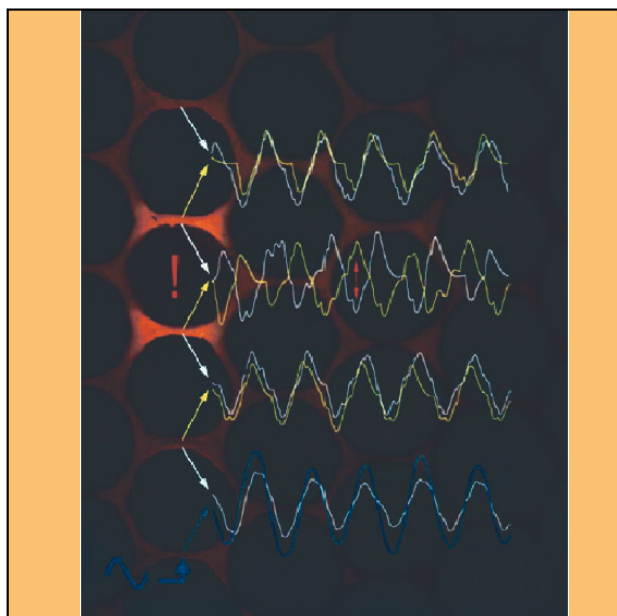
Werden mehrere LDS - Systeme gleichzeitig eingesetzt, kommt ein unerwartetes räumliches Schwingungsmuster ans Licht: bei der bestübertragenen Frequenz in einer gesamten Reihe von Zellen quer über die ganze Wabe hinweg schwingen alle gegenüberliegenden Wände jeder einzelnen Zelle in die gleiche Richtung. Man findet jedoch in jeder Zellreihe eine einzige Zelle, deren Wände in exakter Gegenphase schwingen (Schwingungsknoten).

Diese Zelle ist je nach Lage des Anregungspunktes zwischen einer und sieben Zellen vom Anregungsort entfernt. Es ist denkbar, dass die auf den Zellrändern stehenden oder gehenden Bienen diese besondere Zelle erkennen und als Nähe zu einer Tänzerin deuten.

Die von den Bienen selbst erzeugte Wabenstruktur ist damit unter anderem ein wichtiger Teil des Kommunikationssystems, aber hat als Kinderstube eine wichtige Funktion, da die besondere Konstruktion der Waben die Bedürfnisse der Larven und Puppen optimal unterstützt.

□ □

ABB. 4: Die Schwingungen die von einer Tänzerin erzeugt werden, breiten sich als horizontale Verschiebungen des Netzes, gebildet von den oberen Zellrändern, über die Wabe aus. Dabei entsteht ein räumliches Muster, in dem sich eine einzige Zelle nahe der Vibrationsquelle durch ihre „pulsierenden“ Bewegungen hervorhebt.



