

Übersichtsartikel

Martin Heisenberg*

„Mind from Matter?“ – Über Verhalten und Gehirn

<https://doi.org/10.1515/nf-2018-0002>

Zusammenfassung: Wie hat die Darwin'sche Evolution aus toter Materie den menschlichen Geist (die Seele; engl. mind) hervorgebracht? Aus diesem langen, komplizierten Prozess nimmt der vorliegende Aufsatz einen wichtigen Abschnitt heraus, den vom tierischen Verhalten zur Tier-Seele (animal mind). Der Lebensprozess hat zwei Domänen: Die Erhaltung der internen Stabilität und die Wechselwirkung zwischen dem Organismus und der Welt. Bei Tieren sind diese Wechselwirkungen als Verhalten organisiert. In der Evolution entsteht nützliches Verhalten, weil dieses der Fitness zugutekommt. Angesichts des Reichtums der Welt und der Offenheit der Zukunft wird die Organisation des Verhaltens immer komplexer und indirekter (Metaorganisation). Dieses Konzept wird in dem vorliegenden Aufsatz mit Verhaltensstudien an der Fliege *Drosophila* dokumentiert.

Schlüsselwörter: Biologische Evolution; tote Materie; Verhaltensorganisation; Leben, Seele, Geist

Max Delbrück, einer der Begründer der molekularen Genetik, schrieb vor etwa 40 Jahren ein Buch mit dem Titel „*Mind from Matter?*“ (Delbrück, 1986). Schon seit Beginn der Neuzeit wird über das Verhältnis zwischen der materiellen und der psychischen Wirklichkeit nachgedacht. René Descartes hatte ihre Verschiedenartigkeit mit der Vorstellung von zwei unvereinbaren Seinsweisen hervorgehoben, eine Vorstellung, die heute als ontologischer Dualismus bezeichnet wird. Mit der Entwicklung der Naturwissenschaften und speziell Darwins Evolutionslehre entdeckte man mehr und mehr Übergänge und Gemeinsamkeiten. Zur Zeit Delbrücks herrschte unter Naturwissenschaftlern schon die Vorstellung, dass psychische Prozesse im Gehirn stattfinden. Allerdings lag die Antwort auf die Frage, wie diese und die physiologischen Prozesse sich gegenseitig beeinflussen, noch weitgehend im Dunkel.

Als Naturalist nimmt man an, dass im Lauf der Evolution aus abiotischer Materie zunächst das Leben entstand, lebende Materie. Das waren zunächst vermutlich Gruppen sich durch zyklische Autokatalyse vermehrender Moleküle, deren Zusammengehörigkeit vielleicht schon durch eine sie umhüllende Membran gesichert war. Diese getrennten Organismen diversifizierten sich weiter und entwickelten als Bestandssicherung die Verdopplung, wie wir sie heute von den Einzellern kennen, Myriaden von einzigartigen, gegen ihre Umwelt weitgehend abgeschlossenen Wesen. Später entwickelten sich die Vielzeller und ihre zyklische Regeneration. Mit der Fortbewegung im Raum entstanden in einem Teil der Lebewesen Verhalten und Gehirn, mit der Sozialisation die Kommunikation und der Geist (englisch: mind). Mit dem Fragezeichen in seinem Titel zeigte Delbrück, dass er diesem Szenario allerdings selbst noch etwas verwundert gegenüber stand. Offenbar war für ihn die Frage noch nicht abgeschlossen. Ich will sie in diesem Aufsatz noch einmal aufnehmen, um aus der heutigen Sicht der Verhaltensforschung die Entstehung des Mentalen in der Biomaterie etwas plausibler zu machen.

Soweit wir bisher wissen, ist das Leben ein einmaliger, einzigartiger, aber außerordentlich vielgestaltiger Prozess. Ob die Grundprinzipien der Bestandssicherung und Diversifizierung in ähnlichen Prozessen auch in anderen Gegenden des Universums verwirklicht sind, wissen wir nicht, und ich sehe auch keine rationale Möglichkeit, Wahrscheinlichkeiten dafür anzugeben, dass solche Behauptungen zutreffen. Die Entstehung des Lebens zieht sich bis heute hin. Die Evolution ist Schöpfung: Überall in der Biosphäre entsteht Neues, das vorher nicht da war und sich nicht zwingend aus früheren Zuständen des Universums ableiten lässt. Wir können rückblickend vielleicht rekonstruieren, wie etwas entstanden ist, aber selbst ein allwissender Übermensch könnte nicht vorhersehen, was in Zukunft entstehen wird. Das gilt besonders für die biologische Evolution.

Lebewesen sind, wie gesagt, Unikate in einem für die Evolution signifikanten Sinn. Jeder von uns ist eines davon. Ein wesentliches Element ihrer Organisation ist der hohe Grad ihrer *Autonomie*. Jedes ist weitgehend auf sich selbst gestellt. Jedes erlebt die Welt zunächst nur aus seiner Sicht. Wohl kaum etwas anderes ist für ein Lebewesen

*Korrespondenzautor: Martin Heisenberg, Julius-Maximilians Universität Würzburg, Rudolf-Virchow-Zentrum, D15, Josef-Schneider-Straße 2, 97080 Würzburg, Deutschland, E-Mail: heisenberg@biozentrum.uni-wuerzburg.de

so einschneidend, wie die Grenze zwischen sich selbst und dem Rest der Welt, zwischen eigen und fremd, innen und außen. Die Lebewesen können Eigenschaften haben, die noch nie eines vor ihnen hatte und die man später, wenn sie sich bewährt und unter den Nachkommen verbreitet haben, als neu entstandene Funktionen oder Strukturen beschreiben kann. Auch in der Welt des Geistes entsteht ständig Neues durch unser Denken, Reden und Handeln. Dort ist die Entstehung des Neuen am offensichtlichsten.

