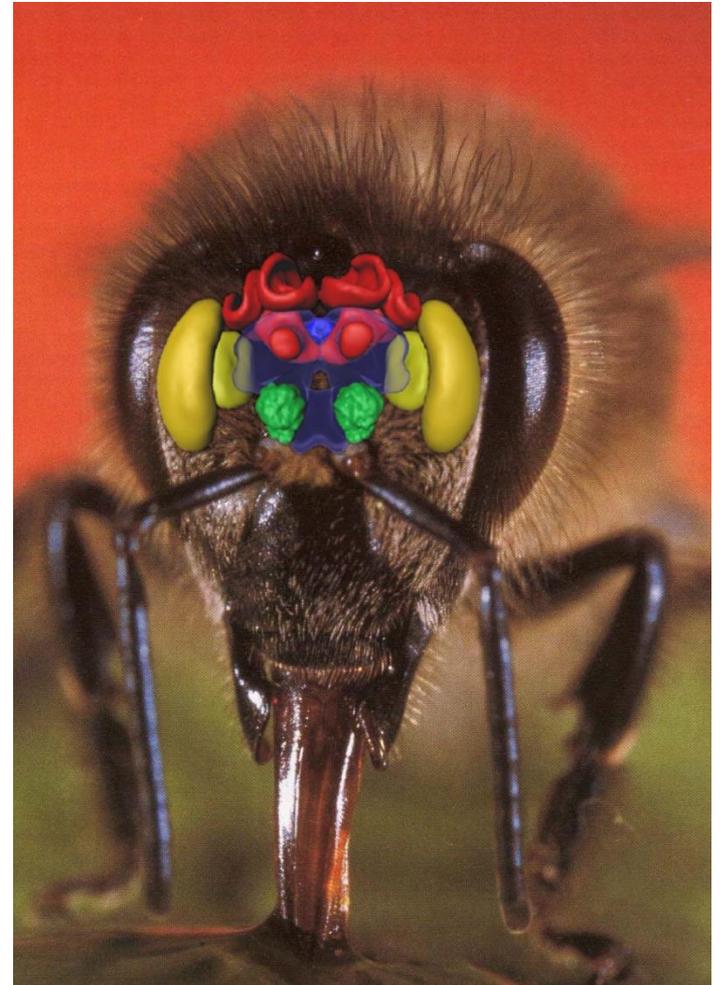


# Die Intelligenz der Bienen

Randolf Menzel,  
Freie Universität Berlin

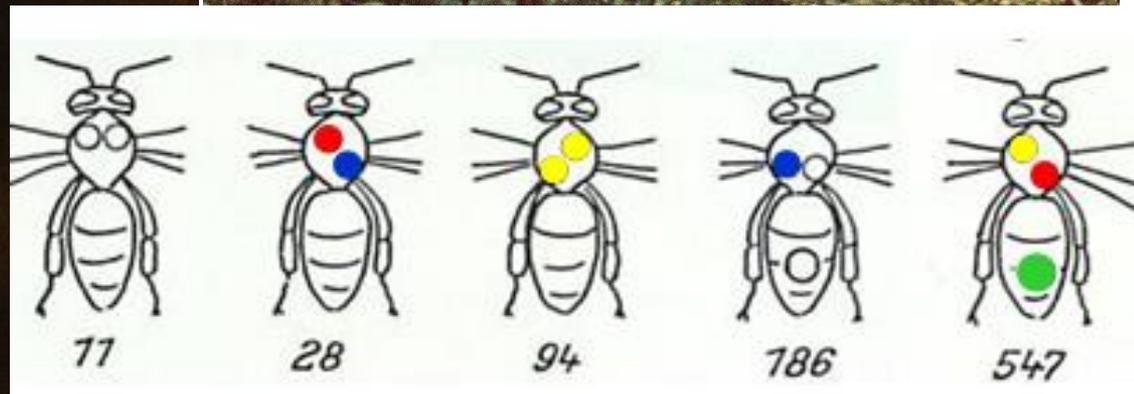
[www.neurobiologie.fu-berlin.de](http://www.neurobiologie.fu-berlin.de)

Imkerverband St. Gallen  
Salez Nov. 2017



# Eine der wichtigsten Entdeckungen von Karl von Frisch: Bienen lassen sich als einzelne Tiere dressieren

- Farben sehen
- UV sehen aber kein Rot
- viele Düfte unterscheiden
- sich nach dem Sonnen-Kompass orientieren
- einen Zeitsinn haben
- das Polarisationsmuster Des Himmelslichts sehen
- die Flugrichtung und Entfernung in einem Tanz mitteilen



**Karl von Frisch**  
1886 - 1982

Martin Lindauer



**Dinge wahrzunehmen ist der Keim der Intelligenz.**

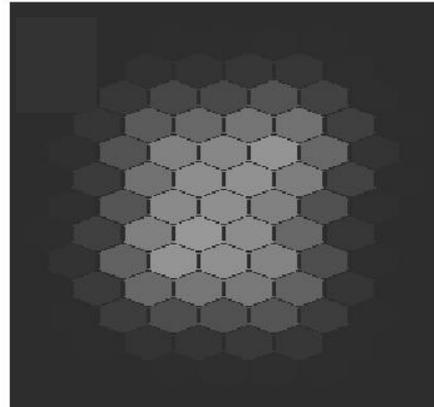
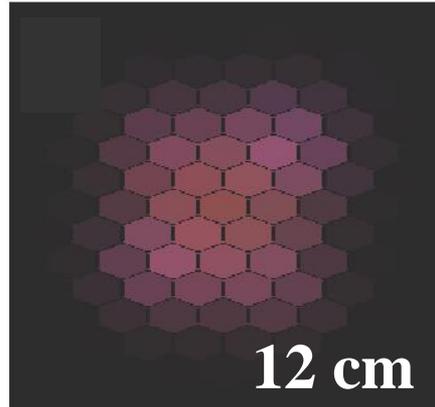
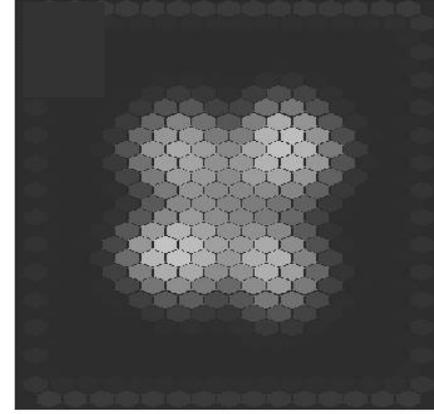
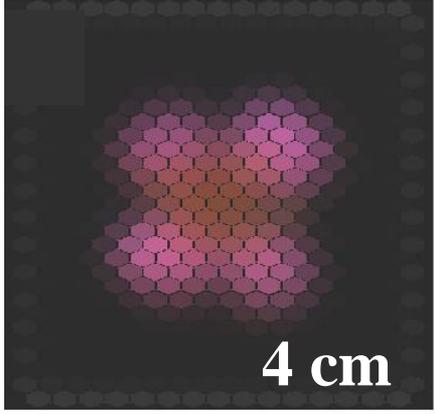
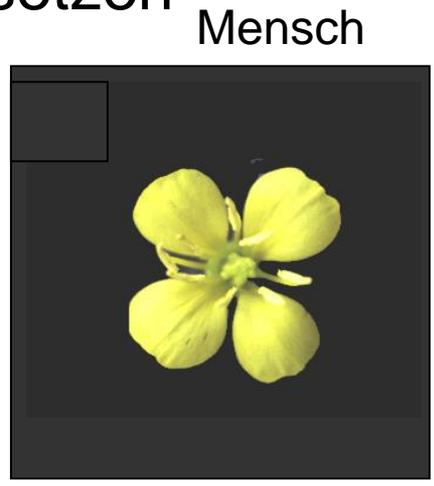
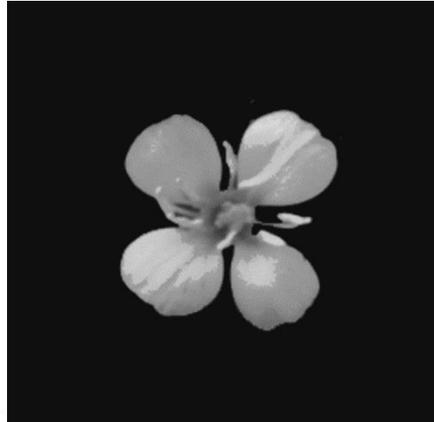
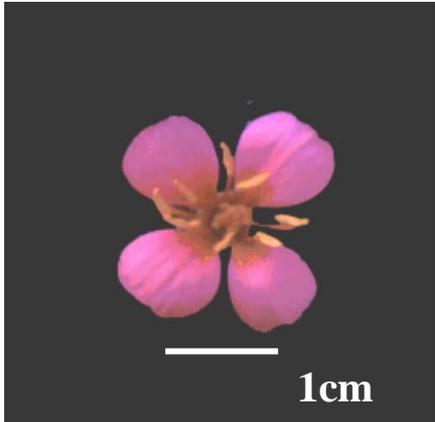
**Laotse, der Weise des Tao**

# Blumenfarben für Insekten



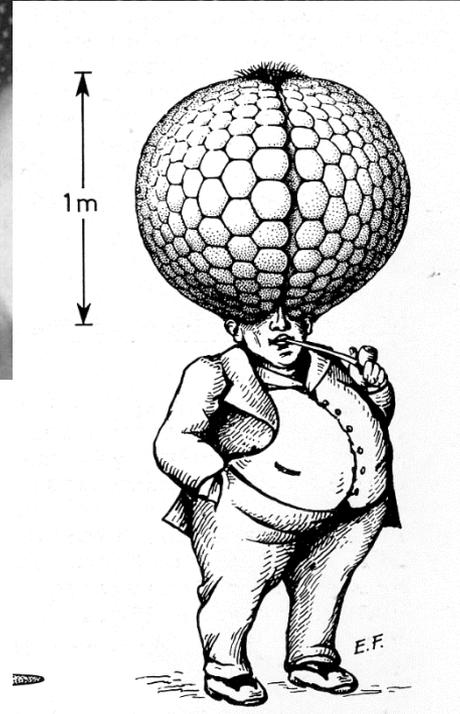
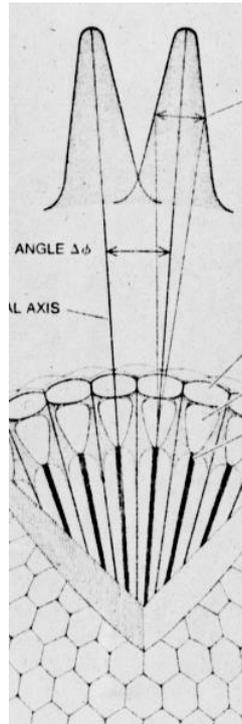
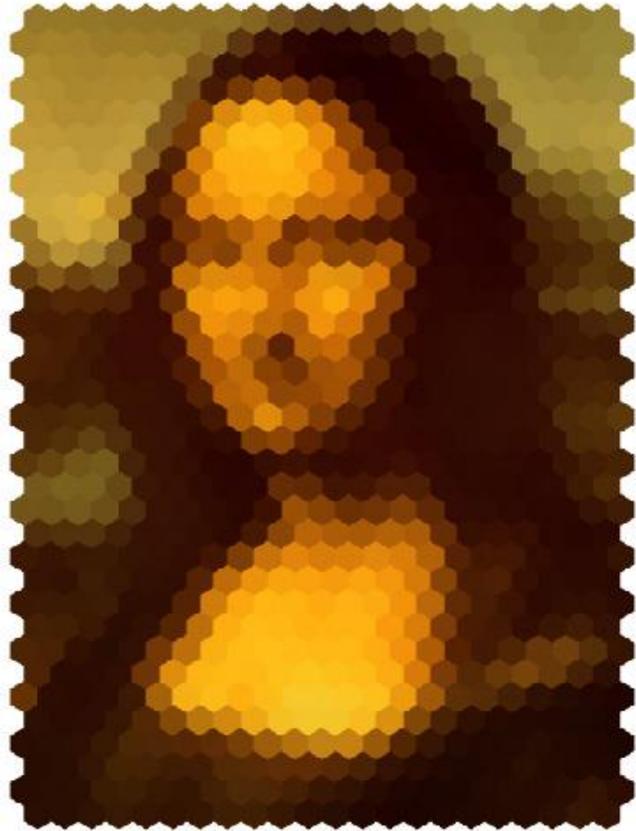
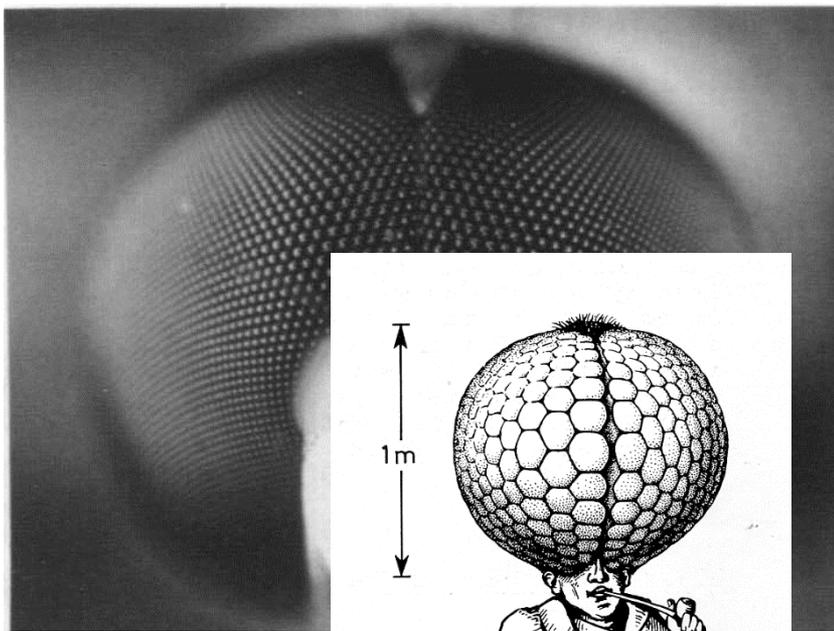
Die Schönheit der Blumen ist in der Evolution der letzten 300 Millionen Jahre für die bestäubenden Insekten entstanden, nicht für uns

# Bienenfarben in menschliche Wahrnehmung übersetzen



*Oenothera biennis*

Komplexaugen erzeugen ein gerastetes Bild mit geringerer Auflösung



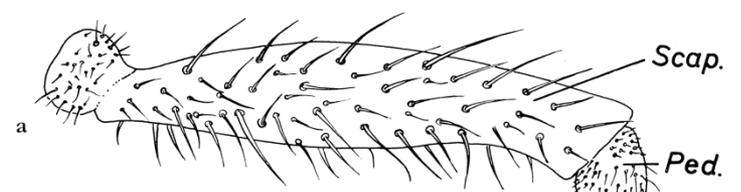
(Die Facettenlinsen sind stark vergrößert dargestellt, insgesamt ca. 1 Million Facetten)



