

Das Gehirn – ein **Orchester** ohne Dirigent

Es geht dem Menschen nicht recht in den Kopf, was in seinem Kopf vorgeht: Dort arbeiten Milliarden von Nervenzellen ohne jede koordinierende „Oberaufsicht“ in jeweils getrennten Arealen der Großhirnrinde an jeweils gesonderten Aufgaben – und vermitteln dennoch zusammenhängende Wahrnehmungen der sinnlich fassbaren Welt.

WOLF SINGER schildert, wie das im Prinzip funktioniert, und bietet damit Einblick in das komplexeste und zugleich faszinierendste Gebilde der materiellen Welt.

Wie kann es sein, dass unsere Intuition grundlegend irrt, sobald sie sich dem Organ widmet, dem sie sich verdankt – wenn sie zu ergründen sucht, wie unser Gehirn organisiert ist? Wenden wir den Blick nach innen, wähen wir in unserem Kopf eine zentrale Instanz am Werk, die wir mit unserem bewussten Ich gleichsetzen und die über all die wunderbaren Fähigkeiten verfügt, die uns Menschen auszeichnen. Weil sich diese Intuition so überzeugend, ja überwältigend aufdrängt, nimmt es nicht Wunder, dass im Lauf der Kulturgeschichte immer wieder darüber spekuliert wurde, wo im Gehirn diese allmächtige und alles kontrollierende Instanz ihren Sitz haben könnte.

Es müsse, so die plausible Annahme, einen singulären Ort geben, an dem alle Informationen über die inneren und äußeren Bedingungen verfügbar sind, an dem Entscheidungen getroffen und von dem aus alle Handlungen angestoßen werden. Selbst Descartes, der mentale Prozesse als nicht an materielle Vorgänge im Gehirn gebunden, sondern als diesen übergeordnet sah, dessen frei schwebende *res cogitans* somit keines umschriebenen Orts bedurft hätte – selbst Descartes glaubte, nicht ohne eine singuläre, lokalisierbare Instanz auskommen zu können.

Der Gegensatz zwischen dieser Vorstellung und den inzwischen verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen könnte drastischer kaum sein. Untersuchungen der strukturellen und funktionellen Organisation unseres Gehirns belegen, dass dieses Organ in hohem Maße de-

zentral und distributiv organisiert ist, dass in ihm jeweils unzählige unterschiedliche Prozesse parallel in sensorischen und motorischen Subsystemen ablaufen – und dass es eben kein singuläres Zentrum gibt, das diese vielfältigen Prozesse verwaltet.

Das zeigt sich besonders eindrucksvoll an der funktionellen Organisation der Großhirnrinde, die den letzten bedeutenden Schritt in der Evolution von Gehirnen verkörpert: Seit ihrem ersten Auftreten bei niederen Wirbeltieren gab es keine wesentlichen strukturellen Neuerungen. Zwar wuchs im Lauf der Evolution das Volumen der Hirnrinde kontinuierlich an, wodurch sich auch die Komplexität der Vernetzungsmöglichkeiten dramatisch erhöhte, doch die internen Verschaltungen der neuen Areale gleichen denen der alten. Die fortschreitende Ausdifferenzierung kognitiver Leistungen beruht also vornehmlich auf einer quantitativen Vermehrung von Großhirnrinde – mit deren „Erfindung“ der Evolution offenbar ein großer Wurf gelungen ist: Sie hat damit ein informationsverarbeitendes Prinzip verwirklicht, das vielfältigen und sehr unterschiedlichen Aufgaben gleichermaßen gerecht wird.

Wenn aber im Gehirn keine zentrale, allen Subprozessen übergeordnete Instanz agiert: Wie wird dann die Zusammenarbeit der vielen Milliarden Zellen koordiniert? Wie kann das Gehirn als Ganzes stabile Aktivitätsmuster ausbilden, wie formieren sich die verteilten Verarbeitungsprozesse zur Grundlage kohärenter Wahrnehmungen, und wie kommt ein derart distributiv orga-

nisierendes System zu Entscheidungen? Woher weiß dieses Organ, wann die verschiedenen Subprozesse zu einem Ergebnis gelangt sind? Wie beurteilt es die Verlässlichkeit des jeweiligen Resultats? Und wie vermag es fein aufeinander abgestimmte Bewegungen zu steuern?

