

Letztlich dient das Gehirn dazu, uns zu zielgerichteten und zweckmäßigen Handlungen anzuleiten. Dazu müssen jeweils Sinneseindrücke und Erfahrungen planvoll in motorische Aktivitäten umgesetzt werden – über eine

Schaltstelle, den prämotorischen Cortex. Des-
sen Funktion erforscht

RICARDA SCHUBOTZ
am Leipziger **MAX-
PLANCK-INSTITUT
FÜR KOGNITIONS-
UND NEUROWISSEN-
SCHAFTEN.**

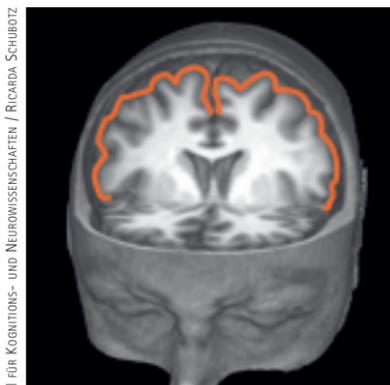


Wie uns das **Gehirn** bewegt

Jeder kennt diese Sommernächte. Es ist wunderbar warm – ideal, um bei offenem Fenster zu schlafen. So will man sanft in das Reich der Träume entschlummern. Doch plötzlich dringt jenes typische Summen in unsere Ohren, das nichts Gutes verheißt. Das Erstaunliche: „Obwohl es dunkel ist und obwohl man das Geräusch der Stechmücke nur hört, kann unser Gehirn ziemlich gut orten, wo die Mücke fliegt und wo und wann sie gerade gelandet ist“, erklärt Ricarda Schubotz.

Genauer gesagt simuliert ein bestimmter Teil unseres Gehirns aus den Sinnesinformationen – ob nun Hören oder Sehen – den Bewegungsablauf des Moskitos: der sogenannte prämotorische Cortex, kurz PMC genannt. „Eine geniale Leistung“, wie die Neurowissenschaftlerin findet. Nach ihren Vorstellungen nutzen wir den prämotorischen Cortex, um beobachtete Handlungen jeglicher Art vollautomatisch und unbewusst nachzuahmen, solange sie nicht länger als ein paar Sekunden dauern. Für die junge Forscherin ist diese Hirnregion eine entscheidende Schaltstelle zwischen Innen- und Außenwelt, „zwischen dem, was sensorisch hereinkommt, und dem, was ich motorisch daraus mache“. So gesehen agiert der PMC gleichsam als sensomotorischer Prophet des Gehirns.

Die These speist sich aus Schubotz' Experimenten der vergangenen Jahre und ist für die Neuroszene durch-



Ein Band der Antizipation: Der laterale prämotorische Cortex (PMC) zieht sich als hinterste Provinz des Stirnhirns von den Schläfen aufwärts um das Gehirn herum. Sein direkter Nachbar: der motorische Cortex.

aus provokant. Denn bislang galt der prämotorische Cortex vor allem als Zeremonienmeister, wenn wir Handlungen vorbereiten. Beispiel: Wir öffnen eine Flasche mit dem Korkenzieher und gießen den Wein in ein Glas. Was wie tausend andere Handlungen spielend von der Hand geht, ist eine Großtat unseres Gehirns. Es muss zunächst wissen, dass gerade ein Korkenzieher zum beabsichtigten Ziel führt. Dann gilt es, das Gerät richtig zu positionieren – Patienten mit einer Apraxie genannten Erkrankung fuchteln überall an der Flasche herum. Dann muss die Hand den Korkenzieher drücken und drehen und mit wohl dosierter Kraft ziehen.