Bei der Entstehung des Neuen kommt eine Grundeigenschaft der Materie zum Tragen, die *Aktivität*. Vorgänge können ohne erkennbare hinreichende Ursachen von selbst in Gang kommen. Bei der Radioaktivität zerfällt ein Atom z. B., ohne dass der Zeitpunkt des Zerfalls vorher schon genau feststeht. An dem Prozess ist der ontologische Zufall beteiligt. Man könnte diesen als den Übergang vom Nicht-Sein zum Sein bezeichnen, als ein Schöpfungsereignis.

In lebender Materie macht sich die Aktivität deutlicher bemerkbar als in toter. Eine Zelle teilt sich, ein Bakterium verändert von sich aus seinen Ort, ein neuer Trieb entsteht an einem Zweig, etc.. Bei Tieren zeigt sich die Aktivität noch deutlicher. Verhalten ist in der Regel aktiv. Das Tier initiiert von sich aus spontan ein Verhalten. Die Kausalkette, die zur Aktivierung eines Verhaltens führt, hat im Tier angefangen. Jeder kennt das so auch von sich selbst. Wir sind Akteure. Unsere Sprache hat eine eigene Verbform dafür, das Aktiv.

Damit sind wir schon beim Verhalten. Das Lebewesen ist nicht vollständig abgeschlossen und nicht allein. Das *Verhalten* ist der Umgang eines Lebewesens mit der Welt und den anderen Lebewesen.

Der einzelne Verhaltensvorgang ist ein Teil des Evolutionsprozesses. Schon jedes Tier kann mit seinem Verhalten zur Selektion, zur weiteren Entwicklung der Biosphäre beitragen. Die Selektion findet schon im Verhalten statt: Eine Mutation, die unter keinen Umständen irgendwelche Auswirkungen auf den Reproduktionserfolg eines Tieres und den seiner Nachkommen hat, ist im evolutionsbiologischen Sinn inert. Das einzelne Verhalten kann für den Reproduktionserfolg gut oder schlecht sein. Da es hier nicht um die Moral geht, werde ich es als ‚adaptiv‘ oder ‚nicht-adaptiv‘ im evolutionsbiologischen Sinn bezeichnen. Anders gesagt, das Verhalten eines Tieres leistet einen größeren oder kleineren Beitrag zur Fortpflanzung seiner Gene, zur Stabilität dieses zyklischen Erneuerungsprozesses Leben. Das richtige Verhalten ist das, was ein Tier für sein gutes Leben beitragen kann.

Das Gehirn hat sich in der Evolution für die Organisation des Verhaltens entwickelt. Diese Beziehung ist unübersehbar. Je vielfältiger und besser das Verhalten, desto

größer das Gehirn. Zum Beispiel sind bestimmte Tunika in einer ersten Lebensphase aktiv mobil, dann geben sie ihre Mobilität auf und machen sich am Untergrund fest. Im ersten Lebensabschnitt haben sie ein Zentralnervensystem, für den zweiten bauen sie es ab. Es ist zu kostspielig. Ein anderes Beispiel ist die Fliege *Drosophila*: Als Larve ohne Gliedmaßen hat sie zunächst einen kleinen Aktionsradius und ein sehr bescheidenes Verhaltensrepertoire. Man sagt, sie sei vor allem auf Nahrungssuche. Mit der Metamorphose vervielfältigt sich ihr Verhalten und ihr Aktionsradius nimmt gewaltig zu. Das Volumen des Gehirns verzehnfacht sich.

Die Tiere, die mobil sind, mehrere bilateral symmetrische Paare von Gliedmaßen haben, sich in der Welt zurechtfinden, fressen, kommunizieren, kopulieren, kämpfen, Probleme lösen, Schutz suchen, schlafen und durch den Winter kommen müssen, ähneln sich in der basalen Grundorganisation ihres Verhaltens. Diese Ähnlichkeit zeigt sich offenbar auch in der strukturellen Organisation des Gehirns. Man kennt weitreichende strukturelle Homologien zwischen den Gehirnen der Säuger und Insekten (Strausfeld und Hirth, 2013), wie der Fund eines fossilen Gehirns des gemeinsamen Vorfahren *Fuxianhuia protensa* vor 500 Millionen Jahren aus einem Steinbruch in der Nähe von Kunming in Süd-China nahelegt.