Auf dieses Bündel von Fragen gibt es zunächst eine allgemeine Antwort: Offensichtlich hat die Evolution das Gehirn mit Mechanismen zur Selbstorganisation ausgestattet, die in der Lage sind, auch ohne jede zentrale, koordinierende Instanz Subprozesse zu binden und globale Ordnungszustände herzustellen. Wir sind jedoch noch weit davon entfernt, die Prinzipien zu verstehen, nach denen sich verteilte Prozesse im Gehirn zu kohärenten Zuständen fügen – Zuständen, die dann als Substrate von Wahrnehmungen, Vorstellungen, Entscheidungen und Handlungen dienen.

Gleichtakt vermittelt Arbeitspakt

Eine experimentell überprüfbare Hypothese lässt sich am Beispiel von Bindungsproblemen verdeutlichen, die bei der Verarbeitung visueller Signale auftreten. Aufgrund ihrer spezifischen Verschaltungen reagieren Nervenzellen in der Sehrinde des Gehirns jeweils selektiv auf elementare Merkmale visueller Objekte: auf Umrisse, Texturen, Farbkontraste oder Bewegungen. Auf höheren Verarbeitungsstufen finden sich Neuronen, die auf relativ komplexe Kombinationen solcher elementarer Merkmale ansprechen. Das führte zunächst zu der Vermutung, die Bindung der elementaren Merkmale zu Repräsentationen ganzer Objekte würde dadurch erzielt, dass Zellen auf der höchsten Ebene der Verarbeitungshierarchie selektiv auf die besonderen Merkmals-Konstellationen einzelner Objekte ansprechen.

Demnach sollte es für jedes wahrnehmbare Objekt eine spezialisierte Nervenzelle in der Sehrinde geben, die dann durch ihre Antwort jeweils das Vorhandensein dieses Objekts signalisiert – was sich aber experimentell nie bestätigen ließ. Und es leuchtet auch ein, weshalb die Natur diese Option zur Bindung verteilter neuronaler Signale allenfalls ausnahmsweise wählt, nämlich bei häufig auftretenden oder sehr bedeutsamen Objekten: Ansonsten bedürfte es einer astronomisch hohen Zahl hoch spezialisierter Zellen, um mit dieser Strategie alle wahrnehmbaren Objekte in all ihren unterschiedlichen Erscheinungsformen zu repräsentieren. Und zudem wäre es unmöglich, neue, noch nie gesehene Objekte wahrzunehmen; denn dafür, und das ist kaum vorstellbar, hätte die Evolution schon vorausschauend entsprechend spezialisierte Zellen vorsehen müssen.

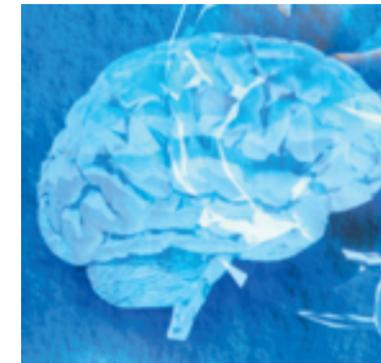
Tatsächlich verfahren hoch entwickelte Gehirne nach einer komplementären, wesentlich flexibleren Strategie: Sie repräsentieren Objekte der Wahrnehmung – ob visuell, akustisch oder taktil erfasste – jeweils durch eine Vielzahl gleichzeitig aktiver Neuronen, von denen jedes aber nur einen Teilaspekt des gesamten Objekts kodiert.