□ □

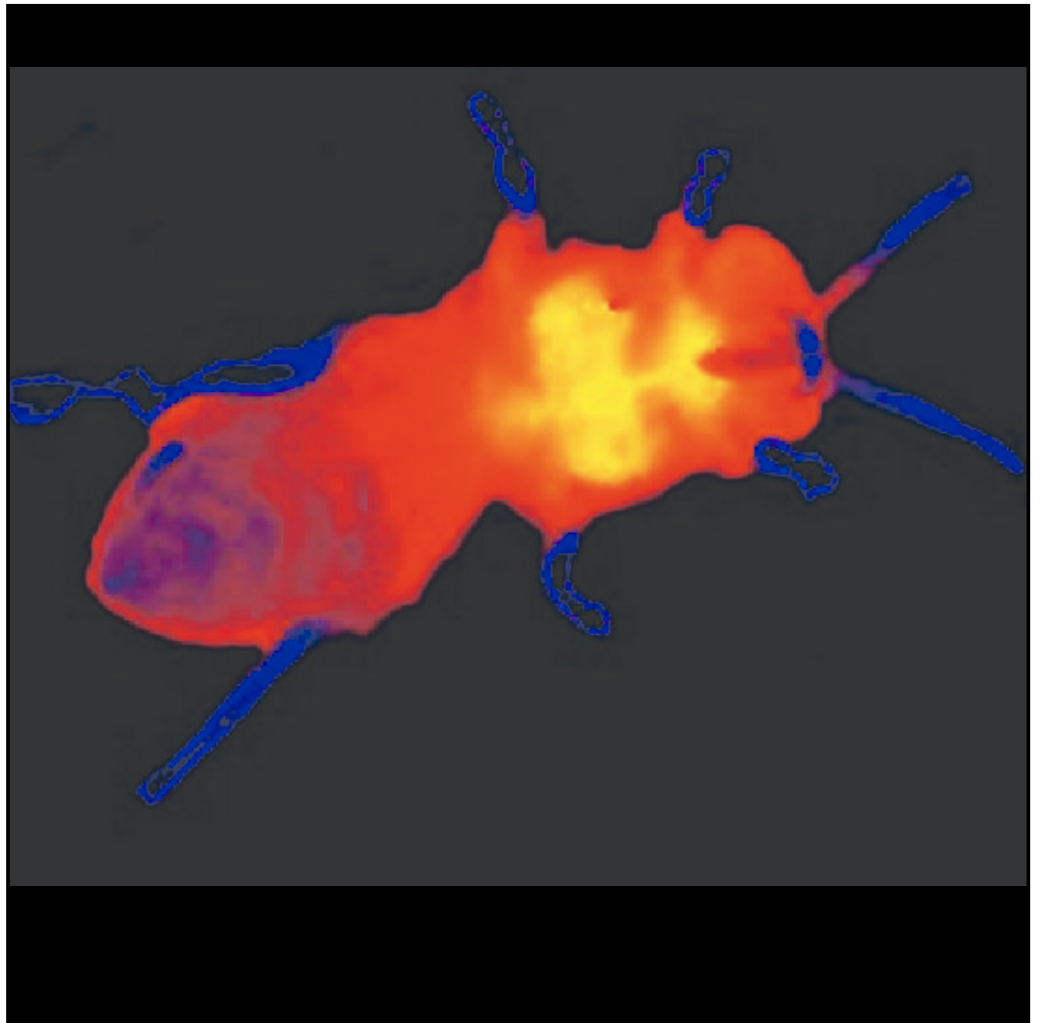
ABB. 5: Thermographische Aufnahme einer „Heizerbiene“. Darstellung in Falschfarben. Foto: beegroup Würzburg und Thermosensorik Erlangen.

⋮ ⋮ ⋮ DIE HEIZER IM BIENENVOLK

Systeme, die für das menschliche Auge unsichtbare elektromagnetische Wellen sichtbar machen, haben es ermöglicht, die Oberflächentemperatur von Objekten direkt zu sehen. Hochempfindliche Thermovisionsgeräte erlauben Temperaturunterschiede von wenigen hundertstel Grad Celsius zu entdecken; das Ganze bei einer optischen Auflösung, die nicht mehr weit von lichtoptischen Geräten entfernt liegt. Die Tatsache, dass Honigbienen das Brutnest wärmen, ist lange bekannt. Bereits 1793 verwendete Francois Huber ein Quecksilberthermometer zur Bestimmung der Brutnesttemperatur.

Um jedoch das Verhalten einzelner Bienen bei der Temperaturregulierung zu untersuchen und damit tiefer in Details dieses faszinierenden Phänomens eindringen zu können, fehlten bis vor kurzem geeignete Untersuchungsmöglichkeiten. Erst einige technologische Neuerungen der letzten Zeit, wie Miniatur-Wärmesonden und Video-Thermographie, eröffneten neue Möglichkeiten. So kamen erste Grundstrukturen eines der faszinierendsten Bereiche der Sozio-Physiologie eines Bienenvolkes ans Licht.