Die Daumen Regel: 2° Sewinkel

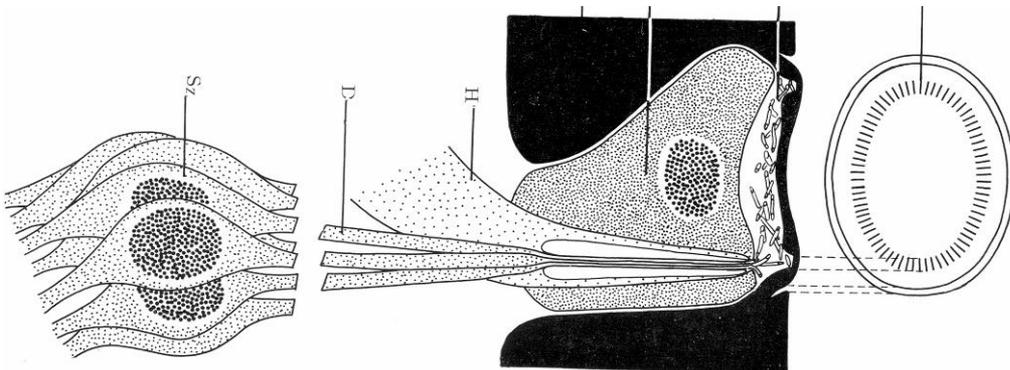
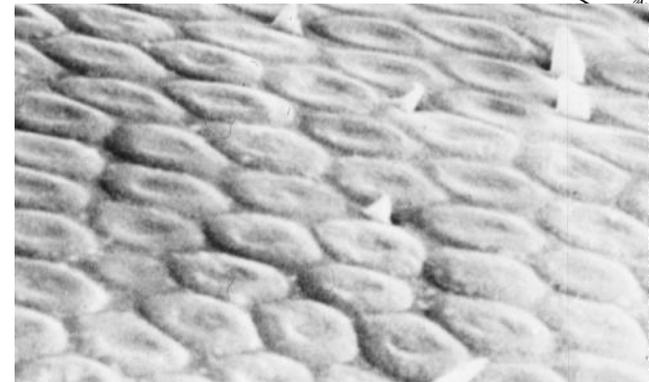
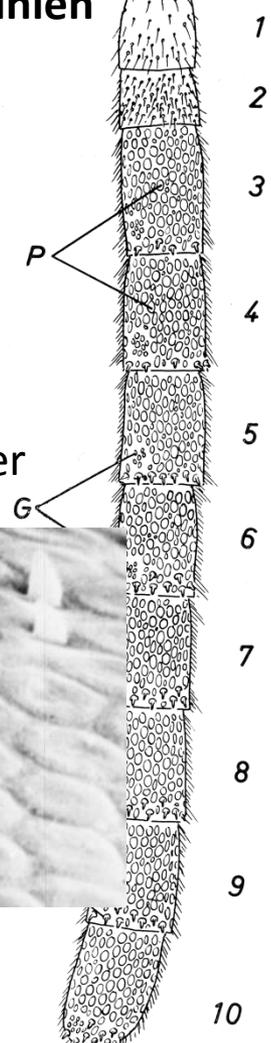
K. Kirschfeld, Are Photoreceptors optimal?  
NeuroScience 6, 97-101, 1983

# Die Duftwelt ist eine komplexe Welt



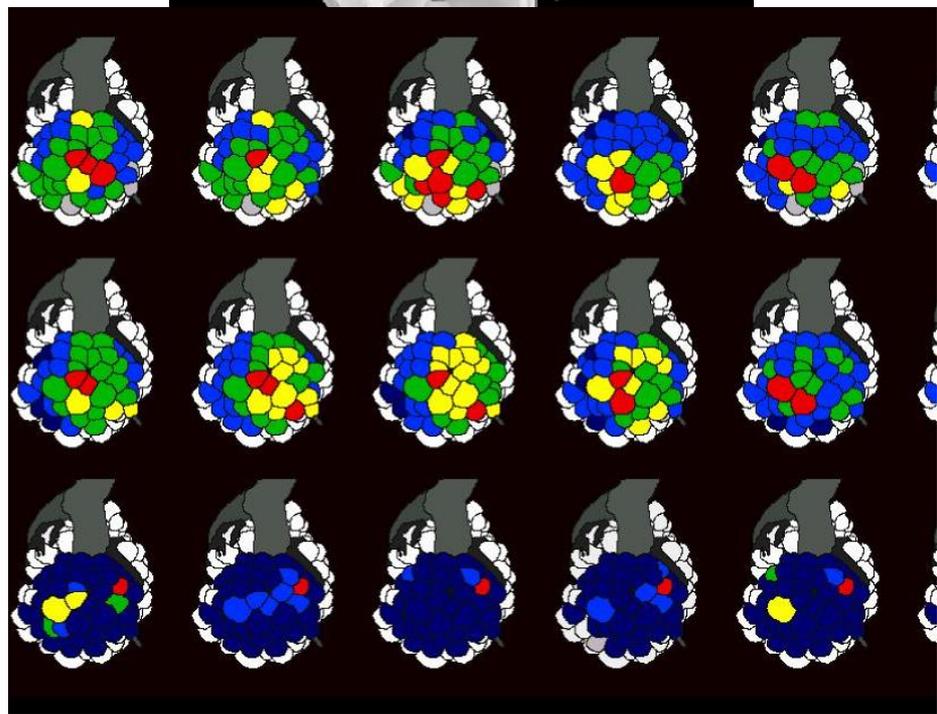
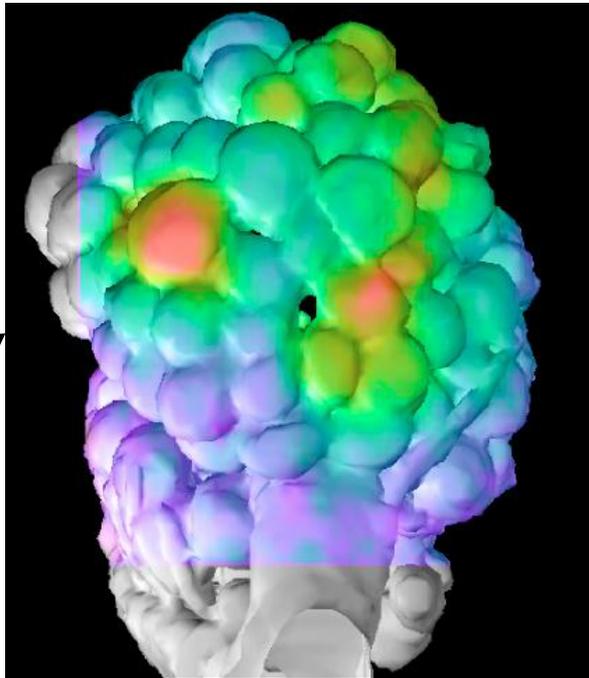
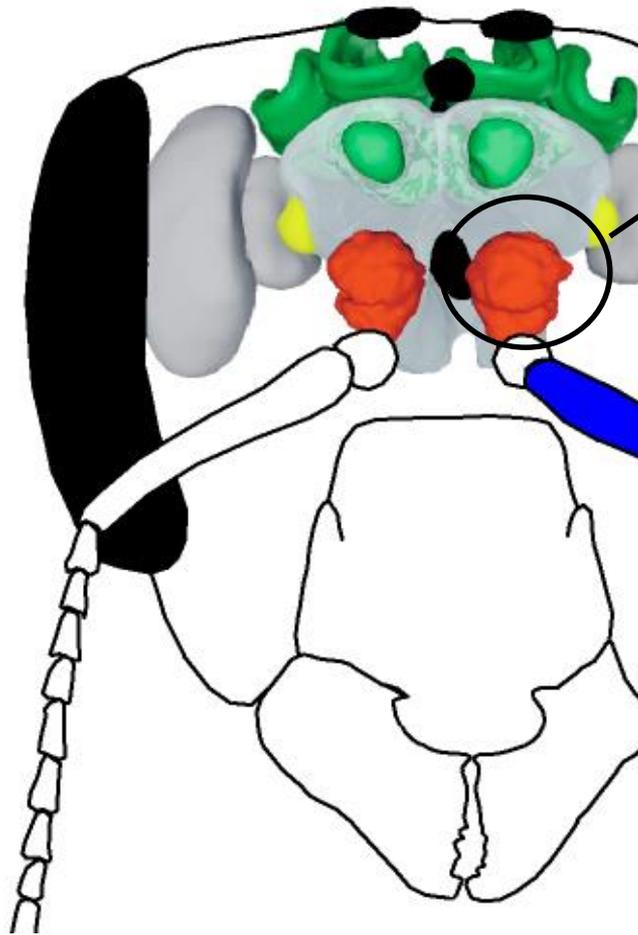
## Bienen riechen und fühlen mit den Antennen

- Duft
- Berührung
- Wind
- Temperatur
- Feuchte
- CO<sub>2</sub>
- elektrostatische Felder



60.000 Sinneszellen auf jeder Antenne sind allein in den Porenplatten versammelt

Düfte werden im Gehirn der Biene wie beim Menschen und anderen Tieren als Muster von Nerven Aktivitäten codiert

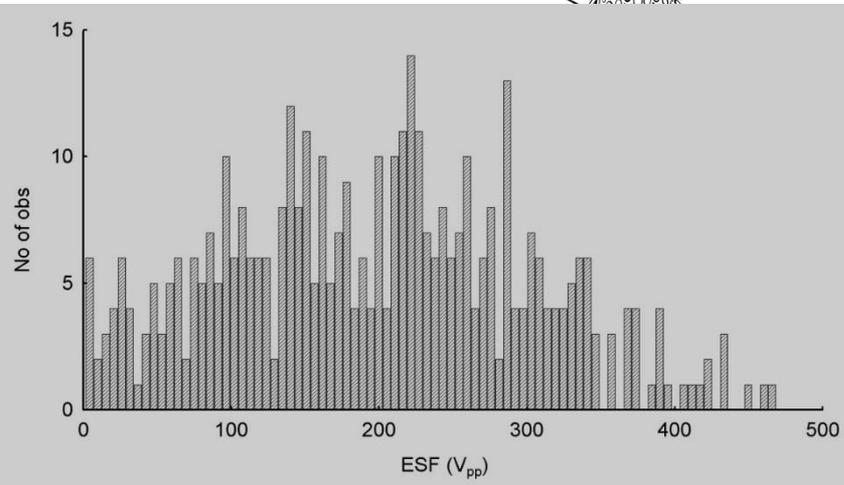
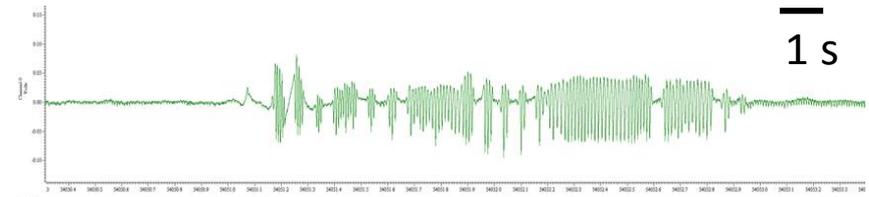


# Antennen: nicht nur zum Riechen sondern auch zum Fühlen

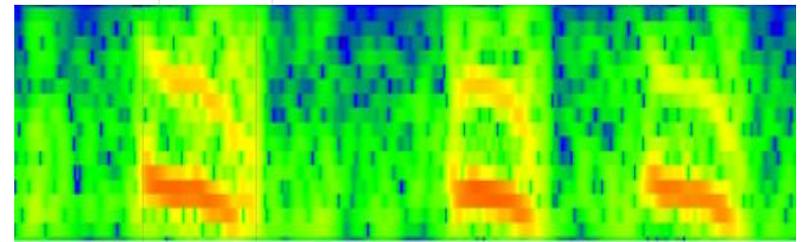
- von Luftströmungen
- von Vibrationen
- von elektrostatischen Feldern



Bienen laden sich im Flug elektrisch auf.



Elektrische Spannung auf der Körperoberfläche ankommender Sammelbienen



Elektrostatische Felder einer Biene in der Kolonie

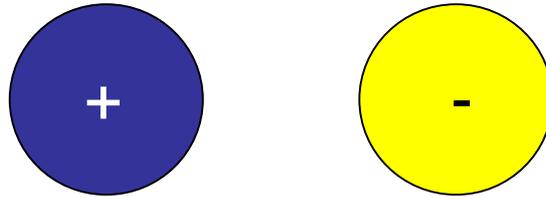
# Der komplexe Blumenmarkt



**Lernen ist wie Rudern gegen den Strom. Hört man damit auf, treibt man zurück.**

**Laotse**

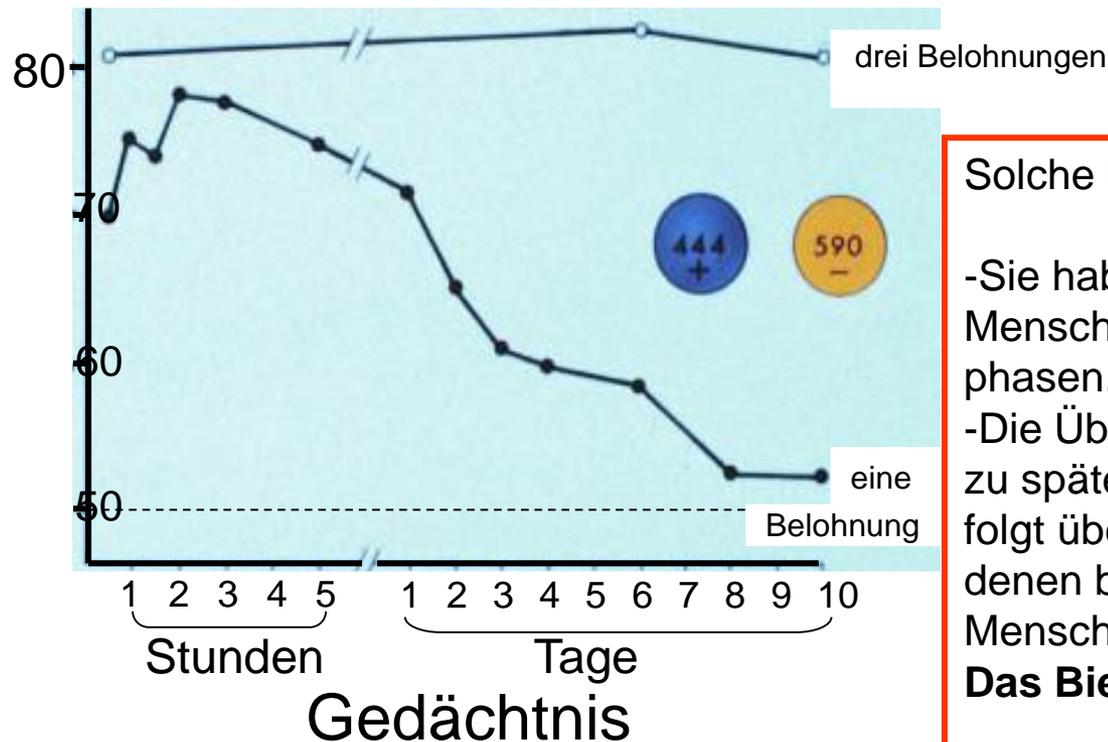
# Bienen lernen schnell und halten das Gelernte lange im Gedächtnis



Farben lernen

Winterbienen erinnern sich auch im Frühjahr an das, was sie im Herbst gelernt hatten (M. Lindauer)

% Richtigwahl



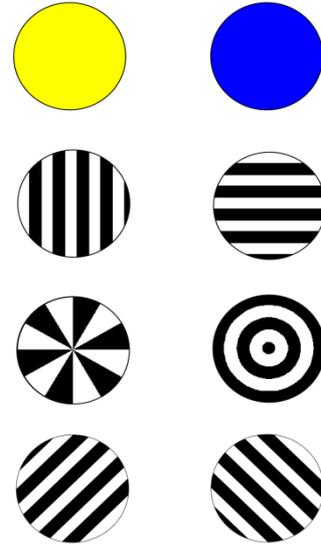
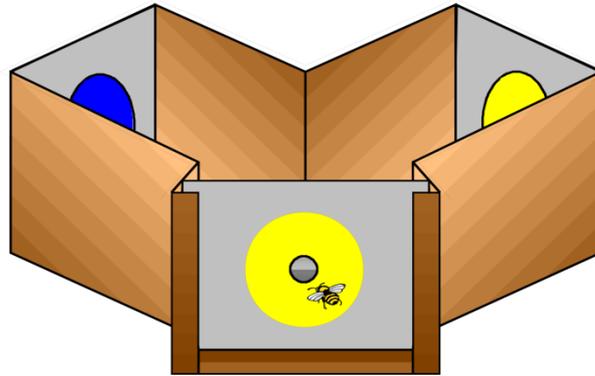
Solche Experimente zeigen:

-Sie haben wie andere Tiere und der Mensch verschiedene Gedächtnisphasen.