„Eine ziemlich komplexe Sequenz, die, in ihre Bestandteile zerlegt, mehr als hundert Schritte umfasst“, sagt

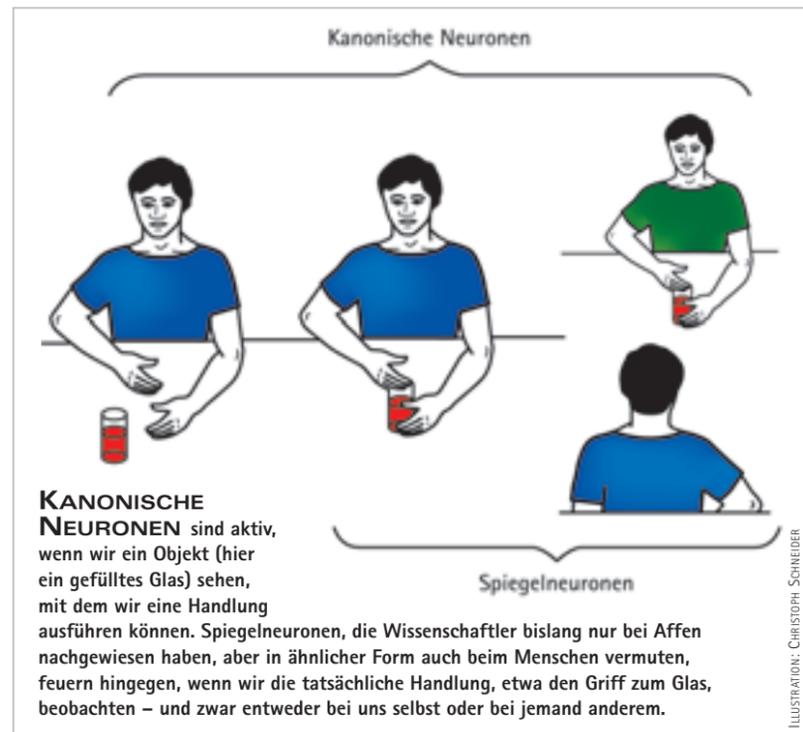
Ricarda Schubotz. Und trotzdem spult das Gehirn die einzelnen Komponenten verblüffend schnell und fließend ab – in der korrekten Reihenfolge, in der richtigen Zeit, alles ordentlich vorbereitet und geplant. Der PMC arrangiert also die Sequenz einer Handlung: ABCDEFG.

Anatomisch zieht sich der prämotorische Cortex als hinterste Provinz des Stirnhirns von den Schläfen aufwärts wie ein dünnes Band um das Gehirn herum – in direkter Nachbarschaft zum motorischen Cortex. Des-
sen Signale wandern über das Rückenmark hinab zu den Muskeln, die die Bewegung ausführen. Mit ihrem Fokus auf den PMC agiert Ricarda Schubotz in einem spannenden Forschungszweig. Darauf deuten unter anderem jüngste neurophysiologische Untersuchungen bei Makaken. Demnach sitzen im PMC dieser Affen die inzwischen berühmten mirror neurons, die Spiegelneuronen. Diese Nervenzellen feuern nicht nur, wenn die Tiere eine bestimmte Handlung ausführen, sondern auch, wenn sie diese bei ihren Artgenossen beobachten.

Seit ihrer Entdeckung sind immer neue Versuche auch beim Menschen gestartet und die Spiegelneuronen in Zusammenhang mit Imitation, Mitgefühl und Krankheiten wie Autismus gebracht worden. Ein regelrechter Hype um diese Zellen begann. Allerdings sprechen die Forscher bei Menschen nur von einem Spiegel-system, denn bislang konnte niemand die Neuronen im humanen PMC nachweisen – obwohl eine entsprechende Suche kurz vor Operationen am offenen Gehirn von Epilepsie-Patienten durchaus möglich ist.

