

# WAHRNEHMUNG

Zusammenspiel von Sinnen und Gehirn

## Kognition

Wie das Gehirn die Welt konstruiert

**Predictive Processing**  
Effiziente Vorhersagemaschine

**Fokussieren**  
Ignorieren bitte!



Folgen Sie uns:



Antje Findeklee  
E-Mail: findekle@spektrum.de

**Liebe Lesende,**  
sofern wir uns nicht gerade in einem abgeschlossenen dunklen und schallisolierten Raum befinden, strömen quasi unentwegt Umgebungsreize auf uns ein, die wir mit unseren Sinnen registrieren. Diese Informationen verarbeitet unser Gehirn und erstellt uns daraus ein Bild der Welt um uns herum. Doch – stimmt das so überhaupt? Ergebnisse der Hirnforschung weisen darauf hin, dass frühere Erfahrungen und Erinnerungen bereits vorab beeinflussen, wie wir unsere Umgebung wahrnehmen. Womöglich trifft unser Gehirn sogar auf Wahrscheinlichkeiten beruhende Vorhersagen von dem, was wir sehen, hören, riechen oder fühlen werden, justiert sie anhand der Sinnesinformationen nach – und spart so eine Menge Energie. Unser Kompakt taucht ein in dieses Zusammenspiel von äußeren Sinnen und innerer Verarbeitung.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 16.10.2023

# IMPRESSUM

CHEFREDAKTION: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

CREATIVE DIRECTOR: Marc Grove

LAYOUT: Oliver Gabriel, Marina Männle

SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.),

Sigrid Spies, Katharina Werle

BILDREDAKTION: Lea BAYER, Alice Krüßmann (Ltg.),  
Anke Lingg, Gabriela Rabe

REDAKTION: Antje Findeklee, Dr. Michaela Maya-Mrschtik

VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600,

Fax: 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 358114,

UST-ID-Nr.: DE229038528

GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle

ASSISTENZ GESCHÄFTSLEITUNG: Stefanie Lacher

MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.),  
Michaela Knappe (Digital)

LESER- UND BESTSELLSERVICE: Helga Emmerich, Estefanny Espinosa de Rojas, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer

ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2023 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

# INHALT



- 04 KOGNITION  
Wie das Gehirn die Welt konstruiert
- 15 NEUROTHEORIE  
Sehen, was wahrscheinlich ist
- 21 PREDICTIVE PROCESSING  
Effiziente Vorhersagemaschine
- 30 VISUELLE WAHRNEHMUNG  
Wir sehen die Welt so, wie es uns nutzt
- 32 FOKUSSIEREN  
Ignorieren bitte!
- 40 AUFMERKSAMKEIT  
Bleib bei der Sache!
- 53 SEHEN  
Unser wichtigster Sinn?
- 56 VERKNÜPFUNG  
Wir sehen, was wir hören
- 58 TASTSINN  
Die Macht der Gedanken
- 60 HERZ UND HIRN  
Wie der Herzschlag unsere Wahrnehmung beeinflusst
- 62 INNERER TAKTGEBER  
Zeit vergeht im Rhythmus unseres Herzschlags
- 64 GUTE FRAGE  
Warum schließen wir beim Genießen die Augen?

KOGNITION

# WIE DAS GEHIRN DIE WELT **KONSTRUIERT**

von György Buzsáki



Eine neue Theorie besagt: Das Gehirn ist bei der Geburt kein unbeschriebenes Blatt, sondern verfügt bereits über ein großes Repertoire an Aktivitätsmustern. Das eröffnet Perspektiven dazu, wie wir unser Umfeld wahrnehmen und darauf reagieren.

**A**ls ich als junger Wissenschaftler meine ersten Seminare an der Universität leitete, erzählte ich den Studentinnen und Studenten eins zu eins, was ich in den Neurophysiologiebüchern gelesen hatte. Ich erklärte überzeugt, wie das Gehirn Informationen aus der Umwelt nutzt, um den Körper zu steuern: Spezielle Neurone in Augen, Ohren und anderen Sinnesorganen wandeln sensorische Reize in elektrische Signale um und leiten sie dann an die entsprechenden Teile der Hirnrinde weiter. Diese verarbeitet die eingehenden Daten und löst die Wahrnehmung aus. Um eine

passende Bewegung einzuleiten, weisen Impulse aus dem motorischen Kortex die Nerven des Rückenmarks an, bestimmte Muskeln zu kontrahieren.

Die meisten Studierenden waren mit meinen Erklärungen zufrieden. Doch einige besonders schlaue stellten mir unangenehme Fragen: »Wo genau im Gehirn findet die Wahrnehmung statt?« Oder: »Was löst eine Fingerbewegung aus, bevor Zellen im motorischen Kortex feuern?« Meine Standardantwort lautete: Das passiert alles im Neokortex! Dann wechselte ich geschickt das Thema oder streute ein paar obskure lateinische Begriffe ein, die ihnen wissenschaftlich genug erschienen, um sie vorübergehend zufrieden zu stellen.

Ich hatte mit der Erforschung des Gehirns begonnen, ohne mir viele Gedanken darüber zu machen, ob die Theorie

**György Buzsáki** ist Systemneurowissenschaftler an der New York University School of Medicine. Seine Arbeit befasst sich unter anderem damit, wie sich Erinnerungen bilden.

#### AUF EINEN BLICK

## Ein Quell der Möglichkeiten

**01** In den Neurowissenschaften dominiert die Ansicht, dass das Gehirn anfangs einer »Tabula rasa« gleicht, die im Lauf des Lebens mit Sinneseindrücken und Erfahrungen gefüllt wird.

**02** Dieses einfache »Outside-in«-Modell hat jedoch einige Schwachstellen. Manche Hirnprozesse lassen sich damit schwer oder gar nicht erklären.

**03** Die neuere »Inside-out«-Theorie bietet eine alternative Sichtweise. Demnach ist selbst ein junges Gehirn voller Informationen, die nur noch sinnvoll mit Erfahrungen verknüpft werden müssen.

zur Kopplung von Wahrnehmung und Handlung plausibel war. Zu Beginn meiner Karriere beschäftigten mich andere Entdeckungen und Erkenntnisse, die sich nach und nach zu dem entwickelten, was in den 1960er Jahren als »Neurowissenschaften« bekannt wurde. Doch meine Unfähigkeit, diese berechtigten Fragen zu beantworten, hat mich seither nicht mehr losgelassen. Ich musste mir eingestehen, dass ich versuchte, etwas zu erklären, was ich nicht wirklich verstand.

Ein großes Problem für mich und andere Fachleute liegt schon darin, dass niemand so genau sagen kann, was eigentlich der »Geist« (im Englischen »mind«) ist. Seit Aristoteles gingen zahlreiche Denker und Denkerinnen davon aus, dass er zunächst ein unbeschriebenes Blatt ist, auf das unsere Erfahrungen gemalt werden. Im vergangenen Jahrhundert hat diese »Outside-in«-Perspektive die Psychologie und die Kognitionswissenschaft durchdrungen. Demnach dient das Gehirn als Werkzeug, um die wahre Natur der Welt zu erkennen.

Das ist allerdings nicht die einzige Sichtweise. Man kann die Sache auch andersherum betrachten: Womöglich ver-

suchen Hirnnetzwerke lediglich, ihre eigene interne Dynamik aufrechtzuerhalten. Dabei erzeugen sie ständig zahllose, anfangs unsinnige Muster neuronaler Aktivität, so genannte Feuermuster. Wenn eine scheinbar zufällige Handlung vorteilhaft erscheint, gewinnt das ihr zu Grunde liegende Muster an Bedeutung. Sagt ein Säugling etwa »te-te« und bieten die Eltern ihm daraufhin freudig einen Teddy an, erhält der Laut »te-te« die Zuschreibung »Teddybär«. Neuere Erkenntnisse der Hirnforschung sprechen dafür, dass an dieser »Inside-out«-Theorie etwas dran sein muss.

### Wie funktioniert Wahrnehmung?

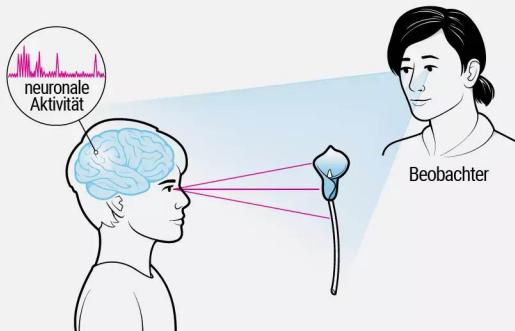
Dennoch ist das Konzept der leeren Tafel – der »Tabula rasa« – unter Neurowissenschaftlern nach wie vor weit verbreitet. Fachleute suchen weiterhin neuronale Mechanismen, die diese Vorstellungen stützen. Viele von ihnen orientieren sich dabei an den Entdeckungen von David Hubel und Torsten Wiesel. Für ihre Arbeit zum visuellen System erhielten die beiden 1981 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Die Forscher hatten die neuronale Aktivität von Tieren aufge-

zeichnet, während sie ihnen verschiedene Formen zeigten. Sich bewegende Linien, Kanten, helle sowie dunkle Bereiche und andere erkennbare Muster brachten unterschiedliche Gruppen von Neuronen zum Feuern. Hubel und Wiesel folgerten, dass das Gehirn Bilder schrittweise analysiert: Es beginnt mit einfachen Mustern und setzt sie dann zu komplexeren zusammen. Irgendwo werden alle Merkmale verbunden, um schließlich das gesamte Objekt zu repräsentieren. Man selbst muss dafür nichts tun, das Gehirn macht das ganz automatisch.

Dem Outside-in-Ansatz zufolge besteht die grundlegende Funktion des Gehirns darin, Signale aus der Umwelt wahrzunehmen und sie richtig zu interpretieren. Es bräuchte jedoch eine Art Mittelsmann, um auf diese Reize zu reagieren. Zwischen den Wahrnehmungseingängen und -ausgängen müsste sich eine Art »zentraler Prozessor« befinden. Er nähme sensorische Eindrücke aus der Umwelt wahr und trüfe Entscheidungen darüber, was mit ihnen geschehen soll, um dann die richtige Reaktion einzuleiten. Diese spekulative Instanz hat verschiedene Namen: freier Wille, Exeku-

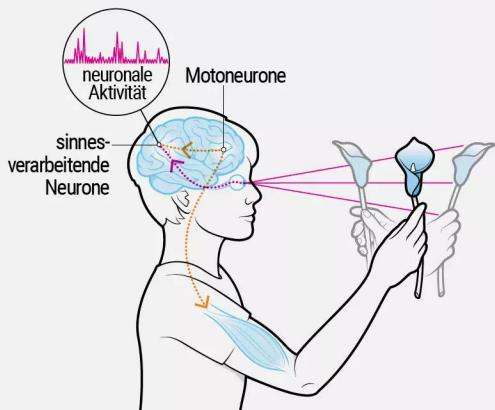
## »Outside in« oder »Inside out«?

Die Idee, dass das Gehirn wie eine leere Tafel ist, auf die Erfahrungen geschrieben werden, gibt es seit der Antike. Noch heute existiert sie in abgeänderter Form weiter, doch manche Neurowissenschaftler zweifeln sie inzwischen an. Sie setzt nämlich schwer haltbare Annahmen über die Art und Weise voraus, wie das Gehirn Ereignisse in der Welt verarbeitet. Insbesondere betrifft das die Notwendigkeit eines hypothetischen »Beobachters«, der eingehenden Signalen eine Bedeutung zuweist.