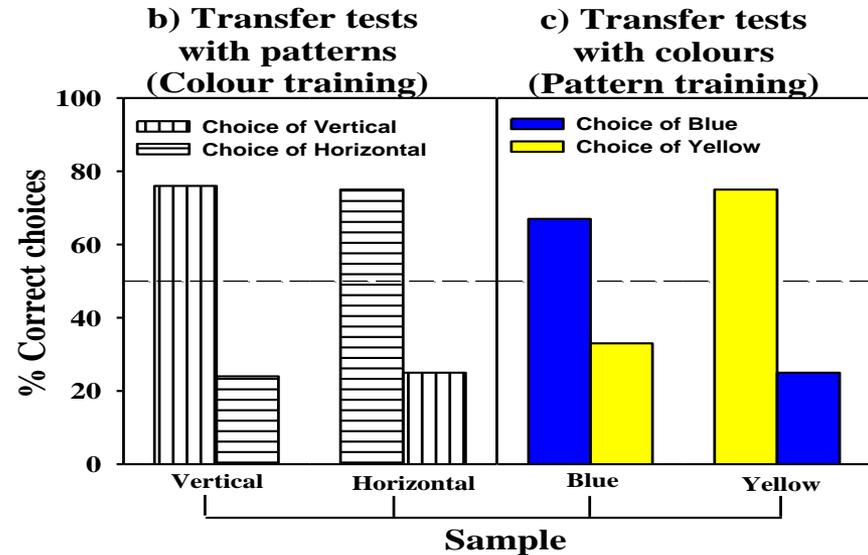
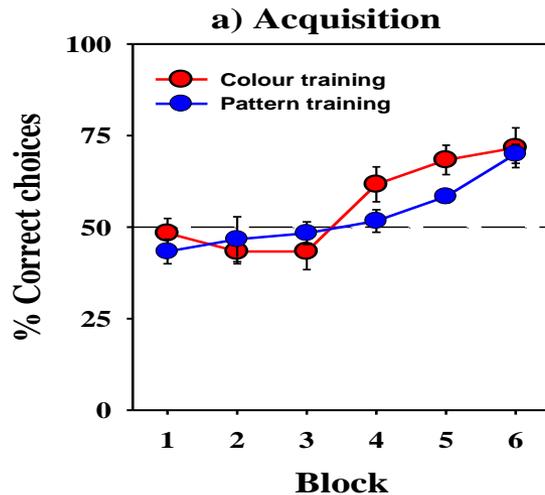
-Die Überschreibung von frühen zu späten Gedächtnisphasen erfolgt über Molekülreaktionen, die denen bei anderen Tieren und dem Menschen sehr ähnlich sind.

