The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Eine Fliege kann einen Geruch verlieren und dennoch zurückkehren. In einer virtuellen Fahne half eine gemerkte Richtung

Fixierte Fruchtfliegen kehrten wiederholt zu einer Duftgrenze zurück, nachdem sie in geruchsfreie Luft gelaufen waren. Verhalten, Modellierung und neuronale Eingriffe stützen eine kompakte Erinnerung an eine Richtung, keine vollständige Karte. Das Ergebnis stammt aus einem kontrollierten Virtual-Reality-Versuch und zeigt noch nicht dieselbe Strategie im freien natürlichen Flug.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo, Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila*, Andrew F. Siliciano, Sun Minni, Chad Morton, Charles K. Dowell, Noelle B. Eghbali, Silas E. Busch, Juliana Y. Rhee, L. F. Abbott and Vanessa Ruta, Nature (2026) · DOI: 10.1038/s41586-026-10827-7

Eine Fliege kann einen Geruch verlieren und sich trotzdem zu ihm zurückdrehen

Die Fliege hatte den Geruch hinter sich gelassen.

Sie lief weiter durch saubere Luft, manchmal Dutzende Sekunden und Hunderte virtuelle Millimeter. Dann drehte sie sich zur überschrittenen Grenze zurück und fand den Duft wieder. In diesem Moment konnte der Geruch selbst nicht den Weg weisen.

Das ist die zentrale Beobachtung einer neuen Nature-Studie zur Navigation von Fruchtfliegen. Die Forschenden argumentieren, dass die Fliegen ein kompaktes Richtungsgedächtnis nutzten: keine Karte der gesamten Duftfahne und keine Erinnerung an die zurückgelegte Entfernung, sondern eine gemerkte Peilrichtung zu einer Grenze, die nicht mehr wahrnehmbar war.

Das Ergebnis ist bemerkenswert, weil es zeigt, wie wenig gespeicherte Information genügen kann. Es lässt sich aber auch leicht übertreiben. Diese Fliegen flogen nicht frei durch eine natürliche Landschaft. Sie liefen fixiert auf einer luftgetragenen Kugel in einer streng kontrollierten virtuellen Welt. Die Studie stützt in dieser Apparatur eine vektorbasierte Strategie; sie zeigt nicht, dass Fliegen mentale Karten anlegen, erklärt nicht jede Form der Geruchsnavigation bei Tieren und identifiziert nicht die Zellen, in denen eine Erinnerung physisch gespeichert wird.