### Outside-in-Modell:

Ein Reiz – das Bild einer Blume – erreicht die Augen, und das Gehirn antwortet darauf, indem es Neurone zum Feuern bringt. Diese These ist nur plausibel, wenn ein »Beobachter« in den Prozess involviert ist, der die Blume und die neuronalen Reaktionen auf sie miteinander in Beziehung setzen kann. Fehlt diese Instanz, »sehen« Nervenzellen in der Sehrinde die Blume nicht.



### Inside-out-Modell:

Der alternative Erklärungsansatz kommt ohne Beobachter aus. Er geht davon aus, dass wir die Außenwelt verstehen lernen, indem wir mit ihr interagieren. Wenn man ein Objekt, etwa eine Blume, bewegt, erfährt man mehr über sie. Um diese Aufgabe zu meistern, fließen Signale von handlungs-auslösenden und sensorischen Neuronen zusammen und geben gemeinsam Aufschluss über seine Größe, Form und weitere Attribute. Ein bedeutungsvolles Bild entsteht und lässt das Gehirn in diesem Fall die Blume »sehen«.

## Nervenzellen wissen nichts von den Ereignissen, die ihre Aktivität verursachen

tivfunktion oder schlicht »Black Box«. Hirnregionen höherer Ordnung wie der präfrontale Kortex wurden bereits als der Ort postuliert, an dem »alles zusammenfließt« und an dem »alle Handlungen beginnen«. Bei näherer Betrachtung tun sich allerdings erhebliche Widersprüche auf.

Der Outside-in-Ansatz kann nämlich nicht erklären, wie das Licht, das auf die Netzhaut trifft, in eine Erinnerung an einen Sommerausflug umgewandelt wird. Die veränderten Feuermuster der Sinneszellen, die gerade stimuliert werden, stellen an und für sich nichts dar, was das Gehirn verstehen und speichern kann. Neurone in der Sehrinde, die beim Anblick einer Rose aktiv werden, erkennen die Blume nicht. Sie reagieren lediglich auf Signale aus weiteren Teilen des Gehirns, einschließlich jener, die von der Retina kommen.

In anderen Worten: Neurone in den visuellen Arealen im Kortex und sogar im hypothetischen Zentralprozessor können nicht »sehen«, was in der Welt um sie herum geschieht. Es gibt keinen inneren Dolmetscher, der veränderten Feuermustern eine Bedeutung zuweist. Und so wissen die Nervenzellen nichts von den Ereignissen, die ihre Aktivität verursachen. Nur eine Art »Beobachter«, der sowohl die Hirnaktivität als auch die auslösenden Faktoren in der Außenwelt sieht, ist in der Lage, die beiden Perspektiven zusammenzuführen (siehe »»Outside in« oder »Inside out«?«).

### **Wahrnehmung ist, was wir tun**

Da signalverarbeitende Neurone im Kortex nicht direkt auf die Außenwelt zugreifen, müssen sie eingehende Information mit etwas anderem abgleichen – sie sozusagen »erden«. Dem Gehirn steht

dafür nur eine Quelle zur Verfügung; sie entsteht, sobald wir eine Handlung auslösen. Ins Wasser getauchte Stöcke sehen beispielsweise häufig krumm aus. Erst wenn wir sie hin und her bewegen, bemerken wir, dass sie nicht gebrochen sind. Der Abstand zwischen zwei Bäumen und zwei Berggipfeln mag aus einer bestimmten Perspektive gleich erscheinen, aber sobald man sich ihnen nähert oder sich weg bewegt, wird der Unterschied ersichtlich.

Im Outside-in-Modell basiert eine Handlung auf einer Kette von Ereignissen: von der Wahrnehmung über die Entscheidung bis zur durchgeführten Aktion. In Wahrheit durchläuft das Gehirn jedoch nicht alle diese Schritte einzeln. Stattdessen informieren motorische Areale bei jeder Bewegung den Rest der Großhirnrinde über eingeleitete Muskelkontraktionen. Sie tun das, indem sie eine

# Routenplaner im Kopf

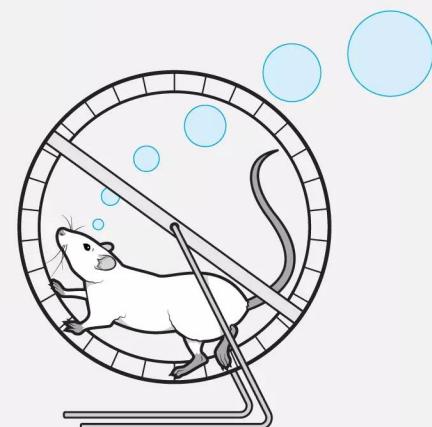
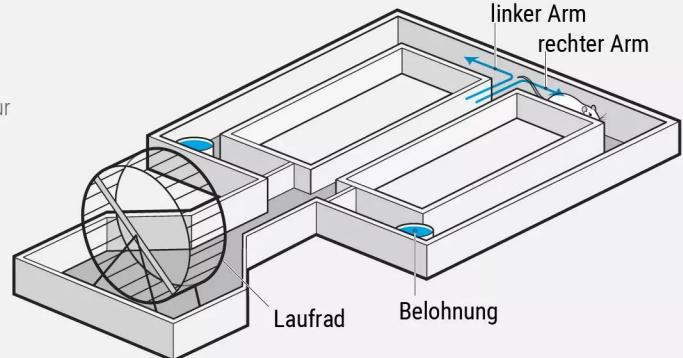
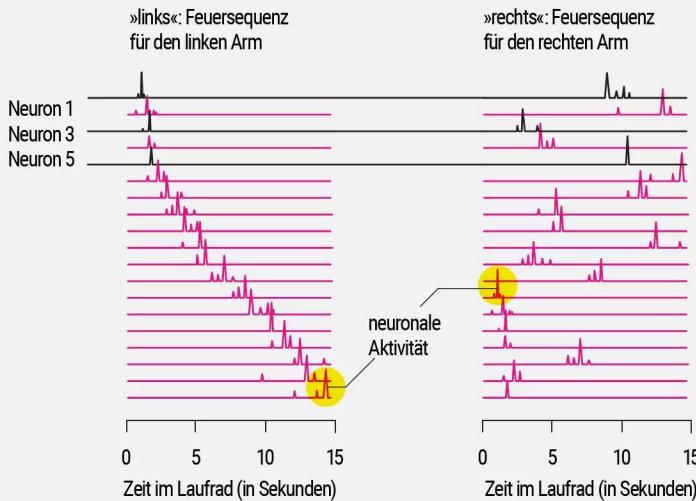
Laut einem Experiment werden spezifische Neurone in einer bestimmten Reihenfolge aktiv, wenn eine Ratte einen Weg durch ein Labyrinth plant, um an eine Belohnung zu kommen.

## Aufbau des Experiments:

Ein Laufrad befindet sich am Eingang eines Labyrinths mit zwei Armen. Die Ratte kann ihren Weg nach einem 15-sekündigen Lauf im Laufrad frei auswählen, sie erhält aber nur eine Belohnung, wenn sie abwechselnd links und rechts geht. Neuronale Feuermuster werden sowohl während der Zeit im Laufrad als auch im Labyrinth erfasst.

## Resultate:

Die neuronale Aktivität der Ratte im Laufrad sagte voraus, welche Richtung das Tier Sekunden später im Labyrinth einschlagen würde – ganz so, als würde sie sich den vor ihr liegenden Weg ausmalen. Das Feuermuster »links« (unten) trat auf, während sich die Ratte im Laufrad befand, bevor sie anschließend den linken Arm des Labyrinths entlanglief. Es unterscheidet sich vom Muster »rechts«, bei dem das Tier den anderen Weg wählte.



zusätzliche Nachricht aussenden, die man Efferenzkopie (englisch: corollary discharge) nennt.

Die Efferenzkopie liefert die Information, mit denen sensorische Schaltkreise sich erden. Denn sie bestätigt es, wenn das eigene Handeln eine beobachtete Veränderung bedingt hat. Ohne einen solchen Abgleich würden Sinneseindrücke niemals sinnvolle Erkenntnisse über die Größe und Form eines Gegenstands liefern. Wahrnehmung kann nach dieser Auffassung als das definiert werden, was wir tun, und nicht als das, was wir passiv über unsere Sinne aufnehmen.

Neuronale Schaltkreise, die Handlungen auslösen, haben also zwei Aufgaben. Die erste besteht darin, Befehle an Muskeln zu senden – darunter auch solche, die Augen und sonstige an der Wahrnehmung beteiligte Körperteile (etwa die Finger oder die Zunge) steuern. Diese richten die Sensoren besser zur Signalquelle aus, so dass das Gehirn mehr Daten über die Art und den Ursprung des Reizes erhält.

Ihre zweite Aufgabe ist es, die Information über diese Bewegungen in Form von Efferenzkopien an sensorische und weitere übergeordnete Hirnbereiche zu

senden. Man kann sich das wie einen Einschreibebeleg vorstellen: Neurone, die Augenbewegungen auslösen, benachrichtigen zugleich visuelle Kortexareale über ihr Tun. So kann unser Gehirn etwa unterscheiden, ob sich eine Blume im Wind bewegt hat oder wir sie angefasst haben.

Ein einfacher Versuch zeigt, was die Efferenzkopie bewirkt: Bedecken Sie eines Ihrer Augen mit einer Hand. Tippen Sie nun den anderen Augapfel mehrmals sanft von der Seite mit der Fingerspitze an, während Sie diesen Text lesen. Sie werden sofort sehen, dass die Buchstaben hin- und heranziehen. Wenn Sie wie üblich lesen, bleiben die Zeilen an Ort und Stelle, obwohl Ihre Augen ebenfalls ständig in Bewegung sind. Der Grund: Die Neurone, die die Augenbewegungen einleiten, senden eine Efferenzkopie an das visuelle System. Das Gehirn beurteilt mit ihrer Hilfe, ob sich die Umwelt oder der Augapfel bewegt.

### Lassen Erinnerungen Neuronennetze wachsen?

Der Unterschied zwischen dem Outside-in- und dem Inside-out-Ansatz wird be-

sonders deutlich, wenn man die beiden auf Lernprozesse anwendet. Das Tabula-rasa-Modell geht davon aus, dass Hirnnetzwerke mit neuen Erfahrungen zusätzliche Verbindungen knüpfen. Beim Lernen sollten die Schaltkreise demnach ausgefeilter werden. Im Inside-out-Modell ist Erfahrung hingegen nicht die Hauptquelle für die Komplexität des Gehirns. Stattdessen organisiert sich das Netzwerk selbst und legt sich dabei ein riesiges Repertoire an vorgefertigten Feuermustern an, die so genannten neuronalen Trajektorien. Es gleicht folglich einem Wörterbuch, das anfangs mit unsinnigen Wörtern gefüllt ist. Neue Erfahrungen ändern nichts an der Gesamtaktivität der Neuronennetze. Vielmehr lernen wir, indem wir vorhandene Trajektorien mit dem Erlebten verbinden.

Selbst ein junges, relativ unerfahrenes Gehirn verfügt über einen riesigen Vorrat an neuronalen Trajektorien. Das erlaubt es ihm, Erfahrungen mit bereits vorhandenen Mustern abzugleichen. Ein Gehirn, das sich ständig neu verschaltet, wäre nicht in der Lage, sich schnell an wechselnde Ereignisse in der Außenwelt anzupassen.

Bei Bedarf sollten neuronale Netzwerke dennoch plastisch (und somit lernfähig) sein. Wie neuere Studien zeigen, stellt das Gehirn dieses Gleichgewicht her, indem es Nervenzellen unterschiedlich stark miteinander verknüpft. Die meisten bilden nur schwache Verschaltungen aus, während ein kleinerer Teil robuste Kontakte unterhält. Die fest vernetzte Minderheit ist immer in Alarmbereitschaft. Sie feuert schnell und gibt Informationen bereitwillig weiter. Zudem widersetzt sie sich jeglichen Änderungen an ihren Schaltkreisen. Dank dieser Eigenschaften bleiben diese elitären Teilnetze, die mitunter als »rich club« bezeichnet werden, über neuronale Ereignisse im gesamten Gehirn gut informiert.