**Das Bienehirn als Modell**

# Lernen von Regeln: Gleich oder verschieden



Vergleichen und wählen: gleich oder verschieden



# Den Bienen ins Gehirn schauen wenn sie lernen und Gedächtnis bilden



Duft

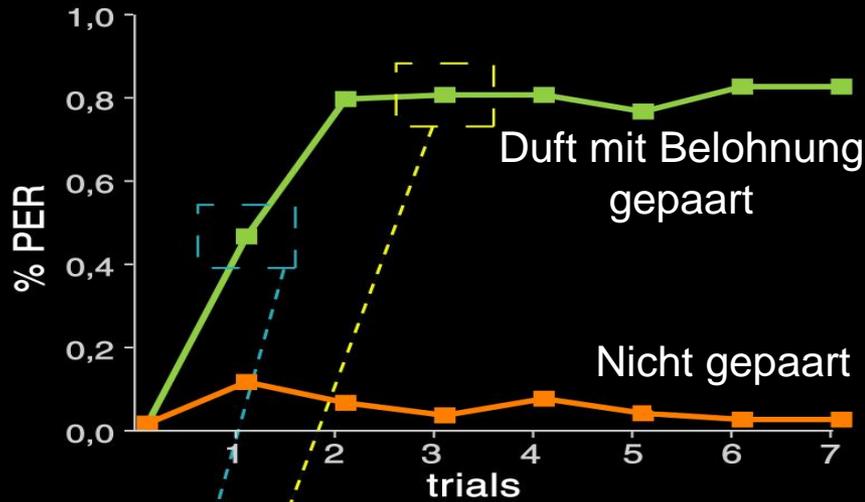


Duft

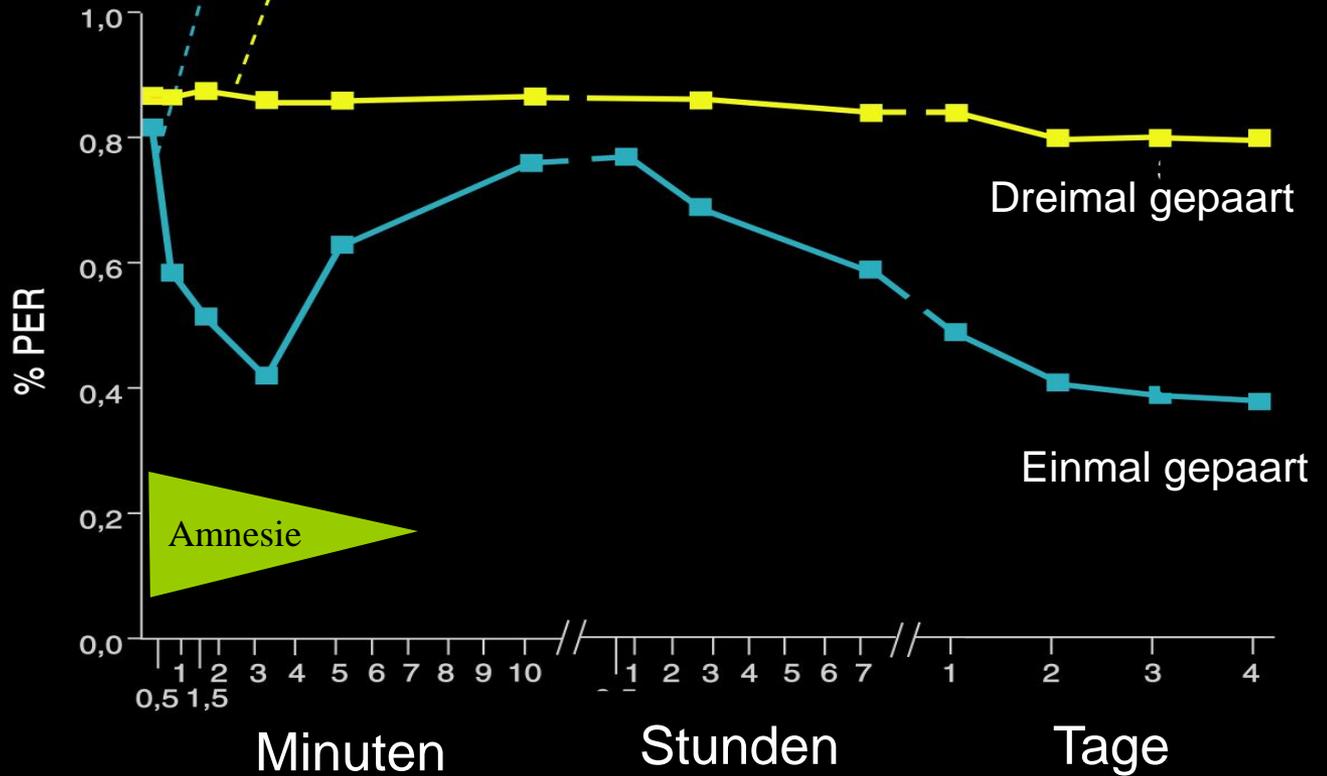
Test Situation

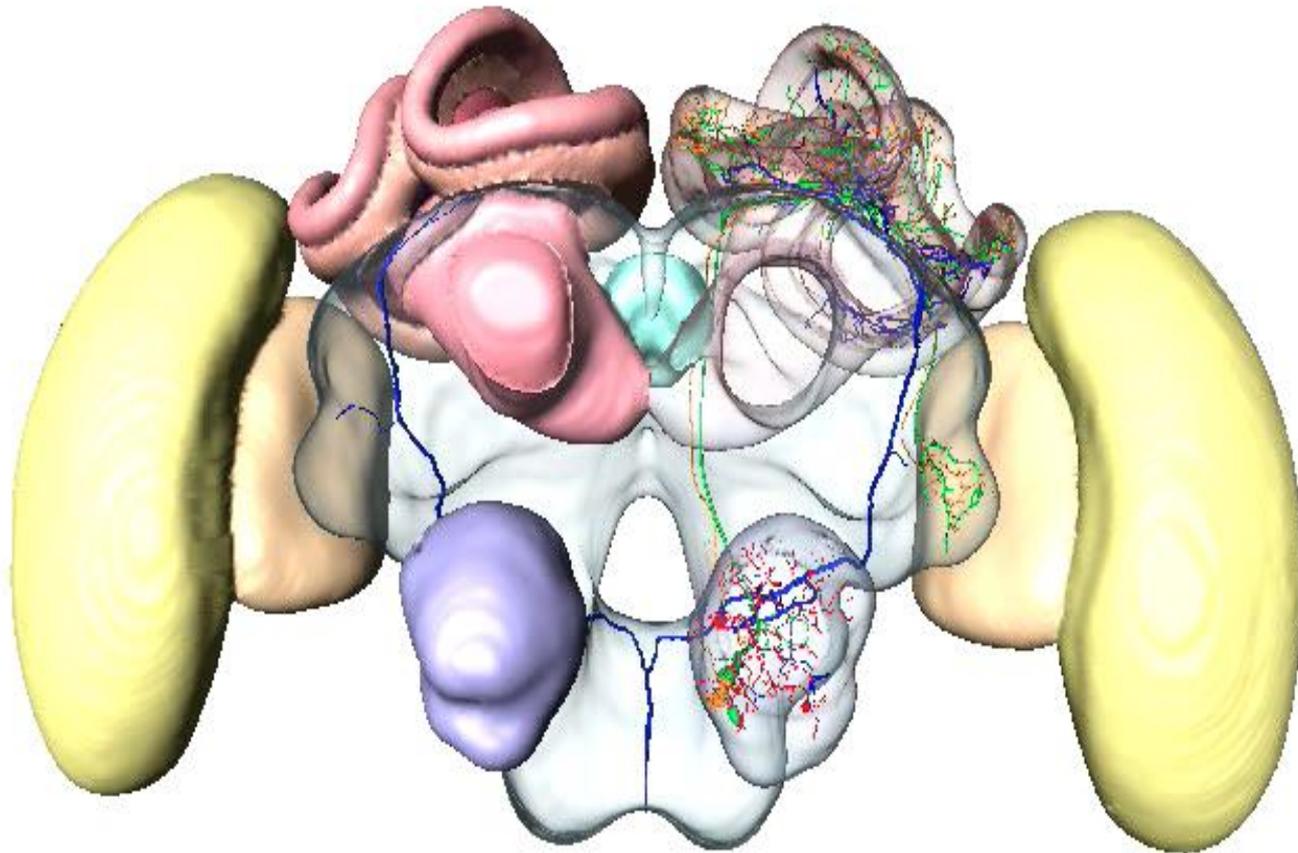
Nur der gelernte Duft wird präsentiert

# Lernen:



# Erinnern (Gedächtnis):

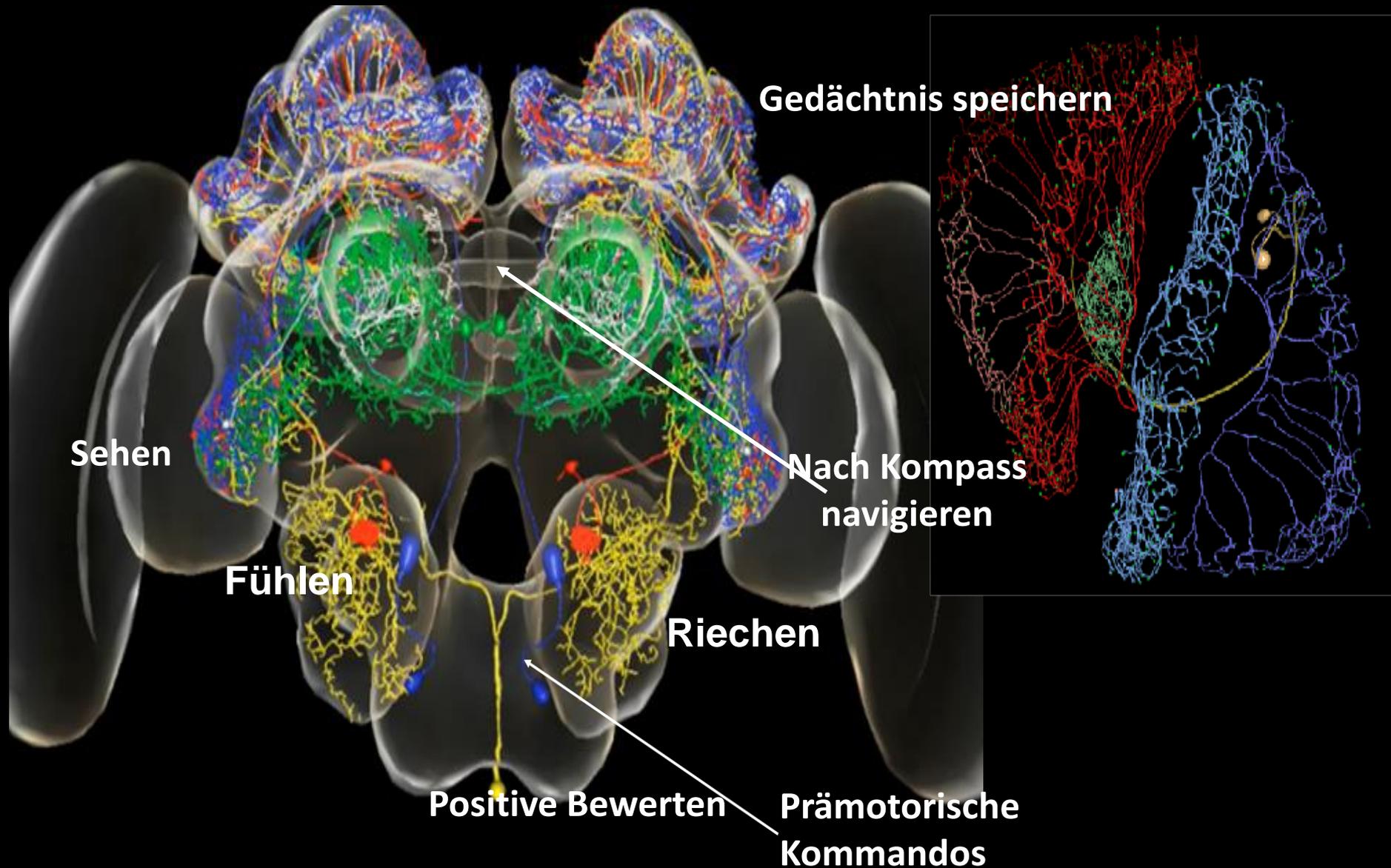




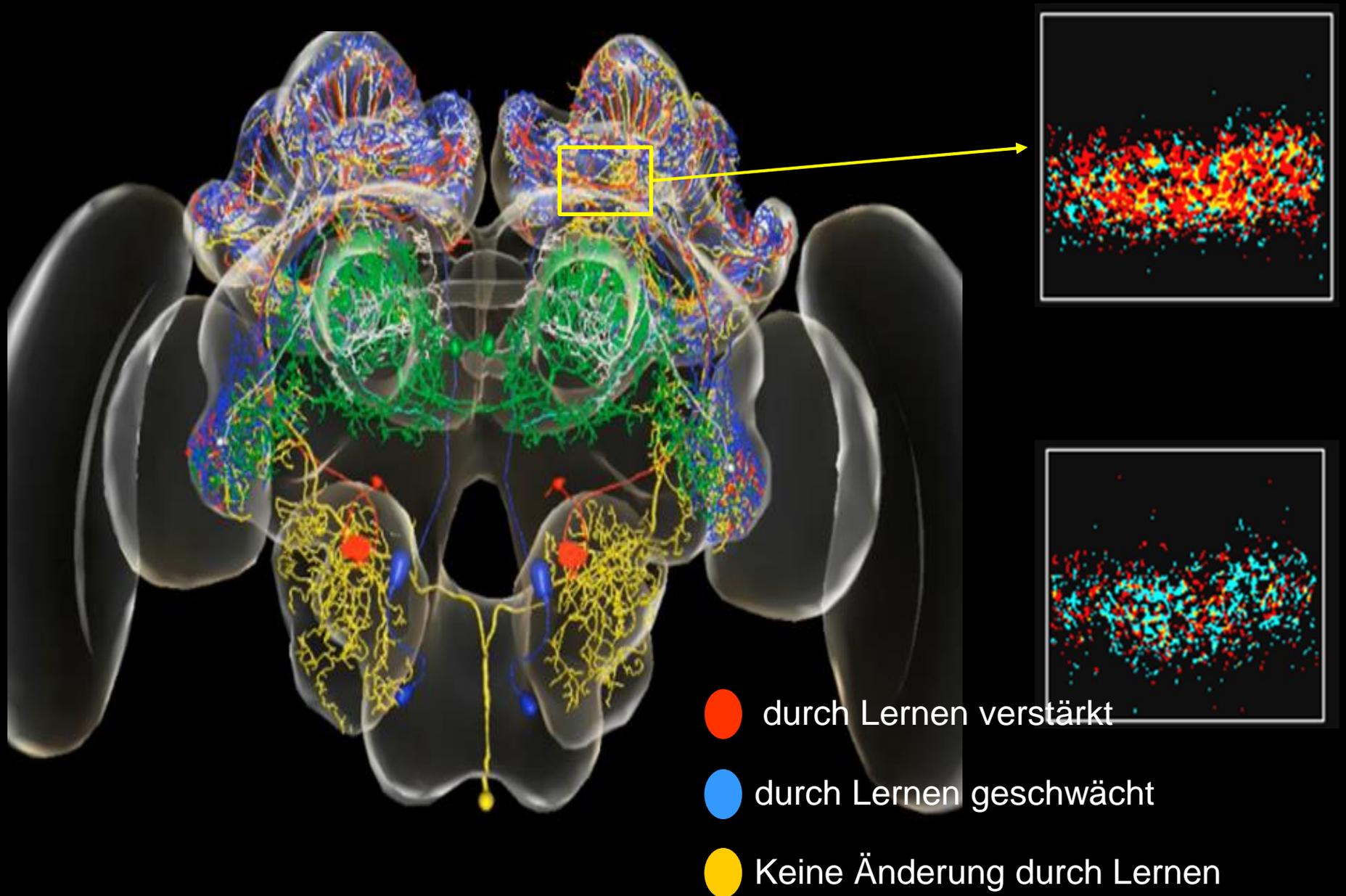
1 mm<sup>3</sup> groß

960.000 Nervenzellen in einem Bienehirn

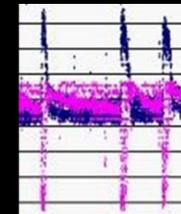
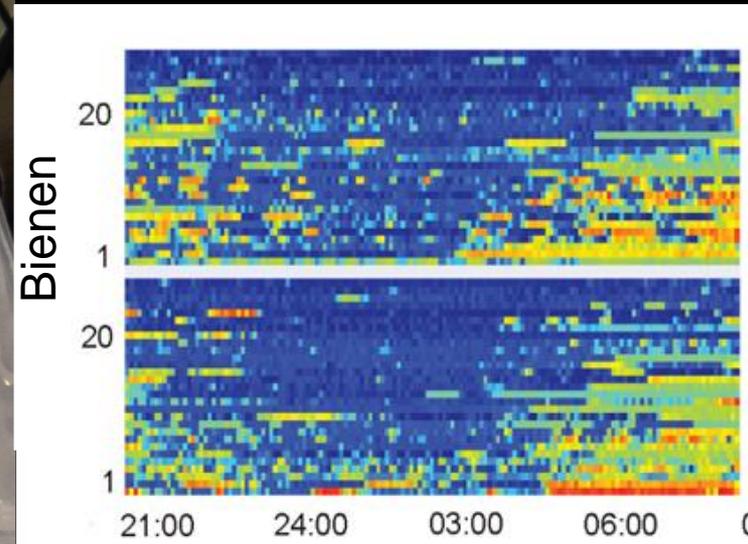
**Das Bienehirn ist aus ca. 950.000 Nervenzellen aufgebaut**  
Manche der Nervenzellen kennen wir „persönlich“



# Die Gedächtnisspur wird als Veränderung der Verschaltung



# Der Schlaf ist wichtig für die Gedächtnisbildung auch bei Bienen



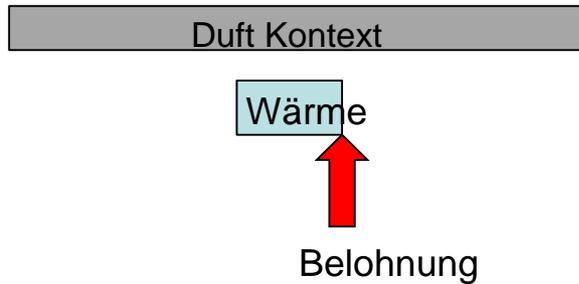
Bienen schlafen im Stock und im Labor

- Schlafen länger nach einer schwierigen Lernaufgabe.
- Stört man ihren Schlaf schlafen sie in der nächsten Nacht länger und erinnern sich schlechter

Im Schlaf treten kurze Phasen schneller Antennenbewegung auf (träumen Bienen?)

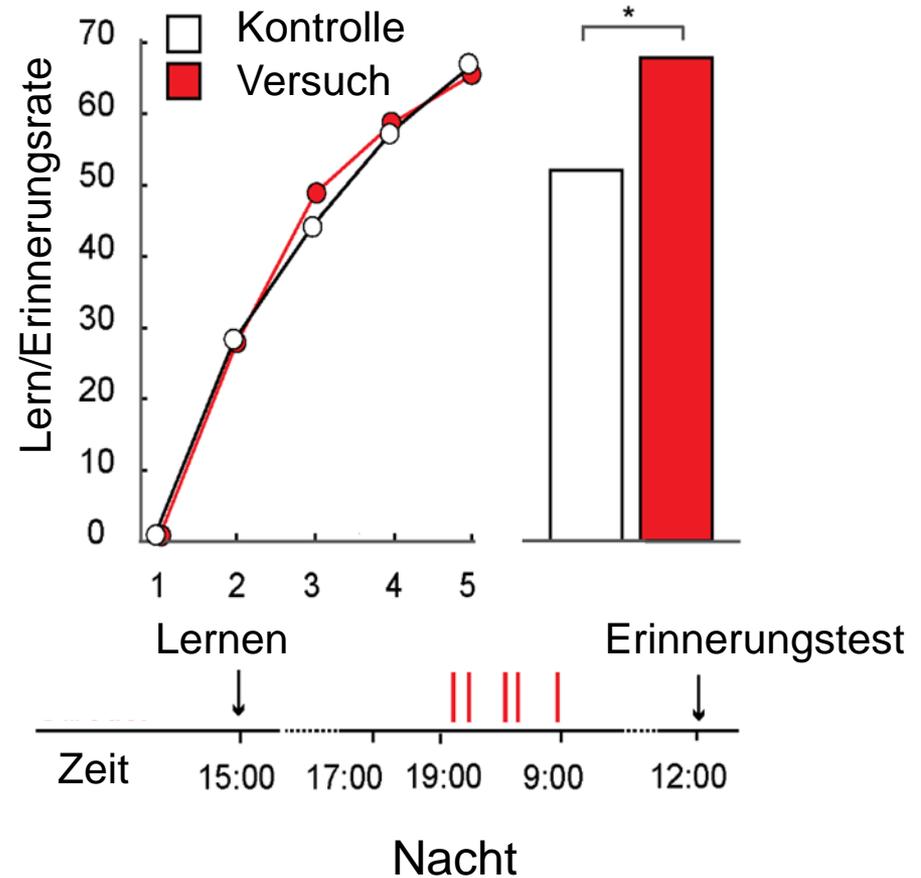
# Die Gedächtnisbildung im Schlaf kann wie beim Menschen durch einen Erinnerung verbessert werden

## Kontext abhängiges Lernen



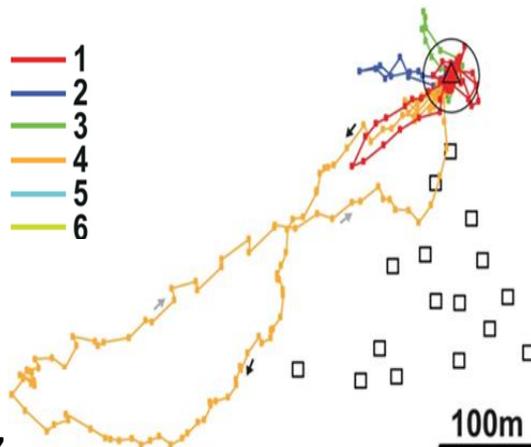
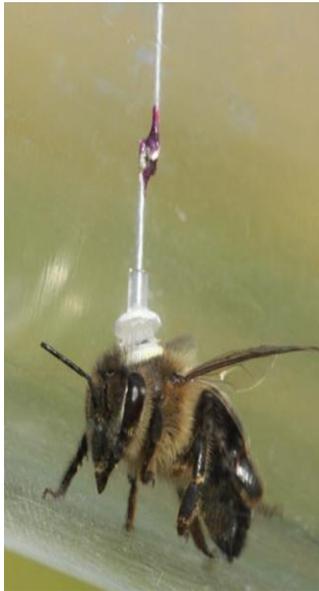
## Kontrollexperimente:

- Kontext Duft in Wachphasen
- Neuer Duft in Schlafphasen



# Navigation

## Lernen durch Explorieren



Degen et al. 2015,

### Lernen

Sonnen Kompass

Entfernungsmessung

(optischer Fluss)

Wegintegration

Landschaft

> **Sichere Rückkehr zur Kolonie**

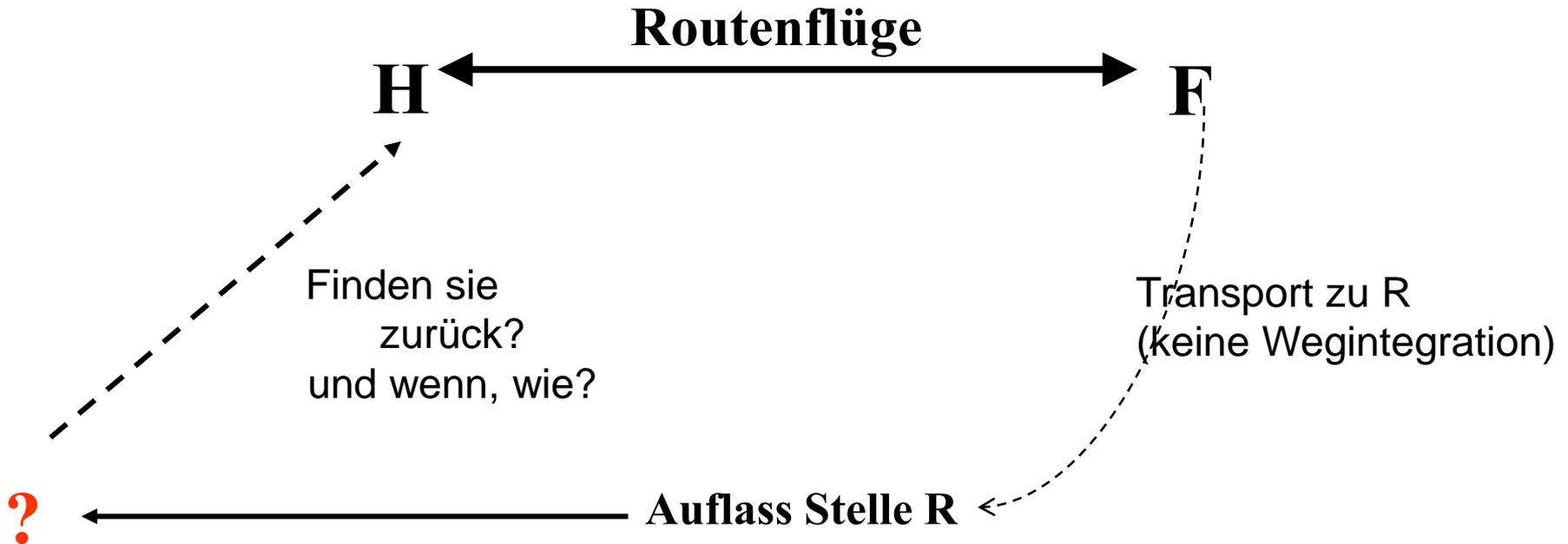


# Wie navigieren Bienen?



Aus dem Film "More than Honey"

