

Wege zum Minigehirn

Viele nur millimetergroße Tiere zeigen ein überraschend komplexes, vielfältiges Verhalten. Die Leistungsfähigkeit ihrer winzigen Gehirne ist das Produkt einer langen evolutionären Optimierung. Dabei schreckten manche Arten nicht einmal davor zurück, die Zellkerne aus ihren Neuronen hinauszuwerfen.

Von William G. Eberhard, William T. Wcislo und Adelheid Stahnke

Je kleiner eine Art, umso größer ist das Gehirn im Verhältnis zum Körper. Diesem Prinzip gehorchen sogar noch die winzigsten Insekten und Spinnen. Der Schweizer Arzt und Naturforscher Albrecht von Haller (1708–1777) beobachtete die später nach ihm benannte Regel allerdings bei den Wirbeltieren. Er bemerkte aber auch schon, dass die Größenbeziehung nur innerhalb einzelner Tierklassen oder näher verwandter Arten zutrifft, also innerhalb von taxonomischen Einheiten.

Denn zwei gleich große Organismen aus ganz verschiedenen Tiergruppen müssen durchaus nicht gleich große Gehirne besitzen. Jedes Taxon richtet sich gewissermaßen nach einem eigenen Grundwert. Für die zusammengehörigen Arten ergibt sich dann aus den Relationen zwischen Körper- und Hirngröße jeweils eine »allometrische« Gerade. Diese Linien für die verschiedenen Gruppen liegen zueinander versetzt (siehe Bild S. 26): manche sind gegen andere mehr nach links beziehungsweise nach rechts verschoben.

Bisher haben Biologen für die hallersche Regel keine wirklich zufrieden stellenden Erklärungen gefunden – also dafür, dass die Hirngröße relativ zunimmt, wenn Tiere schrumpfen. Noch weniger verstehen sie das Phänomen der vonein-

ander abweichenden allometrischen Linien im Tierreich. Wieso konnten so viele Evolutionslinien der wirbellosen Tiere deutlich kleinere Gehirne erfinden, als es ihrer Herkunft entsprach? Neuere Studien an ihnen haben manche früheren Auffassungen widerlegt – und zugleich neue Fragen aufgeworfen.

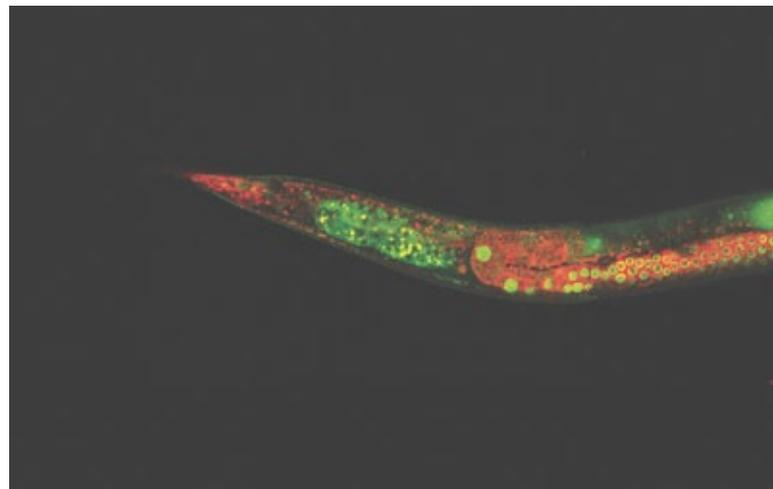
Diese Untersuchungen wecken den Verdacht, dass die unterschiedlichen Zentralnervensysteme des Tierreichs in mancher Hinsicht weniger gleichartig funktionieren als bisher geglaubt. Winzlinge mit einem relativen Riesenhirn sind schon aus energetischen Gründen anderen Zwängen ausgesetzt als größere Arten. Deswegen müssen sie Kompromisse schließen und Einsparungen machen oder auch neue Wege finden – nur wo und wie und mit welchen Folgen für Lebensweise und Verhalten?

Die meisten Forscher haben sich bisher eher von der Faszination leiten lassen, die von der Größenzunahme von Gehirnen in der Evolution ausgeht – vor allem natürlich, weil sie sich für die Entwicklung von Intelligenz und anderen geistigen Leistungen interessieren. Umgekehrte Prozesse fanden kaum Beachtung. Doch auch millimeterkleine Zwerge unter den Würmern oder Gliederfüßern finden sich in ih-

AUF EINEN BLICK

IM REICH DER ALLERKLEINSTEN

- 1 Sehr kleine Tiere haben auch **winzige Gehirne**. Trotzdem erbringen sie teils erstaunliche **Verhaltensleistungen**.
- 2 Besondere Anpassungen ermöglichen dies: Mikroskopisch kleine parasitische Wespen etwa lassen ihr **Hirn schrumpfen**, indem sie die Kerne der meisten ihrer wenigen Nervenzellen hinauswerfen. Andere Tiere verzichten auf einige Muskeln oder verkleinern Organe – so dass das Hirn im Körper Platz findet.
- 3 Die **Leistungsfähigkeit** von Minigehirnen mit vergleichsweise wenigen Neuronen haben Forscher bisher unterschätzt. Sogar Fadenwürmer mit ihren gerade einmal 302 Neuronen können lernen. Millimetergroße Spinnen bauen ebenso exakte Netze wie viel größere Verwandte.



rer Umwelt zurecht, äußern vielseitiges, durchaus flexibles Verhalten und pflanzen sich erfolgreich fort. Sogar manche nur staubkorngroßen Jugendstadien leben selbstständig.