Der fleißige »rich club« macht etwa ein Fünftel der Neurone aus. Seine Mitglieder sind jedoch für fast die Hälfte der Hirnaktivität verantwortlich. Die restlichen Nervenzellen zählen zum »poor club«. Sie feuern eher langsam und sind nur schwach mit anderen verbunden. Dafür sind sie offenbar sehr plastisch und in der Lage, ihre Verbindungspunkte, die so genannten Synapsen, physisch zu verändern.

Beide Populationen arbeiten zusammen, um die Hirndynamik aufrechtzuerhalten. Der »rich club« reagiert auf verschiedene Erfahrungen mit ähnlichen Feuermustern. Das ermöglicht es uns, Unbekanntes recht gut einzuschätzen – nicht, weil wir uns daran erinnern, sondern weil wir Vermutungen über die eingehenden Eindrücke anstellen. Für das Gehirn ist nichts völlig neu, weil es Neues stets mit Altem in Verbindung bringt.

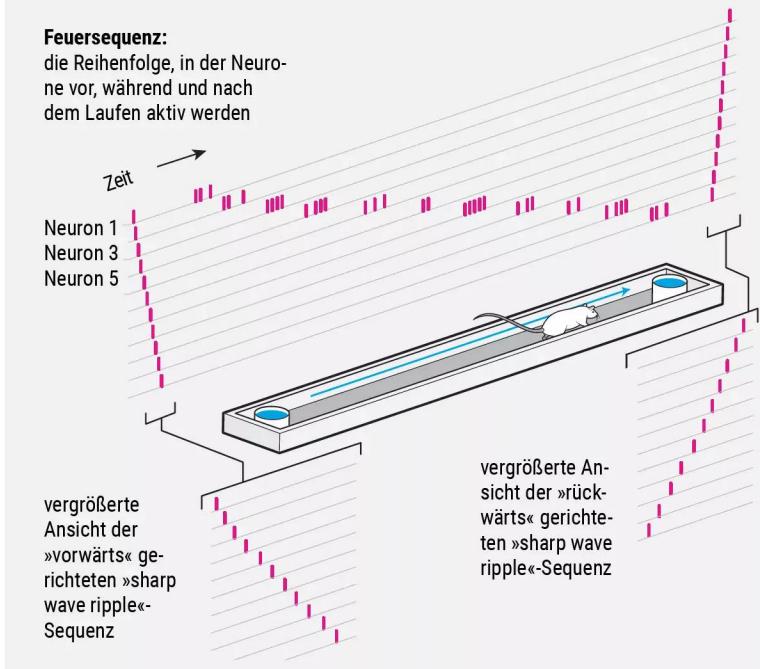
Plastische, langsam feuernende Neurone kommen ins Spiel, wenn eine wichtige Unterscheidung gemacht und für die Zukunft gespeichert werden muss. Sie erfassen subtile Unterschiede von Reizen, indem sie die Stärke einiger Verbindungen zu anderen Nervenzellen verändern. Ein kleines Kind erkennt zum Beispiel einen Hund, weil man ihm zuvor schon öfter einen gezeigt hat. Sieht es dann zum ersten Mal ein Schaf, nennt es dieses vielleicht ebenfalls »Hund«. Erst durch die Reaktion des Umfelds (»Das ist doch kein Hund, das ist ein Schaf!«) lernt das Kind den Unterschied – vermittelt durch die »Poor-club«-Neurone.

Ich hatte mir nie vorgenommen, zu widerlegen, dass unsere Wahrnehmung ausschließlich auf dem Outside-in-Prinzip basiert. Erst Jahrzehnte nach Beginn meiner Arbeit – die sich vor allem mit Neuronenpopulationen im Hippocampus befasst – wurde mir klar: Das Gehirn ist viel mehr mit sich selbst beschäftigt als mit dem, was um es herum geschieht. Diese Erkenntnis brachte mich dazu, die Forschung in meinem Labor völlig neu auszurichten. Mein Team und andere zeigten dann, dass Neurone den größten Teil ihrer Aktivität auf hirninterne Prozesse verwenden. Sie werden also keineswegs nur von Reizen gesteuert, die auf unsere Sinne einwirken.

Das verdeutlicht auch die folgende Tatsache: Wenn Sie Ihre Augen schließen, wissen Sie immer noch, wo Sie sind. Ein Großteil dessen, was »Sehen« ausmacht, ist nämlich in der Hirnaktivität selbst begründet. Eine solche neuronale Aktivität, die unabhängig von einströmenden Reizen stattfindet, macht so etwas wie Imagination erst möglich. Sie bietet damit die Grundlage für diverse andere kognitive Prozesse.

### Feuersequenz:

die Reihenfolge, in der Neurone vor, während und nach dem Laufen aktiv werden



### Ratten planen ihren Weg

Ein Beispiel für eine »abgekoppelte«, also von Sinneseindrücken unabhängige Hirnaktivität bietet eine Arbeit meines Teams am Schläfenlappen. Das Areal umfasst Strukturen, die uns dabei helfen, uns in der Umgebung zu orientieren – etwa den Weg zur Arbeit zu finden. Dazu gehören unter anderem der Hippocampus und der angrenzende entorhinale Kortex. Unsere

Forschung stützt sich auf die 2014 mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Entdeckung von John O'Keefe vom University College London. Mit seiner Arbeitsgruppe fand er heraus, dass manche Nervenzellen im Hippocampus von Ratten während der Navigation die räumliche Position des Tiers codieren. Aus diesem Grund nennt man diese Neurone auch Ortszellen. Läuft eine Ratte durch ein Labyrinth, werden

## Vorbereitung und Wiederholung

Eine Gruppe von Neuronen feuert, bevor, während und nachdem eine Ratte einen Gang entlangläuft. Bevor sie losrennt und wenn sie ihr Ziel erreicht hat, spulen die Zellen im Zeitraffer das gleiche Aktivitätsmuster ab wie während des Laufens (am Ziel allerdings in umgekehrter Reihenfolge). Man nennt diese schnellen Sequenzen »sharp wave ripples«. Sie ermöglichen es dem Tier, seinen Weg zu planen und sich später an ihn zu erinnern.

dagegen. Eines davon führten wir 2008 an der Rutgers University in New Jersey durch. Meine Mitarbeiterin Eva Pastalkova und ich trainierten Ratten darauf, abwechselnd den linken und den rechten Arm eines Labyrinths zu durchqueren, um zu einer Wasserquelle zu gelangen. Vor jedem Durchgang mussten die Nager 15 Sekunden lang in einem Rad laufen. Das sollte sicherstellen, dass allein ihre Erinnerung an die Routen darüber entschied, welchen Weg sie wählten.

Wenn bestimmte Neurone des Hippocampus feste Orte »repräsentieren«, wie es die Theorie der räumlichen Navigation von O'Keefe besagt, sollten ein paar kontinuierlich feuern, während sich die Ratte im Rad befindet. Jedoch verhielt sich keine einzige der hunderte überwachten Zellen so. Stattdessen wurden im Laufrad viele kurz nacheinander aktiv, in einer fortlaufenden Sequenz. Diese Hirnaktivität unterschied sich je nachdem, ob das Versuchstier im kommenden Versuch den rechten oder den linken Weg wählte. Die Daten erlaubten es uns somit, vorherzusagen, wohin es gleich laufen würde – und zwar ab dem Moment, in dem es das Laufrad betrat (siehe »Routenplaner im Kopf«).

## Mentale Reisen durch Raum und Zeit

Die Erkenntnisse brachten uns auf eine Idee: Dieselben neuronalen Mechanismen, die uns beim Navigieren der Welt helfen, könnten auch mentale »Reisen« ermöglichen. Wenn ich zum Beispiel später Lebensmittel besorgen muss, stelle ich mir vielleicht vor, wie ich durch den Supermarkt laufe. Zuerst gehe ich an Obst und Gemüse vorbei, deshalb kommen die Tomaten ganz oben auf die Einkaufsliste. Dann Milchprodukte, Teigwaren, die Wursttheke ... und so weiter.

Es gibt noch abstraktere Gedankenreisen. Dazu zählen etwa solche, die uns durch eine Reihe von vergangenen Erlebnissen mitnehmen. Ihnen entspringt das episodische Gedächtnis. Es ermöglicht uns viel mehr als nur einen Blick »zurück« – unsere bisherigen Erfahrungen erlauben es uns, Vorhersagen über die Zukunft zu treffen und für sie zu planen. Ein und derselbe neuronale Mechanismus lässt sich also vermutlich ganz unterschiedlich nutzen. Entsprechende Neurone kann man deshalb als Ortszellen, Gedächtniszellen oder Planungszellen bezeichnen, je nach Kontext.

Dass von sensorischen Reizen losgelöste Feuersequenzen bedeutsam sind, zeigt ein anderes Beispiel: die Hirnaktivität im Ruhezustand. Während ein Tier nichts tut oder schläft, ist sein Gehirn nicht untätig. Bestimmte Areale tauschen sich weiterhin aktiv aus. Wenn eine Ratte sich nach einer Labyrintherkundung in ihrem Käfig ausruht, erzeugt ihr Hippocampus charakteristische kurze Feuermuster. Diese »sharp wave ripples« treten in Zeitfenstern von 100 Millisekunden auf. Sie aktivieren erneut dieselben Neurone, die schon im Labyrinth feuerten (siehe »Vorbereitung und Wiederholung«). Der Prozess wiederholt sozusagen, was beim Durchlauf geschah. Er trägt zur Bildung des Langzeitgedächtnisses bei und ist für eine normale Hirnfunktion unerlässlich. Tatsächlich wird das Gedächtnis ernsthaft beeinträchtigt, wenn man diese Aktivität in Experimenten manipuliert oder wenn eine Krankheit sie stört.

Neuere Studien belegen, dass hinter den zeitlich komprimierten »Ripple«-Ergebnissen ein Prozess steckt, um in Gedanken unterschiedliche Lösungswege auszuprobieren. Das ermöglicht es uns,

reale und ausgedachte Alternativen zu unseren Handlungen zu finden. So lässt sich abwägen, was die optimale Strategie gewesen wäre. Wir können damit neue Schlussfolgerungen ziehen und künftige Taten vorausplanen – alles, ohne dass wir jede Möglichkeit unmittelbar durch einen realen Versuch testen müssten. Das macht unsere Gedanken und Pläne gewissermaßen zu aufgeschobenen Handlungen.

Ich wünschte, ich hätte all das gewusst, bevor ich damals die Fragen meiner klugen Studierenden vorschnell abtat. Heute würde ich ihnen sagen: Alle Gehirne, ob einfach oder komplex, arbeiten nach den gleichen Grundprinzipien. Neuronale Prozesse, die mit und ohne Sinnesreize ablaufen, finden nebeneinander statt. Eine von der Wahrnehmung abgekoppelte Nervenzellaktivität, die zugleich durch äußere Erfahrungen geeicht wird, ist die Essenz der Kognition.



(Gehirn&Geist, 10/2022)

Buzsáki, G. et al.: Neurophysiology of remembering. Annual Review of Psychology 73, 2022

Pastalkova, E. et al.: Internally generated cell assembly sequences in the rat hippocampus. Science 321, 2008

Spektrum  
der Wissenschaft  
**KOMPAKT**



# SIGNALÉ DES KÖRPERS

FÜR NUR  
€ 4,99

Kommunikation | Augen lügen nicht  
Emotionale KI | Berechnete Gefühle  
Soziale Wahrnehmung | Wie Stimmen wirken

HIER DOWNLOADEN

NEUROTHEORIE

# SEHEN, WAS WAHRSCHEINLICH IST

von Veronique Greenwood

Welche Reize wir im visuellen Arbeitsgedächtnis behalten, ist mit Unsicherheit behaftet. Doch dank der statistischen Fähigkeiten unseres Gehirns können wir abschätzen, welche Erinnerungen verlässlicher sind als andere.