Der unsichtbare Korridor wurde von Software erzeugt

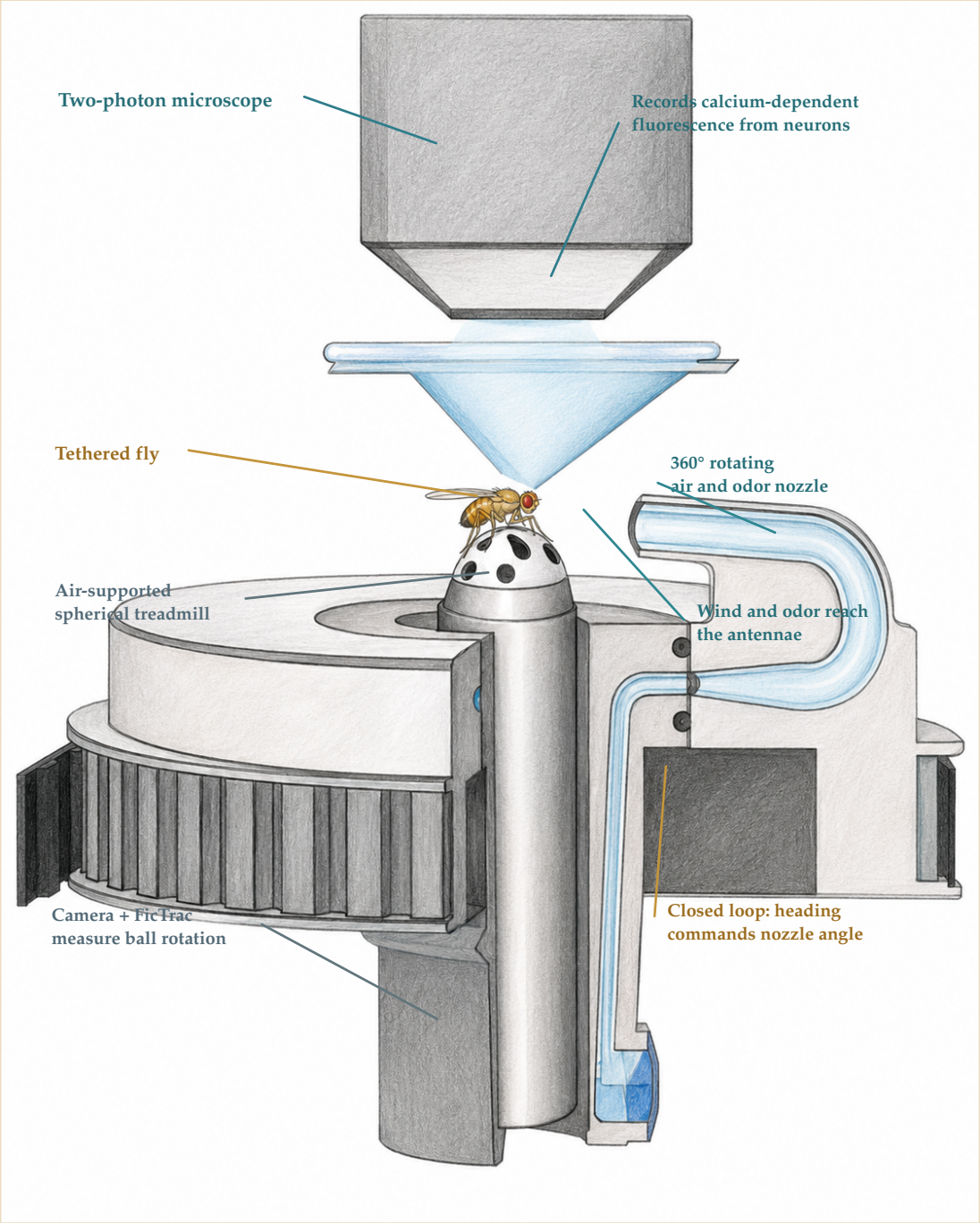
Eine Duftfahne ist der bewegte Bereich eines Geruchs, der von Luft getragen wird. Im Freien biegt sich eine Fahne, zerfällt und verbindet sich neu, wenn sich der Wind ändert. Dadurch ist schwer zu wissen, was ein Tier in jedem Moment genau gerochen hat.

Die Forschenden machten das Problem mit **geschlossener Virtual Reality** kontrollierbar. Der Körper der Fliege war über einer leichten, auf Luft schwebenden Kugel fixiert. Während die Fliege lief, maß eine Kamera ungefähr 60-mal pro Sekunde die Drehung der Kugel. Software übersetzte diese Drehung in eine virtuelle zweidimensionale Position und Ausrichtung.

Diese Ausrichtung steuerte eine motorisierte Düse, die sich um 360 Grad drehen konnte. Änderte die Fliege ihre virtuelle Blickrichtung, bewegte sich die Düse um sie herum, sodass der Wind in der virtuellen Welt der Fliege aus einer stabilen Richtung kam. Gleichzeitig veränderten Massendurchflussregler je nach virtueller Position, wie viel saubere Luft oder Apfelessiggeruch die Antennen erreichte. Das Überqueren einer softwaredefinierten Grenze schaltete den Duft daher ein oder aus und erzeugte einen fiktiven, 50 Millimeter breiten und einen Meter langen Korridor, obwohl die Fliege die Kugel nie verließ.