Mit der aktiven Fortbewegung in einer unbekanntem Welt und mit einer offenen Zukunft ist die gute Organisation des Verhaltens eine große, oft nur unvollkommen lösbare Aufgabe. Evolutionsbiologisch betrachtet haben sich mit der Zeit immer anspruchsvollere Formen der Verhaltensorganisation gebildet. Einfache Regeln wie: „Es wird dunkel: schlafen gehen!“ oder: „Der Energievorrat geht zu Ende: Futter suchen!“ führen oft nicht zum gewünschten Ergebnis. So haben sich mit der Zeit auch Organisationsformen entwickelt, bei denen viele konditionale Bedingungen zusammenwirken, Formen, die an veränderte Bedingungen angepasst werden können, die die Verhaltensorganisation nicht unmittelbar, sondern nur indirekt und nur gegebenenfalls verbessern.

Nehmen wir die Tätigkeit eines Verlegers. Er stellt Bücher her und verkauft möglichst viele von ihnen. Das ist so, aber mit dieser Aussage hat man keine erschöpfende Jobbeschreibung. Sein Arbeitsplan ist weitaus vielseitiger. Er muss Manuskripte lesen und redigieren, u. U. Autoren suchen und mögliche Buchprojekte mit ihnen diskutieren, er muss den spezifischen Bedarf in den verschiedenen Zweigen des Buchmarkts untersuchen, Lesereisen für Autoren organisieren, Kundenkontakte pflegen, nicht nur mit den Endverbrauchern, sondern auch mit Versandhäusern, Buchläden und Bibliotheken, neue Produktions- und Lesemethoden im Auge behalten, usw., usw.. All die-

se Tätigkeiten verbessern die Qualität und beflügeln den Verkauf der Bücher indirekt. Die eigentliche Herstellung und der Verkauf nehmen nur einen kleinen Teil der Arbeitsplanung ein.

So ist es auch mit der Verhaltensorganisation. Das Leben ist das gestaltete Verhalten. In jedem Moment und an jedem Ort ist das richtige Verhalten gefragt, mit der richtigen oder zumindest einer guten Wirkung. Es soll dem Tier nützen. Nur so kann es ihm die Fitness für die Weitergabe seiner Gene verschaffen.

Das Verhalten spielt sich als Interaktion mit der Welt ab. Dafür entwickelt z. B. auch schon das Tiergehirn ein Modell der Welt. Dieses ist zum Teil von den Vorfahren ererbt und durch die eigene Erfahrung weiter angepasst. Das Tier muss die aktuellen Gegebenheiten der Welt kennenlernen, um sich richtig verhalten zu können. Es muss lernen, unter welchen Umständen, wann und wo sein Verhalten welche Wirkungen hat. Schon wenn es z. B. irgendwo regungslos sitzt, liefern seine Sinne ihm u. U. nützliche Informationen für das Verhalten, das es vielleicht später ausführen wird. Das Tier erwirbt schon *Orientierung*. Es kann sein Verhalten vorher auf die dann aktuellen Gegebenheiten der Umgebung einstellen.

Alles, was im Gehirn neben der direkten Verhaltensorganisation vor sich geht, das Mentale, das Psychische, die Gefühle, das Denken, das Wissen, die Mathematik, die Kunst, alles kann man im Licht der biologischen Evolution ebenfalls als Teil der Verhaltensorganisation verstehen, allerdings im Hintergrund. Das folgt aus der Annahme, dass auch die mentalen Gehirnprozesse im wesentlichen auf dem Weg über das Verhalten relevant für die Fortpflanzung der eigenen Gene werden, d. h. nur so die Lebensstabilität und den Fortpflanzungserfolg beeinflussen.

Man geht heute davon aus, dass für die einzelnen Verhaltensmodule im Nervensystem spezifische Netzwerke vorhanden sind, die das jeweilige Verhalten ablaufen lassen, wenn sie aktiviert werden. ‚Zentrale Mustergeneratoren‘ werden sie genannt. Bei großen Insekten hat man einige von ihnen auch schon identifiziert. Fast alle Aktionen sind fast immer abgeschaltet, nicht nur nachts. Die Wahrscheinlichkeit ihrer Aktivierung hängt von zahlreichen Einflüssen ab, wie Wahrnehmungen, Trieben, Stimmungen, Gefühlen, Erinnerungen, und so weiter. Die Mustergeneratoren müssen jeweils mit einer Schaltung gekoppelt sein, die die Erwartung der Wirkung der jeweiligen Aktion in den verschiedensten Lebenslagen repräsentiert. Denn, um zwischen verschiedenen Aktionen auswählen zu können, muss das Tier die zu erwartenden Wirkungen der Aktionen mit einander vergleichen. Die Wirkungen der Verhaltensakte können nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden, schon allein, weil -wie gesagt- die Zukunft

offen ist. Wenn die Wirkungen sich ändern, müssen die Erwartungen dieser Wirkungen entsprechend angepasst werden. Es ist außerordentlich aufwendig, für bestimmte Aktionen und bestimmte Lebensumstände verlässliche Wirkungserwartungen zu etablieren. Kein Wunder, dass es dazu des Gehirns bedarf.

Das Mentale als Teil der Verhaltensorganisation ist keine theoretische Annahme. Man kann es im Verhalten beobachten. Das soll in den nächsten Abschnitten an Beispielen aus der aktuellen Verhaltens- und Gehirnforschung vorgeführt werden. Die Beispiele stammen ausschließlich von einem Organismus, der Taufliege *Drosophila*.