**S**tellen Sie sich vor, Sie lesen irgendwo eine Telefonnummer, wollen sie in Ihr Smartphone eingeben – und bemerken prompt, dass die Zahlen im Kopf schneller verblassen, als Ihnen lieb ist. Während Sie die ersten Ziffern noch im Gedächtnis präsent haben, verschwimmen die hinteren vor dem inneren Auge. Wie war das gleich? Kam die Sechs vor oder nach der Acht?

Um Informationen wie einzelne Zahlen zu bearbeiten, müssen sie lange genug im mentalen Speicher bleiben. Dazu bedarf es einer Fähigkeit, die als visuelles Arbeitsgedächtnis bezeichnet wird. Seine Kapazität ist allerdings begrenzt. Seit Jahren debattieren Wissenschaftler über die genaueren Hintergründe: Finden nur ein paar Elemente auf einmal Platz oder mangelt es eher an Detailreichtum? In anderen Worten: Verteilt sich die Fassungskraft unseres Geistes auf einige wenige, dafür aber kristallklare Erinnerungen oder auf eine Vielzahl schemenhafter Fragmente? Wie man heute weiß, sind

die neuronalen Signale, die dem Arbeitsgedächtnis zu Grunde liegen, ziemlich verrauscht (siehe »Kurz erklärt«). Daher sind seine Inhalte zwangsläufig ungewiss. Für diese Unsicherheit haben wir ein Gefühl – wir sind also in der Lage abzuschätzen, welchen Erinnerungen eher zu trauen ist und welchen nicht.

Wie stellt das Gehirn das an und wie sind die Informationen repräsentiert? Um das herauszufinden, zeichnete ein Team um Clayton Curtis von der New York University 2021 die Hirnaktivität von Menschen auf, während diese eine räumliche Gedächtnisaufgabe lösten. Die Teilnehmenden sollten sich genau merken, wo kurz zuvor ein Punkt auf einem Bildschirm erschienen war. Anschließend sollten sie ihren Blick auf jene Position richten. Die Forscher fanden heraus, dass die mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRI) gemessenen Signale im visuellen Kortex eine Schätzung dessen widerspiegeln, was die Probanden gesehen zu haben glaubten (und nicht, was sie tatsächlich erblickt hatten). Die statistische Verteilung des Rauschens in den Signalen korrelierte dabei mit der berichteten Unsicherheit bezüglich ihrer

---

**Veronique Greenwood** ist Wissenschaftsautorin in New York.

AUF EINEN BLICK

## Kalkulierbare Ungewissheit

**01** Unsere Erinnerungen sind unsicher. Wir besitzen aber die Fähigkeit, diese Ungewissheit abzuschätzen und in Entscheidungen einzubeziehen.

**02** Laut Forschern repräsentiert das Gehirn Gedächtnisinhalte als Wahrscheinlichkeitsverteilung und bildet so nicht nur die Erinnerung, sondern auch die damit verbundene Ungewissheit ab.

**03** Die Ergebnisse untermauern die Theorie vom »bayesianischen Gehirn«, wonach uns statistische Modelle dabei helfen, sensorische Informationen zu interpretieren.

Erinnerung. »Das Gehirn nutzt das Rauschen, um bessere Entscheidungen zu treffen«, erklärt Curtis.

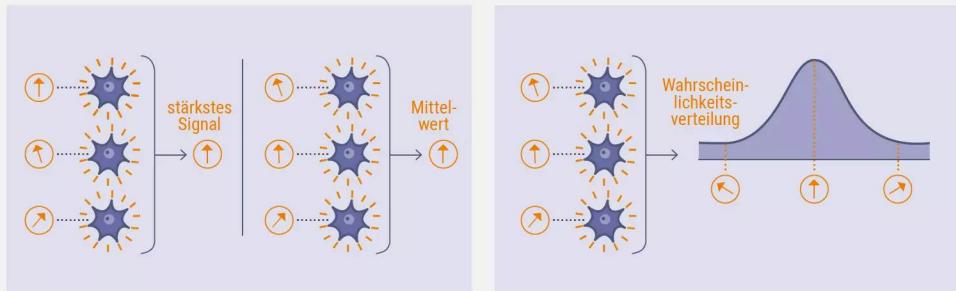
Die Ergebnisse stützen die These, dass das zentrale Nervensystem aktuelle und im Gedächtnis gespeicherte Sinneseindrücke in Form von Wahrscheinlichkeiten interpretiert. Zellen im visuellen System feuern als Reaktion auf bestimmte Reize in einem festgelegten Muster und senden ein Signal an den Rest des Gehirns. Die Neurone sind für sich genommen jedoch verrauschte Informationsquellen, so dass »die Aktivität einzelner Nervenzellen wahrscheinlich nicht die Wahrnehmung ist, mit der das Gehirn auf das Gesehene schließt«, so Curtis.

## Das bayesianische Gehirn

Vermutlich kombiniert es vielmehr die Impulse aus ganzen Zellverbänden. Es ist wichtig zu verstehen, wie das passiert. Denkbar wäre zum Beispiel, dass das Gehirn einen Mittelwert bildet: Wenn einige Neurone beim Anblick eines 45-Grad-Winkels am stärksten feuern und andere bei 90 Grad, dann gewichtet es vielleicht derart, so dass es einen 60-Grad-Winkel im Sehfeld darstellt. Eine weitere Mög-

# Wie interpretiert das Gehirn Sinneseindrücke?

Gedächtnisinhalte sind nichts anderes als die interpretierten Signale von Neuronenpopulationen. Doch worauf fußt diese Deutung? Hierzu gibt es mehrere Erklärungsmodelle.



## Traditionelle Theorie

Eine Erinnerung wird entweder durch die am stärksten feuерnden Zellen bestimmt oder aus dem Mittelwert aller Signale.

## Probabilistische Erklärung

Neuere Arbeiten deuten darauf hin, dass neuronale Signale probabilistisch interpretiert werden. Welches sind die Reize, die basierend auf Erfahrungen ein bestimmtes Erregungsmuster am wahrscheinlichsten erzeugt haben? Der Mittelwert der Wahrscheinlichkeitsverteilung entspricht dem Gedächtnisinhalt, die Breite der Streuung der damit verbundenen Unsicherheit.

lichkeit: Es geht nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip vor, wobei die am stärksten feuern den Zellen die Wahrnehmung bestimmen. »Aber es gibt noch eine weitere Option, die von der bayesianischen Theorie beeinflusst ist«, erklärt der Psychologe Curtis (siehe »Wie interpretiert das Gehirn Sinneseindrücke?«).

Dieser Ansatz ist benannt nach dem englischen Reverend und Mathematiker Thomas Bayes (1702–1761) und bezieht die Unsicherheit in die Schätzung von Wahrscheinlichkeiten ein. Es geht darum, mit welcher Sicherheit ein Ereignis eintreten wird, wenn die Umstände feststehen. Auf das Sehen angewandt, bedeutet das: Unser Gehirn interpretiert neuronale Signale mit Hilfe einer Plausibilitätsfunktion. Welches sind – basierend auf Daten aus früheren Erfahrungen – die Seheindrücke, die ein bestimmtes Erregungsmuster am wahrscheinlichsten erzeugt haben?

1867 brachte der deutsche Physiologe und Physiker Hermann von Helmholtz (1821–1894) die bayesianische Statistik erstmals mit jenen Berechnungen in Verbindung, die unser Gehirn beim Wahrnehmen von Umweltreizen augenscheinlich anstellt. Dennoch schenkten nur we-

nige Neurowissenschaftler diesen Ideen Beachtung. Erst in den 1990er und frühen 2000er Jahren zeichnete sich ab, dass Menschen durchaus probabilistische Schlüsse ziehen und sich die bayessche Wahrscheinlichkeitsrechnung dazu eignete, um Prozesse der Wahrnehmung und Bewegungskontrolle zu beschreiben.

»Die Leute fingen auf einmal an, vom bayesianischen Gehirn zu sprechen«, sagt Wei Ji Ma, der ebenfalls an der New Yorker Studie beteiligt war. In einer Arbeit von 2004 argumentierten Alexandre Pouget (heute an der Universität Genf) und David Knill von der University of Rochester für die »bayesianische Codierungshypothese«. Diese besagt, dass unser Denkorgan Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet, um sensorische Informationen abzubilden. Damals konnte das jedoch niemand sonst beweisen. 2006 gelang Ma, Pouget und zwei weiteren Kollegen von der University of Rochester dann der Nachweis, dass Populationen simulierter Neuronen optimale bayesianische Berechnungen durchführen.

Mit Hilfe elektrophysiologischer Methoden und bildgebender Verfahren lie-

## KURZ ERKLÄRT

### Neuronales Rauschen

Die mentalen Repräsentationen von Sinneseindrücken sind verrauscht; sie werden durch zufällige Fluktuationen in den neuronalen Signalen quasi verfälscht. Beispiel Sehwahrnehmung: Manche Neurone im visuellen Kortex reagieren bevorzugt auf Objekte einer bestimmten Orientierung. So feuern einige Zellen etwa beim Anblick eines 45-Grad-Winkels am stärksten, andere bei 90 Grad. Dabei fällt ihre Antwort auf ein und denselben Reiz nicht immer gleich aus. Der Grund hierfür ist ihre spontane, unvorhersehbare Grundaktivität (Rauschen).

ferten Ma und andere Wissenschaftler in den folgenden Jahren Beweise dafür, dass die Theorie von Bayes auf das Sehen anwendbar ist. Hierzu setzten sie maschinelle Lernprogramme, so genannte Decoder, zur Analyse der Hirnaktivität ein. Diese können im Allgemeinen so trainiert werden, dass sie die Zusammenhänge zwischen einem gesehenen Bild und dem Muster des neuronalen Blutflusses oder der Aktivität von Hirnzellen erkennen. Dadurch lässt sich etwa vorhersagen, was Menschen während einer fMRI-Messung auf einem Bildschirm betrachtet haben. Anstatt dabei eine einzige Vermutung anzustellen, erzeugen bayesianische Decoder eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Der Mittelwert dieser Verteilung repräsentiert die wahrscheinlichste Prognose darüber, was der Proband sah. Die Breite der Verteilung beschreibt zugleich die Unsicherheit in Bezug auf das, was derjenige erblickte.

In der Studie von 2021 übertrugen Curtis, Ma und ihre Kollegen die Idee auf das visuelle Arbeitsgedächtnis. Sie fütterten den Decoder mit fMRI-Bildern von zehn Hirnregionen, die sowohl fürs Sehen als auch für das Arbeitsgedächtnis zuständig

sind und die während des Gedächtnisexperiments erstellt worden waren.

Das Team untersuchte, ob die Mittelwerte der neuronalen Aktivitätsverteilung mit dem Blickwinkel der Probanden (also ihrer Erinnerung) übereinstimmten oder ob sie vielmehr widerspiegeln, wo der Punkt tatsächlich gewesen war. In sechs der Hirnareale stimmten die Werte besser mit der Erinnerung der Teilnehmenden überein. Laut der bayesianischen Codierungshypothese präsentiert die Breite der Verteilungen zumindest in einigen der betreffenden Hirnregionen das subjektive Vertrauen der Probanden in ihre Erinnerungen. »Fiel die Verteilung sehr flach aus, waren sich die Teilnehmer unsicherer«, erklärt Curtis.