NERVENZELLEN FÜR STIFTE UND PAPIERSTAPEL

Ricarda Schubotz warnt daher vor schnellen Analogieschlüssen und verweist lieber darauf, dass im prämotorischen Cortex von Affen noch



etliche weitere faszinierende Neuronentypen existieren – etwa die kanonischen Nervenzellen. Sie feuern, wenn ein Tier einen Gegenstand anfasst oder nur sieht; es braucht keinen anderen Affen, der nach dem Objekt greift. Allerdings schalten sich kanonische Neuronen anders als die Spiegelneuronen nur bei Objektarten an, die eine bestimmte Art von Griff erfordern. Ein Stapel Papier, den man mit der ganzen Hand greift, lässt andere Zellen feuern als etwa ein Kugelschreiber, den man mit einem Feingriff von Daumen und Zeigefinger fasst.

Kanonische Zellen repräsentieren also eher ein motorisches Programm – „wie greife ich etwas?“ – und nicht Form oder Funktion eines Gegenstands. Sie sind eine Untergruppe der sogenannten Greifneuronen. Für bestimmte Greifneuronen ist es unerheblich, ob der Affe etwas mit der rechten Hand greift, mit dem Mund oder mit der linken Hand – was sich anatomisch oder von der Muskulatur her deutlich unterscheidet. Wichtig ist vielmehr, dass der Gegenstand gefasst und an den Körper herangebracht wird. Sequenzneuronen sind nicht auf einfache Be-

wegungen spezialisiert, sondern auf ganze Bewegungsabfolgen. Im Experiment mit Makaken lassen sie sich leicht nachweisen: Ein Nahrungsautomat kann nur geöffnet werden, wenn man seinen Bedienungsknopf erst drückt, dann dreht und schließlich zieht – eine Reihenfolge, die Affen lernen können, um an das Futter zu gelangen. Die Sequenz der drei Schritte kann jedoch von Experiment zu Experiment variieren. Die Sequenzneuronen reagieren auf die Stellung einer Handlung in der Abfolge – feuern also beispielsweise immer bei der ersten Bewegung, egal ob es sich um Drehen, Drücken oder Ziehen handelt.

HANDLUNGEN AUS DEM NEURONALEN BAUKASTEN

Beim Affen beobachten Forscher verschiedene Felder des PMC, die sich darin unterscheiden, wie sie strukturiert sind, wie die kortikale Schichtung aussieht oder wie dicht die Zellen gepackt sind. Diese Felder sind nicht nur anatomisch, sondern auch funktionell verschieden. „Das Interessante dabei ist“, so Ricarda Schubotz, „dass es nicht darum geht, wie sich Muskeln oder Gelenke bewegen, son-

dern wie das Lebewesen ein Objekt am Körper manipuliert.“ Die Hypothese: Es gibt im PMC eine ganze Batterie von Repräsentationsmöglichkeiten und ein Repertoire von Handlungsideen. „Ich kann eine Tasse greifen, um daraus zu trinken. Ich kann sie aber auch greifen, um sie zu reinigen, auszuschütten oder jemand anderem zu reichen“, sagt die Leipziger Neurowissenschaftlerin.

Wir besitzen also einen Baukasten von Neuronentypen, um daraus unterschiedliche Handlungen zusammenzustellen. Feuert ein kanonisches Neuron beim Anblick einer Tasse, muss der Affe nicht zwingend nach der Tasse greifen wollen. Im Gegenteil: Womöglich steckt das Tier gerade in einem Versuch, wo das Greifen der Tasse bestraft wird und das Betrachten der Tasse belohnt. So gesehen ist der PMC nicht allein für Handlungsvorbereitung zuständig. Warum?