Zunächst: Wie bringt ein kleiner Körper ein vergleichsweise großes Gehirn überhaupt unter? In Extremfällen macht die Hirnmasse annähernd 16 Prozent der Körpermasse aus. Bei Wirbeltieren liegt das Gehirn in der Schädelkapsel. Sehr kleine Salamander oder Fische geben ihm mehr Raum, indem sie einige der entsprechenden Knochen verkleinern oder ganz weggelassen haben. Insekten und Spinnen kapseln das Gehirn nicht ein, besitzen aber ein festes Außenskelett. Bei winzigen

erwachsenen Spinnen sowie den noch sehr kleinen Jungspinnen größerer Arten erstreckt sich die Hirnmasse oft bis weit in den dann deutlich ausgebuchteten Brustbereich. Mitunter, wie auch bei einigen Milben, reicht sie sogar bis in die Beine. Es gibt staubkorngroße Jungspinnen, deren Kopfbruststück zu 80 Prozent von Hirn ausgefüllt ist. Auch einige kleine Käfer verlagern ihr Gehirn teilweise, manche sogar ganz, aus dem Kopf in den Brustraum oder selbst in den Hinterleib. Bei manchen anderen winzigen Insekten schmiegt es sich in seiner Form eng an Muskeln und andere Strukturen an.

Zwangsläufig schränken solche Verhältnisse den Platz für die übrigen Organe ein. So weist ein kleiner Faulholzkäfer der Gattung *Sericoderus* in Kopf und Brust weniger Muskeln auf als größere verwandte Arten, und junge Springspinnen der Art *Phidippus clarus* besitzen einen geschrumpften Verdauungstrakt. Vermutlich haben solche Anpassungen, die das Überleben erschweren, Grenzen – und damit auch die Miniaturisierung von Tieren.

Ein Ausweg wäre, das Gehirn selbst zu verkleinern: etwa durch weniger oder kleinere Nervenzellen oder weniger beziehungsweise kürzere Verbindungen für neuronale Verschaltungen. Nach bisherigem Wissen besitzen die Winzlin-

ge eines Taxons gewöhnlich weniger Neurone als die größeren Arten. Dass sie die Zellen verkleinern, tritt offenbar nur begrenzt auf. Beliebig lassen sich Nervenzellen ohnehin nicht schrumpfen. Axone – die langen Ausläufer, über die Nervenzellen Signale aussenden – dürfen wohl nicht dünner als ungefähr 0,1 Mikrometer (tausendstel Millimeter) sein. Die Signale würden sonst im »Rauschen« der sie weiterleitenden Membranen verschwimmen (siehe auch SdW 5/2012, S. 26).

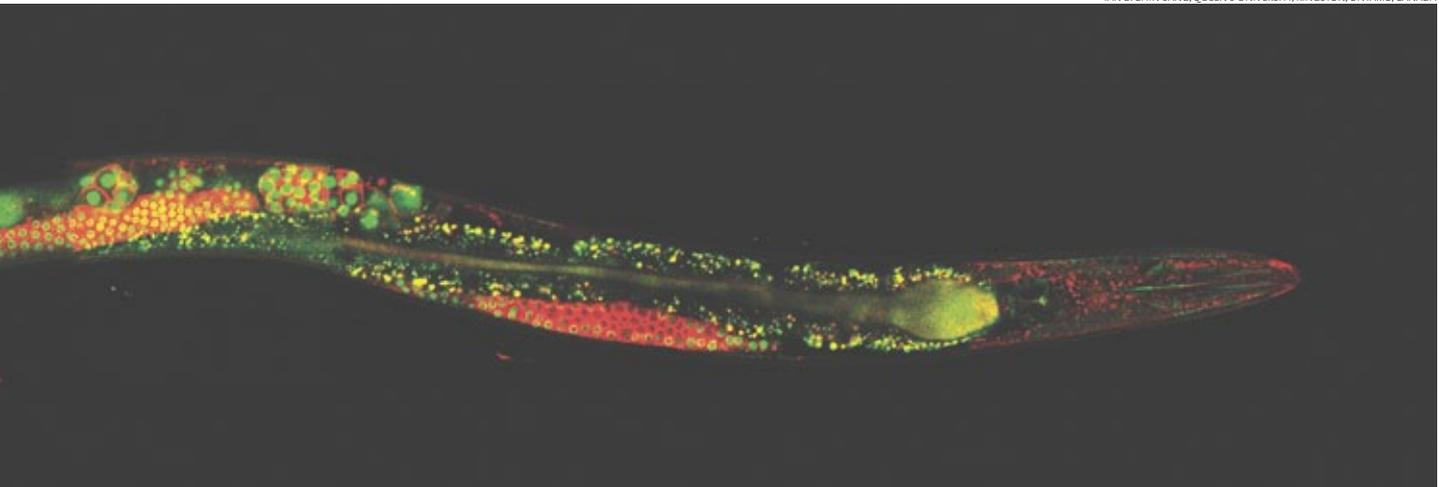
»Bei winzigen Spinnen erstreckt sich die Hirnmasse oft in den Brustbereich oder sogar bis in die Beine«