### **Effizienter Mechanismus**

Um diese Unsicherheit zu bewerten, baten Curtis und sein Team die Freiwilligen darum, eine Wette über die Position des Punktes abzuschließen. In zwei Bereichen des visuellen Kortex, V3AB und IPS1, war die Breite der Verteilung (statistisch ausgedrückt die Standardabweichung) durchweg mit dem Ausmaß der Unsicherheit assoziiert. Somit scheinen die-

selben Zellpopulationen sowohl die Erinnerung an einen bestimmten Ort zu codieren als auch das Vertrauen in die betreffende Erinnerung. »Das ist ein effizienter Mechanismus«, sagt Curtis.

»Allerdings fallen die gemessenen Korrelationen sehr gering aus«, so Paul Bays, Neurowissenschaftler an der University of Cambridge, der ebenfalls das visuelle Arbeitsgedächtnis untersucht. fMRI-Scans sind grobkörnig: Jeder Datenpunkt repräsentiert die Aktivität von tausenden, vielleicht sogar von Millionen Neuronen. »Wir verwenden hier stark verrauschte Daten, um winzige Elemente zu betrachten«, sagt Hsin-Hung Li, Erstautor der New Yorker Studie.

So faszinierend die Ergebnisse sind, sie können also nur eine vorläufige Antwort auf die Frage geben, wie Unsicherheit im Arbeitsgedächtnis neuronal repräsentiert wird. »Die Arbeit spricht dafür, dass sie im Aktivitätsniveau von Nervenzellverbänden codiert wird«, so Bays. Theoretisch denkbar wäre auch, dass eine Erinnerung und die mit ihr verbundene Unsicherheit nicht von denselben Neuronen verarbeitet werden – womöglich befinden sie sich nur in enger

Nachbarschaft zueinander. Oder vielleicht korreliert das Feuern der Zellen stärker mit einem anderen kognitiven Aspekt, was sich aber mit der heutigen Technik noch nicht darstellen lässt.

Die Vorstellung, dass wir permanent mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen in unseren Köpfen herumlaufen, hat eine gewisse Schönheit. Vermutlich sind nicht nur Sehvermögen und Arbeitsgedächtnis auf diese Weise strukturiert, glaubt Pouget. »Die bayesianische Theorie ist allgemein gültig« – egal ob das Gehirn eine Entscheidung trifft, feststellt, ob man Hunger hat, oder durch Straßen navigiert.

Wenn die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten ein so wesentlicher Bestandteil unserer Wahrnehmung und unseres Denkens ist, warum sind Menschen dann so schlecht im Umgang mit Wahrscheinlichkeiten? Erkenntnisse unter anderem aus der Verhaltensökonomie haben gezeigt, dass wir unzählige Schätzfehler machen, die etwa dazu führen, dass wir die Risiken in Bezug auf das Eintreten gefährlicher Situationen überbewerten. »Wenn man Menschen bittet, die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses

zu bestimmen, gelingt ihnen das meistens schlecht«, sagt Pouget. Jedoch hängt diese Art von Schätzung von einem evolutionär jungen Hirnsystem ab. Wahrnehmung, Gedächtnis und motorische Steuerung hingegen wurden in einem deutlich längeren Prozess der natürlichen Auslese verfeinert, bei dem es häufig den Tod bedeutete, ein Raubtier zu spät zu entdecken oder eine Gefahr falsch einzuschätzen. Eine Wahrnehmung schnell zu beurteilen und dabei die eigene Unsicherheit einzubeziehen, hat unseren Vorfahren vermutlich sehr oft das Leben gerettet. ↗



Quanta magazine

(Gehirn&Geist, 6/2022)

Knill, D., Pouget, A.: The Bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in Neuroscience* 27, 2004

Li, H.-H. et al.: Joint representation of working memory and uncertainty in human cortex. *Neuron* 109, 2021

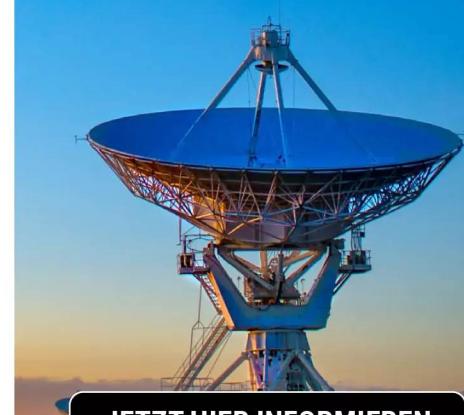
Ma, W. J. et al.: Bayesian inference with probabilistic population codes. *Nature Neuroscience* 9, 2006

Van Bergen, R. S. et al.: Sensory uncertainty decoded from visual cortex predicts behavior. *Nature Neuroscience* 18, 2015

# Spektrum.tv

Dokumentationen  
und Reportagen  
zu den Topthemen  
der Wissenschaft

4,99 €/Monat  
Ohne Verpflichtung  
Ohne Werbung



JETZT HIER INFORMIEREN

PREDICTIVE PROCESSING

# EFFIZIENTE VORHERSAGEMASCHINE

von Anil Ananthaswamy

Versuche mit künstlichen neuronalen Netzen stützen die Vorstellung, dass das Gehirn laufend Prognosen darüber anstellt, was es wahrnehmen wird. So spart es viel Energie.



**W**ie erzeugt unser Gehirn aus den Sinnesindrücken Wahrnehmungen? Eine Fülle an Forschungsergebnissen deutet darauf hin, dass es eingehende sensorische Reize nicht einfach wie ein Puzzle zu einem Gesamtbild zusammensetzen kann. So sind wir fähig, eine Szene auf Grundlage des in unsere Augen einfallenden Lichts selbst dann im Geiste zu konstruieren, wenn die ihr zu Grunde liegende Information verrauscht und mehrdeutig ist.

Deshalb gingen einige Fachleute dazu über, das Gehirn als eine »Vorhersagemaschine« zu betrachten. Mit Hilfe des so genannten »predictive processing« (übersetzt so viel wie: vorher sehende Verarbeitung) nutze es sein Vorwissen über die Welt, um Schlüsse zu ziehen oder Hypothesen darüber aufzustellen, was die eingehenden sensorischen Informationen

bedingt haben könnte. Die Vermutungen – und nicht die Sinneseindrücke selbst – erzeugen dann die Wahrnehmungen vor unserem geistigen Auge. Je mehrdeutiger die Eindrücke sind, desto stärker muss das Gehirn sich demnach auf sein Vorwissen verlassen.

»Das Schöne am ›predictive processing‹ ist, dass sich damit wirklich viele – Kritiker würden vielleicht sagen: zu viele – Phänomene erklären lassen«, so Floris de Lange, Neurowissenschaftler am Predictive Brain Lab der Radboud-Universität in den Niederlanden. Die Belege für diese Idee sind jedoch großteils indirekt und vielseitig interpretierbar, fügt sein Kollege Tim Kietzmann hinzu, der zu maschinellem Lernen forscht.

Um die Idee eingehender zu prüfen, wenden Fachleute sich vermehrt Computermodellen zu. Mit deren Hilfe wollen sie entschlüsseln, wie das Gehirn arbeitet. Informatikerinnen und Informatiker ließen sich bereits vor Jahrzehnten vom Verhalten biologischer Neuronennetzwerke inspirieren und entwickelten künstliche neuronale Netze. Diese können lernen, Vorhersagen über eingehen-

---

Anil Ananthaswamy ist Wissenschaftsjournalist und Autor mehrerer Bücher. Er schreibt vor allem über Themen aus den Bereichen KI, Neurowissenschaft und Physik.

AUF EINEN BLICK

## Vorweggenommene Eindrücke

**01** Während wir etwas wahrnehmen, stellt unser Gehirn Vermutungen darüber an, was die eingehenden Reize bedeuten könnten – und stützt sich dabei auf bereits angesammeltes Wissen.

**02** Diese Vorstellung bildet den Kern des »predictive processing«, einer These über die Funktionsweise des Gehirns. Mit künstlichen neuronalen Netzen testen Fachleute ihre Plausibilität.

**03** Dabei entdeckten sie: Wenn die Programme so arbeiten müssen, dass sie möglichst wenig Energie verbrauchen, organisieren sie sich nach einem der Theorie entsprechenden Prinzip.

de Informationen zu machen. Sie erlangen so einige Fähigkeiten, die denen eines Gehirns zu ähneln scheinen.

Dass die Wahrnehmung womöglich auf »predictive processing« beruht, mag auf den ersten Blick abwegig erscheinen: Das Prinzip erfordert schließlich einen komplizierten, nicht besonders intuitiven Prozess. In der Vergangenheit gab es aber immer wieder Menschen, die sich der Idee zuwandten, wenn andere Erklärungen unzureichend erschienen. Schon vor 1000 Jahren legte der muslimisch-arabische Astronom und Mathematiker Alhazen in seinem »Buch vom Sehen« einen solchen Mechanismus dar, um verschiedene Aspekte des Sehens zu beschreiben. Die Vorstellung gewann in den 1860er Jahren an Bedeutung. Damals argumentierte der deutsche Physiker und Arzt Hermann von Helmholtz, das Gehirn schließe auf äußere Ursachen der einströmenden Sinneseindrücke und konstruiere diese nicht »von unten nach oben« aus den sensorischen Reizen.

### Plausible Erklärung für Sinnestäuschungen

Helmholtz entwickelte sein Konzept der »unbewussten Schlussfolgerung«, um die

## Von der Vorhersage zur Wahrnehmung

Bottom-up-Modelle der Wahrnehmung stellen sich in Untersuchungen als weniger viel versprechend heraus als Top-down-Modelle, in denen hierarchisch organisierte Neuronenschichten Vorhersagen über die sensorischen Signale machen, die sogleich zu ihnen vordringen werden.

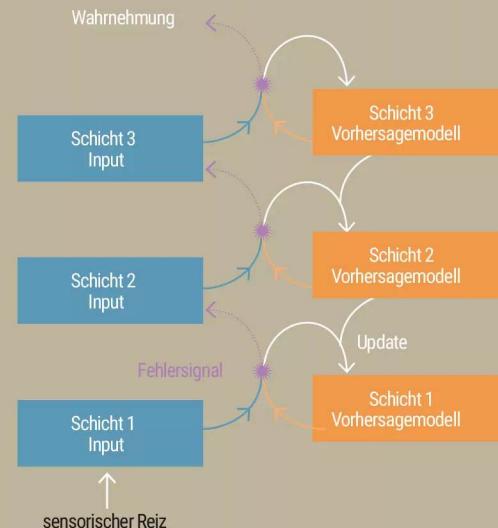
### Bottom-up-Modell:

Wahrnehmungen entstehen als Ergebnis von aufsteigenden sensorischen Signalen, die durch mehrere Verarbeitungsschritte laufen, bevor sie in der obersten Neuronenschicht ankommen.



### Top-down-Modell:

Jede Schicht sendet Vorhersagen über den Input, den sie erwartet, an die Schicht unter ihr. Sie erhält von letzterer Rückmeldungen zu den Fehlern in der Vorhersage und korrigiert daraufhin ihr Vorhersagemodell. Die Wahrnehmung ergibt sich aus der Kombination dieser Top-down- und Bottom-up-Prozesse.



bi- oder multistabile Wahrnehmung zu erklären. Diese tritt bei bestimmten optischen Illusionen auf, bei denen sich ein Bild auf mehr als eine Weise interpretieren lässt. Ein Beispiel dafür ist die bekannte doppeldeutige Zeichnung, in der man eine Ente und ein Kaninchen erkennt. Unser Gehirn wechselt dabei ständig zwischen den beiden Tierbildern hin und her. Da sich das Licht, das auf die Retina trifft, nicht ändert, schloss Helmholtz: Das gesehene Bild muss sich aus einem unbewussten Prozess ergeben, der Voraussagen darüber macht, was die eingehenden Reize bedeuten.