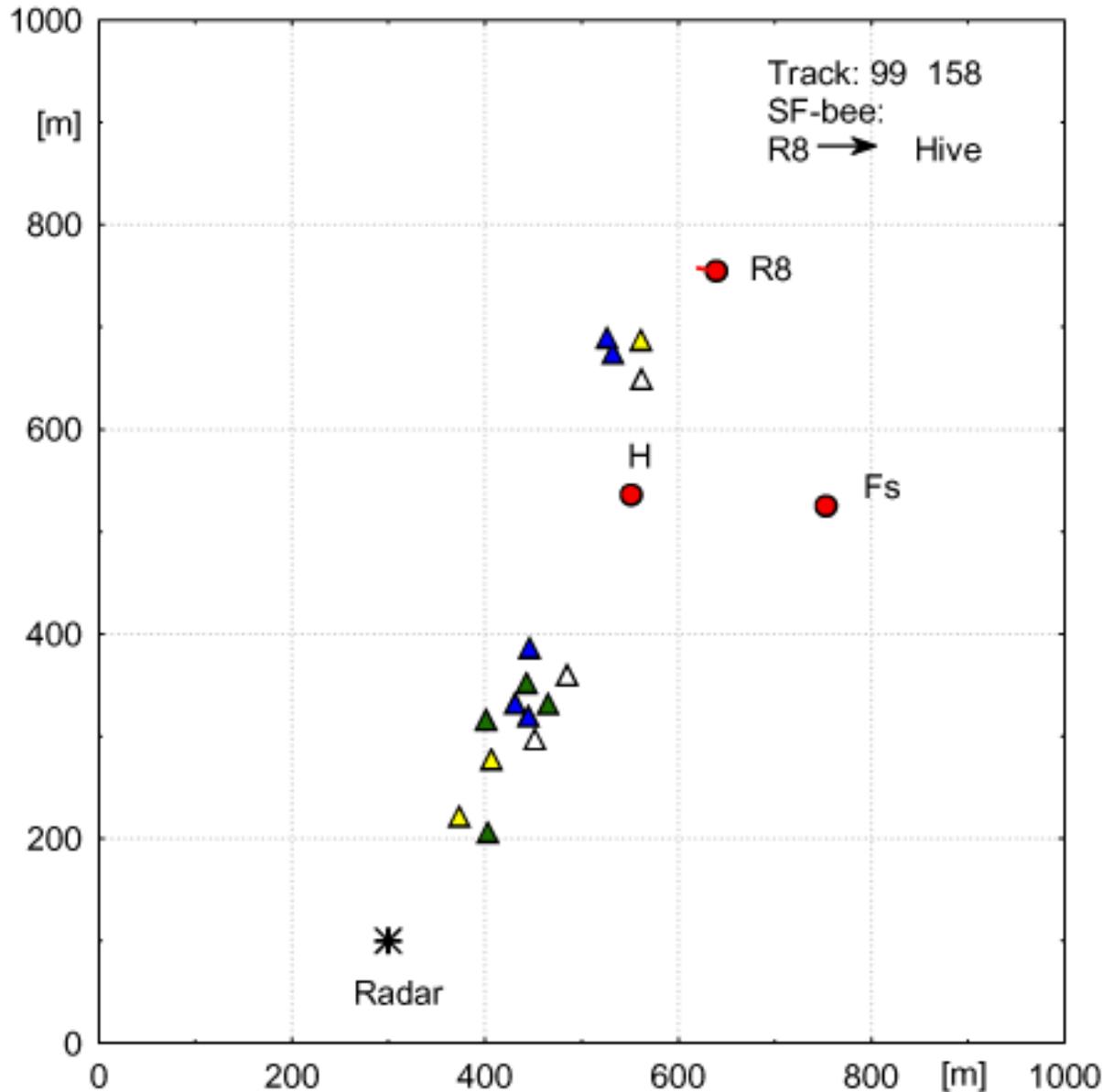
# Wie verwenden Bienen ihr Landschaftsgedächtnis?



Zu erst fliegen Bienen entsprechend ihrem Routengedächtnis(Vektorflug)

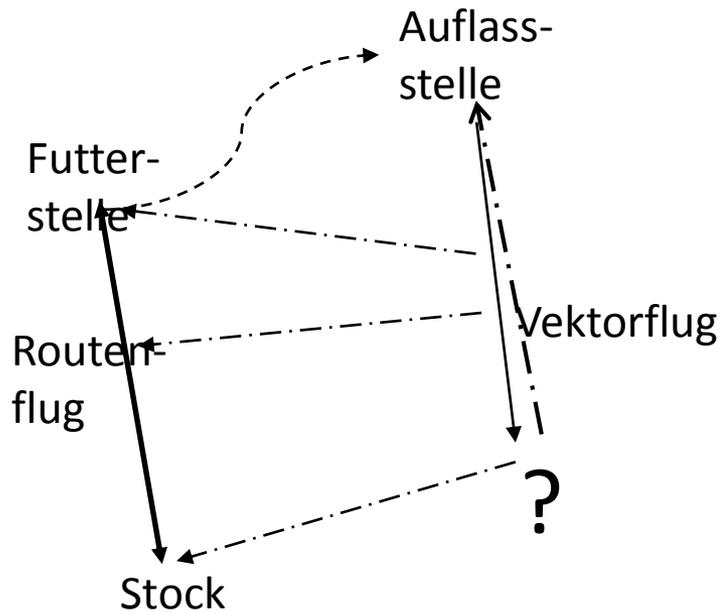
**Also doch nur egozentrische Navigation??**

# Die Biene war vom Stock (H) über 200 m nach Osten zur Futterstelle (Fs) dressiert



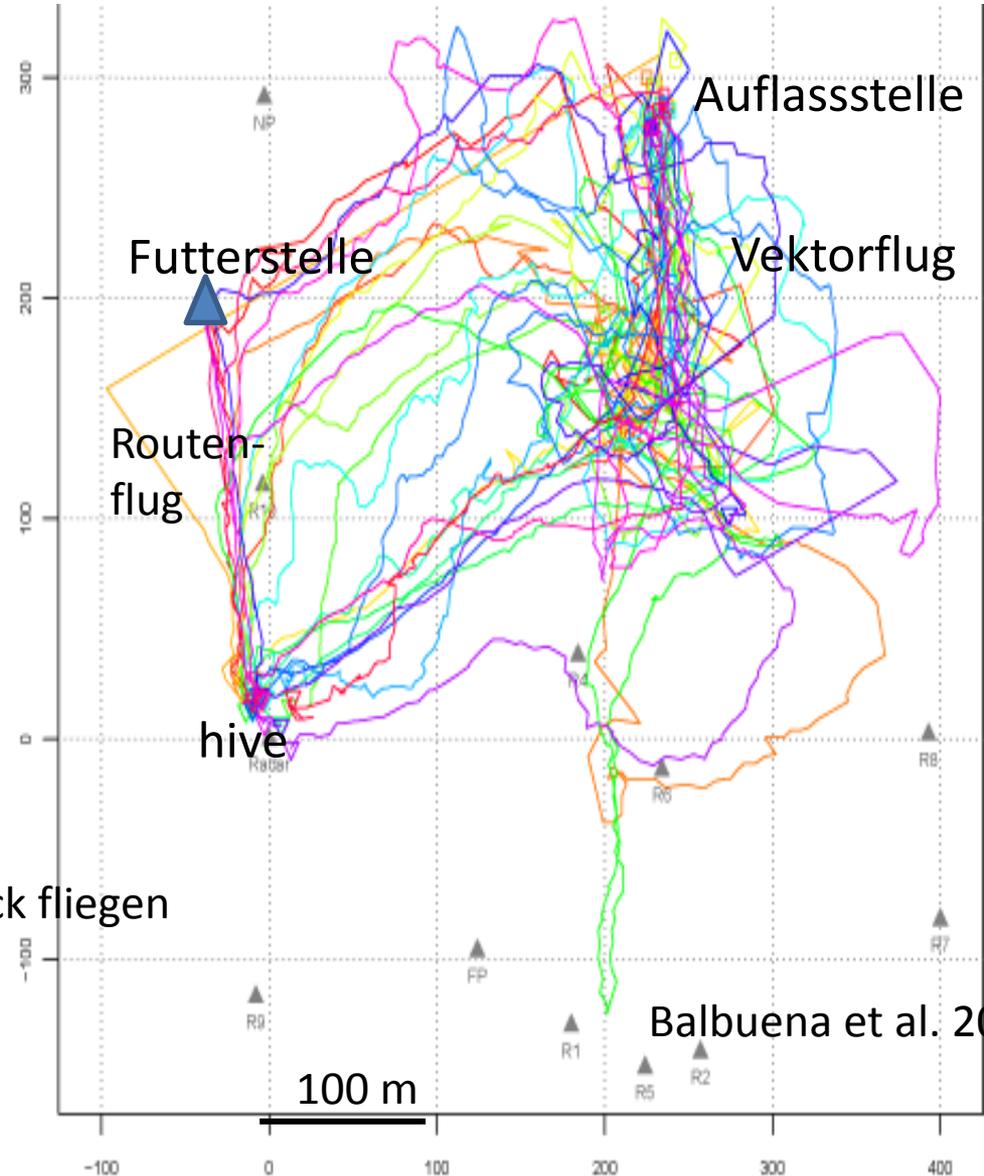
# Entscheidungen zwischen verschiedenen Zielen

Erfahrene Sammelbienen entscheiden sich zwischen  
i Optionen

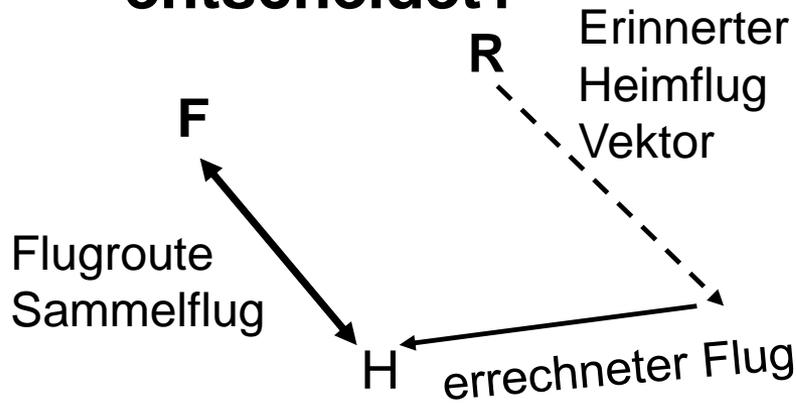


Entscheidungen:

- über Futterstelle zum Stock fliegen
- direkt zum Stock fliegen
- Kompromiss Flug



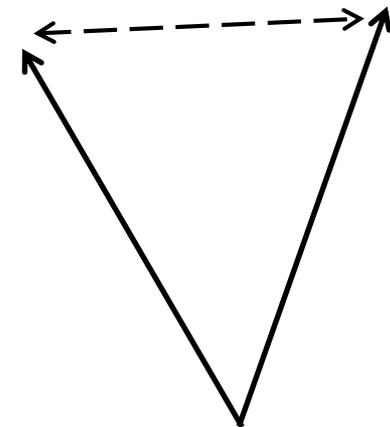
# Rechnet das Bienen Gehirn wenn es zwischen Alternativen entscheidet?



Führt die Biene also eine  
Triangulationen durch?



Sonnen  
Kompass



Stock

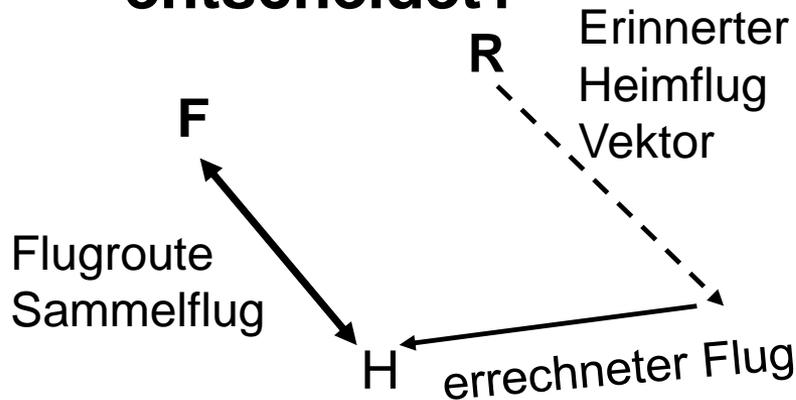
Triangulation  
von Vektoren



Carl Friedrich Gauß  
1777- 1855



# Rechnet das Bienen Gehirn wenn es zwischen Alternativen entscheidet?



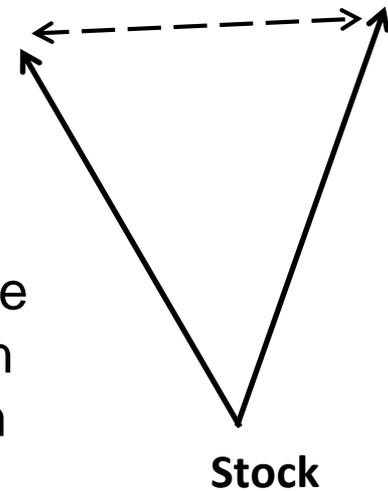
# Führt die Biene also eine Triangulationen durch?