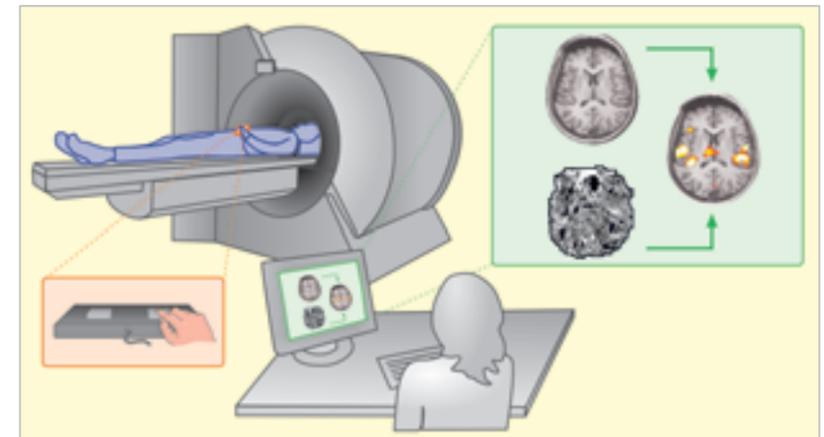
Antworten darauf suchen die Leipziger Wissenschaftler seit geraumer Zeit auch beim Menschen mit bildgebenden Verfahren wie der funktionellen Magnetresonanztomografie. Das methodische Prinzip klingt simpel: Während ein Proband im Scanner liegend eine Aufgabe löst, erkennt der Tomograf jene Hirnregionen, die dabei einen erhöhten Stoffwechsel aufweisen – als indirektes Maß der feuernden Nervenzellen. Letztendlich zeigen bunte Bilder das jeweilige Aktivierungsmuster. Schon zeitig offenbarte sich bei den Untersuchungen des prämotorischen Cortex eine Parallele zu den Affen-Befunden: Auch wenn die Versuchsteilnehmer regungslos im Tomografen liegen und eine Aufgabe ohne Handlungsplanung bearbeiten, ist der PMC aktiv.

Damit der PMC ohne motorische Planung anläuft, braucht es zwei Voraussetzungen: Einerseits müssen sich die Probanden mit Dingen beschäftigen, die im Alltag mit ganz

bestimmten Handgriffen verbunden sind – etwa mit Geschirr, Computermaus oder Zange. „Diese Objekte haben für uns eine pragmatische Bedeutung“, erklärt Ricarda Schubotz. Wenn wir solche Gegenstände sehen, verknüpft sie der prämotorische Cortex sofort und immer und überall mit der passenden Handlung, so die Hypothese. Denn so vertraute Dinge wie eine Computermaus registrieren wir nicht nur in ihrer Form, Farbe, Textur und Orientierung, sondern auch in ihrer Bedeutung für uns als handelnde Wesen. Der alltägliche Umgang mit diesen Gegenständen schult unsere entsprechende Wahrnehmung, „in der bereits die potenzielle Handlung an oder mit ihnen verborgen ist“, wie es die Leipziger Neurowissenschaftlerin ausdrückt.

OBJEKTE MIT EINER GRIFFIGEN BEDEUTUNG

Andererseits wird der PMC auch ohne motorische Planung aktiv, wenn die Forscher den Probanden ganz bestimmte Aufgaben in Bezug auf ein präsentiertes Objekt geben. Die Optik der Objekte ist dann unerheblich; sie müssen uns nicht einmal an real alltägliche Gegenstände erinnern. „Nicht was man sieht, ist hier von Bedeutung“, betont Schubotz, „sondern was man damit machen soll.“ Nicht nur die Beachtung abstrakter Figuren, sondern auch die Beachtung abstrakter Geräusche wirft den PMC an. „Von vornherein plausibel ist das alles nicht“, sagt Schubotz und bringt