Fliegen führen ein anderes Leben als Menschen. Das Fliegengehirn enthält etwa eine Million mal weniger Nervenzellen als unseres. Wir dürfen also davon ausgehen, dass die Verhaltensorganisation von Mensch und Fliege sehr unterschiedlich und die der Fliege entsprechend bescheidener ist. Aber wenn *Mind from Matter* zutrifft und es, wie vorgeschlagen, eine gemeinsame Grundorganisation des Verhaltens gibt, die auch schon bei den gemeinsamen Vorfahren vor 500 Millionen Jahren vorlag, darf man annehmen, dass sich auch schon im Fliegenverhalten die indirekte, die mentale Ebene der Verhaltensorganisation zeigt und vielleicht dort sogar leichter zu beobachten ist als beim Menschen. Hinzu kommt, dass das Fliegenverhalten unter Laborbedingungen untersucht wird, wo die Verhaltensorganisation in besonderer Weise gefordert ist. Im Folgenden ist der Leser eingeladen sich bei den Verhaltensbeispielen jeweils selbst zu überlegen, wie indirekt die Verhaltensorganisation ist.

Intentionalität: Fliegen verhalten sich intentional. Wenn ich etwas tue, will ich in der Regel damit etwas erreichen. Mein Tun hat ein Ziel, eine Absicht. Es wird immer wieder behauptet, der wesentliche Unterschied zwischen menschlichem Handeln und Verhalten von Tieren sei, dass Tiere nicht intentional wären. Diese Behauptung hat sich inzwischen nicht nur bei den Tierfreunden als falsch herausgestellt. Schon die Fliege kommt für die Aktivierung ihres Verhaltens nicht ohne die jeweilige Erwartung seiner Wirkung aus. Diese Wirkungserwartungen sind gewichtet und bewertet, d. h. einerseits wird die Zuverlässigkeit der Erwartung mitgespeichert, andererseits auch der adaptive Wert der erwarteten Wirkung im Fall ihres Eintreffens. Eine Entscheidung kann sich indirekt auswirken und die Wirkung, auf die es ankommt, weit in der Zukunft liegen. Solches Verhalten nennt man intentional.

Erlernte Hilfflosigkeit: Die Erwartungen gibt es realiter im Fliegengehirn, denn man kann sie in Verhaltensexper-

rimenten manipulieren. Ein Beispiel ist die sogenannte *Erlernte Hilfllosigkeit* (Batsching et al., 2016): Die Fliege läuft in einer kleinen, länglichen Kammer hin und her. Man misst, wo die Fliege gerade ist und kann abhängig vom Ort der Fliege die Kammer erhitzen; z. B. kann man es so einrichten, dass die Hitze angeht, wenn die Fliege sitzen bleibt und ausgeht, wenn die Fliege wieder losläuft. Die Fliege hätte also das An- und Ausgehen der Hitze unter ihrer Kontrolle, wenn sie diesen Zusammenhang zwischen ihrem Laufverhalten und den Temperaturveränderungen an dem Ort, an dem sie gerade ist, kennen würde. Genau dies wird im Verhaltensversuch gezeigt.

Wenn die Fliege sitzen bleibt und eine Sekunde später von der Hitze getroffen wird, läuft sie meist sofort wieder los. Sie hält die Hitzepulse so kurz, dass die Temperatur meist schon wieder abfällt, bevor sie ihre volle Höhe erreicht hat und kompensiert das erzwungene kürzere Sitzen mit häufigeren Pausen.

Eine zweite Fliege in einer genauso gebauten Kammer bekommt die gleichen Hitzepulse, aber unabhängig von ihrem eigenen Verhalten. Sie muss die Hitze aushalten ohne Einfluss auf sie zu haben. Anfangs versucht sie, wenn sie gerade sitzt, der Hitze zu entkommen, aber sie unterdrückt dieses offenbar unnütze Verhalten immer häufiger. Wenn sie im Laufen von der Hitze getroffen wird, dreht sie die Laufrichtung um, lernt aber bald, dass auch das nichts nützt und gibt den Versuch auf. Nur ab und zu probiert sie noch, ob die Hitze inzwischen vielleicht doch wieder beeinflussbar ist. In der Zwischenzeit läuft sie langsamer und macht längere Pausen. Sie zeigt durch die immer häufigere Unterdrückung der Fluchtreaktion, dass sie sich nicht mehr viel von ihr verspricht. Ansonsten schont sie ihre Kräfte und verfällt in einen depressionsähnlichen Zustand (Ries et al., 2017), in dem sie auch andere Reizangebote auslöst.

Im Hin-und-Herlaufen in so einer Kammer kann man die Dauer der Ruhepausen messen. Ohne Störungen durch Hitzepulse sind die Häufigkeiten dieser Dauer nach einem bestimmten Zufallsmuster verteilt, dessen Ausbildung von bestimmten Neuronen einer zentralen Gehirnregion abhängt, die an der Orientierung im Raum beteiligt ist. Blockiert man die Synapsen dieser Neuronen, ändert sich das zeitliche Muster (Martin et al., 2001).

Ob man diese Anpassung der Wirkungserwartung an die Erfahrung und die depressionsähnliche Disposition als mental bezeichnen soll, sei dahingestellt. Dasselbe gilt für Intentionalität. Aber dass die hintergründige Verhaltensorganisation für die Fliege günstig ist, kann man nicht übersehen.