Man unterscheidet so schnell zwischen den sichtbaren „kalten“ Bienen, deren Körpertemperatur auf Umgebungstemperatur ist, und den „heißen“ Bienen mit einer Temperatur bis zu 44 Grad Celsius. Die Wärmerzeugung ist auf den Brust-

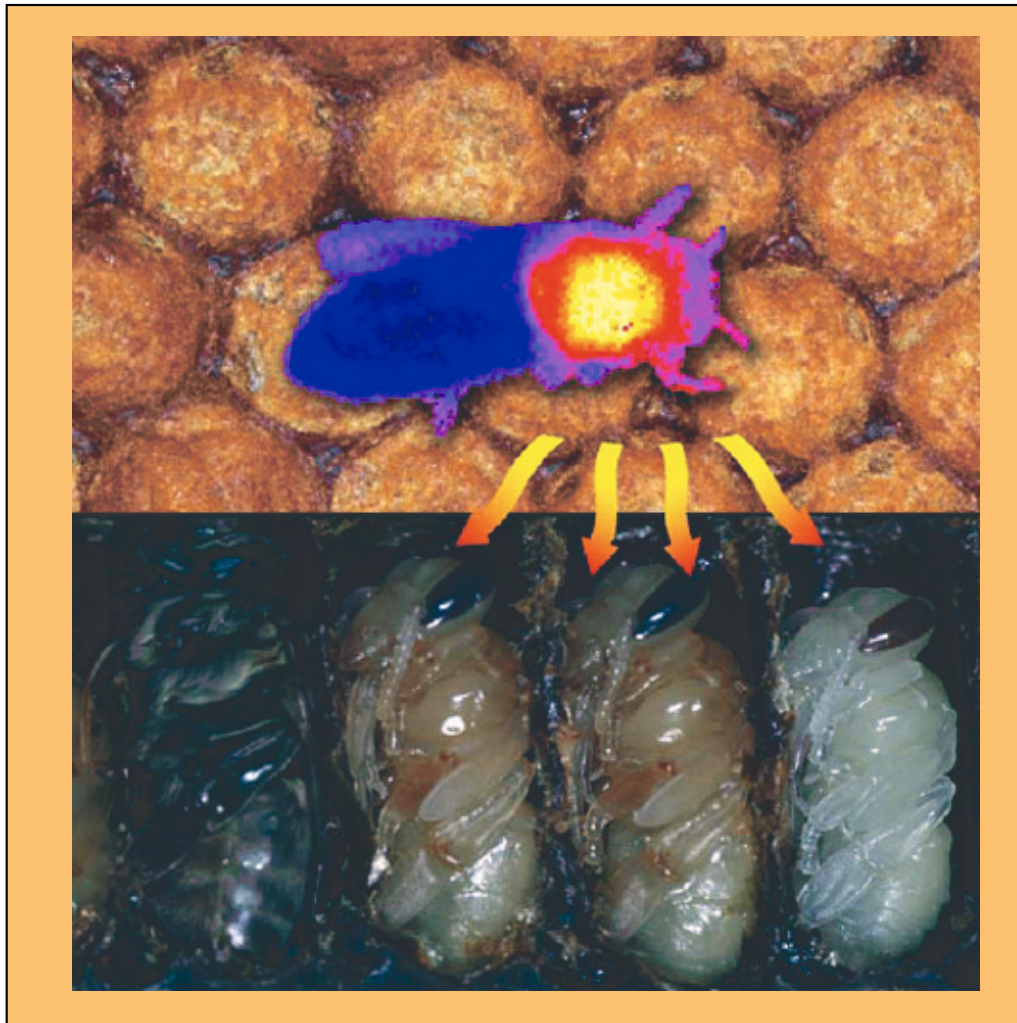


abschnitt beschränkt, die Ausbreitung der Wärme in den Hinterleib wird durch ein raffiniertes Gegenstromprinzip des Kreislaufsystems der Biene verhindert.