Die unterste Größe eines Nervenzellkörpers gibt der Zellkern vor, dessen Mindestmaße wiederum von der Genomgröße abhängen. Bei den winzigsten Insekten

kann der Kern bis zu 90 Prozent des Zellkörpers einnehmen. Bis vor Kurzem wusste jedoch niemand, ob manche Wirbellose zur Platzersparnis die Erbmasse dichter packen beziehungsweise auf einige Chromosomen, ja sogar den Zellkern selbst verzichten. Doch Letzteres entdeckte kürzlich Alexy Polilov von der Lomonossow-Universität Moskau bei parasitischen Wespen der Gattung *Megaphragma*: Diese kaum 0,2 Millimeter langen Insekten haben als erwachsene Tiere fast nur noch kernlose Neurone. Im Zentralnervensystem ihrer Puppen zählte der russische Forscher noch rund 7400 Zellkerne, aber die meisten davon lösen sich kurz vor dem Schlupf auf. Der erwachsenen Wespe bleiben insgesamt nur etwa 350 Neurone mit Zellkern, davon liegen bis zu zwei Drittel im Gehirn. Die übrigen rund 7000 Neurone arbeiten ohne Kern. Das Hirnvolumen schrumpft dadurch auf fast die Hälfte.

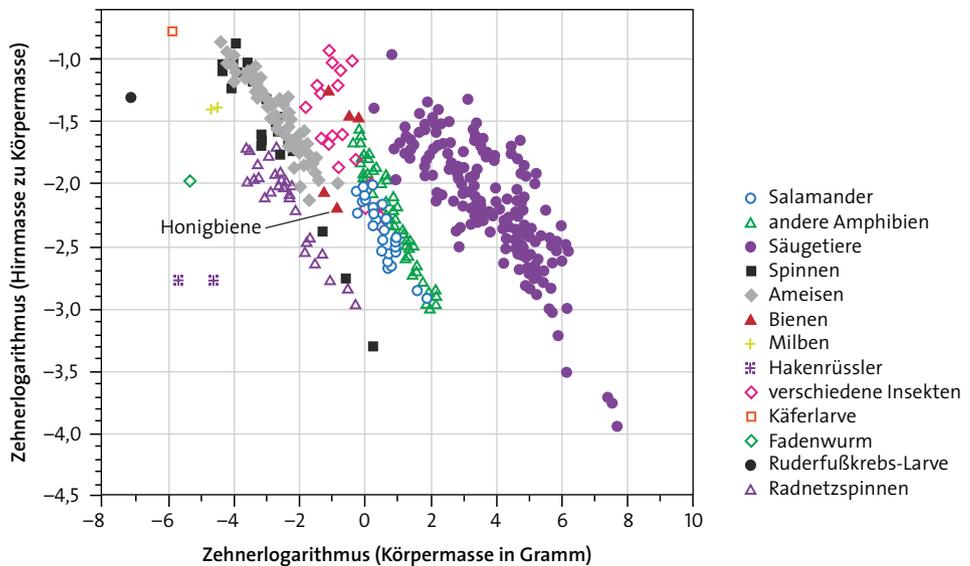
Der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* ist gerade einmal rund einen Millimeter lang, besitzt nur 302 Nervenzellen und beherrscht doch ein vielseitiges Verhaltensrepertoire. Auf dieser Fluoreszenzaufnahme liegt der Kopf des Wurms rechts.

IAN D. CHIN-SANG, QUEEN'S UNIVERSITY, KINGSTON, ONTARIO, CANADA



Hirngröße folgt eigenen Regeln

Kleinere Tiere haben verhältnismäßig große Gehirne, größere Tiere relativ kleine. Außerdem richten sich die einzelnen Tiergruppen aber nach eigenen Grundbeziehungen aus. Hieraus ergeben sich für die verschiedenen Taxa getrennte allometrische Geraden. Bei der hier gewählten Darstellungsweise liegen sie zueinander nach links beziehungsweise rechts versetzt.