Selbst: Auch im Flug kann man Wirkungserwartungen beobachten. Das verdanken wir einer Untersuchungsmethode, die schon vor mehr als 50 Jahren entwickelt wurde (Reichardt und Wenking, 1969). Die Fliege wird am Rücken angeklebt und an einem Gerät befestigt, das die Drehkräfte um ihre senkrechte Körperachse misst, die sie entwickelt. Wenn sich in ihrem Sehfeld eine Bewegung zeigt, interpretiert sie diese zunächst als Eigendrehung und versucht mit einem Wendemanöver in die gleiche Richtung ihren Flug zu stabilisieren, merkt allerdings schon in Sekundenbruchteilen, dass ihr Verhalten keinen Erfolg hat (Heisenberg und Wolf, 1984).

In einem nächsten Schritt wird das Messgerät zu einem Flugsimulator ausgebaut. Wir hängen die Fliege in die Mitte einer zylinderförmigen Arena, auf deren innerer, senkrechter Wand wir visuelle Muster bewegen können. Aus den Drehkräften der Fliege berechnen wir, wie schnell sie sich, wäre sie frei, drehen würde und drehen das Panorama in die entgegengesetzte Richtung: Produziert die Fliege Kräfte nach rechts, dreht sich das Panorama nach links. Das verschafft der Fliege die Illusion einer eigenen Drehung. Die Fliege ergreift augenblicklich dieses Angebot und versucht, ihre scheinbare Eigendrehung zu stoppen und geradeaus zu fliegen.

Der Flugsimulator gibt uns die Möglichkeit, die Wirkung des Verhaltens gezielt zu manipulieren und damit die Wirkungserwartung als Element der Flugsteuerung sichtbar zu machen. Wir können z. B. genau in dem Moment, in dem die Wirkung eines Wendemanövers nach rechts in der Bewegung des Panoramas nach links bestehen sollte, stattdessen das Panorama ebenfalls nach rechts drehen. Diese, der normalen Erfahrung der Fliege widersprechende, Bewegungsrichtung löst bei der Fliege zunächst massive Korrekturversuche aus, die alle das Gegenteil von dem bewirken, was die Fliege erwartet. Belässt man die Fliege für eine Weile in einer solchen „verkehrten Welt“ legt sich allerdings die Verwirrung, sobald die Fliege mitbekommt, dass sie nicht dem reinen Chaos ausgesetzt ist, sondern es nun eine Drehung nach links ist, welche sich, mithilfe unserer Apparatur, als eine Drehung des Panoramas nach links auswirkt. Mit anderen Worten, wie im ersten Beispiel: Wirkungserwartungen sind nicht starr, sondern können sich anpassen!

Ausprobieren: Auch Tiere geraten in Situationen, in denen sie keine ausreichenden Hinweise haben, was das richtige, das beste Verhalten sein könnte. Es gibt vielleicht Verhaltensoptionen, die in Frage kommen, aber keine hat klare Erfolgsaussichten. Dann kann man immer noch ausprobieren. Für die Fliege bedeutet Ausprobieren ein Verhalten zu aktivieren, für das sie keine hinreichend

positiv bewertete Wirkungserwartung hat. Wie gesagt, sie ist Akteur, sie agiert von sich aus, sie ist initial aktiv. Hier kommt der Zufall ins Spiel. Hier zeigt sich, dass zufälliges Verhalten adaptiv sein kann. Die Fliege registriert die Wirkung und wiederholt das Verhalten, wenn sich eine ähnliche Situation wieder ergibt. Eine neue Verhaltensreaktion ist geboren (Wolf und Heisenberg, 1986).

Die Entstehung solcher Reizreaktionszusammenhänge lässt sich im Labor direkt beobachten. Ein Beispiel haben wir schon oben im Bewegungsumkehrexperiment gesehen. In einem anderen Versuch kleben wir eine Fliege am Rücken an und setzen sie auf eine federnde Wippe, auf der sie mit ihrer Körperhaltung eine künstliche visuelle Umwelt, ein Panorama mit einem schwarzen Balken steuern kann. Drückt sie mit ihren Beinen die Wippe nach links, dreht sich der Zylinder im Uhrzeigersinn, drückt sie die Wippe nach rechts, dreht er sich im Gegenuhrzeigersinn. Die Fliege merkt sehr schnell durch Ausprobieren, dass sie es ist, die die Bewegungen des Balkens verursacht und dirigiert ihn so, dass er vor der Fliege bleibt. Offenbar versucht sie, auf die Landmarke zuzulaufen. Dieses Verhalten zeigt sie unabhängig davon, wie man die Beziehung zwischen Drehrichtung des Zylinders und Auslenkung der Wippe wählt. Genauso gut kann man die Auslenkung des Hinterleibs der Fliege verwenden, die Drehung des Zylinders zu steuern. Anders als im Flugsimulator kann die Fliege nicht auf einen schon in ihren Genen oder ihrer Erfahrung angelegten Reizreaktionszusammenhang zurückgreifen, sondern muss nach irgendeinem Verhalten suchen, das sich auf die Bewegung des Panoramas auswirkt. So lernt auch ein Kleinkind sein erstes Plastikauto zu steuern.