Im 20. Jahrhundert feilten Kognitionspsychologen weiter an der These von der Wahrnehmung als aktivem Prozess. Sie postulierten, das Gehirn greife zur Konstruktion der Umwelt sowohl auf über die Sinne einströmende Bottom-up- als auch auf inhärente Top-down-Inputs zurück, die sich aus Vorwissen und Erwartungen speisen. In seiner 1980 erschienenen, einflussreichen Arbeit »Perceptions as Hypotheses« (Wahrnehmungen als Hypothesen) argumentierte Richard Langton Gregory (1923–2010), dass Sinnestäuschungen im Wesentlichen dann entste-

hen, wenn das Gehirn eine falsche Vermutung darüber anstellt, was hinter eingehenden sensorischen Reizen steckt.

Informatiker und Informatikerinnen versuchten zuerst, Computern allein mit Bottom-up-Ansätzen – also ohne einprogrammiertes, internes Modell als Referenz – beizubringen, Bildinhalte zu erkennen. Diese Vorgehensweise war laut dem Neurowissenschaftler Karl Friston vom University College London jedoch von Anfang an zum Scheitern verurteilt. Denn ohne einen solchen Abgleich könnte man zwar Aussagen über Muster in den Daten machen, nicht aber über ihre Bedeutung.

Derweil nahm die Akzeptanz von »predictive processing« in Fachkreisen zu. Es blieb allerdings offen, wie das Prinzip in lebenden Organismen umgesetzt werden könnte. Ein beliebtes Modell, das so genannte »predictive coding«, geht von einer Hierarchie von Informationsverarbeitungsebenen im Gehirn aus. Die oberste Schicht repräsentiert abstraktes, hochrangiges Wissen. Sie macht Vorhersagen, indem sie die neuronale Aktivität der darunter liegenden vorwegnimmt. Zugleich sendet sie Signale »nach unten«. Die zwei-

## KURZ ERKLÄRT:

### »Predictive processing«

ist ein Theoriegerüst, das davon ausgeht, dass vom Gehirn erzeugte Vorhersagen eine entscheidende Rolle bei der Wahrnehmung, der Kognition und dem Verhalten spielen.

### »Predictive coding«

ist ein Codierungsprinzip, das auf dem »predictive processing« aufbaut. Demnach gibt es im Gehirn mehrere Informationsverarbeitungsschichten. Die oberste macht ständig Vorhersagen über eingehende Signale und korrigiert sie über Fehlersignale, die sie von den darunter liegenden Schichten erhält.

### Künstliches neuronales Netz

ist ein System, in dem künstliche Neurone auf bestimmte Arten miteinander verbunden sind, so dass es ihnen möglich ist, aus Inputsignalen selbstständig zu lernen.

### Rekurrentes neuronales Netz (RNN)

ist ein schichtweise aufgebautes künstliches neuronales Netz, in dem der Output von Neuronen einer Schicht über Rückkopplungen auch als Input in vorgeschaltete Neurone einfließt.

te Schicht nutzt diese, um ihre tatsächliche Aktivität mit der Vorhersage zu vergleichen. Gibt es eine Diskrepanz, erzeugt sie ein Fehlersignal, das wiederum nach oben fließt. Damit kann die höhere Schicht ihre Vorhersage aktualisieren.

Ein solcher Prozess findet gleichzeitig für jedes Paar untereinanderliegender Schichten statt, bis hinunter zur letzten, die den tatsächlichen sensorischen Input empfängt. Jede Diskrepanz zwischen dem, was von außen einströmt, und dem, was das Gehirn vorwegnimmt, führt zu einem Fehlersignal, das in der Hierarchie nach oben wandert. Die oberste Schicht aktualisiert schließlich ihre Hypothese. »Die Idee des ‚predictive coding‘ setzt voraus, dass das Gehirn im Grunde zwei Populationen von Neuronen hat«, so de Lange. Eine Gruppe codiere demnach die derzeit beste Vorhersage über das, was wahrgenommen wird, während die andere Fehler erkennt und meldet.

## Die Verwechslung als Vorhersagefehler

Wie sich eine solche Verarbeitung praktisch auswirkt, lässt sich gut anhand eines Beispiels erklären: Stellen Sie sich vor, Sie gehen einen Waldweg entlang.

Plötzlich meinen Sie, ein paar Meter vor sich im Dickicht eine Schlange zu erkennen. Nach dem ersten Schreckmoment – also der Zeit, die das Gehirn braucht, um die eingehende Information mit seiner Vorhersage abzugleichen – bemerken Sie, dass das Objekt am Boden gar kein Tier ist, sondern nur ein Stück Seil.

1999 erstellten die Computerwissenschaftler Rajesh Rao und Dana Ballard (damals am Salk Institute und an der University of Rochester) ein Computermodell, das nach dem Prinzip des »predictive coding« aufgebaut war. Es bestand aus künstlichen Neuronen, die jeweils ausschließlich für die Vorhersage oder für die Fehlerkorrektur zuständig waren. Die Forscher modellierten damit Teile eines Pfads im visuellen Verarbeitungssystem eines Primatengehirns. Er besteht aus hierarchisch organisierten Regionen, die beim Erkennen von Gesichtern und Objekten mitwirken. Mit dem Ansatz gelang es Rao und Ballard, einige ungewöhnliche Eigenschaften des natürlichen Vorbilds darzustellen.

Die beiden Fachleute führten diese Arbeit noch vor dem Aufkommen moderner tiefer neuronaler Netze durch. Sie

bestehen jeweils aus einer Eingabeschicht, einer Ausgabeschicht und mehreren versteckten Zwischenschichten. Ab 2012 verwendeten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen solche Konstrukte, um das Sehsystem von Primaten zu modellieren. Bei fast allen von ihnen handelte es sich jedoch um Feedforward-Netzwerke. Sie erlaubten es Informationen lediglich, in eine Richtung – vom Eingang zum Ausgang – zu fließen. »Das Gehirn ist aber eindeutig keine reine Feedforward-Maschine«, erklärt de Lange. »Im Gehirn gibt es viele Rückkopplungen, ungefähr so viele wie vorwärtsgerichtete Signale.«

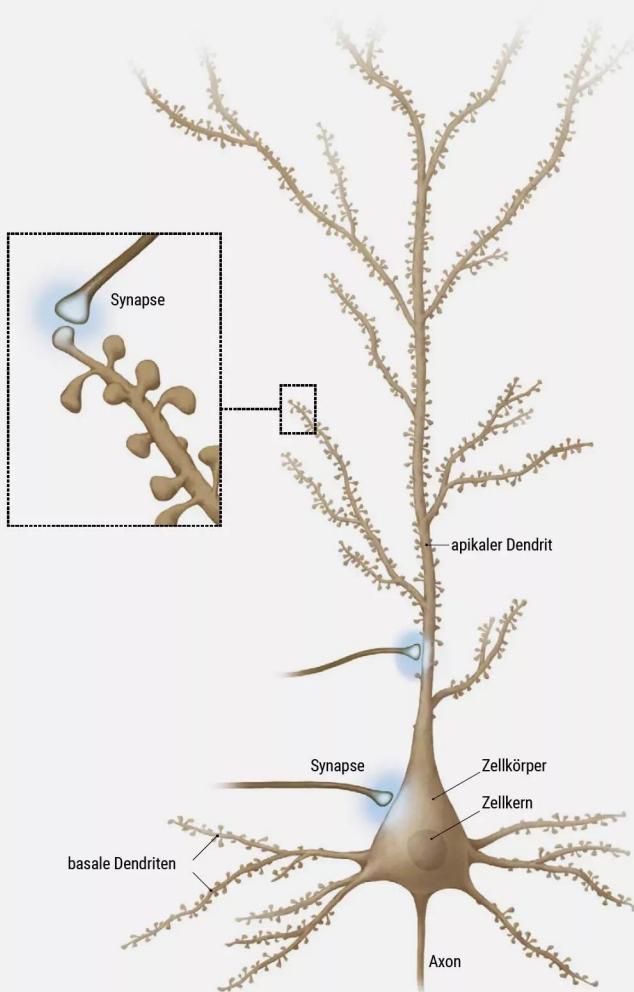
Deshalb wandten Fachleute sich bald einer anderen Struktur zu, die in den so genannten rekurrenten neuronalen Netzen (RNN) realisiert ist. Diese Systeme zeigen Eigenschaften, die sie zu einem »idealen Substrat« für die Modellierung des Gehirns machen, so Kanaka Rajan, Neurowissenschaftlerin an der Icahn School of Medicine at Mount Sinai in New York. Ihre eigene Arbeitsgruppe verwendet sie, um die Wirkungsweise des Gehirns besser zu verstehen. RNNs haben sowohl Feedforward- als auch Feedback-

Verbindungen zwischen ihren künstlichen Neuronen. Sie sind konstant aktiv, ganz unabhängig davon, welche Eingaben sie erhalten. »Die Fähigkeit, diese Dynamik über einen sehr langen Zeitraum – im Grunde für immer – zu erzeugen, ermöglicht es den Netzwerken, trainiert zu werden«, so Rajan.

### Eine KI, die sich wie das Gehirn verhält?

Zusammen mit seinen Doktorvätern David Cox und Gabriel Kreiman erstellte William Lotter 2016 ein RNN, das lernte, das nächste Bild in einer Videosequenz vorherzusagen. Sie nannten es PredNet. »Ich nehme die Schuld dafür auf mich, dass ich nicht kreativ genug war, mir einen besseren Namen einzufallen zu lassen«, gesteht Lotter. Das Team entwarf die Anwendung nach den Grundsätzen des »predictive coding«. Es besteht aus einer Hierarchie von vier Schichten, von denen jede die Eingabe vorhersagt, die sie von der darunter liegenden erwartet, und ein Fehlersignal nach oben sendet, wenn es eine Abweichung gibt.

Die Forscher trainierten das Netz mit Videos von Straßen, die von einer an einem Auto montierten Kamera aufge-



## Aufbau einer Pyramidenzelle

Wegen ihrer charakteristischen Form werden einige Neurone Pyramidenzellen genannt. Ihre Besonderheiten: Sie sind groß und multipolar, bilden also neben dem signalübertragenden Axon mehrere signalempfangende Zellfortsätze – so genannte Dendriten – aus. Denjenigen, der in entgegengesetzter Richtung zum Axon orientiert ist, nennt man apikalen Dendriten. Mehrere weitere basale Dendriten befinden sich auf der Seite des Axons. Pyramidenzellen unterhalten hunderte bis tausende Kontaktstellen (Synapsen, hier blau markiert) mit anderen Neuronen. Über sie gelangt Information direkt zum Zellkörper (axosomatisch) oder zum Dendriten (axodendritisch). Pyramidenzellen in der Großhirnrinde empfangen Signale von zahlreichen unterschiedlichen Quellen, darunter auch sensorische Reize.

nommen worden waren. PredNet lernte, kontinuierlich das folgende Bild solcher Clips vorherzusagen. »Wir wussten nicht, ob es funktionieren würde«, so Lotter. Dass dies der Fall war, »war ziemlich cool«. Im Anschluss untersuchten sie PredNet auch aus neurowissenschaftlicher Warte. 2021 berichteten die Forscher, dass das System Verhaltensweisen zeigt, die man in Affengehirnen als Reaktion auf unerwartete Reize beobachtet. Darunter befanden sich welche, die in einfachen Feedforward-Netzwerken nur schwer zu replizieren sind.