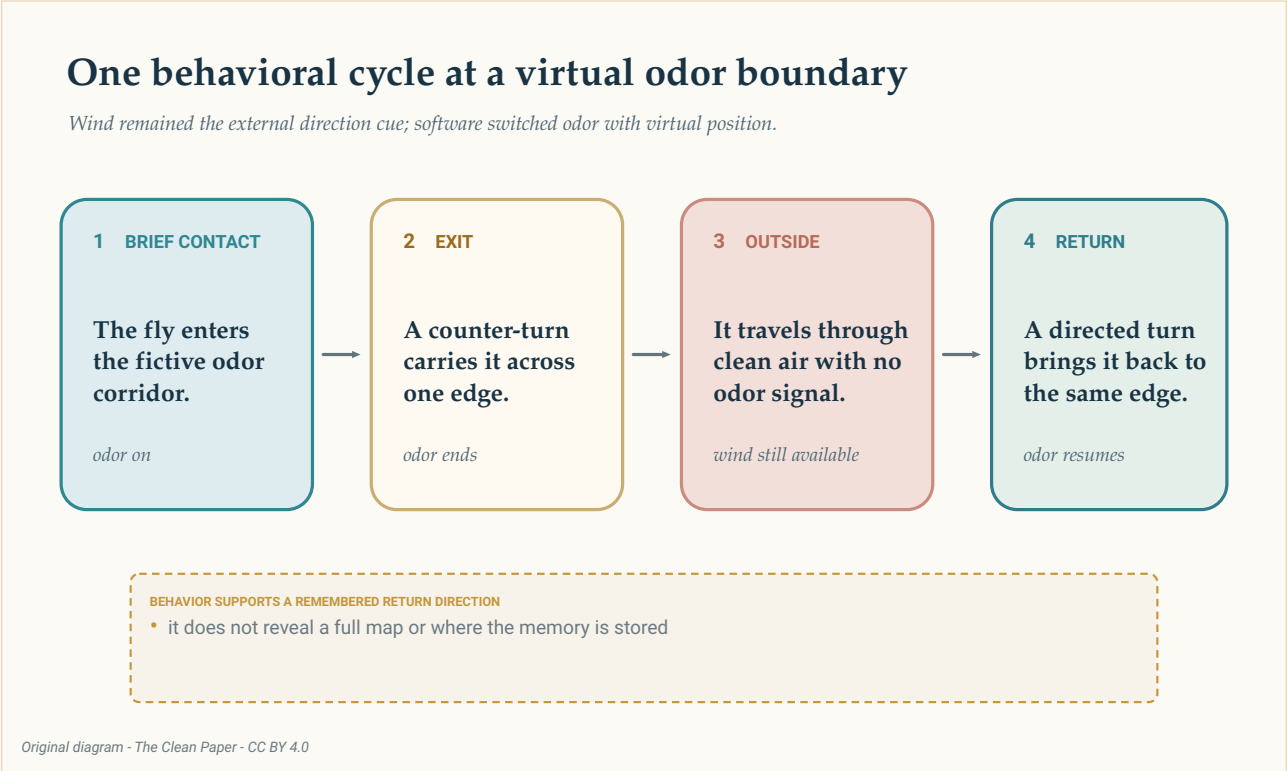
Die Apparatur erzeugte zu jedem Zeitpunkt eine synchronisierte Aufzeichnung der virtuellen Position, Ausrichtung, des Duftzustands und der Luftstromsteuerung. Daraus rekonstruierten die Forschenden Bahnen, markierten jeden Ein- und Austritt und maßen, wie direkt die Fliege zurückkehrte. Der Wind lieferte den äußeren Richtungshinweis; die eigene Bewegung der Fliege

bestimmte, wann sie auf eine der beiden Seiten der virtuellen Duftgrenze traf.



Die Fliege blieb über einer luftgetragenen Kugel fixiert. Eine Kamera und FicTrac wandelten Kugeldrehung in virtuelle Bewegung und Ausrichtung um; die Software drehte anschließend die Luft-und-Duft-Düse und schaltete den Duft je nach virtueller Position. In getrennten neuronalen Bildgebungsversuchen zeichnete das Zwei-Photonen-Mikroskop über der Fliege calciumabhängige Fluoreszenz von EPG- oder FC2-Neuronen auf, sodass neuronale Aktivität mit dem Verhalten in Beziehung gesetzt werden konnte. Das Mikroskop war nicht für jeden Verhaltensversuch erforderlich.

The Clean Paper CC BY 4.0



Im kontrollierten Versuch trat eine Fliege kurz in den virtuellen Duftkorridor ein, verließ ihn, bewegte sich durch geruchsfreie Luft und kehrte gerichtet zurück. Das Verhalten stützt eine erinnerte Rückkehrrichtung; es verrät nicht, wo diese Information gespeichert ist.

The Clean Paper CC BY 4.0

Im zentralen Experiment mit dem **vertikalen Korridor** traten **40 Fliegen** wiederholt in den Duft ein, machten eine Gegenwendung hinaus und kehrten zu derselben Kante zurück. „Vertikal“ ist die Bezeichnung der Arbeit für die 0-Grad-Geometrie: Die Längsachse des Korridors verlief parallel zur Richtung gegen den Wind. Es bedeutet nicht, dass die Apparatur aufrecht stand.