Aufmerksamkeit: Mit ihren vergleichsweise großen Augen erfasst die Fliege etwa 85% des Sehraumes gleichzeitig. Was sie in den verschiedenen Teilen des Sehfeldes sieht, hat aber oft unterschiedliche Verhaltensrelevanz. Kann die Fliege die Auswertung der Sehsignale auf Teile des Sehfeldes begrenzen? Hat sie Aufmerksamkeit (Sareen et al., 2011; Koenig et al., 2016)? Um dieser Frage nachzugehen, entzieht man der Fliege die Eigenkontrolle und zeigt ihr zwei schwarze Balken, den einen rechts, den anderen links vor ihr, und bewegt plötzlich beide gleichzeitig in entgegengesetzte Richtungen. Sie kann nur einer der beiden Bewegungen mit einem Versuch der Eigendrehung folgen. Was soll sie tun? Sie tut mal das eine, mal das andere. Wenn man nun aber kurz vor dem Test eine Seite für die Fliege interessant macht, indem man z. B. von dort einen angenehmen Duft auf die Fliege bläst oder indem man den Balken dort kurz hin und her wackelt, antwortet die Fliege im nachfolgenden Test bevorzugt auf diesen Bal-

ken. Sie hat ihre Aufmerksamkeit auf die Seite gelenkt, wo das Ereignis vorher stattgefunden hatte. Auch nach dem Test bleibt die Aufmerksamkeit noch für ein paar Sekunden in diesem Bereich, bis die Fliege sie möglicherweise von sich aus anderswo hin lenkt (Koenig et al., 2016).

Wahrnehmungshypothesen: Auch am Flugsimulator lässt sich zeigen, dass die Fliege, wie der Mensch im Sehvorgang mit mehrdeutigen Mustern, mal die eine, mal die andere Hypothese verfolgt (Toepfer et al., 2018). Wir zeigen ihr im Panorama zwei über einander liegende, fein gemusterte Texturen, die sich ohne das Zutun der Fliege relativ zu einander mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bewegen. Aber zusätzlich steuert die Fliege beide mit ihrem Drehmoment. Sie kann ihren Flug also nur jeweils gegenüber einer der Texturen stabilisieren. Während sie das tut, muss sie die Bewegung der anderen vernachlässigen. Wie der Mensch beim Anblick des Necker-Würfels, wechselt die Fliege von sich aus zwischen den beiden Möglichkeiten hin und her. Das Sehen ist nicht nur passive Informationsaufnahme, sondern Deutung. Auch die Fliege interpretiert visuelle Reize versuchsweise. Ein großer werdender dunkler Fleck kann ein Räuber oder ein Landeplatz sein, dem die Fliege sich nähert. Von der richtigen Deutung hängt es ab, ob das gewählte Verhalten adaptiv ist (Toepfer et al., 2018).

Schlaf: Der Schlaf ist eine Phase im Verhaltensablauf. Aber ist er ein mentaler Zustand? Gibt es ihn bei der Fliege? Die Fliege ist tagsüber meist mobil und nachts oft für längere Zeit bewegungslos. Wie kann man wissen, ob das Schlaf ist? Sie legt sich nicht wie ein Hund bequem auf die Seite und ihre Augen kann sie auch nicht schließen. Der Schlaf der Fliege bleibt eine Annahme, die dadurch gestärkt wird, dass man immer mehr Übereinstimmungen zwischen Mensch und Fliege in den Symptomen findet, die man beim Menschen kennt (Huber et al., 2004). Man kann einfach einmal annehmen: Wenn sich eine Fliege für länger als 5 Minuten nicht rührt, schläft sie. Damit hat man etwas, was man messen kann. Mal sehen, wie weit man damit kommt. Es zeigt sich: Nachts hat die Fliege mehr und längere Ruhephasen als tagsüber. Während dieser Ruhephasen wird die Körperhaltung immer lässiger. Junge Fliegen verbringen mehr Zeit damit als alte, wenn man sie daran hindert, diese Ruhephasen einzuhalten, holen sie sie am nächsten Tag nach; Schlafmittel verlängern die Phasen, Kaffee verkürzt sie. Inzwischen hat man auch Gene identifiziert, die bei Fliege und Mensch den Schlaf in ähnlicher Weise beeinflussen. Heute zweifelt kaum jemand mehr daran, dass Fliegen schlafen. Wie diese spezielle Form der Verhaltensorganisation adaptiv

ist, würde man gerne genauer verstehen. Immerhin: Der Schlaf fördert die Bildung des Langzeitgedächtnisses (Seugnet et al., 2008), bei der Fliege wie bei uns. Ob die Fliege auch träumt?

Emotionen, Dispositionen, Motivationen: Hat eine Fliege *Schmerz* (Anderson und Adolphs, 2014)? Die Antwort ist ähnlich wie beim Schlaf. Man beobachtet die Symptome. Man findet ähnliches Vermeidungsverhalten wie bei größeren Tieren, die gleichen genetischen Sequenzen in den zuständigen Rezeptoren auf der Körperoberfläche, usw.. Schmerz ist Schmerz, auch wenn wir nicht wissen, wie es von innen ist, Fliegenschmerz zu haben.