Kietzmann, van Gerven und weitere Forschende an der Radboud-Universität verfolgten die Experimente mit Spannung. Für sie stellte sich daraufhin eine noch grundlegendere Frage: Das Modell von Rao und Ballard sowie PredNet enthielten künstliche Neurone, die explizit nur für die Vorhersage beziehungsweise die Fehlerkorrektur zuständig waren. Zudem waren Mechanismen einprogrammiert, die bewirkten, dass korrekte Top-down-Vorhersagen die Fehlerneurone hemmten. Was aber wäre, wenn man das nicht ausdrücklich vorgeben würde? »Wir fragten uns, ob all diese architektonischen

Zwänge wirklich notwendig sind oder ob man mit einem noch einfacheren Ansatz auskommen würde«, erklärt Kietzmann.

Die Wissenschaftler argumentierten, dass neuronale Kommunikation offensichtlich mit hohen Kosten verbunden ist. Schließlich ist das Gehirn im Körper das Organ, das am meisten Energie verbraucht. Die Notwendigkeit, sparsam mit ihr umzugehen, könnte das Verhalten jedes sich entwickelnden neuronalen Netzwerks in Organismen einschränken. Die Arbeitsgruppe wollte deshalb untersuchen, ob sich für »predictive coding« typische Rechenmechanismen in RNNs allein dadurch ergeben könnten, dass die Systeme Aufgaben mit so wenig Energie wie möglich erfüllen müssen. Um das zu simulieren, schraubten sie an der Stärke der Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen, auch bekannt als Gewichte. »Wenn man die Gewichte verringert, führt das dazu, dass man mit weniger Energie kommuniziert«, erklärt Kietzmann. Diesen Eingriff betrachteten sie als Modell für die Minimierung synaptischer Übertragung, die einen Großteil des Energieverbrauchs in biologischen Neuronen ausmacht.

Das Team trainierte ein derartiges RNN mit Sequenzen aufeinander folgender Ziffern in aufsteigender, umlaufender Reihenfolge, also 1234567890, 3456789012, 6789012345 ... und so weiter. Jede Nummer zeigten sie dem Netzwerk in Form eines 28 mal 28 Pixel großen Bilds. Die Anwendung generierte mit der Zeit selbst ein Modell, um die nächste Zahl, ausgehend von einer beliebigen Stelle in der Folge, vorherzusagen. Sie war dabei gezwungen, das mit den kleinstmöglichen Gewichten zwischen den Einheiten zu tun, analog zu den niedrigen Niveaus an neuronaler Aktivität in einem biologischen Nervensystem.

Unter diesen Bedingungen spezialisierten sich im Netzwerk künstliche Neurone von selbst zu »Vorhersageeinheiten« und zu »Fehlerseinheiten«. Letztere waren besonders aktiv, wenn Erstere noch nicht in der Lage waren, die nächste Zahl richtig vorherzusagen. Ihre Aktivität nahm ab, als die Vorhersageeinheiten zunehmend korrekt arbeiteten. Entscheidend ist, dass das Netzwerk zu dieser Architektur gelangte, weil es den Energieverbrauch minimieren musste. »Es lernte die Art von Hemmung, die Menschen

normalerweise explizit einbauen«, betont Kietzmann. »Unser System tut das von sich aus, um energieeffizient zu sein.«

### Spurensuche in echten Neuronen

So überzeugend diese Daten aus computergestützten Studien erscheinen mögen – letztlich braucht es Messungen in lebenden Gehirnen, um »predictive coding« in ihnen zu belegen. Hierzu formulierte Blake Richards von der McGill University und seine Kolleginnen und Kollegen einige klare Hypothesen darüber, was man in Neuronennetzen sehen sollte, während diese lernen, Vorhersagen über unerwartete Ereignisse zu treffen. Um die Prognosen zu überprüfen, kollaborierten sie mit einem Team vom Allen Institute for Brain Science in Seattle. Gemeinsam führten sie Experimente an Mäusen durch und beobachteten dabei die neuronale Aktivität im Gehirn der Tiere. Das Augenmerk lag auf bestimmten Neuronen im Neokortex (siehe »Aufbau einer Pyramidenzelle«), von denen man annimmt, dass sie sich aus anatomischer Sicht für »predictive coding« eignen. Diese Pyramidenzellen empfangen sowohl sensorische Bottom-up-Signale

(über Synapsen an ihrem Zellkörper) als auch Top-down-Vorhersagesignale (über Synapsen an ihren apikalen Dendriten).

Die Versuchsleiter zeigten den Nagern Abfolgen von so genannten »Gabor patches« – Bilder, die aus hellen und dunklen Streifen bestehen. In jedem Clip erschienen nacheinander vier solcher Elemente, alle in ungefähr derselben Ausrichtung. Die Mäuse lernten also, dieses Muster zu erwarten. »Es muss für sie verdammt langweilig gewesen sein, sich die Videos anzusehen«, so Richards. Nach dem Training konfrontierten die Forscher die Versuchstiere mit etwas Unerwartetem: Das vierte »Gabor patch« ersetzten sie durch eines, das sie beliebig rotiert hatten. Die Nager waren zunächst überrascht, aber mit der Zeit gewöhnten sie sich an die Änderung. Während des gesamten Experiments beobachteten die Wissenschaftler, wie die Neurone der Mäuse die Reize verarbeiteten.

Dabei stellten sie fest, dass viele der untersuchten Zellen unterschiedlich auf erwartete und unerwartete Reize reagierten. Entscheidend war, dass die Diskrepanz bei den lokalen, von unten nach oben gerichteten Signalen am ersten Test-

tag stark ausgeprägt war, während sie am zweiten und dritten Tag abnahm, als die Reize für die Tiere zunehmend weniger überraschend wurden. In einem »Predictive-processing«-Kontext würde das darauf hindeuten, dass neu gebildete Top-down-Erwartungen die Reaktionen auf eingehende sensorische Informationen reduzierten.

Die apikalen Dendriten reagierten mit der Zeit immer spezifischer auf die unvorhergesehenen Reize. Die neuronalen Schaltkreise schienen also zu lernen, die Eigenschaften der abweichenden Ereignisse besser zu repräsentieren. Das half ihnen dabei, beim nächsten Mal zutreffendere Vorhersagen zu machen. »Die Studie stützt die Idee, dass im Neokortex so etwas wie ›predictive coding‹ stattfindet«, so Richards.

Einzelne Beobachtungen zur neuronalen Aktivität oder zum Verhalten eines Tiers lassen sich zuweilen ebenso durch andere Modelle erklären. Das »predictive processing« bietet hingegen einen Rahmen, mit dem sich viele von ihnen auf einmal erklären lassen. Das spricht für diese Theorie über die Funktionsweise des Gehirns. »Für mich sind die Be-

weise zum aktuellen Zeitpunkt ziemlich überzeugend«, so Richards. »Ich bin sogar bereit, eine Menge Geld darauf zu setzen.« ↪

(Gehirn&Geist, 11/2022)

Ali, A. et al.: Predictive coding is a consequence of energy efficiency in recurrent neural networks. BioRxiv  
10.1101/2021.02.16.430904, 2021

Gillion, C. J. et al.: Learning from unexpected events in the neocortical microcircuit. BioRxiv  
10.1101/2021.01.15.426915, 2021

Lotter, W. et al.: A neural network trained for prediction mimics diverse features of biological neurons and perception. Nature Machine Learning 2, 2020

Rao, R. P. N., Ballard, D. H.: Predictive coding in the visual cortex: A functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. Nature Neuroscience 2, 1999

Spektrum  
der Wissenschaft  
**KOMPAKT**

# BAUCH ODER KOPF



## Wie entscheiden wir?

Hirnforschung | Mit Augenmaß

Rationalität | Warum wir doch vernünftig sind

Neuromarketing | Kauf mich!



© Quanta Magazine

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »[To Be Energy-Efficient, Brains Predict Their Perceptions](#)« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99



VISUELLE WAHRNEHMUNG

# WIR SEHEN DIE WELT SO, **WIE ES UNS NUTZT**

von Anton Benz

Das Gehirn bildet sensorische Reize möglichst präzise ab? Von wegen.  
Der Nutzen einer Information beeinflusst unsere Wahrnehmung –  
und das bereits auf Ebene der Netzhaut.

**W**enn es um unser Überleben, unser Wohlbefinden oder andere Interessen geht, sehen wir die Dinge unbewusst verzerrt. Zu diesem Ergebnis kommt ein Team um Jonathan Schaffner von der Universität Zürich. Es bewies außerdem, dass der Effekt bereits im Auge beziehungsweise in der Netzhaut einsetzt.

Im ersten Versuch sollten 25 Personen jenes von zwei Streifenmustern auswählen, welches einem 45-Grad-Winkel am nächsten kam. Dafür gab es unterschiedliche Belohnungen. Einmal erhielten sie für jeden Treffer 15 Schweizer Franken. In der zweiten Bedingung hing die Entlohnung nur von der Orientierung der Reize

ab: Der Score stieg kontinuierlich von 0 bis 45 Grad (1 Franken bei 0 Grad Neigungswinkel; 46 Franken bei 45 Grad). Und siehe da: Die Probanden lernten bei der zweiten Bezahlungsart besser, diagonale Muster voneinander zu unterscheiden. Die Wahrnehmung scheint sich also anzupassen: Wir sehen das präzise, was uns nutzt.

Ist es wirklich die basale Wahrnehmung, die sich verändert, oder handelt es sich um unterschiedliche Interpretationen desselben Sinneseindrucks? Um das zu untersuchen, machte sich das Team die räumliche Organisation der frühen Sehareale zu Nutze. Diese sind wie eine Karte der Retina aufgebaut: Benachbarte Reize der Netzhaut stimulieren benachbarte Nervenzellen. 61 Freiwillige trainierten im Folgeversuch mit denselben Belohnungsprinzipien – aber nun sah jeder Teilnehmer das Vergleichspaar in einer der beiden Bildschirmhälften. Nach dem

Training ging es wieder ans Geldgewinnen: Die Teilnehmer sahen ein einzelnes Muster jeweils am oberen oder am unteren Rand des Screens und mussten den Winkel der Streifen schätzen. Befand sich das Muster im selben Teil des Bildschirms wie im Training, so passte sich ihre Wahrnehmung sofort an die Logik der Nutzenmaximierung an, die sie zuvor gelernt hatten. Dies war nicht der Fall, wenn das Muster im anderen Teil erschien.

Die Anpassung passiert also schon in den frühesten Stadien der Reizverarbeitung, war die Schlussfolgerung. »Sobald wir etwas betrachten, versuchen wir unseren eigenen Nutzen zu maximieren«, so die Autoren. »Das bedeutet, dass kognitive Verzerrungen lange vor dem bewussten Nachdenken über etwas beginnen.« ↵

---

Anton Benz hat »Philosophie-Neurowissenschaften-Kognition« studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Magdeburg.

(Spektrum.de, 11.07.2023)



FOKUSSIEREN

# IGNORIEREN BITTE!

von Mandy Viktoria Bartsch

Ständig ist das Gehirn damit beschäftigt, unwichtige Sinnesreize auszublenden. Damit diese nicht unsere bewusste Wahrnehmung stören, leisten die grauen Zellen Schwerstarbeit.

**E**s musste ja unbedingt ein griechischer Salat sein. Da stehe ich nun in der Gemüseabteilung des Supermarkts und frage mich, wo ich frische Tomaten und Gurken finde. Um mich herum eine Vielzahl mehr oder weniger exotischer Früchte, Gemüse aus der Region, Bio-Obst, Nüsse und abgepackte Snacks. Natürlich bin ich kurz nach Arbeitsschluss zum Einkaufen gefahren, wie die meisten Personen um mich herum offensichtlich auch.

Ein buntes Durcheinander an Sinnesindrücken umgibt mich: Neben mir wird über aktuelle Politik diskutiert, der Warenscanner piept im Hintergrund, und dann rempelt mich auch noch jemand

mit seinem Einkaufswagen an. Dennoch schaffe ich es nach einem kurzen Blick über die Auslagen, das gesuchte Gemüse ausfindig zu machen und in meinen Korb zu legen. Warum gelingt mir das trotz der widrigen Umstände so schnell?