Die Autoren nennen dieses Muster **Kantenverfolgung**. Ein **Bout** ist eine zusammenhängende Episode zwischen Grenzüberquerungen: Ein innerer Bout reicht vom Eintritt bis zum Austritt, ein äußerer Bout vom Austritt bis zur Rückkehr der Fliege. Über 755 innere Bouts hinweg dauerte ein Besuch im Mittel 4,9 Sekunden. Während der Rückkehrbewegungen betrug der mittlere Abstand von der Grenze 10,4 Millimeter. Weniger als 4 % von 793 Bouts überquerten den Korridor vollständig bis zur gegenüberliegenden Kante.

Diese letzten beiden Zahlen beschreiben Bouts, nicht Hunderte unabhängiger Fliegen. Die Unterscheidung ist wichtig, weil ein Tier viele Bouts beitragen kann.

Die Rückkehr war nicht bloß ein fester Reflex gegen den Wind

Mehrere Experimente prüften einfachere Erklärungen.

Zunächst veränderten die Forschenden, was **entlang** des Korridors geschah, während eine Fliege gegen den Wind lief. Der Duft konnte zur virtuellen Quelle hin stärker werden, konstant bleiben oder schwächer werden. Die Fliegen erzeugten in allen drei Fällen ähnliche Bahnen. Eine einfache Regel wie „Geh weiter, wo der Geruch stärker wird“ kann die Kantenverfolgung in dieser Apparatur daher nicht erklären.

Anschließend machten sie die **seitliche** Kante des Korridors zu einem weichen gaußförmigen Profil, in dem sich die Konzentration allmählich statt sprunghaft änderte. Die Fliegen sammelten sich nahe der Flanke, an der sich die Konzentration am schnellsten änderte, nicht im Zentrum mit dem stärksten Geruch. Der relevante Hinweis war daher die seitliche Veränderung, die eine effektive Grenze markierte, und nicht ein notwendiger Anstieg zur Quelle entlang des Korridors.

Das bedeutet nicht, dass Konzentrationsgradienten in der Natur nie wichtig sind. Es bedeutet, dass ein Anstieg in Richtung Quelle für dieses Verhalten unter den getesteten Bedingungen nicht nötig war.

Die Forschenden veränderten außerdem die Ausrichtung des Korridors. Getrennte Gruppen verfolgten vertikale, 45-Grad- und 90-Grad-Korridore, und eine weitere Gruppe traf auf einen Korridor, der nach Austritten seitlich versprang. Die Gruppengrößen betrugen 40, 21, 20 beziehungsweise 24 Fliegen. Ihre äußeren Bahnen änderten sich mit der Geometrie. Eine allgemeine Regel wie „Immer gegen den Wind drehen“ kann diese Flexibilität nicht erklären.

In dieser Anordnung erreichte der Duft beide Antennen innerhalb von ungefähr zwei Millisekunden. Die Kombination beidseitiger optogenetischer Aktivierung mit Wind konnte ein kantenverfolgungsähnliches Muster reproduzieren. **Optogenetik** verwendet lichtempfindliche Proteine, um ausgewählte Zellen zu verändern. Hier legt das Ergebnis nahe, dass für dieses Verhalten kein Links-rechts-Unterschied in der Ankunftszeit des Geruchs nötig war. Es macht den beidseitigen Vergleich bei frei beweglichen Tieren in anderen Fahnen nicht irrelevant.

Ein Vektor ist kleiner als eine Karte

Ein **Vektor** ist eine Richtung zusammen mit einer Größe. Die hier nützliche gespeicherte Größe war vor allem die Richtung: Wohin sollte sich die Fliege drehen, um die Grenze der Duftfahne zu erreichen? Die Studie fand keine Evidenz dafür, dass die Fliege eine vollständige Anordnung der Fahne oder ihre eigene Position darin speicherte.

Zunächst erzeugten die Autoren künstliche Bahnen, indem sie Bestandteile echter Fliegenbewegungen mischten. Sie zogen beobachtete Lauflängen und Drehwinkel zufällig und fügten sie zusammen. Einige dieser synthetischen Läufer trafen schließlich wieder auf die Duftgrenze, wanderten aber weiter und nahmen weniger direkte Wege als echte Fliegen. Selbst das Hinzufügen der gewöhnlichen Tendenz der Fliegen, gegen den Wind zu drehen, reproduzierte die kurzen, gerichteten Rückkehrbewegungen nicht. Das reale Verhalten enthielt daher mehr Richtung als eine zufällige Neumischung derselben Bewegungen.