AMERICAN SCIENTIST, NACH STRIEDER, G.F.: PRINCIPLES OF BRAIN EVOLUTION 2005, UND AUS QUELLEN IN EBERHARD, W.G., WCISLO, W.T.: GRADE CHANGES IN BRAIN-BODY ALLOMETRY. IN: ADVANCES IN INSECT PHYSIOLOGY 40, S. 155–214, 2011

Ohnehin sind 7000 Neurone für ein Insekt sehr wenig. Stubenfliegen besitzen 340 000 Stück, und eine etwas größere verwandte Art der genannten Wespen trägt allein im Oberschlundganglion, einem wesentlichen Hirnteil, 37 000 Zellen. Die Zwergwespe scheint ihre karge Ausstattung allerdings nicht anzufechten. Zwar wissen wir noch nicht, mit welchen besonderen Mechanismen diese Miniwespen den Mangel wettmachen, aber sie weisen alles wesentliche Verhalten auf: zum Beispiel herumfliegen, sich paaren oder passende Wirte für die Eiablage finden.

Nervengewebe sind energetisch gesehen Spritfresser. Das Gehirn des Menschen, nur gut zwei Prozent seiner Körpermasse, beansprucht über 15 Prozent der vom Grundstoffwechsel bereitgestellten Energie. Kleinere Gehirne sind sogar pro Volumen für gleiche Leistungen noch aufwändiger zu unterhalten als größere, weil die Informationsverarbeitung verdichtet abläuft. Vermutlich existiert deswegen für kleine Arten sowie die kleineren Arten innerhalb einer Tiergruppe ein höherer Selektionsdruck auf Energieeffizienz neuronaler Leistungen.

Um Energie einzusparen, könnten Winzlinge ihre Hirnmasse schrumpfen, indem sie ihre Verhaltenskapazitäten einschränken. So ein Verzicht wäre nicht erforderlich, wenn die Tiere stattdessen den Aufbau ihres Nervensystems ökonomisierten. In der Realität dürfte beides ineinandergreifen.

Für mehr Ökonomie im Energiebedarf bestehen im Prinzip eine Menge Möglichkeiten. Wie häufig winzige wirbellose Tiere einzelne dieser Wege nutzen, wissen wir aber noch nicht. Offensichtlich verlagern Wirbellose aber generell mehr von der Informationsverarbeitung auf ihre Sinnesorgane als Wirbeltiere, so dass sie damit bereits Hirnmasse einsparen, ganz abgesehen davon, dass diese Sinnesorgane Reize von vornherein sehr spezifisch filtern.

Ausgeklügelte architektonische Sparmaßnahmen im Nervensystem verwenden vor allem die Fadenwürmer (Nematoden), denen nur eine sehr kleine, streng abgezählte Anzahl von Zellen zur Verfügung steht. Sie können zum Beispiel über einen einzigen Nervenzellkontakt gleichzeitig mehrere Muskeln aktivieren. Und sie verstehen sich darauf, ein und dieselbe Nervenzelle für mehrere Aufgaben einzusetzen: Dann vermag dasselbe Neuron sowohl Sinnesinformationen zu empfangen als auch Befehle an die Muskulatur zu geben. Strukturell geradezu vorbildlich sind bei ihnen die »Verbindungskabel«, also die Nervenzellausläufer, möglichst kurz ausgelegt (siehe Bild rechte Seite).

Keine lange Leitung im Gehirn

Allgemein ist die Signalübermittlung über ganz kurze Distanzen kostengünstiger als die über lange Leitungen, schon weil sie physiologisch anders ablaufen kann. Diesen Effekt dürften viele Winzlinge noch zusätzlich ausreizen, indem sie zwecks kürzerer Wege Neurone und deren Schaltstellen verlagern. Oft kommen kleinere Hirne zudem mit weniger zwischengeschalteten Neuronen aus, die Informationen von einer Stelle zur anderen übermitteln, etwa vom Ort des Sinneseingangs zu einer Befehlszentrale. Oder ganze Schaltkreise erfüllen zu verschiedenen Zeiten andere Zwecke, je nachdem, welches chemische Milieu an Signalstoffen dort aktuell herrscht. Dass im Zentralnervensystem winziger Insekten Nervenknotten (Ganglien) mehr verschmelzen als bei größeren Arten und ihre Gehirne weniger gegliedert wirken, mag gleichfalls eine Effizienzmaßnahme sein.

Schon dem spanischen Mediziner und Histologen Santiago Ramón y Cajal (1852–1934) war aufgefallen, wie viel kunstvoller ein Insektengehirn wirkt, wie viel klarer und stärker strukturiert die Zellen und ihre Verbindungen unter dem Mi-

kroskop erscheinen im Vergleich zu den Gehirnen von Wirbeltieren mit ihren unübersichtlich vielen Zellen, Zellausläufern und dicken Verbindungssträngen. Der Spanier war ein Pionier der Neuronenlehre (der Einsicht, dass das Nervensystem aus einzelnen Zellen und deren Fortsätzen besteht) und erhielt mit anderen zusammen 1906 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Die Neuroanatomie von Insekten verglich er mit der Feinmechanik von Taschenuhren, die von Wirbeltieren hingegen mit dem eher grobschlächtigen Innenleben alter Standuhren. Tatsächlich haben zumindest bei manchen Wirbellosen die kleineren Neurone auch kürzere Empfängerantennen (Dendriten) und sind wohl gleichfalls weniger komplex und damit übersichtlicher gestaltet. Was solche Unterschiede funktionell besagen, ist noch nicht wirklich klar. Vermutlich weisen sie aber auf wesentliche Eigenschaften hin, in denen sich die verschiedenen Nervensysteme im Tierreich voneinander abheben.