## Die Alternative: Kognitive Karte



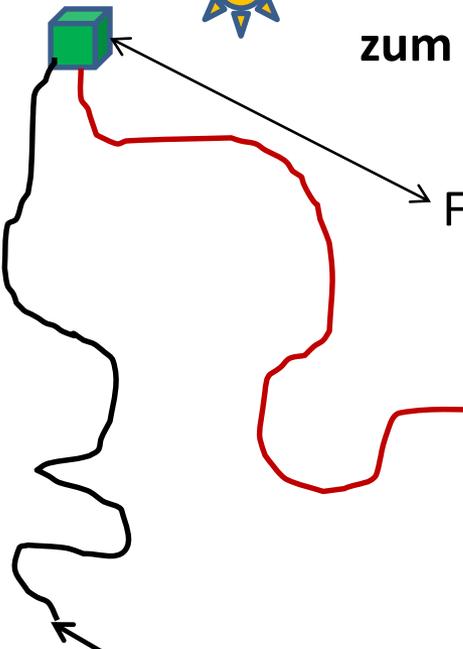
Gedächtnis für die geometrischen Bezüge zwischen Landmarken auch unabhängig vom Sonnenkompass



Triangulation  
von Vektoren

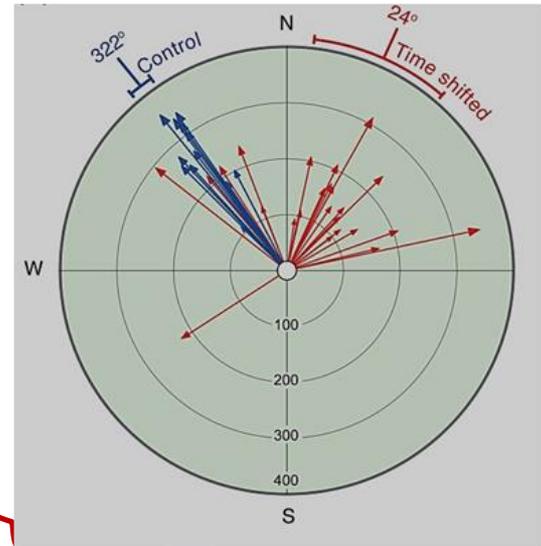


# Die Sonne gegenüber der Erde drehen: Findet die Biene zum Stock zurück?



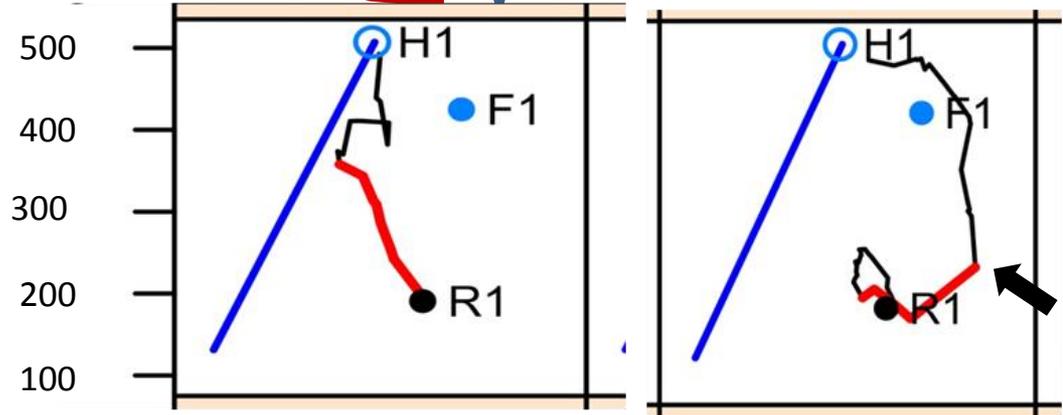
Ja!

Nein!



Initialer Vektorflug der Kontrollbienen

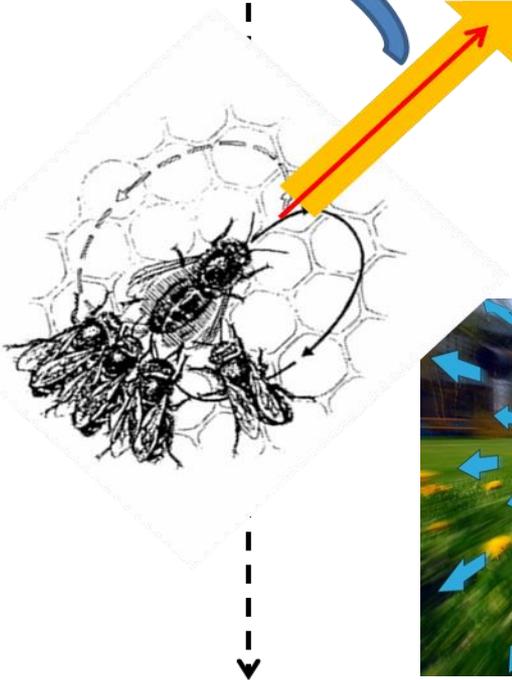
R Initialer Vektorflug der Zeit versetzten Bienen



Lange Anästhesie stoppt die innere Uhr

# Der Schwänzeltanz: eine symbolische Form der Kommunikation

lass den aktuellen  
Sonnenazimut  
so viel Grad links neben dir



**Schwerkraft**

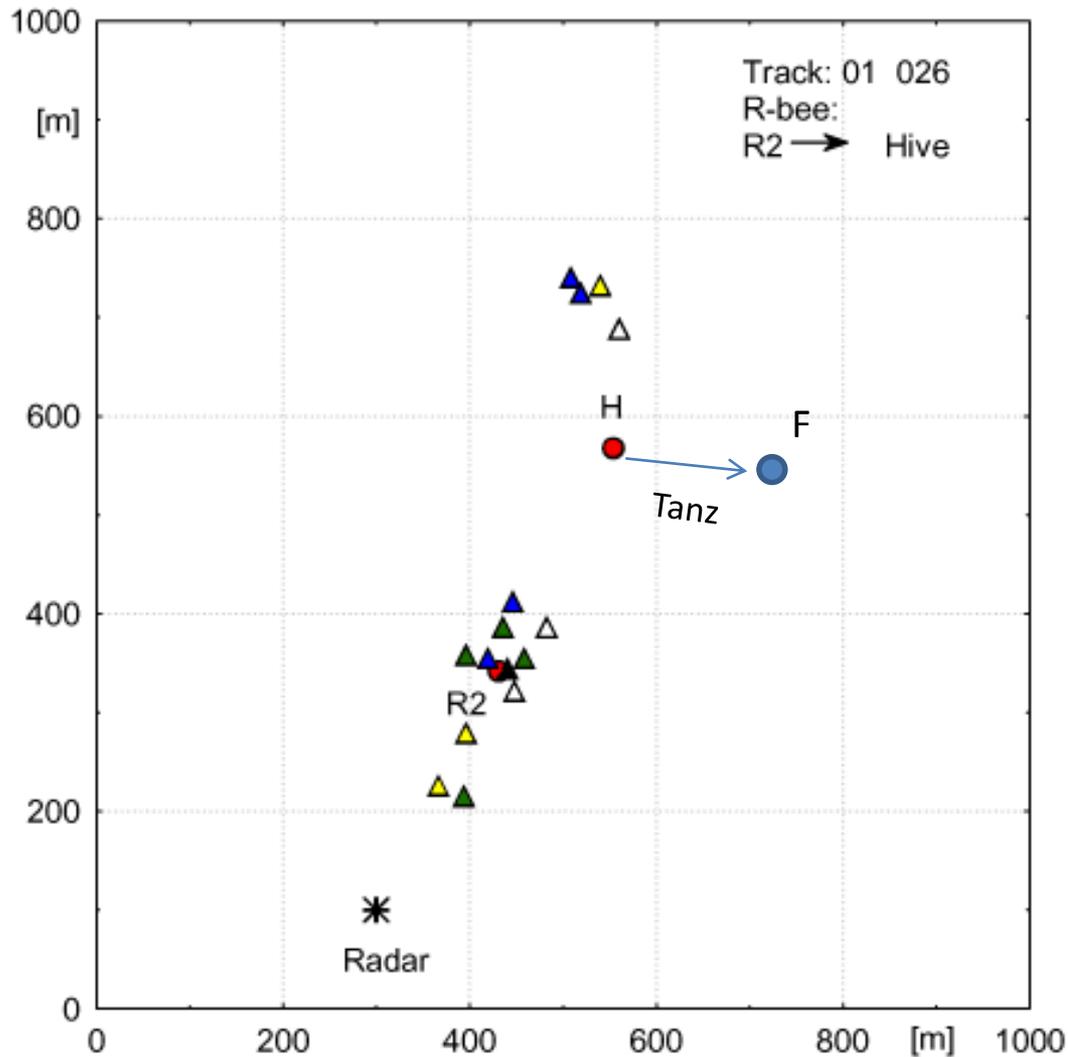
Zahl der Schwänzels-  
Bewegungen: Entfernung



Symbolische Codierung des Flugvektors  
(Richtung relativ zum Sonnenkompass,  
Entfernung visuell gemessen)

Attraktivität der Futterstelle oder  
einer neuen Niststelle

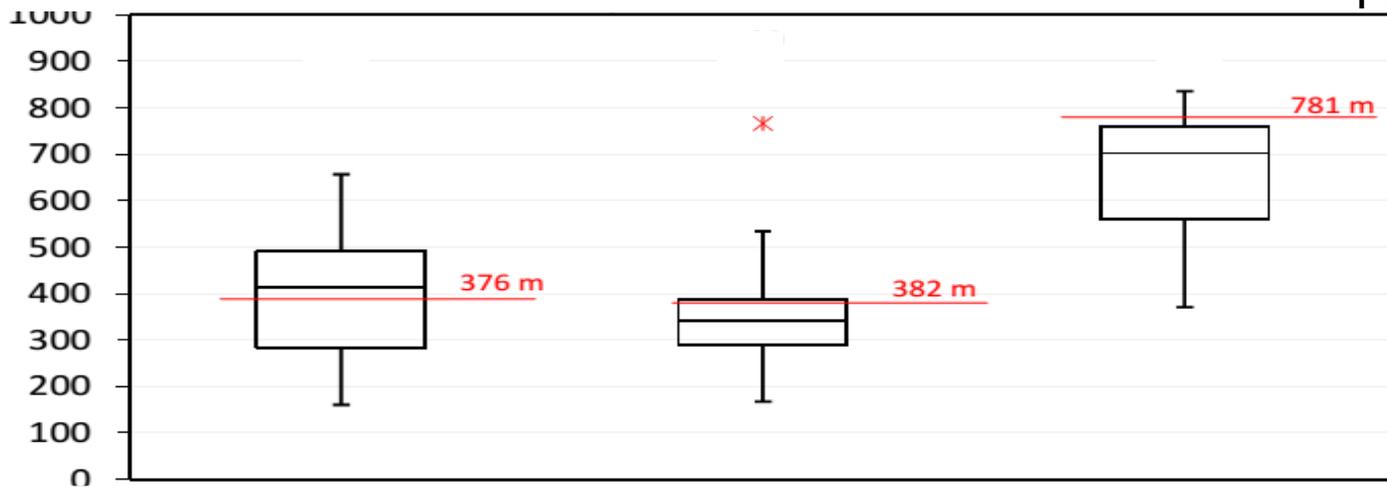
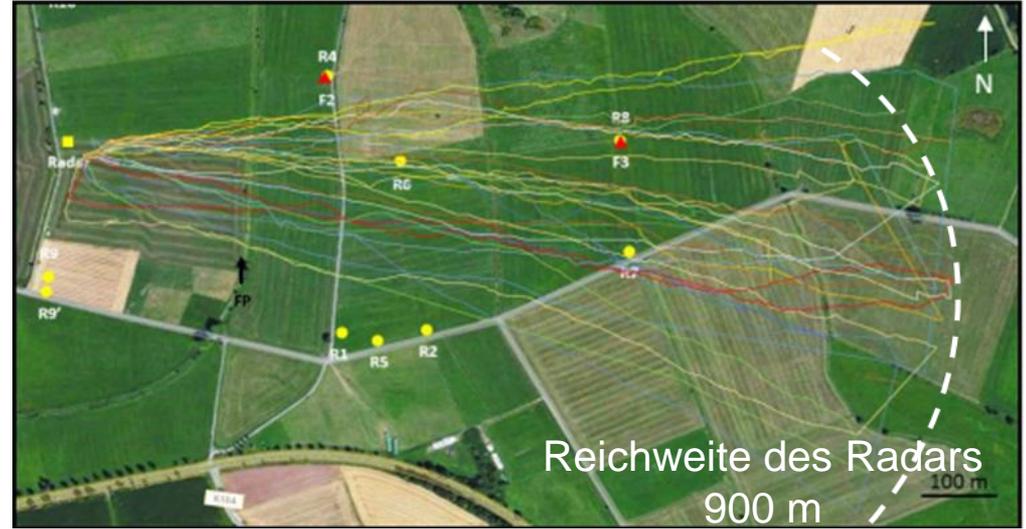
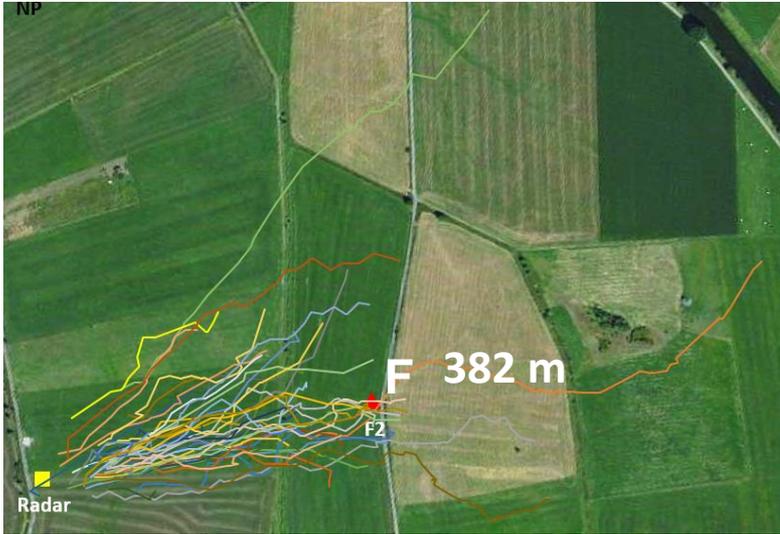
Geruch, Geschmack der Futterstelle



**Karl von Frisch's und  
Martin Lindauer's  
Interpretation des  
Schwänzeltanzes ist korrekt:  
Der Ausflugvektor wird  
mitgeteilt.**