Als Nächstes bauten die Forschenden ein Modell mit zwei Modi: **die Grenze verlassen** und **zur Grenze**

zurückkehren. Diese Modi waren keine Etiketten für jeden Moment innerhalb oder außerhalb des Dufts. Es waren alternative Steuerungsregeln, zwischen denen während der Bewegung gewechselt werden konnte.

Jede Grenzüberquerung gab dem Modell eine Richtung zum Merken. Beim Austritt aktualisierte es eine Richtung, die während des Entfernens verwendet wurde. Beim Eintritt aktualisierte es eine getrennte Rückkehrrichtung: im Wesentlichen „Als ich die Grenze fand, bewegte ich mich in diese Richtung." Bei einer späteren Rückkehr lenkte diese gemerkte Richtung die simulierte Fliege zurück zur Kante.

Die Forschenden passten das Modell an Bahnen der 0-, 45- und 90-Grad-Korridore an. Im zusammenfassenden Vergleich erzeugten 72 echte Fliegen und 75 Simulationen ähnliche Bahnstatistiken. Wurde die beim Eintritt gelernte Rückkehrrichtung entfernt, wurde die Verfolgung bei allen Korridorausrichtungen weniger effizient. Das stützt den Nutzen einer Erinnerung an die Eintrittsrichtung; es beweist nicht, dass das Gehirn der Fliege buchstäblich die Gleichungen des Modells ausführt.

> **Was bedeutet „Gedächtnis" in dieser Arbeit?**
>
> Die Forschenden lasen keinen gespeicherten Pfeil direkt aus dem Gehirn einer Fliege. „Richtungsgedächtnis" ist eine Schlussfolgerung, die durch Verhalten, ein Modell und neuronale Messungen gestützt wird. Das Modell zeigt, dass wenige veränderliche Richtungen wichtige Bahnstatistiken reproduzieren können. Es beweist nicht, dass die Fliege die Gleichungen wörtlich umsetzt oder dass eine benannte Neuronengruppe der Speicherort ist.

Eine zusätzliche Erfahrung mit einem entgegengesetzt ausgerichteten 45-Grad-Abschnitt verschob das spätere Verhalten von 10 Fliegen, zusammen mit 29 Modellsimulationen. Das macht die Richtungsdeutung spezifischer als eine nachträgliche Beschreibung, bleibt aber eine modellbasierte Interpretation.

Eine Richtungsreferenz und ein aktuelles Ziel

Als Nächstes maß und störte die Studie die Aktivität im **Zentralkomplex** der Fliege, einer an der Navigation beteiligten Gehirnregion.