Darüber, ob manche Winzlinge ihr Verhalten zwecks Energieeinsparung einschränken, wissen wir noch recht wenig. Es könnte sich lohnen, zu untersuchen, ob sie beispielsweise Aktionen stärker in getrennte, einfache Verhaltensschritte untergliedern, die nacheinander ablaufen und aufeinander aufbauen, ähnlich wie Ingenieure Roboter programmieren: Die komplexe Aufgabe, ein irgendwo im Raum befindliches Objekt zu greifen, ist leichter umsetzbar, wenn sich die Maschine zunächst in dessen Richtung wendet, sich ihm dann bis auf einen bestimmten Abstand nähert – und erst im letzten Schritt aus der definierten Distanz zufasst.

Vergleichende Hirnforschungen zu Verhaltensleistungen haben sich bisher vorwiegend mit Hintergründen für Größenzunahme und steigende Leistungsfähigkeit befasst, dagegen wenig mit umgekehrten Entwicklungen. In beiden Evolutionszusammenhängen geht es um die grundlegenden Unterschiede der Hirn-Körper-Größenrelationen, also der verschobenen allometrischen Geraden, zwischen den Tiergruppen (Bild linke Seite). Viele Wirbellose sind geradezu Meister der Miniaturisierung: Sie mussten Lösungen dafür finden, ihre Gehirne ohne allzu viele Einbußen dem winzi-

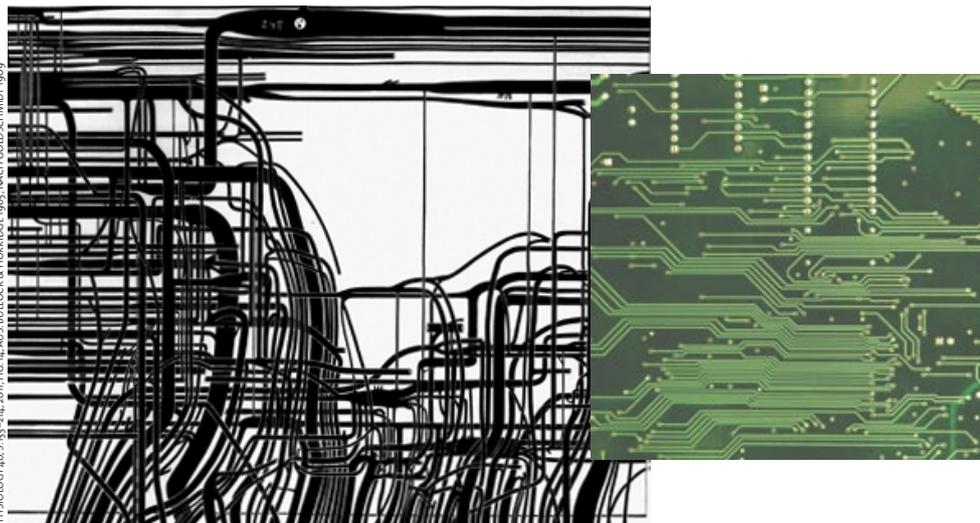
gen Körper anzupassen. Vielleicht ließ erst ein Sprung nach unten in der Hirngröße neue Evolutionslinien mit sehr kleinen Arten entstehen. Das ging manchmal anscheinend mit grundlegenden Abwandlungen im Aufbau des Nervensystems und seiner neuronalen Mechanismen einher.

Sparsamkeit versus Überfluss

Eindrucksvoll ist insbesondere der riesige Unterschied zwischen den Fadenwürmern und den Wirbeltieren – die auch ganz verschiedenen evolutionären Wurzeln entsprungen. Erstere sind mit Nervenzellen äußerst knauserig ausgestattet, letztere schwelgen in einem riesigen Angebot. Der einen Millimeter lange Wurm *Caenorhabditis elegans* besitzt erwachsen genau 302 Nervenzellen, manche anderen Nematoden haben noch weniger. Und jedes Neuron dieses Wurms bildet nur um die 25 Synapsen, also Kontakte mit anderen Nervenzellen. Diese wenigen Verschaltungen sind nach recht einfachen Mustern angelegt und gleichen sich von Tier zu Tier frappierend – denn die Lage und Funktion der einzelnen Zellen und ihrer Verbindungen sind genau vorgegeben. Der große Nachteil: Für einen Nematoden kann der Verlust einer einzigen Nervenzelle eine Katastrophe bedeuten. Unter Umständen fallen dann ganze Verhaltensbereiche aus.