Die *Aggression* bei *Drosophila* wird intensiv untersucht. Die Frage, die sich daran anschließt, ist, ob es auch einen emotionalen Zustand *Aggressivität* gibt. Es gibt nach verlorenen Kämpfen einen Zustand der Niedergeschlagenheit. Der Verlierer gibt im nächsten Kampf mit einem anderen Männchen früher auf (Asahina et al., 2014).

Die *Balz* wird seit über hundert Jahren bei *Drosophila* untersucht. Ist sie mit Gefühlen verbunden? Wiederum: Wir sind auf die Symptome angewiesen. Das Weibchen wird durch den Gesang des Männchens eingestimmt, d. h. durch den richtigen, den arteigenen Gesang wird das Weibchen das Männchen eher zur Kopulation zulassen. Ein Männchen, das immer wieder abgewiesen wird, ist tagelang demotiviert überhaupt zu balzen, auch mit jungfräulichen Weibchen, und es spricht nach dem frustrierenden Erlebnis dem Alkohol stärker zu als Männchen, die bessere Erfahrungen gemacht haben (Shoat-Ophir et al., 2012).

Auch *Sucht*-Phänomene lassen sich bei *Drosophila* beobachten. Man vergleicht z. B. die Attraktivität von zwei Gerüchen. Einen von ihnen paart man mit Alkohol. Bei niedriger Konzentration macht der Alkohol den Geruch attraktiver, d. h. der Geruch wird später im Vergleichstest vorgezogen, auch nachdem man den Alkohol weg lässt. Bei einer höheren Konzentration des Alkohols wirkt er abstoßend. Die Fliege vermeidet den Geruch, der mit dem Alkohol gepaart war. Erstaunlicherweise kehrt sich aber dieser Effekt in der Erinnerung um. Am nächsten Tag bevorzugt die Fliege den Geruch, der mit der abstoßenden Dosis Alkohol präsentiert worden war und sie behält diese Präferenz für über eine Woche bei. Die Attraktion ist so stark, dass die Fliegen dafür freiwillig über stromführende Leiterbahnen klettern (Kaun et al., 2012).

Sozialität: Fliegen sitzen gerne beisammen (Ueda und Wu, 2009). Weibchen beobachten, wo andere Weibchen ihre Eier ablegen und benützen diesen Ort dann auch. Sie geben bei der Paarung dem Männchen den Vorzug, wel-

ches sie schon bei der Paarung mit einem anderen Weibchen beobachtet haben.

So viel aus dem Fliegenlabor. Der Besuch dort sollte zeigen, dass, wo immer man die Verhaltensorganisation untersucht, man auf weitere Organisationsebenen im Hintergrund stößt, von denen man zumindest einige dem Mentalen zuschreibt. Man konnte sehen, dass sich die mentalen Gehirnprozesse als Verbesserung der Verhaltensorganisation entwickelt haben und dass sich z. B. kognitionsähnliche Prozesse auch schon in der visuellen Wahrnehmung der Fliege andeuten. Wer heute über das Verhalten und Gehirn der Taufliege arbeitet, kann oft gar nicht vermeiden, mit seinen Untersuchungen auch Fragen über das mentale Leben der Fliege zu bearbeiten.

Zurück zum Fragezeichen in Delbrücks Buchtitel: ‚Mind from matter?‘. Was hat es Delbrück so schwer gemacht zu akzeptieren, dass mentale Prozesse in der biologischen Evolution aus Materie entstanden sind? Die Antwort gibt er selbst mit einigen weiteren Fragen am Ende seines Buches: „*Did we explain how mind evolved from no mind? Did we find out why so much more was delivered than was ordered...? ...does it even make sense to posit, that the capacity to know truth can arise from dead matter?*“ Delbrück denkt schon weiter: Es mag ja stimmen, dass der Geist in der biologischen Evolution entstanden ist, aber wir haben seine Entstehungsgeschichte nicht verstanden. Dazu müsste man wenigstens ansatzweise versuchen nachzuzeichnen, wie der Evolutionsprozess die entsprechenden Lebewesen Schritt für Schritt bis zu dem Zustand verändert hat, den wir Geist nennen. Was waren die großen und kleineren Innovationen? Wie bauten sie auf einander auf? Brauchte schon der Einzeller mentale Fähigkeiten? Wie müssen sich soziales Verhalten und Kommunikation entwickelt haben, bis der ‚Nährboden‘ für die evolutive Entwicklung der Kognition gegeben war? Haben sich nicht vielleicht auch mit der Entwicklung von Materie erst zu Leben, dann weiter zu Geist die Evolutionsprinzipien selbst entwickelt? Beginnen die Biologen nicht gerade zu verstehen, wie das Leben funktioniert? Würde der Evolutionsprozess nicht weniger abhängig vom zufälligen Auftreten der richtigen Mutationen, wenn man sie sich einzeln für die eigenen Nachkommen aussuchen könnte? Dürfte man das? Gestaltet der menschliche Geist den Lauf der Evolution nicht schon seit Adam und Eva, seit der Erkenntnis von gut und böse, schön und hässlich, wahr und falsch, aber spätestens seit der molekularen Genetik und dem Schreck über die gegenwärtige Erderwärmung entscheidend mit? Ist das Funktionieren des Evolutionsprozesses überhaupt das relevante Thema? Zu der Frage ‚Mind from Matter?‘ ist der vorliegende Aufsatz ein kleiner

Beitrag. Das Buch ‚Mind from Matter‘ ohne Fragezeichen kann bis heute niemand schreiben.