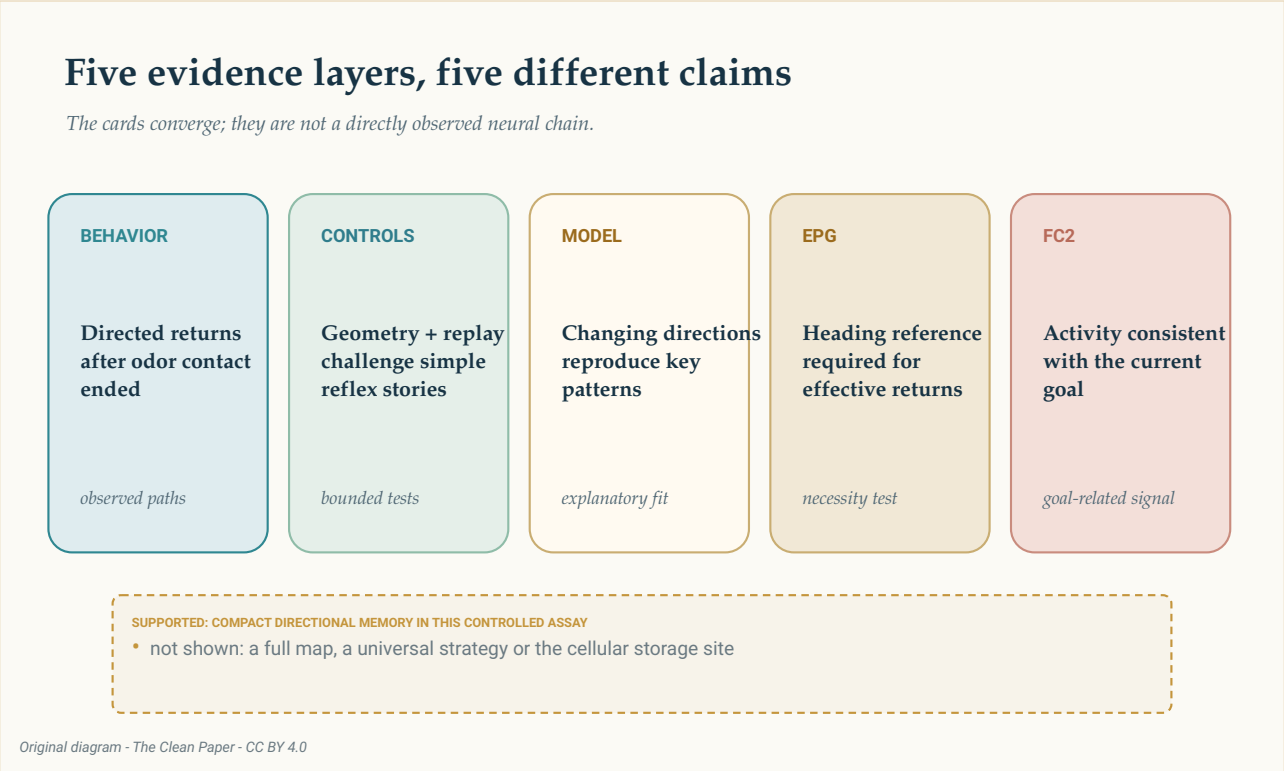
> **Zwei Signale mit unterschiedlichen Aufgaben**
>
> EPG und FC2 sind Bezeichnungen für zwei Neuronenpopulationen im Zentralkomplex. EPG-Aktivität wirkt wie eine Kompassanzeige: Sie verfolgt die Richtung, in die die Fliege relativ zum Wind gerade blickt. FC2-Aktivität ist mit der Richtung verbunden, in die die Fliege zu gelangen versucht. Ein nachgeschalteter Steuerungsschaltkreis kann die aktuelle Ausrichtung mit diesem Ziel vergleichen. Die Studie untersucht beide Populationen, zeigt aber nicht, dass eine von ihnen allein die gesamte Erinnerung speichert.

EPG-Neuronen tragen ein Richtungssignal: Ihr Aktivitätsmuster verfolgt die Blickrichtung der Fliege relativ zu einem äußeren Hinweis. Mithilfe von Calcium-Bildgebung, einem indirekten optischen Maß neuronaler Aktivität, fanden die Forschenden, dass die Phase der EPG-Aktivität während der Kantenverfolgung der Ausrichtung relativ zum Wind folgte. Diese Analyse verwendete 16 Versuche von 9 Fliegen.

Um EPG-Neuronen zu hemmen, veränderten die Forschenden sie so, dass sie **GtACR1** exprimierten, einen durch grünes Licht aktivierten Anionenkanal. Eine LED blieb während des gesamten Testversuchs eingeschaltet, aktivierte den Kanal und unterdrückte die ausgewählten Neuronen; dieselbe Beleuchtung beeinträchtigte genetische Kontrollfliegen nicht.

Wurden EPG-Neuronen auf diese Weise gehemmt, machten 12 Versuchsfliegen weniger wirksame gerichtete Rückkehrbewegungen als 6 genetische Kontrollfliegen. Die begrenzte Schlussfolgerung lautet, dass die von der EPG-Aktivität getragene Richtungsreferenz unter den getesteten Bedingungen für wirksame Kantenverfolgung nötig war. Dies ist kein Beleg dafür, dass EPG-Neuronen allein die Grenzrichtung speicherten.

FC2-Neuronen zeigten eine andere Beziehung. Ihre Populationsaktivität war mit dem aktuellen Navigationsziel verbunden und wies im Versuch vor Drehungen zur Grenze der Duftfahne. Die Bildgebung verwendete 6 Fliegen; für Vergleiche nach Stilllegung wurden je nach Analyse Gruppen von 9 bis 14 Fliegen eingesetzt. Die Stilllegung beeinträchtigte die Kantenverfolgung.