Der Kontrast zum Hirn des Menschen könnte nicht dramatischer sein. Es verfügt über rund 100 Milliarden Nervenzellen. Jedes Neuron bildet ungeheuer viele Synapsen – die Pyramidenzellen in der Großhirnrinde schätzungsweise je 10 000. Das ergibt eine astronomische Anzahl an Kontakten und möglichen Schaltkreisen. Beim Menschen sind die Aktivitäten von großen Neuronengruppen entscheidend, nicht die einzelner Zellen. Da macht es nichts, wenn ein Neuron versagt. Sogar größere Ausfälle lassen sich unter Umständen kompensieren.

Schon das Ausreifen des Gehirns geschieht bei Fadenwürmern und Wirbeltieren nach völlig anderen Regeln. Bei Letzteren herrscht in der Jugend zunächst ein großes Überangebot an Neuronen. Nicht gebrauchte Zellen und Verbindungen werden während des Heranreifens in beträchtlichem



Nach einem völlig anderen Prinzip als in einem Wirbeltiergehirn ordnen sich die neuronalen Leitungen beim Pferdespulwurm (linkes Bild). Das Arrangement erinnert an einen Computerchip (rechtes Bild). Zu sehen sind die Verbindungen von 70 der 134 Fasern im ringförmigen »Gehirn« des Fadenwurms nahe der Stelle, wo der bauchwärtige Nervenstrang, das Bauchmark, entspringt.

EBERHARD, M.G., WIGSLO, W.F.: GRADE CHANGES IN BRAIN-BODY ALLOMETRY. IN: ADVANCES IN INSECT PHYSIOLOGY 40, S. 237-274, 2011. DOI: 10.1016/B978-0-12-385192-2.00005-0. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385192-2.00005-0>

ISTOCKPHOTO / STAS FERDY



FOTOLIA / VALERY KIRSANDY

Honigbienen besitzen ein großes und flexibles Verhaltensrepertoire. Dazu gehört, einen passenden Ort für ein neues Nest zu finden und dieses zu konstruieren. Ebenso legen sie unterschiedliche Waben für die männliche und weibliche Brut, für Honig sowie für Vorräte an. Vor dem Stock bewachen sie den Eingang und kontrollieren zurückkehrende Arbeiterinnen.

Ausmaß eliminiert. So verschwinden in der Netzhaut (einer Ausstülpung des Gehirns, die bereits komplizierte Verrechnungen durchführt) von Primaten rund zwei Drittel der zunächst vorhandenen retinalen Ganglienzellen. Katzen verlieren sogar 80 Prozent davon wieder. Im krassen Gegensatz dazu sondert *C. elegans* lediglich 8 seiner anfangs 310 Neurone aus – noch dazu immer genau die gleichen. Dafür, dass ein Gebrauch oder Nichtgebrauch dies mitbestimmen würde, gibt es keinerlei Anhaltspunkte.

Trotz solcher Riesenunterschiede spricht wenig für die verbreitete Ansicht, das Verhalten »niederer« Tierklassen sei naturgemäß einfacher, also die »Höhe« von Verhalten steige zwangsläufig mit dem Organisationsgrad ihres Gehirns. So gibt es winzige Salamander, die nicht größer als Honigbienen sind. Betrachtet man die allometrischen Geraden zu Hirn- und Körpergröße, gehören die Bienen in eine »tiefere« Gruppe. Dabei leisten sie Erstaunliches: Sie orientieren sich an Landmarken und am von der Tageszeit abhängigen pola-

risierten Sonnenlicht; sie lernen komplexe Muster und können dazu verschiedene Sinne einbeziehen; sie lernen zwischen gleich und verschieden, zwischen oben und unten zu unterscheiden; sie bauen hochorganisierte Nester und richten ihr Verhalten nach dem aktuellen Bedarf im Stock aus; und nicht zuletzt beherrschen sie die »Bienensprache«, den Schwänzeltanz, mit dem sie Stockgenossinnen von guten Futterquellen erzählen – einschließlich Richtungs- und Entfernungsangabe.

Selbst das Verhaltensrepertoire und die Umweltreaktionen von Fadenwürmern mit ihren überschaubaren Neuronen sind nicht grundlegend verschieden von denen vieler reicher ausgestatteter Tiere. Sie bemerken, wenn sie ein Objekt berühren, und registrieren, ob es hart ist oder weich. Sie nehmen die Lichtverhältnisse und die Temperatur, die Sauerstoffkonzentration und den Säuregrad des Milieus wahr, und neben Pheromonen – Signalstoffen von Artgenossen – erkennen sie viele weitere Substanzen und deren Konzentration. Aus solchen Informationen schließen sie zum Beispiel auf Geschlecht und Anzahl von Artgenossen und reagieren passend. Sie beherrschen verschiedene Bewegungen des Schwimmens und Kriechens, sie können umkehren, die Richtung abändern oder eine Aktion nach einiger Zeit wieder einstellen. Sie sind fähig, sich nach einem kleinflächigen Reiz zu orientieren und entweder gezielt dorthin oder davon wegzuschwimmen. Zu ihrem Verhaltensrepertoire gehören Fresen – mit Nahrungssuche, Verschlingen und rhythmischen Schluckbewegungen – und situationsangepasstes Ausscheiden der Verdauungsreste. Die Miniwürmer finden Paarungspartner, kopulieren und legen Eier. Sie sind sogar lernfähig, das heißt verhalten sich erfahrungsabhängig.