Literatur

- Anderson, D. and Adolphs, A. (2014). A framework for studying emotions across species. *Cell* 157, 187–200.
- Asahina, K. et al. (2014). Tachykinin-expressing neurons control male-specific aggressive arousal in *Drosophila*. *Cell* 156, 221–235.
- Batsching, S., Wolf, R. and Heisenberg, M. (2016). Inescapable Stress Changes Walking Behavior in Flies – Learned Helplessness Revisited. *PLoS ONE* 11(11): e0167066. doi: 1371/journal.pone.0167066.
- Delbrück, M. (1986). *Mind from Matter?* Blackwell Scientific Pub.
- Heisenberg, M. and Wolf, R. (1984). *Vision in Drosophila*. Springer, Berlin.
- Huber, R., Hill, S., Holladay, C., Biesiadecki, M., Tonioni, G. and Cirelli, C. (2004). Sleep Homeostasis in *Drosophila melanogaster*. *Sleep* 27, 628–639.
- Kaun, K. A., Devineni, A. V. and Heberlein, U. (2012). *Drosophila melanogaster* as a model to study drug addiction. *J. Hum. Genet.* 131, 959–975.
- Koenig, S., Wolf, R. and Heisenberg, M. (2016). Vision in Flies: Measuring the Attention Span. *PLoS ONE* 11 (2):e0148208. PMID:26848852. doi: 10.1371/journal.pone.0148208.
- Martin, J. R., Faure, P. and Ernst, R. (2001). The power-law distribution for walking-time intervals correlates with the ellipsoid-body in *Drosophila*. *J. Neurogenet.* 15, 205–219.
- Reichardt, W. and Wenking, H. (1969). Optical detection and fixation of objects by fixed flying flies. *Naturwissenschaften* 56, 424–425.
- Ries, A.-S., Hermanns, T., Poeck, B. and Strauss, R. (2017). Serotonin modulates a depression-like state in *Drosophila* responsive to lithium treatment. *Nat. Commun.* 8, 15738. DOI: 10.1038/ncomms15738.
- Sareen, P., Wolf, R. and Heisenberg, M. (2011). Attracting the Attention of a Fly. *PNAS* 108, 7230–7235. Koenig, S.
- Seugnet, L., Suzuki, Y., Vine, L., Gottschalk, L. and Shaw, P. J. (2008). D1 receptor activation in the mushroom bodies rescues sleep-loss-induced learning impairments in *Drosophila*. *Curr. Biol.* 18, 1110–1117.
- Shohat-Ophir, G., Kaun, K. R., Azanachi, R. and Heberlein, U. (2012). Sexual deprivation increases ethanol intake in *Drosophila*. *Science* 335, 1351–1354.
- Strausfeld, N. and Hirth, F. (2013). Deep homology of arthropod central complex and vertebrate basal ganglia. *Science* 340, 157–161.
- Toepfer, F., Wolf, R. and Heisenberg, M. (2018). Multi-stability with ambiguous visual stimuli in *Drosophila* orientation behavior. *PLoS Biology* 16(2): e2003113. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003113>.
- Ueda, A. and Wu, C.-F. (2009). Effects of social isolation on neuromuscular excitability and aggressive behaviors in *Drosophila*: altered responses by *Hk* and *gsts1*, two mutations implicated in redox regulation. *J. Neurogenet.* 23(4), 378–394.
- Wolf, R. and Heisenberg, M. (1986). Visual orientation in *Drosophila* is an operant behavior. *Nature* 323, 154–156.

Anmerkung: Englische Version des Artikels online verfügbar unter <https://doi.org/10.1515/nf-2018-A002>

Autoreninformationen



Prof. Dr. Dr. h.c. Martin Heisenberg
Julius-Maximilians Universität Würzburg,
Rudolf-Virchow-Zentrum, D15, Josef-
Schneider-Straße 2, 97080 Würzburg,
Deutschland
Tel.: +49 931 3184451
E-Mail: heisenberg@biozentrum.uni-wuerzburg.de

Martin Heisenberg, geboren 1940 in München, studierte Chemie, Biochemie und Genetik in München und Tübingen. Als Post-Doktorand arbeitete er bei Max Delbrück am California Institute of Technology, Pasadena (1966–1968), bevor er sich bei Karl G. Götz am Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik, Tübingen der Verhaltensphysiologie an der Tauflied *Drosophila* zuwandte (1968). Dabei führte er die Genetik als Handwerkszeug in die Untersuchung von Gehirn und Verhalten ein. Seit 1975 ist er Professor an der Universität Würzburg. Seine früheren Arbeiten sind in dem Buch „Vision in *Drosophila*“ (1984; mit R. Wolf) zusammengefasst. Weitere Schwerpunkte liegen beim olfaktorischen und visuellen Lernen, der visuellen Wahrnehmung, operanten Konditionierung, selektiven Aufmerksamkeit, Motivation, höheren „cognitiven“ Leistungen und Struktur-Funktionsbeziehungen auf der Netzwerkebene. Ziel ist ein allgemeines Funktionsmodell des Gehirns auf der Basis des Verhaltens.