Rekrutierte Biene an R2 freigelassen

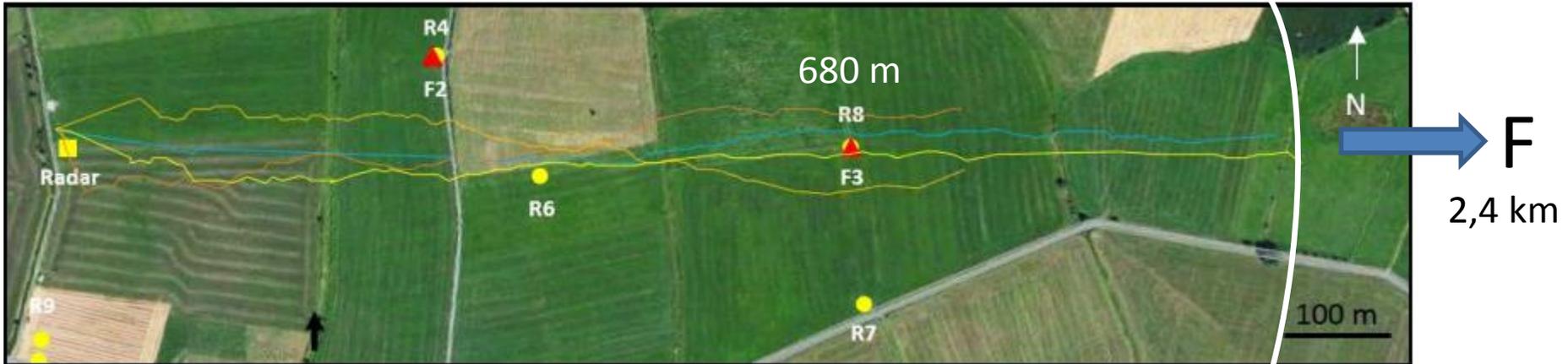
# Flugspuren von rekrutierten Bienen



Futterstelle in 1.6 km

# Bei weiter entferntem Ziel ist der Flug der rekrutierten Biene genauer

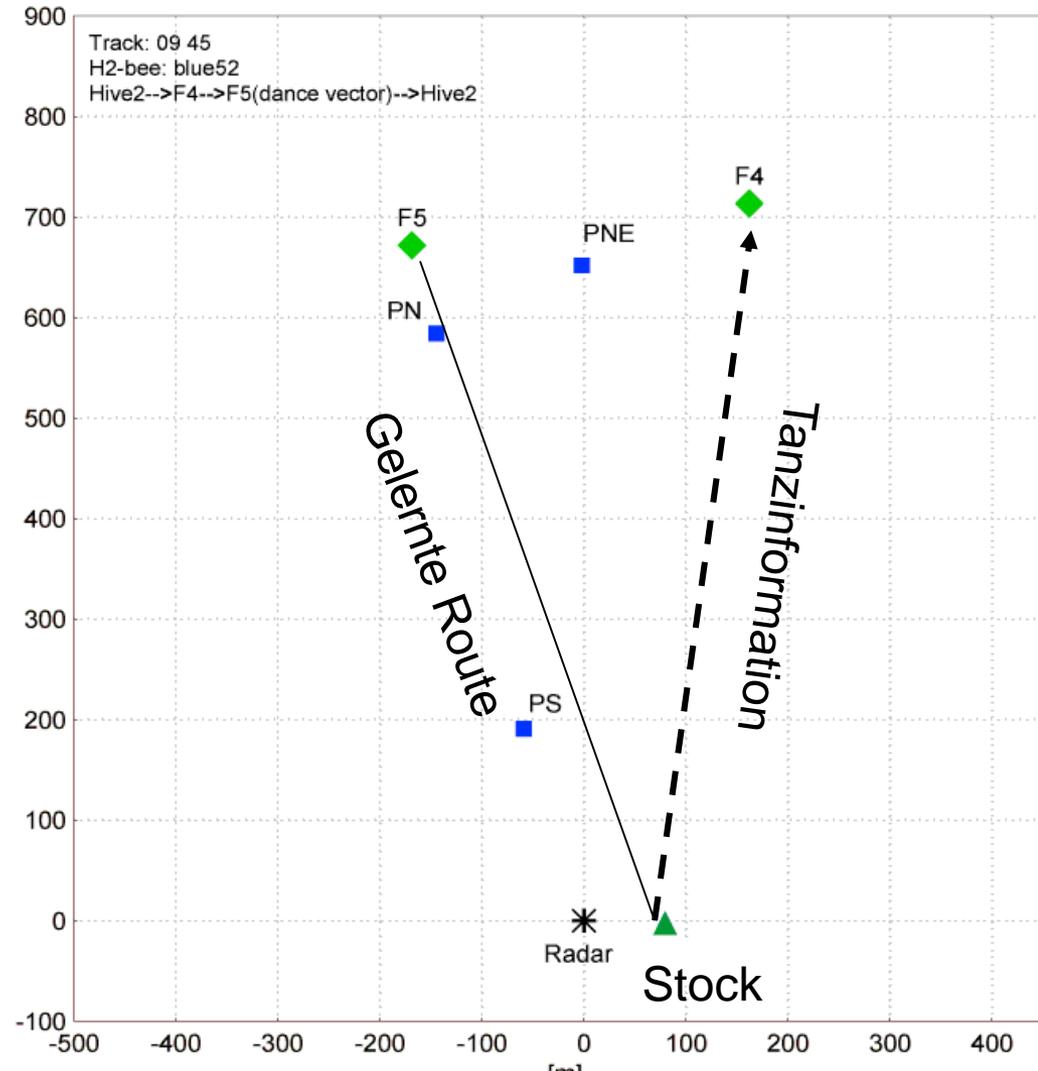
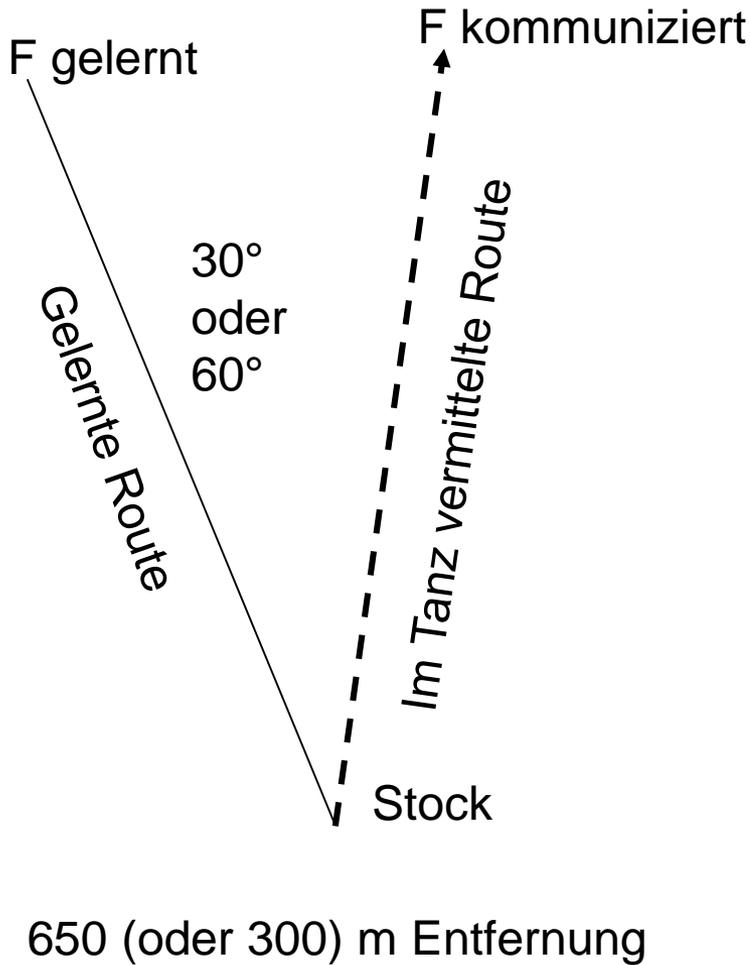
Grenze des Radars (900 m)



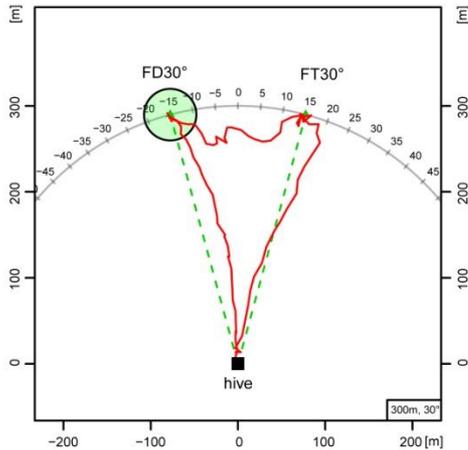
**Die Varianz in Richtung und Entfernung des geflogenen Vektors ist größer für kurze Entfernungen**  
**Der Informationstransfer ist genauer für längere Schwänzelläufe (mehr Schwänzeln).**  
**Eine Schwänzelnbewegung entspricht ca 80 m (für Entfernungen bis ca. 1,5 km, dann zunehmend größere Strecke pro Schwänzeln)**

# Was wird mitgeteilt: eine Fluganweisung oder ein Ort?

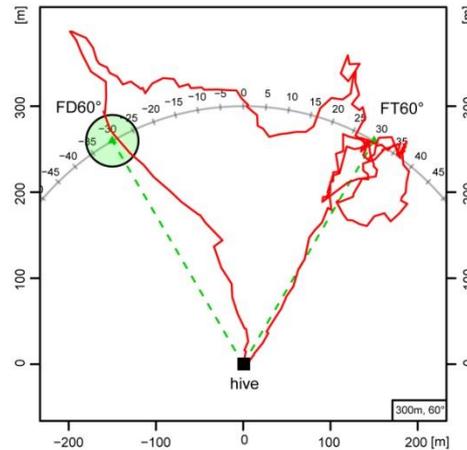
Ordnen Sammelbienen die Tanzinformation in ihre Kenntnis der Landschaft ein?



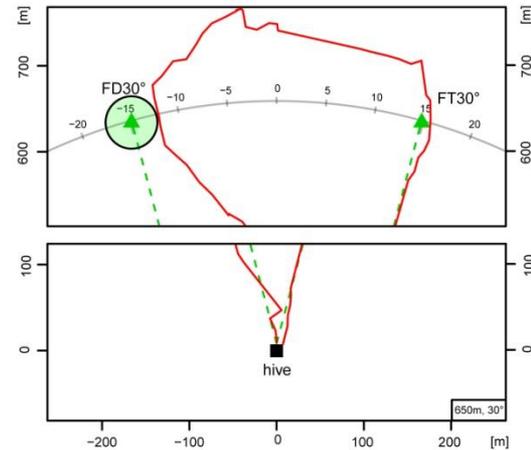
## Drei Beispiele für kürzeste direkte Flüge



300 m, 30°



300 m, 60°

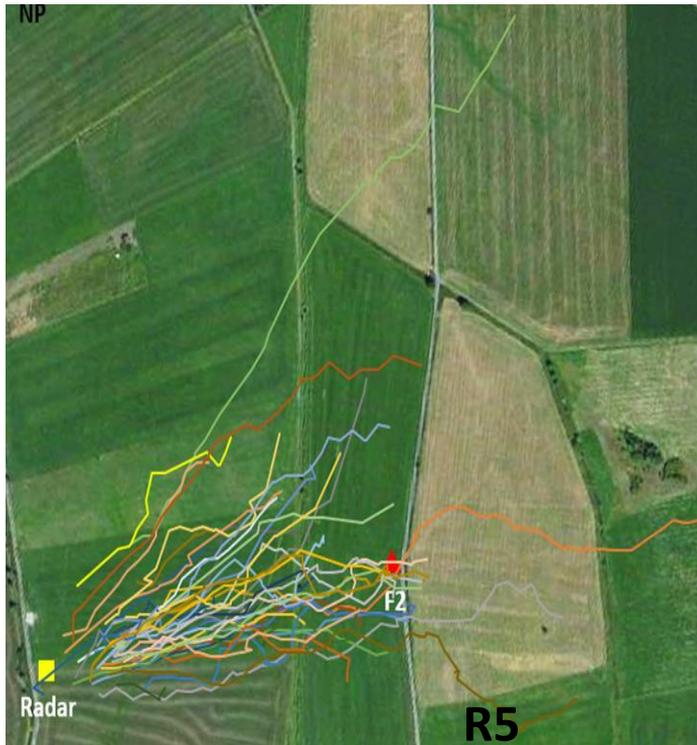


650 m, 30°

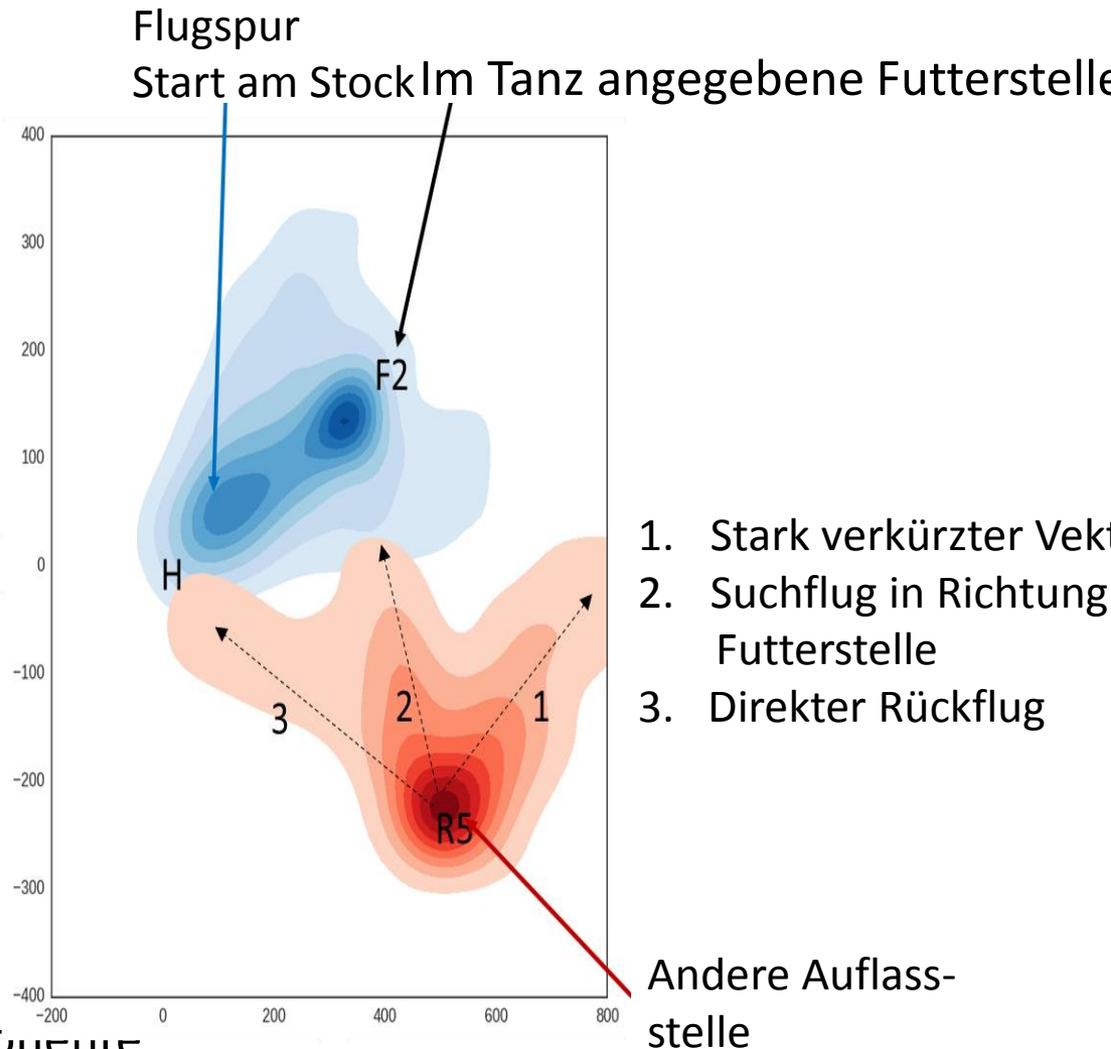
- *Kürzeste direkte Flüge werden für große Entfernungen nur für kürzere Strecken als die Rückkehrstrecke durchgeführt (650 m Experiment);*
- *Bei geringeren Entfernungen werden auch Strecken geflogen, die gleich lang wie die Rückkehrstrecke ist (300 m Experiment).*