Weiter fällt auf, dass sich „heiße“ Bienen in erster Linie im Bereich gedeckelter Brut aufhalten, in denen die finale Metamorphose zur erwachsenen Biene stattfindet. Diese Bienen nehmen dabei zwei sehr unterschiedliche Positionen ein: Entweder sitzen sie minutenlang vollkommen still auf dem Deckel einer Brutzelle oder sie stecken im Innern einer leeren Zelle im gedeckelten Brutbereich, so dass man von ihnen nur noch die Hinterleibsspitze sieht. Damit sind auch

schon die beiden unterschiedlichen Heizstrategien genannt: „Kontaktheizer“ auf Zelldeckeln und „Rundumheizer“ in den leeren Zellen.

Kontaktheizer ziehen ihren Körper dicht an die Wabenoberfläche heran und drücken auf diese Weise ihren Brustabschnitt auf einen Zelldeckel. Durch das Anpressen des warmen Körpers auf die Wabenoberfläche wird eine bessere Wärmeübertragung auf die unter dem Deckel ruhende Puppe erreicht - ein Effekt, den man durch das Beiseiteschieben einer sich andrückenden Heizbiene am hinterlassenen Wärmeabdruck auf dem Zelldeckel mit Thermographie sichtbar machen kann.



□ □

ABB. 6: Heizbienen übertragen im Brutbereich, in dem die Zellen verdeckelt sind, Wärme auf die Puppen. Das Ausmaß der „Wärmebehandlung“ bestimmt in erheblichem Umfang die Eigenschaften der sich entwickelnden Biene. Bild: M.Kleinhenz, beegroup Würzburg.

späteren Verlauf ihr Leben und ihre Möglichkeiten mitbestimmen werden. Dieses Leben insgesamt zu beobachten und zu protokollieren, erlaubt der Einsatz neuer Techniken der Computer-Industrie.

⋮⋮⋮ BIG BROTHER IM BIENENSTOCK

Die Vision eines immer beobachtenden Orwell'schen großen Bruders ist zurzeit auch gesellschaftlich in intensiver Diskussion, die oft von den für uns Verhaltensbiologen positiven Aspekten der neuen Technologien ablenkt. Gerade bei hochkomplexen Systemen wie einem Volk von Honigbiene, ist die gleichzeitige Aufzeichnung der Bewegungen vieler Individuen ohne den Einsatz solcher Techniken nur sehr schwer und aufwändig zu realisieren. Die Leistungen eines Gesamtvolkes sind aber nur durch die Beobachtung sehr vieler – im Idealfall aller – Individuen zu erfassen, zu analysieren und zu verstehen.

Die fortschreitende Miniaturisierung hat vor kurzem den Einsatz solcher Systeme auch für soziale Insekten möglich gemacht. RFID (Radio Frequency Identification) ist dabei der Oberbegriff einer Reihe von Technologien, die über verschiedene Frequenzen (in diesem Bereich wird oft 13,56 MHz genutzt) Informationen austauschen. Die Besonderheit sind hier so genannte passive RFID-

Schwieriger ist es, die Bienen zu beobachten, die unbeweglich über längere Zeit im Innern leerer Zellen stecken. Wir konnten zwar feststellen, dass sich die Bienen vor dem Einschlüpfen in leere Zellen aufheizen, waren sie aber einmal in den Zellen verschwunden, konnte auch die Thermokamera nichts mehr ausrichten. Erst ein speziell konstruierter Beobachtungsstock erlaubte es uns, solchen Bienen zuzusehen und ihre Körpertemperatur zu messen. Dabei zeigte sich, dass in der Regel die Bienen, die in der Brutregion in leeren Zellen stecken, eine Körpertemperatur bis nahe 42 Grad Celsius besitzen. Die Heizbienen stecken bis zu 30 Minuten mit einer

derart hohen Körpertemperatur in den Zellen und verlassen sie offenbar erst dann, wenn ihre Energiereserven erschöpft sind. Im Unterschied zu den Heizbienen, die sich auf einen Zelldeckel andrücken, ist das Heizen in leeren Zellen ungleich effektiver: Ist eine leere Zelle von gedeckelten Brutzellen umgeben, erreicht eine einzige Heizbiene sechs Puppen, wogegen über den Deckel nur eine einzige Puppe direkt erreicht werden kann (Abbildung oben).