EINBLICKE IN DIE KOPFARBEIT

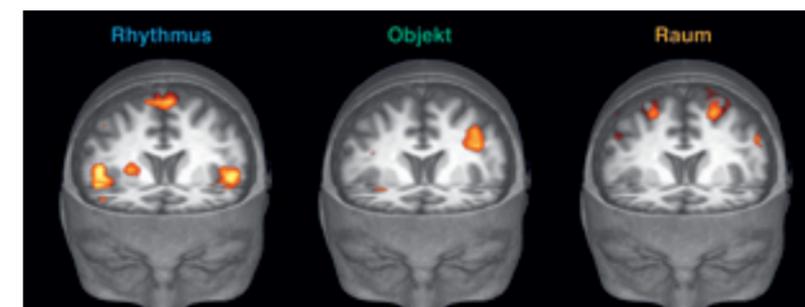
Mit der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT) untersuchen die Wissenschaftler, welche Teile des Gehirns bei einer bestimmten Aufgabe aktiv sind. Der Proband liegt in einer Röhre, in der ein Magnetfeld erzeugt wird. Mit Radiowellen lassen sich dann Änderungen des lokalen Stoffwechsels im Gehirn feststellen. Wenn die Testperson Aufgaben ausführt, die eine Antizipation von Wahrnehmungsereignissen erfordern, wird der prämotorische Cortex aktiv. Auf den fMRT-Bildern leuchten diese Regionen farbig auf.

als Erklärung die Antizipation, die Vorhersage, ins Spiel. Kurzum: Alle Aufgaben, die Antizipation von Wahrnehmungsereignissen erfordern, rufen den prämotorischen Cortex auf den Plan. Auch wenn keine konkrete Handlungsplanung gefordert ist.

Mit der sogenannten seriellen Prädiktionsaufgabe haben die Leipziger Wissenschaftler diesen Effekt beleuchtet. Dabei bekommen die Probanden im Magnetresonanztomografen auf einem Monitor völlig abstrakte Stimulusserien (Sequenzen) zu sehen. Präsentiert werden etwa zwei Kreise, die um den Mittelpunkt des Bildschirms in bestimmter Weise rotieren. Indem man die Versuchs-

teilnehmer geschickt instruiert, sollen sie ihre Aufmerksamkeit auf bestimmte Komponenten der Bewegung lenken: erstens auf die Kreise selbst, zweitens auf den Rhythmus, also die zeitliche Komposition der Bewegung, und drittens auf die räumliche Koordination der Bewegung. Die Frage ist: Sind diese verschiedenen Aspekte im PMC besonders repräsentiert?

Das Ergebnis: Wann immer es um die Verarbeitung von Reihenfolgen geht, leuchten Teile des prämotorischen Cortex auf den bunten Gehirnbildern auf. Für Schubotz liegt der Grund der PMC-Aktivierung auf der Hand: Wir müssen unsere eigenen Handlungen in jeder Sekunde



Geteilte Antizipation: Verschiedene Vorhersagen aktivieren unterschiedliche Teile des prämotorischen Cortex. Je nachdem, ob wir uns auf Rhythmen, Objekte oder den Raum konzentrieren, erhöht sich der Stoffwechsel – wie die fMRT-Bilder zeigen – in jeweils anderen Regionen.



FOTO: MAURITIUS IMAGES

Manchmal ist Antizipation lebenswichtig – etwa wenn wir im Straßenverkehr Abstände anderer Verkehrsteilnehmer abschätzen und ihre Bewegungen vorausberechnen.

auf die Ereignisse um uns herum abstimmen. Wollen wir als Fußgänger eine Straße kreuzen, taxieren wir die fahrenden Autos und versuchen zu antizipieren, wann sie auf unserer Höhe sind. Entsprechend stimmen wir den Zeitpunkt des Losgehens ab oder gehen langsamer oder schneller. Überdies antizipieren wir auch Effekte, die wir mit unseren Handlungen erzielen wollen.

WO SICH PLANUNG UND ANTIZIPATION VEREINEN

Gießen wir etwa Wein in ein Glas, gibt es mehrere dieser Handlungseffekte: dass wir den Flaschenhals genau über dem Glas halten oder dass wir das Glas nicht zum Überlaufen bringen. „Handlungspläne“, fasst die Forscherin eine neue These zusammen, „sind vor allem Sequenzen von Handlungseffekten und nicht motorische Pläne.“ Wir spüren, wenn wir die Flasche fest genug gegriffen haben, um sie anzuheben; wir sehen, wann das Glas gerade so voll ist, um sie wieder abzustellen.