Die nicht weiter reduzierbare neuronale Entsprechung eines kognitiven Objekts besteht demnach in einem raumzeitlich strukturierten Erregungsmuster in der Großhirnrinde, jeweils erzeugt durch eine Vielzahl von Zellen. Ähnlich, wie eine begrenzte Zahl von Buchstaben durch Rekombination nahezu unendlich viele Worte und Sätze liefert, so lassen sich durch Rekombination von Neuronen, die jeweils nur einzelne, elementare Merkmale kodieren, nahezu unendlich viele Objekte der Wahrnehmung repräsentieren – auch solche, die noch nie zuvor gesehen wurden. Allerdings verlangt diese Strategie, dass die Erregungsmuster zwei Botschaften gleichzeitig vermitteln: Zum einen müssen die Neuronen damit melden, dass das spezielle Merkmal, für das sie kodieren, im Sichtfeld vorhanden ist; zum anderen aber müssen sie signalisieren, mit welchen anderen Neuronen sie in dem Augenblick gemeinsame Sache machen.

Wir haben vor mehr als einem Jahrzehnt entdeckt, dass Neuronen in der Sehrinde ihre Aktivitäten mit einer Genauigkeit von wenigen tausendstel Sekunden synchronisieren können, wobei sie meist rhythmische Oszillationen in einem Frequenzbereich um 40 Hertz erzeugen. Dazu kam die weitere, wichtige Beobachtung, dass Zellen vor allem dann ihre Aktivität synchronisieren – und damit sozusagen im Gleichtakt arbeiten –, wenn sie an der Kodierung ein und desselben Objekts beteiligt sind. Das führte uns zu dem Schluss, dass diese präzise Synchronisierung neuronaler Aktivitäten die Signatur dafür darstellen könnte, welche Zellen sich temporär zu funktionell kohärenten Ensembles gebunden haben – eine Hypothese, mit deren experimenteller Prüfung sich mittlerweile weltweit viele Laboratorien befassen.

Dabei, wie so oft, erweist sich auch in dem Fall, dass der ursprüngliche Befund nur die Spitze eines Eisbergs sichtbar machte. Denn inzwischen zeichnet sich ab, dass die neuronalen Synchronisationsphänomene funktionell weit bedeutsamer sind als zunächst vermutet. Eine ihrer vielleicht spannendsten Implikationen liefern jüngste Untersuchungen an Patienten mit Schizophrenie: Sie legen nahe, dass die Synchronisation neuronaler Aktivitäten bei diesen Kranken gestört und unpräzise ist. Wenn die Synchronisation tatsächlich der Koordination von parallel und zudem räumlich verteilt ablaufenden neuronalen Operationen dient, würde das manche der dissoziativen Phänomene erklären, die diese noch immer rätselhafte Krankheit charakterisieren. Die Befunde könnten neue Ansätze für eine gezielte Suche nach den pathophysiologischen Mechanismen liefern.

Was immer wir aber an Lösungen für die vielfältigen Koordinationsprobleme in unseren dezentral organisierten Gehirnen künftig aufdecken werden: Fest steht schon heute, dass die dynamischen Zustände der vielen Milliarden miteinander verknüpften und wechselwirkenden Neuronen der Großhirnrinde ein Maß an Komplexität offenbaren werden, das unser Vorstellungsvermögen übersteigt.



Das bedeutet nicht, dass wir nicht analytische Verfahren entwickeln können und werden, mit denen sich diese Systemzustände erfassen und in ihrem zeitlichen Ablauf verfolgen lassen. Doch die Beschreibungen dieser Zustände werden höchst abstrakt und unanschaulich sein. Und sie werden keine Ähnlichkeit mit unseren geläufigen Wahrnehmungen und Vorstellungen haben, die auf diesen neuronalen Zuständen beruhen.