Anhand welcher Werte sollte man die Fähigkeiten von ganz verschiedenen Tieren vergleichen? Woran lässt sich etwa Intelligenz sauber messen? Manche Forscher nehmen als Maß für geistige Komplexität den Umfang des Verhal-



tensrepertoires einer Art. Die Klassifizierung von Verhaltensweisen ist allerdings subjektiv: Mancher sieht viele einzelne Elemente, wo ein anderer sie zusammenfasst. Außerdem beruht der Vergleich so gewonnener Zahlen auf unbewiesenen Annahmen. Danach müsste jede Verhaltensweise das Nervensystem gleich stark beanspruchen, was sicherlich nicht zutrifft. Dasselbe würde für funktionell gleichwertiges Verhalten gelten. Und sehr seltene Verhaltensweisen, die deswegen oft gar nicht registriert werden, würden als unwichtig für die Gehirnevolution abgetan. Solche Zahlenvergleiche implizieren auch, dass die verschiedenen Tiere ein als gleich betrachtetes Verhalten ähnlich schnell und genau ausführen. Umwelteinflüsse auf die Ausführung vernachlässigen sie ohnehin. Überdies dürften für Forschungszwecke gehaltene Tiere unter den künstlichen Lebensbedingungen in der Regel nicht ihr volles Verhaltensrepertoire ausspielen.

Wie misst man Verhaltensleistungen?

Wegen dieser Schwierigkeiten ersannen Wissenschaftler andere Vergleichsebenen. Sie erfassen zum Beispiel die Fehlerquote bei erforderlichen Entscheidungen oder die Genauigkeit von situationsangepasstem Verhalten sowie, ob ein Tier das gleiche Verhalten jedes Mal gleich präzise hervorbringt. Für kleinere Tiere wären hierbei Einbußen denkbar, unter anderem weil sie weniger Sinnesrezeptoren besitzen und dadurch nicht so differenziert über ihre Umwelt informiert sind. Zudem könnte bei ihnen die neuronale Verarbeitung unter einer verminderten Anzahl von Verschaltungen leiden. Auch Rückmeldungen ans Gehirn über die Genauigkeit des Verhaltens dürften auf Grund von weniger Sensoren unpräziser sein – ganz abgesehen davon, dass Signale bei solchen Winzlingen neurophysiologisch leichter verrauschen könnten.

Nach unseren eigenen Studien finden sich dergleichen Einbußen zumindest nicht bei den von uns untersuchten winzigen Radnetzspinnen – jedenfalls nicht für deren Netzbau. Manche dieser Zwergarten, die ein im Verhältnis zu ihrem Körper auffallend großes Gehirn besitzen, dürften an Kleinheit etwa die Untergrenze für Spinnen darstellen. Sie schaffen es dennoch, ihre Fangnetze mit derselben Präzision zu konstruieren wie wesentlich größere verwandte Arten (siehe Bilder rechts). Dabei orientieren sie sich genauso an den örtlichen Bedingungen wie die größeren Spezies und verfügen, wenn nötig, auch über Alternativen. Weitere gleich gründliche Vergleichsstudien gibt es für die kleinsten wirbellosen Tiere bisher leider nicht. Aufschlussreich wären insbesondere Untersuchungen zu den Lern- und Gedächtnisleistungen.

Eigentlich sollte man bei Verhaltensvergleichen zwischen Arten und Taxa nicht nur die gesamten Gehirne betrachten, sondern vor allem jeweils die für einen Akt direkten Abschnitte. Fledermäuse etwa weisen vergleichsweise riesige Regionen zur Verarbeitung von Hörreizen auf: Die subkortikalen Bereiche dafür sind relativ gesehen 100-mal größer als beim Menschen.



Selbst kleinste Radnetzspinnen bauen perfekte Netze. Die winzige *Anapisona*-Art (unten) produziert alle wesentlichen Details ebenso exakt wie die viel größere *Allocyclosa*-Art (oben), ungeachtet ihres deutlich kleineren Gehirns.