Unser Gehirn antizipiert also gleich zweifach: einerseits Handlungen, die wir selbst starten wollen, andererseits Ereignisse, die in unserer unmittelbaren Umwelt andere Lebewesen oder physikalische Kräfte verursachen. Beide Formen der Antizipation, das belegen Schubotz' Studien, laufen im prämotorischen Cortex zusammen, damit wir erfolgreich

agieren können. Alle Aufgaben, die Verarbeitung von Reihenfolgen erfordern, aktivieren den PMC – und seien sie noch so abstrakt.

Handlungsplanung auf der einen Seite, Handlungsantizipation auf der anderen – passen beide Funktionen des prämotorischen Cortex auch anatomisch zusammen? Wenn Menschen sprechen, also ihren Mund bewegen, oder etwas greifen oder reichen, sind bei der Handlungsplanung unterschiedliche Areale des PMC aktiv. Im weitesten Sinne entspricht dies dem altbekannten Homunkulus – jener stark verzerrten Repräsentation des Körpers im motorischen Cortex, in dem etwa Arme, Lippen, Hände oder Beine hintereinander definierte Hirnflächen beanspruchen. Im PMC sind die Körperteile für die motorische Planung stark überlappend und mehrfach angelegt, weil Handlungen gewöhnlich mehrere Körperteile gleichzeitig bewegen lassen. Überdies sind die Überlappungen in den Bewegungssequenzen begründet, die der PMC vorbereitet und analysiert.

Die Studien von Ricarda Schubotz zeigen: Für die Handlungsantizipation im prämotorischen Cortex gilt eine ähnliche Körperkarte wie für die Handlungsplanung – abhängig von verschiedenen Reizeigenschaften eines Objekts: Was ist es und wie sieht es aus, bezogen

auf seine Eigenschaften wie Form, Farbe, Struktur? Wo ist es? Und: Wie lange dauert der mit ihm verbundene Reiz? Tatsächlich korrespondieren bestimmte Paare von motorischen Planungs- und antizipatorischen Funktionen. Denn sie aktivieren jeweils dieselben Teile des PMC: Sprechen – Lippenbewegungen – und Reizdauer das untere Areal, Handbewegung und Reizobjekt das mittlere, Armbewegung und Reizort das obere Areal.

VERTRAUTE MELODIEN IM KOPF MITSINGEN

„Die verschiedenen Aspekte aktivieren im PMC genau jene Regionen, die für die entsprechende Handlung das passende Körperteil ansteuern“, sagt Schubotz. Antizipieren wir etwa eine vertraute Melodie, die wir im Radio hören, so läuft vollautomatisch jenes Areal des PMC auf Hochtönen, das Singbewegungen steuert. Antizipiert unser Gehirn, wenn wir am Strand liegen, das Eintreffen einer Ozeanwelle, aktiviert es kurioserweise dasselbe Areal. Grund: Wellen treffen in gewissen Rhythmen ein, und Singen ist zuallererst eine hohe rhythmische Leistung.

„Der prämotorische Kortex ist eine Plattform, die Sensorik und Motorik verbindet“, bringt es die Wissenschaftlerin auf den Punkt. Sensorisch dient die Prämotorik im engeren Sinne der Aufmerksamkeit. Soll heißen: Man muss schon auf einen Reiz gefasst sein, damit der PMC anspringt – dann aber tut er das immer und ohne, dass wir dies bewusst verhindern könnten. Warum sich Planung und Antizipation im PMC vereinen, ist noch nicht klar. „Aber vielleicht“, sagt Ricarda Schubotz, „können wir uns in einer ständig wechselnden Umwelt nur dann orientieren, wenn wir uns in alles, was sich vorhersagbar bewegt, hineinversetzen – als seien wir selbst die Verursacher.“

KLAUS WILHELM