Diese aufwendige Kontrolle der Bruttemperatur scheint ein erster der vielen Einflüsse auf das frühe Leben einer Biene zu sein, die im



□ □

ABB. 7: Klassisch: Farbmarkierung der Bienen macht kontinuierliche Direktbeobachtung notwendig und ist auf relativ wenige Tiere begrenzt. Foto: Fiola Bock, beegroup Würzburg

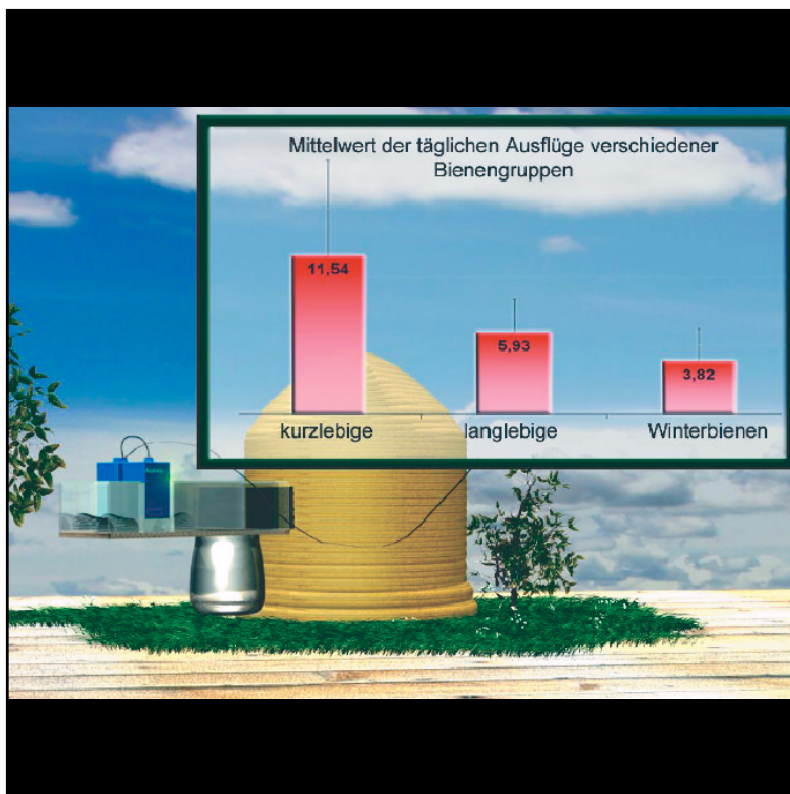
Tags, bei denen eine eigene Stromversorgung nicht notwendig ist, was erst die extreme Miniaturisierung bis unter einen Kubikmillimeter möglich machte.

Ein solches System wird in der beegroup Würzburg genutzt, um die Lebenswege von tausenden Honigbienen über einen unbegrenzten Zeitraum zu verfolgen. An wichtigen Punkten, seien es Stockeingang oder Futterquellen, können Scanner die Identifikationsnummer der auf den Bienen aufgeklebten Chips erfassen und zentral speichern. Die entstehenden Datenbanken lassen die Bewegungen eines Bienenlebens per Mausklick sichtbar werden und bieten beinahe unbegrenzte Möglichkeiten der Auswertungen, wenn diese Daten mit anderen parallel erfassten Daten (z.B. Wetterdaten) korreliert werden. Bei nur 2.4 mg Gewicht und Seitenabmessungen von etwa einem Millimeter kann ungestörtes natürliches Verhalten der Bienen kombiniert werden mit neuen Möglichkeiten zur Aufzeichnung der Bewegungen, aber auch zur Konstruktion



□ □

ABB. 8: Modern: RFID-Chips können auf beliebig viele Bienen aufgeklebt werden und erlauben eine automatische Erfassung individueller Verhaltensweisen. Foto: Fiola Bock, beegroup Würzburg.