Verhalten, veränderte Fahnengeometrie, ein angepasstes Modell und zwei neuronale Eingriffe stützen unterschiedliche Teile der Erklärung durch Richtungsgedächtnis. Zusammen stützen sie eine kompakte Zielrichtung in diesem kontrollierten Versuch, keine vollständige Karte und keinen nachgewiesenen zellulären Speicherort.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dies ist zusammenlaufende Evidenz, keine fotografierte Kausalkette. EPG-Aktivität lieferte eine erforderliche Richtungsreferenz. FC2-Aktivität war mit einer Zielrichtung vereinbar und für wirksames Verhalten nötig. Die Experimente lokalisierten kein einzelnes Gedächtnis-„Engramm“ und bewiesen nicht, dass FC2-Synapsen die Richtung physisch speicherten.

Als grobe Analogie im menschlichen Maßstab: Stellen Sie sich vor, Sie treten aus einer schmalen Nebelbank, während ein gleichmäßiger Wind weiterhin anzeigt, wo Norden liegt. Ein Kompass kann sagen, wohin Sie gerade blicken, doch zur Rückkehr in den Nebel brauchen Sie zusätzlich eine gemerkte Peilung zu seiner Kante. Der Vergleich der aktuellen Ausrichtung mit dieser gewünschten Peilung zeigt, in welche Richtung Sie sich drehen müssen. Eine solche Arbeitsteilung wird hier für EPG- und FC2-Signale vorgeschlagen. Es ist eine erklärende Analogie, kein Beleg dafür, dass Menschen dieselben Zellen oder denselben Algorithmus verwenden.

Das Gedächtnis hing von Handlung ab, nicht nur vom zeitlichen Duftmuster

In einem Wiedergabeexperiment erhielten die Fliegen dieselbe zeitliche Folge von Duftreizen wie zuvor, doch das Timing war von ihrem aktuellen Verhalten entkoppelt. Die gelernte Richtungsverzerrung wurde über die Wiedergabe-Bouts schwächer. Das stützt eine **operante**, handlungsgebundene Aktualisierung: Entscheidend war nicht nur die passive Exposition gegenüber einer Duftfolge, sondern die Beziehung zwischen Duft und Bewegung der Fliege.

Der Nenner ändert sich zwischen diesen Analysen. Extended-Data-Felder umfassen je nach Vergleich 8 oder 9 Fliegen; die Reihe aufeinanderfolgender Bouts verwendet 8 Fliegen; Bahndarstellungen verlangen mindestens 10 wirksame Eintritte; und die zugehörigen Modellfelder verwenden 21 simulierte Bahnen, die ebenfalls diese Eintrittsschwelle erfüllen. Das ist keine einzige zusammengefasste Stichprobe von acht.

Eine unregelmäßigere Duftfahne war nützlich, blieb aber virtuell

Die Forschenden spielten außerdem eine zuvor aufgezeichnete, unregelmäßigere Fahne ab. Sie skalierten sie räumlich und zeitlich um den Faktor fünf, damit fixierte Fliegen ihr häufig genug begegnen konnten. **Zehn von zwölf Fliegen** gelangten bis auf 50 virtuelle Millimeter an ihre Quelle heran.

Das sind nicht zehn Fliegen, die eine reale Quelle in freier Luft finden. Es ist Leistung in einer kontrollierten Wiedergabe einer naturnahen Fahne.

Für jeden Typ dynamischer Fahne erzeugte das Modell 2.000 Bahnen. Der Vergleich der skalierten Fahne analysierte 1.850 dieser 2.000, nachdem ein wirksamer Eintritt verlangt und Bahnen ausgeschlossen worden waren, die zu nahe an der Quelle begannen. Das Gedächtnis half stärker nahe der Quelle, wo aufeinanderfolgende Begegnungen kohärente Richtungsstruktur behielten, und weniger im turbulenteren Bereich weiter gegen den Wind.

Die Einschränkung ist Teil des Ergebnisses. Eine kompakte Richtung kann nur helfen, wenn die Welt kohärent genug bleibt, dass eine frühere Begegnung etwas Nützliches über die nächste aussagt.