Unserer Intuition erscheint es fremd, dass das neuronale Korrelat dessen, was wir als solides, „greifbares“ Objekt wahrnehmen, ein hoch abstraktes, räumlich und zeitlich strukturiertes Erregungsmuster sein soll – und dass auf diese Weise nicht nur dreidimensionale Gegenstände, sondern ebenso Gerüche, Gefühle oder Handlungsintentionen repräsentiert werden. Dabei entspricht jede solche Repräsentation einem bestimmten Zustand unter nahezu unendlich vielen möglichen. Oder anders ausgedrückt: Das System Großhirnrinde bewegt sich in einem unvorstellbar hochdimensionalen Raum fortwährend von einem Punkt zum nächsten. Dabei hängt die Trajektorie, also die Spur dieser Bewegung, von der Gesamtheit aller inneren und äußeren Einflüsse ab, die auf das System einwirken.

Während seiner Wanderung durch diesen hochdimensionalen Zustandsraum verändert sich das System dauernd, weil seine funktionelle Architektur ständig durch die „unterwegs“ gemachten Erfahrungen verändert wird. Es kann deshalb niemals an ein und denselben Ort in diesem Raum zurückkehren. Darin liegt begründet, dass wir Zeit als nicht umkehrbar erleben. So bewirkt ein bestimmtes Objekt, wenn es zum zweiten Mal gesehen wird, einen anderen dynamischen Zustand als beim ersten Mal: Es wird zwar als das Gleiche erkannt, doch in dem neuen Zustand wird mitkodiert, dass es schon einmal gesehen wurde.

Diese Überlegungen lassen erahnen, mit welcher abstrakten Beschreibungen wir zu tun haben werden, wenn wir ein tieferes Verständnis von den Prozessen in unserem Gehirn erlangen wollen. Und das bringt uns zurück zu der eingangs gestellten Frage, warum unser Vorstellungsvermögen so wenig geeignet ist, über die Vorgänge im Gehirn und damit über seine eigenen Grundlagen Auskunft zu geben.

Dieses Unvermögen unseres Vorstellungsvermögens liegt vermutlich daran, dass unsere kognitiven Leistungen evolutionär an eine Welt angepasst wurden, in der es keinen Vorteil bedeutete, sich mit nichtlinearen, hochdimensionalen Prozessen zu beschäftigen. Die Abmessungen der Tiere, die Nervensysteme besitzen, reichen von Millimetern bis zu einigen Metern – und dementsprechend haben sich die kognitiven und exekutiven Funktionen ihrer Nervensysteme an Prozesse angepasst, die für Interaktionen von Objekten dieser Größenordnung charakteristisch

sind. Und in dieser Welt gelten die Gesetze der klassischen Physik, die vermutlich aus dem Grund auch vor den Gesetzen der Quantenphysik entdeckt wurden. Die klassische Physik beschreibt die Welt der soliden Körper, der kausalen Wechselwirkungen und der nicht relativierbaren Koordinaten von Raum und Zeit: die Welt, in der

lineare Modelle genügen, um den Großteil aller für unser Leben wichtigen Prozesse zu verstehen.

Wir beobachten zwar Vorgänge, die eine andere Dynamik aufweisen und unseren Vorstellungen von Kausalität oder Linearität zu widersprechen scheinen; doch es bereitet uns Schwierigkeiten, die dahinter verborgenen Gesetzmäßigkeiten intuitiv zu erfassen. Dass wir uns nichtlineare Wechselwirkungen so schlecht vorstellen können, erklärt sich wohl daraus, dass uns als Lebewesen dieses Vermögen nicht viel genutzt hätte. Denn Modelle von Vorgängen zu entwerfen, bringt Organismen nur dann Vorteile, wenn sich daraus auch zutreffende Vorhersagen ableiten lassen. Das jedoch ist bei hoch nichtlinearen, dynamischen Systemen im Allgemeinen nicht möglich: Deren künftige Entwicklung lässt sich auch bei Kenntnis aller Ausgangsbedingungen meist nicht vorhersehen. Deshalb gab es vermutlich keinen Selektionsdruck für die Ausbildung kognitiver Funktionen, mit denen sich nichtlineare dynamische Prozesse erfassen lassen.