Für detaillierte vergleichende funktionale Untersuchungen durch Verhaltens- und Hirnexperten gelten für Wirbellose leider bisher ähnliche Einschränkungen wie für Wirbeltiere. Nach einer neueren Zählung verwenden die meisten Neurowissenschaftler nur ganz wenige und immer dieselben Tierarten. Rund 75 Prozent der Forschungen erfolgten an nur drei Modellarten, und zwar Säugetieren: der Labormaus, der Laborratte – und am Menschen. Forscher, die das Verhalten von Spezies vergleichen, müssen dagegen eine wesentlich breitere Artenpalette betrachten. Angesichts von schät-



DIRK VAN DER MADE / CC-BY-SA-3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENCES/CC-BY-SA/3.0/)

Weibchen der Goldenen Seidenspinne erreichen bis zu vier Zentimeter Körperlänge. Die Männchen (Tier oben) sind dagegen Zwerge. Noch viel winziger sind die Jungspinnen, die trotzdem schon selbst Netze bauen und Beute fangen.

Noch fehlen eingehende Studien darüber, inwiefern mit dem Aufkommen neuer Evolutionslinien mit Zwergarten Energie sparende Neuerungen des Gehirns einhergingen, so dass sich die Hirn-Körper-Relationen für diese Taxa nach »unten« verschoben. Sind die äußerst artenreichen Rüsselkäfer etwa ein gutes Beispiel hierfür? Sie stellen mit weltweit wohl über 60 000 Spezies rund 15 Prozent aller Käferarten, sind somit vermutlich die größte Käferfamilie überhaupt. Allein in Deutschland kommen fast 1000 Spezies vor. Diese kleinen Käfer besitzen im Vergleich zu anderen Insekten ungewöhnlich wenig Hirnmasse und sind ökologisch dennoch äußerst erfolgreich. Viele ihrer Arten messen wenig mehr als einen Millimeter. Hirn- und Verhaltensstudien an den aller kleinsten Tieren – und zwar an möglichst vielen verschiedenen – versprechen zu den erwähnten offenen Fragen neue Einsichten. Mehr Einblicke in die Evolutions- und ökologischen Zusammenhänge werden nicht nur erhellen, wieso manche Tiere so klein werden konnten, sondern auch, wie andere immer größer wurden. Die Hirnevolution dürfte jedenfalls in allen Fällen eine zentrale Rolle gespielt haben. ~

zungsweise 7,7 Millionen Tierspezies, die meisten davon Wirbellose, untersuchen sie aber immer noch einen verschwindend kleinen Bruchteil – viel zu wenig, um die Evolution von Gehirnen wirklich ergründen zu können.

Zu den kleinsten bisher bekannten Insekten gehören parasitische Wespen, die in Insekteneiern heranwachsen. Sie scheinen es auszunutzen, dass ihre Larven ein hochwertiges Nährstoffkonzentrat vorfinden und deswegen noch nicht besonders für Futtersuche gerüstet sein müssen, also anfangs mit sehr wenig Hirnmasse auskommen. Die eigenen Eier müssen darum kaum Energievorräte enthalten und dürfen äußerst winzig sein – wie dank dessen auch die Erwachsenen.

Womöglich loteten überhaupt oft die Jugendstadien die Evolutionsgrenzen der Miniaturisierung aus. Selbst der Nachwuchs von manchen viel größeren Arten ist anfangs oft extrem klein. Ausgewachsene Weibchen der amerikanischen Goldenen Seidenspinne *Nephila clavipes* wiegen rund zwei Gramm (Bild oben). Die frisch geschlüpften Jungspinnen bringen es auf nur 0,7 Milligramm und verstehen es doch, sich selbstständig zu behaupten und Fangnetze für winzigste Insekten zu bauen. Ihr Gehirn verursacht eine Ausbeulung an der Brust und reicht sogar bis in die Beine. Es ist anzunehmen, dass die besonderen ökologischen und energetischen Ansprüche des Nachwuchses sowie dessen physiologische Einschränkungen sich auch auf den Lebensraum und die Verbreitung der Erwachsenen auswirken, denn die Jungtiere oder Larven dürften vor allem auf Extrembedingungen und Mangelzeiten höchst empfindlich reagieren.

DIE AUTOREN



William G. Eberhard (links) und **William T. Wcislo** sind Forscher am Smithsonian Tropical Research Institute in Panama-City (Panama). Eberhard hat eine Biologieprofessur an der Universidad de Costa Rica in San José. Beide erforschen seit Jahrzehnten Insekten und andere

Arthropoden (Gliederfüßer) der Tropen. Adelheid Stahnke ist Redakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

QUELLEN

Eberhard, W.G.: Are Smaller Animals Behaviourally Limited? Lack of Clear Constraints in Miniature Spiders. In: *Animal Behaviour* 81, S. 813–823, 2011

Eberhard, W.G., Wcislo, W.T.: Grade Changes in Brain-Body Allometry: Morphological and Behavioural Correlates of Brain Size in Miniature Spiders, Insects, and other Invertebrates. In: *Advances in Insect Physiology* 40, S. 155–214, 2011

Manger, P.R. et al.: Is 21st Century Neuroscience too Focused on the Rat/Mouse Model of Brain Function and Dysfunction? In: *Frontiers in Neuroanatomy* 2, S. 1–7, November 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184758

© American Scientist
adaptiert und gekürzt nach *American Scientist* 100, S. 226–233, 2012