Was die Studie nicht zeigt

- Sie zeigt **nicht**, dass eine Fliege eine vollständige räumliche Karte anlegt.
- Sie zeigt **nicht** freien Flug durch eine unveränderte natürliche Duftfahne.
- Sie belegt **nicht**, dass jede geruchsgeleitete Navigation diese Strategie nutzt.
- Sie zeigt **nicht**, dass EPG- oder FC2-Neuronen der ausschließliche physische Speicherort der Erinnerung sind.
- Sie macht aus dem angepassten Modell **nicht** den wörtlichen biologischen Algorithmus der Fliege.
- Sie lässt sich **nicht** direkt auf menschliche Navigation übertragen.

Die Studie ist dort am stärksten, wo sie am spezifischsten ist. Die geschlossene Regelung gab den Forschenden präzisen Zugriff auf jede Duftbegegnung. Änderungen der Geometrie, Wiedergabe, Modellierung, Calcium-Bildgebung und Stilllegung prüften anschließend verschiedene Teile einer gemeinsamen Erklärung. Verhaltens-, Bildgebungs- und Stilllegungskohorten waren jedoch getrennt; Stichprobengrößen wurden nicht im Voraus festgelegt; Datenerhebung und Analyse waren weder randomisiert noch verblindet; und weniger als 10 % der fixierten Fliegen wurden wegen Akklimatisierungs-, Reaktions- oder Trackingproblemen ausgeschlossen.

Diese Grenzen löschen das Phänomen nicht aus. Sie definieren es.

Kurz zusammengefasst

Fixierte Fruchtfliegen, die durch einen virtuellen Duftkorridor liefen, kehrten wiederholt zu einer Grenze zurück, nachdem sie den Geruch hinter sich gelassen hatten. Änderungen von Konzentration und Korridorgeometrie, ein angepasstes Umschaltmodell, neuronale Bildgebung und optogenetische Stilllegung stützen eine Erklärung, nach der die Fliege eine kompakte gemerkte Richtung statt einer vollständigen Karte nutzt. EPG-Neuronen lieferten eine erforderliche Richtungsreferenz, während FC2-Aktivität mit der aktuellen Zielrichtung vereinbar war. Das Ergebnis ist auf einen kontrollierten Laufversuch begrenzt; es identifiziert weder den zellulären Speicherort des Gedächtnisses noch zeigt es dieselbe Berechnung im freien natürlichen Flug.

Nüchtern geprüft

Was die Arbeit zeigt: In einem fixierten Versuch mit geschlossener Regelung machten Fliegen gerichtete Rückkehrbewegungen zu virtuellen Duftgrenzen, die sie nicht mehr wahrnehmen konnten. Mehrere Verhaltenskontrollen, Modellierung und neuronale Eingriffe stützen eine vektorbasierte Strategie.

Was erschlossen wird: Dass das Verhalten ein kompaktes Richtungsgedächtnis nutzt und dass die Aktivität der FC2-Population ein aktuelles Navigationsziel darstellt. Der Gedächtnisinhalt wurde nicht direkt ausgelesen.

Was sie nicht zeigt: Eine vollständige mentale Karte, eine universelle Geruchsstrategie, Leistung im freien Flug in einer natürlichen Fahne, einen einzelnen Gedächtnisspeicherort oder ein menschliches Gegenstück.

Wichtigste Einschränkungen: Eine Art und eine kontrollierte Apparatur; unterschiedliche Fliegenkohorten und Analyseeinheiten zwischen Experimenten; indirekte Calciumsignale; Notwendigkeitstests, die keine Hinreichendheit beweisen; und eine naturnahe Fahne, die wiedergegeben und skaliert wurde.

Wie viel Vertrauen sollte ein allgemeines Publikum haben? Hohes Vertrauen darin, dass das Phänomen der gerichteten Rückkehr in dieser Apparatur real ist und dass richtungs- und zielbezogene Aktivität im Zentralkomplex wichtig ist. Mittleres Vertrauen in das Modell als kompakte Erklärung. Geringes Vertrauen in jede Behauptung, die es unverändert auf den freien Luftraum überträgt oder als vollständige Karte bezeichnet.

Quellen

Siliciano et al., A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila, Nature (2026)
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10827-7

Siliciano et al., data archive for A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila
https://doi.org/10.5281/zenodo.20751812

Ruta Laboratory, Edge-Tracking-Model
https://github.com/rutalaboratory/Edge-Tracking-Model