Komplexität verschafft Flexibilität

Aus dieser Beschränkung unserer kognitiven Fähigkeiten könnte sich erklären, warum unsere Intuition Vorstellungen über die Organisation unseres Gehirns entwickelt hat, die mit der naturwissenschaftlichen Beschreibung dieses Organs nicht übereinstimmen. Das menschliche Gehirn verkörpert fraglos das komplexeste System im uns bekannten Universum – wobei komplex nicht einfach für kompliziert steht, sondern im Sinne der Komplexitätstheorie als *terminus technicus* spezifische Eigenschaften eines Systems benennt, das aus sehr vielen aktiven, miteinander auf besondere Weise interagierenden Einzelelementen besteht.

Solche Systeme zeichnen sich durch eine hoch nichtlineare Dynamik aus; sie können Qualitäten hervorbringen, die aus den Eigenschaften der Komponenten nicht ableitbar sind – und sie sind kreativ: Sie können nahezu unendlich viele Zustände in hochdimensionalen Räumen einnehmen und dabei neue, unvorhersehbare Muster ausbilden. Das liegt daran, dass sie sich selbst organisieren und ohne den koordinierenden Einfluss einer übergeordneten Instanz hochgeordnete, metastabile Zustände einnehmen können.

Warum aber hat die Natur Gehirnen diese Eigenschaften verliehen, wenn es doch vornehmlich um die Analyse linearer Prozesse ging? Die Antwort auf diese Frage

muss – jedenfalls vorläufig – unvollständig ausfallen, weil wir die Organisationsprinzipien unserer Gehirne erst im Ansatz verstehen. Doch inzwischen zeichnet sich ab, dass die Evolution dabei auf die besondere Flexibilität und Anwendungsbreite komplexer nichtlinearer Systeme gesetzt hat. Denn mit ihnen lassen sich Probleme der Informationsverarbeitung sehr viel eleganter bewältigen als mit linearen Operationen – etwa, wenn es darum geht, Muster zu erkennen, Kategorien zu bilden, große Mengen von Variablen assoziativ zu verknüpfen oder Entscheidungen zu treffen.

Der geniale Trick scheint darin zu bestehen, die niedrigdimensionalen Signale, die von den Sinnesorganen geliefert werden, in hochdimensionale Zustandsräume zu transponieren, sie dort zu verarbeiten und die Ergebnisse dann wieder zurück auf den niedrigdimensionalen Raum zu transformieren, in dem die Verhaltensreaktionen stattfinden. Interessanterweise haben wir keine Einsicht in die hochdimensionalen nichtlinearen Prozesse in unserem Gehirn, sondern nehmen nur die niedrigdimensionalen Ergebnisse wahr. Und deshalb stellen wir uns offenbar vor, es müssten im Gehirn die gleichen linearen Vorgänge ablaufen, die wir den beobachtbaren Phänomenen in der Welt draußen unterstellen – und das ist vermutlich auch der Grund, warum wir glauben, es müsse in unserem Gehirn eine zentrale Instanz wirken.

Intuition verführt zu Illusion

Lineare Systeme können sich nicht selbst organisieren. Sie sind nicht kreativ. Ihre Dynamik bewegt sich in unveränderlichen Zirkeln, und wenn in ihnen Neues entstehen soll, müssen strukturierende Einflüsse von außen auf sie einwirken: Sie bedürfen eines Bewegers. Weil wir Linearität annehmen, uns aber als kreativ und intentional erleben, kommt unsere Intuition zu dem falschen Schluss, in unserem Gehirn müsse es eine übergeordnete, lenkende Instanz geben, die all die vielfältigen verteilten Prozesse koordiniert und Impulse für Neues vermittelt. Und da wir diese virtuelle Instanz nicht zu fassen vermögen, schreiben wir ihr all die immateriellen Attribute zu, die wir mit dem Begriff des Selbst verbinden: die Fähigkeit, initiativ zu sein, etwas zu wollen, zu entscheiden oder Neues zu erfinden.