**Die Entscheidung für neue Querflüge hängt von den topographischen Verhältnissen ab.**

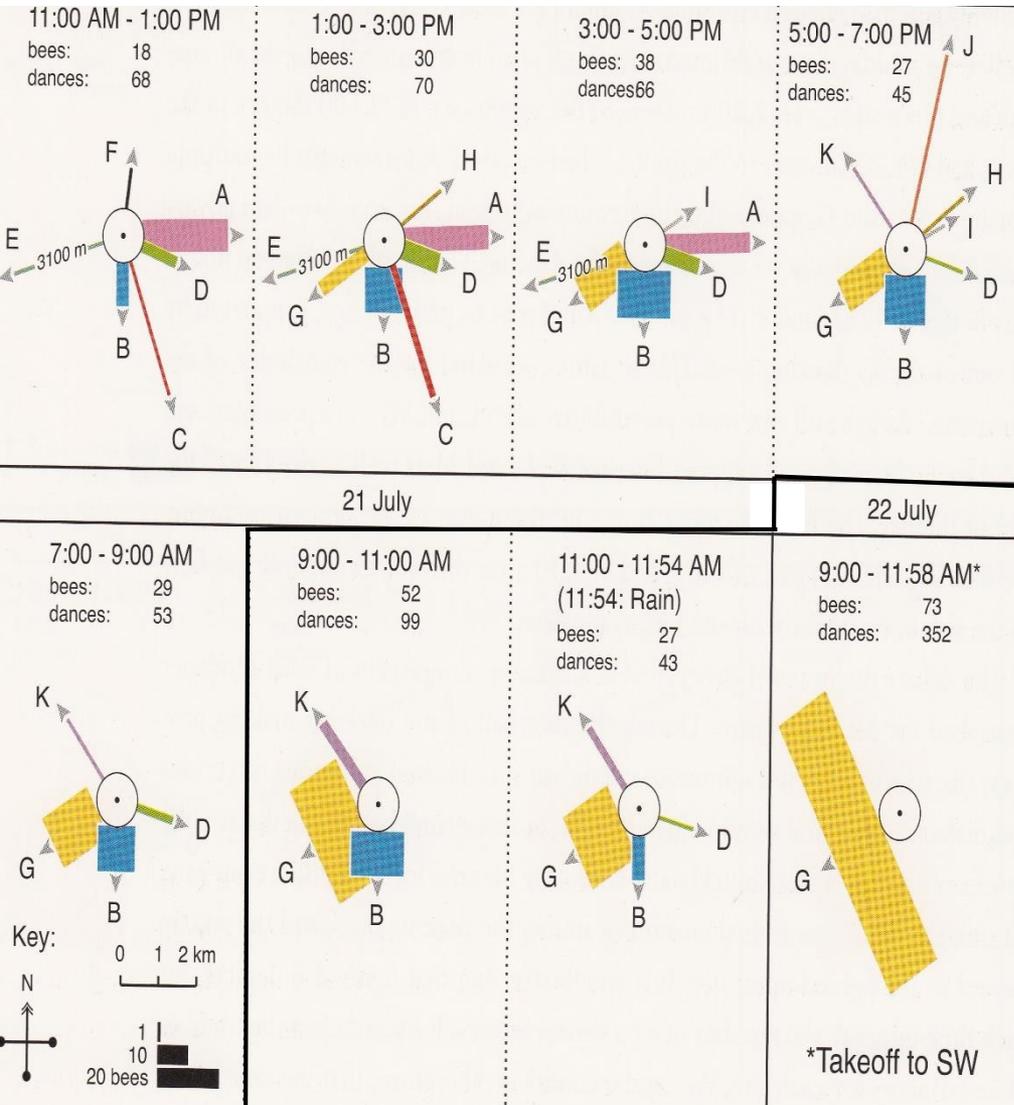
# Interpretiert die rekrutierte Biene die Vektorangabe der Tänzerin als eine Ortsangabe?



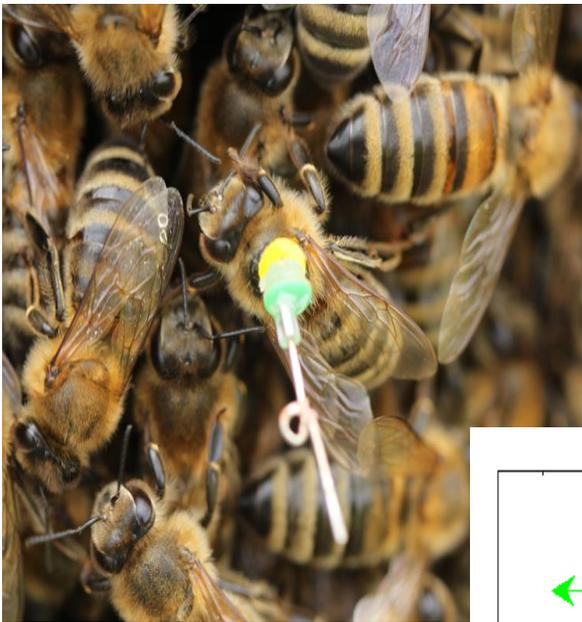
Flugspuren von rekrutierten Bienen  
Starten am Stock, Vektor Komponente



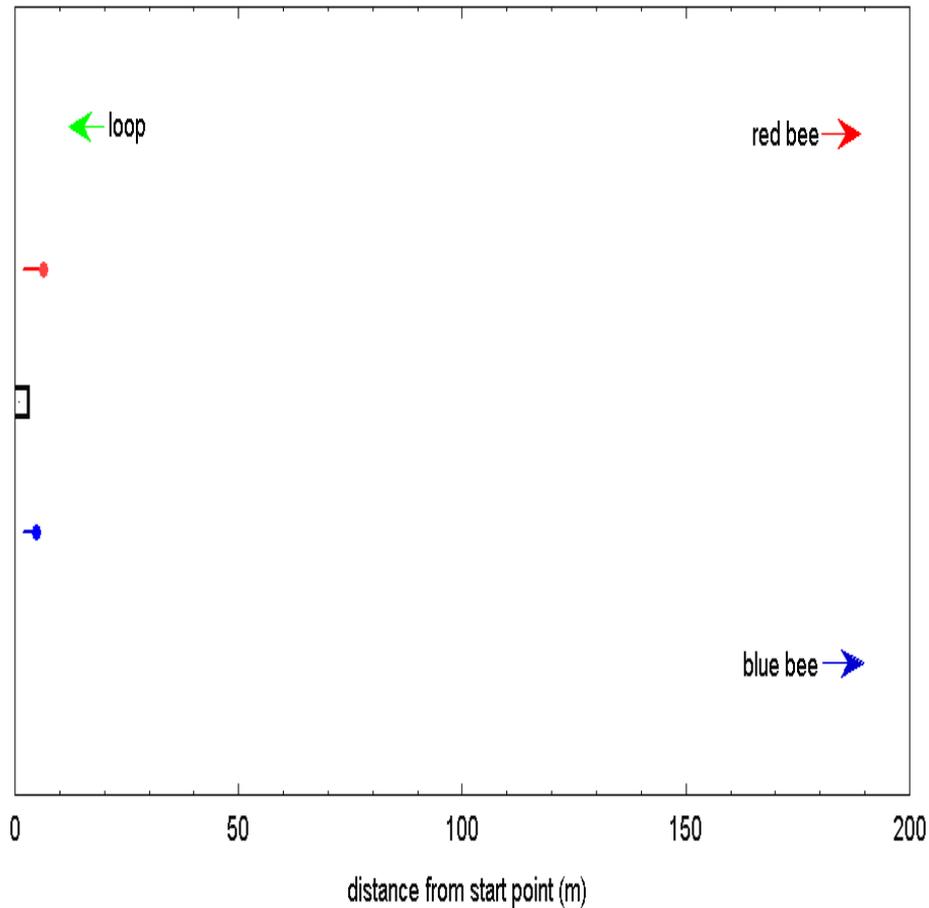
# Kollektive Entscheidungsfindung: Tanzkommunikation in



# Zwei Späher Bienen mit Radar Transpondern ausgestattet



Schwarm  
mit —  
Königin

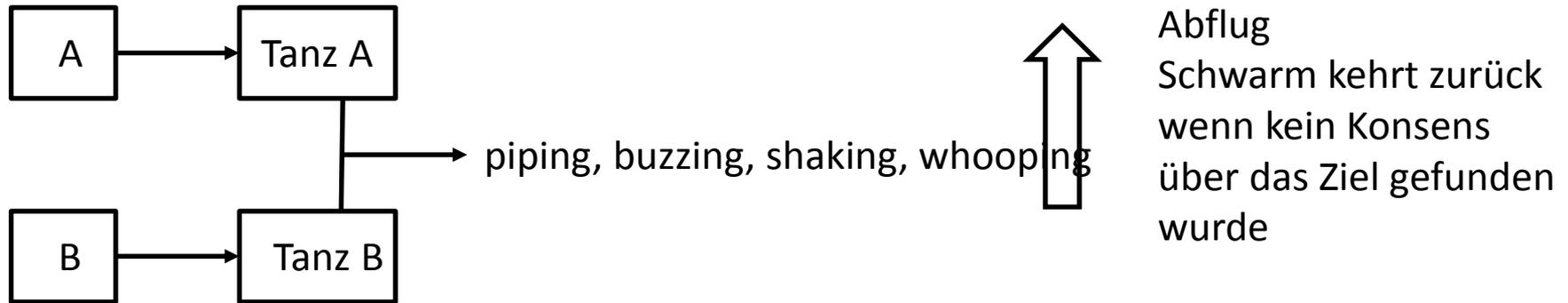




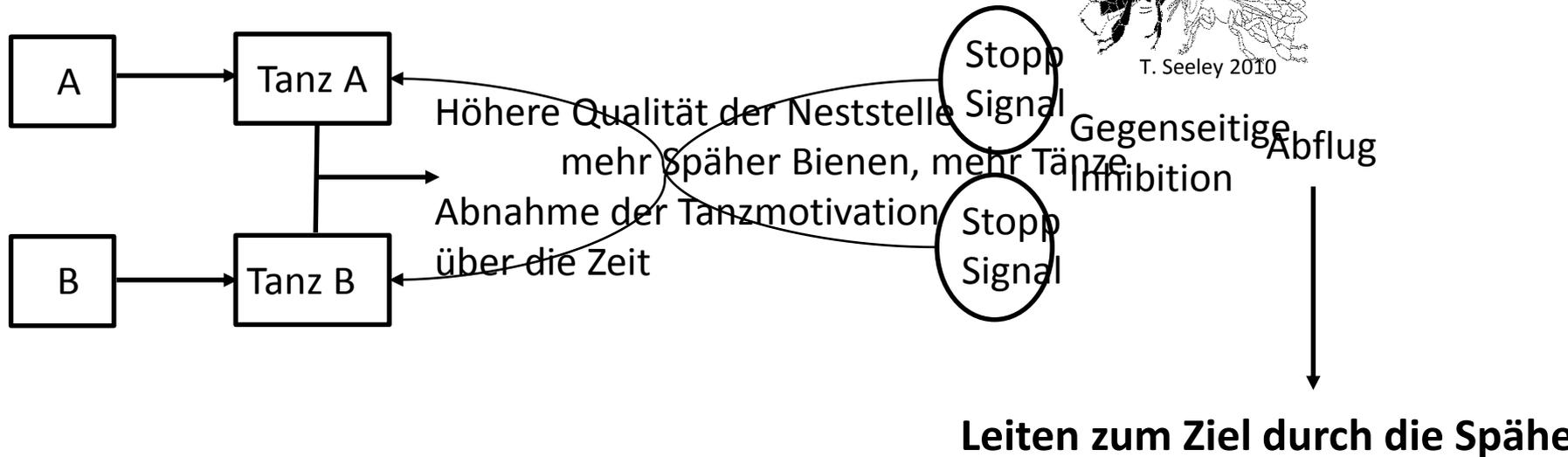
**Schwarm**

# Kollektive Entscheidung im Schwarm

## Entscheidung über den Start: Mehrheitsentscheidung



## Entscheidung über das Ziel: Konsense Bildung



# Pflanzenschutzmittel sind Gehirndrogen für Insekten

## Wo die Neonicotinoide im Insektengehirn wirken



Die komplexesten Verhaltenssteuerungen im Insektengehirn finden in den Pilzkörpern statt. Die Eingänge von den Sinnesorganen und von den vorverarbeitenden Regionen im Gehirn sowie die Verarbeitung innerhalb des Pilzkörpers erfolgt über nikotinische Acetylcholin Rezeptoren.

Neonicotinoide wirken auf diese Gehirnprozesse. Bei höheren Dosen ist dies tödlich, bei sehr niedrigen Dosen stört dies die Gehirnprozesse:

Wahrnehmen, Lernen, Erinnern, Orientieren, Navigieren, Kommunizieren



7g **Thiacloprid** verdünnt auf 50 l ergibt 140 ng/ $\mu$ l

Wenn die Biene 30  $\mu$ l auf gespritzten Blüten sammelt nimmt sie auf einem Sammelflug **420 ng** Thiacloprid auf.

Wir fanden drastische Effekte (Lernen, Gedächtnisbildung, Gedächtnisabruf, Tanz, Navigation) bei **2ng Aufnahme/Flug** (chronisch) und bei **64 ng/Tier** (akut)



**Bereits bei 10 bis 100 facher Verdünnung  
Abnahme der Gedächtnisbildung**

## **Die Intelligenz der Bienen drückt sich aus**

- in der Reichhaltigkeit ihrer Wahrnehmungen
- in der Vielfalt ihrer Bewegungsformen
- in ihrem Lernvermögen, das über einfaches assoziatives Lernen hinausgeht
- in der Komplexität ihrer Gedächtnisformen
- in der symbolischen sozialen Kommunikation über Orte außerhalb ihrer aktuellen Wahrnehmung
- in ihrer Erwartung an Zustände in der Zukunft für bestimmte Entscheidungen
- in ihrem Gedächtnis der Landschaft (kognitive Karte)
- in der Art wie sich ihr Gedächtnis im Schlaf bildet

**Bienen haben daher ihre Form des Planens  
und des Entscheidens aufgrund erwarteter Zustände  
in der Zukunft**

# Navigationsexperimente

Mitarbeiter:  
Uwe Greggers,  
Jaqueline Degen,  
Andreas Kirbach,  
Konstantin Lehmann,  
James Cheeseman  
Marie-Luise Hahn  
Lea Tisson,  
many students



**Finanzielle Unterstützung:**  
Deutsche Forschungsgemeinschaft, Hertie  
Stiftung, Dr. Klaus Tschira Stiftung,  
OLIN Stiftung, Freie Universität Berlin

Ich danke Ihnen für Ihr Interesse und Ihre  
Aufmerksamkeit.