□ □
 ABB. 9: Ein Lesegerät, angebracht vor einem Bienenstock, registriert für alle Bienen ein Leben lang Abflugs- und Ankunftszeiten, aus denen sich dann Daten ableiten lassen, wie Ausflughäufigkeit und Lebensspanne der Bienen.
 Graphik: Fiola Bock, beegroup Würzburg.

sich selbst modifizierender Experimente, da die Erkennung in Echtzeit ausgeführt wird und entsprechend darauf reagiert werden kann.

Die Automatisierung von Fütter- oder Fangvorgängen ermöglicht gezielte automatische Reaktion des Experimentes auf das Individuum und eröffnet eine Vielzahl bislang nur mit extremem Arbeitsaufwand realisierbarer Experimente.

⋮ ⋮ VIEL ZU ENTDECKEN

Ein Ende der Faszination, die von Honigbienen ausgeht und ein abschließendes Bild, das wir uns von diesem hochinteressanten und nützlichen Tier machen, ist nicht in Sicht. Mit jeder neuen Methode, die die Sinne des Verhaltensbiologen erweitert, werden auch die Honigbienen immer wieder neue Überraschungen parat haben. ⋮ ⋮

□ □
 Das Autorenteam:



Fiola Bock, Jahrgang .1974
 Diplombiologin seit 2001 mit dem Thema "Sammelstrategien bei Hummeln", Promotion seit Januar 2002 in der Universität Würzburg bei Prof. Dr. Tautz

Veröffentlichungen u.a.:
 * Chittka L., Dyer A.G., Bock F., Dornhaus A. (2003) Bees trade off foraging speed for accuracy, Nature 424, 388-388
 * Zhang S.W., Bock F., Si A., Tautz J., Srinivasan M.V. (2005) Visual working memory in decision making by honey bees, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 102, 5250-5255

Sebastian Streit, Jahrgang 1969
 1993-2001 Studium Biologie, Abschluss Diplom an der Universität Würzburg.
 2001-2004 Promotion in Biologie bei Prof. Tautz: "Automatische Identifizierung bei sozialen Insekten: Design und Praxistest".

Veröffentlichung u.a.:
 *Streit S., Bock F., Pirk C.W.W., Tautz J. (2003) Automatic life-long monitoring of individual insect behaviour now possible, Zoology - analysis of complex systems 106, 169-171

Jürgen Tautz, Jahrgang 1949
 Studium der Biologie, Geographie und Physik an der Technischen Universität Darmstadt. 1973 Staatsexamen. 1977 Promotion an der Universität Konstanz, 1986 Habilitation an der Universität Konstanz. Postdocs 1979 in Canberra und 1981/82 in Stanford. 1990 Ruf an das Biozentrum der Universität Würzburg. Dort Leiter der beegroup des Biozentrums und Gründer von Bienenforschung Würzburg e.V.

Literatur u.a.:
 Tautz,J., Rohrseitz,K. & D.C.Sandeman: One-strided waggle dance in bees. Nature 382, 32, 1996
 Tautz,J.: Das Festnetz der Bienen. Spektrum der Wissenschaft August 2002, 60-66, 2002
 Kleinhenz M, Bujok B, Fuchs S, Tautz,J.: Hot bees in empty cells - broodnest heating from within. Journal of Experimental Biology 206: 4217-4231, 2003

Kontaktadresse: Prof. Dr. Jürgen Tautz / Beegroup, Biozentrum, Universität Würzburg / Am Hubland, 97074 Würzburg
<http://zoo2.biozentrum.uni-wuerzburg.de>

Die Würzburger Bienenforscher sind schwer aktiv auf der Münchner Bundesgartenschau, integraler Bestandteil der Münchner Wissenschaftstage und sie richten im Frühsommer 2006 ein Forum des bayerischen Landesverbandes in Würzburg aus.