Diese Mutmaßung mag uns eine Warnung sein, wo immer wir absichtlich oder gezwungenermaßen in die Dynamik komplexer Systeme eingreifen. Nahezu sämtliche Bereiche unserer Lebenswelt, die eine Vielzahl miteinander wechselwirkender aktiver Komponenten umfassen, weisen als komplexe Systeme eine hoch nichtlineare Dynamik auf: die sozialen und politischen Systeme ebenso wie die Wirtschaftssysteme und Biotope. Indem wir handeln, werden wir zu aktiven Komponenten dieser Systeme und befördern durch unser Tun deren Dynamik und zukünftige Entwicklung. Und das konfrontiert uns mit einem gewichtigen Problem.

Denn auch bei unserem Handeln in komplexen lebensweltlichen Systemen scheinen wir uns vorwiegend an linearen Modellen zu orientieren, da uns die Intuition für nichtlineares Verhalten fehlt. Wir neigen deshalb dazu, zum einen das Selbstorganisationsvermögen dieser Systeme zu unterschätzen, zum andern aber zugleich deren Lenkbarkeit zu überschätzen. Und also sehen wir die effektivste Strategie zur Stabilisierung und Steuerung dieser Systeme darin, zentrale Instanzen zu etablieren, die dann die vielen verteilten Prozesse regulieren und die Entwicklung des Gesamtsystems in eine gewünschte Richtung lenken sollen. Ein Blick auf die hierarchischen Strukturen in unseren Gesellschafts- und Wirtschaftssystemen genügt, um zu erkennen, dass wir dieser Intuition nur allzu bereitwillig folgen und sie umsetzen.

Dabei stellt sich aber die Frage, ob wir den Fähigkeiten dieser Instanzen immer vertrauen dürfen und ob wir sie nicht gelegentlich überfordern, weil wir von ihnen mehr erwarten als sie selbst unter optimalen Bedingungen zu leisten vermögen. Denn aus prinzipiellen Gründen sind die Entwicklungstrajektorien komplexer Systeme offen und schwer prognostizierbar, und das selbst dann, wenn die Ausgangsbedingungen vollständig bekannt sind. Aus denselben Gründen lässt sich jeweils nur schwer vorhersehen, wie sich steuernde Eingriffe auf das Verhalten eines solchen komplexen Systems auswirken werden.

Vor diesem Hintergrund erscheint es angezeigt, fallweise genau zu prüfen, inwieweit die institutionalisierten Steuerungsmechanismen der Dynamik der jeweiligen Systeme gerecht werden. Handelt es sich um überschaubare Systeme mit vorwiegend linearer Dynamik, dann mögen hierarchisch strukturierte, dirigistische Lenkungsstrukturen die angemessene Option bieten. Geht es indes um hoch komplexe Systeme mit stark nichtlinearem Verhalten, dann empfiehlt es sich, stärker auf die Selbstorganisationskräfte und die Kreativität solcher Systeme zu setzen – und nicht voreilig der Illusion zu erliegen, man könne gezielt eingreifen. Dann ist es angezeigt, sich darauf zu beschränken, die Interaktionsgeflechte und Informationsflüsse so zu gestalten, dass sich die selbstorganisierenden Mechanismen optimal entfalten können.

Dabei sollten wir die Tatsache, dass sich unsere lebensweltlichen Systeme überhaupt so weit entwickeln konnten und dabei leidlich stabil blieben, als gute Nachricht werten. Das sollte uns ermutigen, stärker auf die Robustheit dieser durch Selbstorganisation entstandenen Strukturen zu vertrauen: Kein noch so umsichtiger Planer hätte je derart komplexe Systeme wie unser Gehirn oder unsere sozialen und wirtschaftlichen Gefüge *ab initio* so konzipieren können, dass sie funktionieren und über längere Zeiträume stabil bleiben. ●

WOLF SINGER ist Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt. Sein Beitrag beruht auf dem Festvortrag, gehalten auf der Jahresversammlung 2005 der Max-Planck-Gesellschaft in Rostock.