Unser Gehirn ist ein Meister der visuellen Suche. Selbst unter größter Ablenkung schaffen wir es oft mühelos, Dinge in unserem Umfeld zu orten – zumindest wenn wir deren Merkmale kennen. Der Wahrnehmungspsychologe Jeremy Wolfe von der Harvard Medical School in Boston untersuchte 2004 gemeinsam mit seinem Kollegen Todd Horowitz, welche Eigenschaften die menschliche Aufmerksamkeit besser lenken und welche schlechter. Die Probandinnen und Probanden mussten in einem Suchbild Objekte finden, von denen sie jeweils ein Merkmal kannten. Das gelang ihnen besonders schnell, wenn man ihnen vorher entweder die Größe der zu suchenden

---

**Mandy Viktoria Bartsch** ist promovierte Neurowissenschaftlerin am Leibniz-Institut für Neurobiologie Magdeburg. Dort erforscht sie mit Hilfe von Hirnstrommessungen, wie Aufmerksamkeitsprozesse im Gehirn ablaufen.

#### AUF EINEN BLICK

## Unbewusst aussortiert

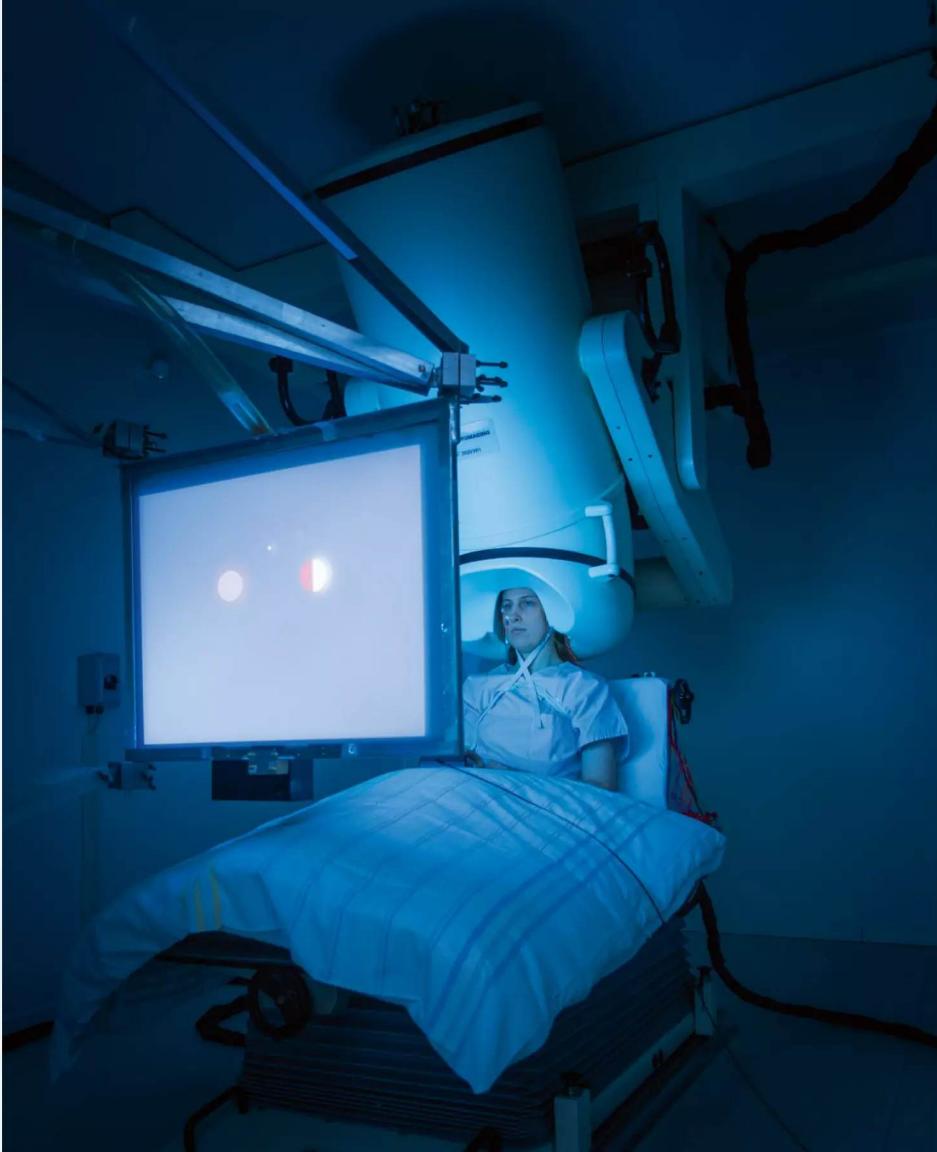
**01** Ununterbrochen prasselt eine Vielzahl an Reizen auf uns ein. Dennoch gelingt es uns erstaunlich gut, unsere Ziele nicht aus den Augen zu verlieren.

**02** Lange Zeit nahm man an, das Gehirn würde alles Unwichtige einfach nicht verarbeiten und ihm auf diese Weise den Zugang zum Bewusstsein verwehren.

**03** Neue Studien zeigen aber: Um etwas zu ignorieren, muss unser Gehirn sich erst einmal kurz damit beschäftigen. Erst dann kann es die bewusste Wahrnehmung unterdrücken.

## Unter der Haube

Beim Arbeiten erzeugt das Gehirn an der Kopfoberfläche messbare elektrische und magnetische Felder. Mittels einer Elektrodenhaube bei der Elektroenzephalografie (EEG) und einem Helm mit Magnetfeldsensoren bei der Magnetenzephalografie (MEG) registrierte die Gruppe um Jens-Max Hopf und Mandy Viktoria Bartsch Veränderungen dieser Felder im Millisekundenbereich. Die Versuchsteilnehmer saßen dabei in einer magnetisch abgeschirmten Kammer. Per Tastendruck sollten sie die Farbe des Halbkreises auf der linken Seite angeben, während auf der rechten Seite ein potenziell ablenkender Kreis in einer anderen Farbe auftauchte.



Gegenstände, deren Orientierung im Raum oder die Farbe nannte. Auch die Suche nach bewegten Objekten klappte überdurchschnittlich gut.

Da sich Gemüse nicht bewegt, die Orientierung im Supermarktregal keine Rolle spielt und Tomaten ähnlich groß sind wie vieles andere Obst und Gemüse, hilft in unserem Beispiel tatsächlich die Farbe am meisten. Bei der Suche nach einer Wassermelone zwischen Gurken und Limetten sollte man dagegen eher die Größe im Blick haben.

Richte ich also meinen Fokus bewusst auf die Farbe Rot, bekommt alles Rote einen Wettbewerbsvorteil im Gehirn. Diese Art der selektiven Aufmerksamkeit ist zwar seit Jahrzehnten bekannt, aber weiterhin Gegenstand aktueller Forschung. Denn noch immer ist nicht endgültig geklärt, wie wir bestimmen, was unser Gehirn verarbeitet. Können wir etwa auch beeinflussen, was es nicht beachten soll?

Zunächst einmal ist Ablenkung gar nicht immer etwas Schlechtes. So sollte man tunlichst reagieren, wenn eine große Bananenspinne aus dem Obstkarton krabbelt oder der Feueralarm losgeht. Solche unerwarteten Reize ziehen unwill-

kürlich unsere Aufmerksamkeit auf sich – Experten sprechen von »attention capture«. Das passiert allerdings nur mit besonders auffälligen, »salienten« Stimuli, etwa einem lauten Knall oder dem letzten verbliebenen roten Gummibärchen unter lauter gelben, grünen und weißen.

Evolutionär gesehen ist das äußerst sinnvoll, denn so können Tiere und Menschen blitzschnell Gefahren erkennen, beispielsweise eine auffällige Giftschlange, aber auch Nahrung wie rote Früchte im Blattwerk. Heutzutage machen wir uns diesen Mechanismus ganz bewusst zu Nutze, etwa durch den Einsatz von grellen Warnlichtern oder Stoppschildern im Straßenverkehr.

Würde unsere Aufmerksamkeit jedoch ständig von jeglichen auffälligen Dingen beansprucht, so könnten wir uns nicht mehr auf die eigentliche Aufgabe konzentrieren. Kann unser Gehirn also bei Bedarf ins Auge springende Reize aktiv ignorieren, beispielsweise die roten Äpfel in der Obstabteilung?

Risa Sawaki und Steven Luck von der University of California in Davis formulierte 2010 die »Signalunterdrückungshypothese«, nach der das Gehirn über ei-

## Vom Paradoxon des Ignorierens

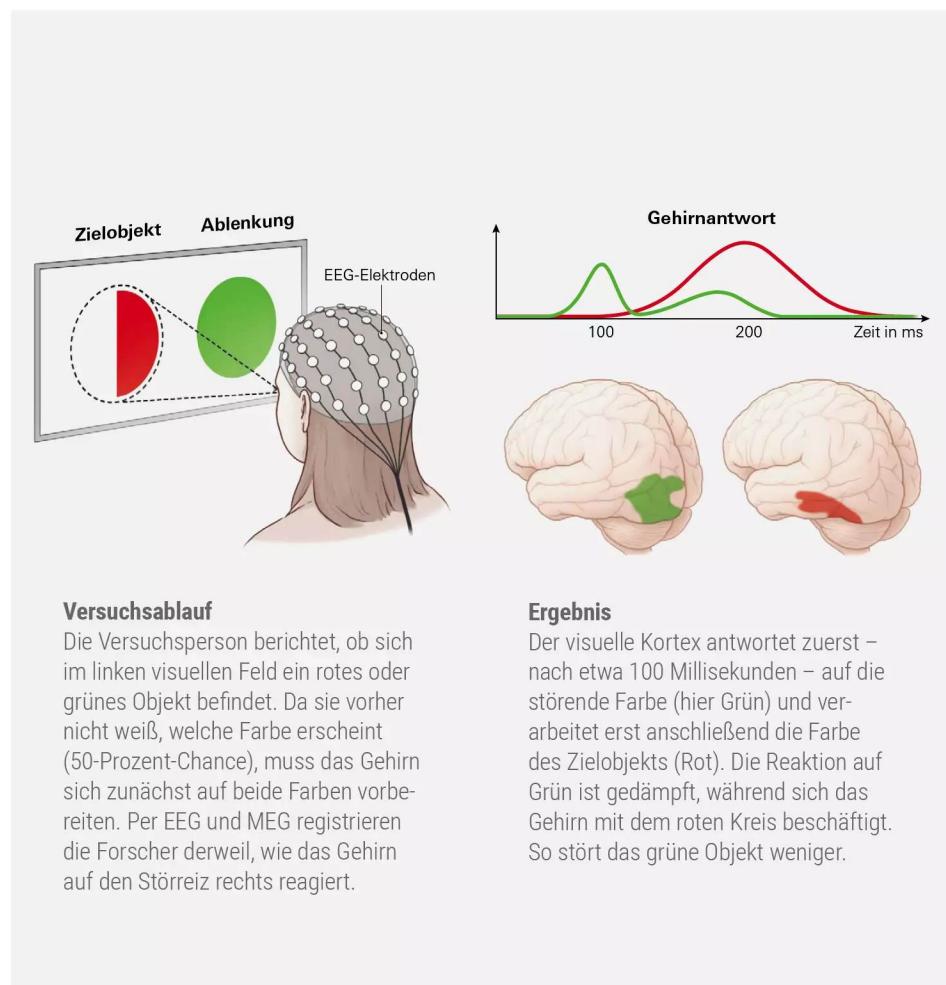
Wie unterdrücke ich den Gedanken an eine Sache, ohne an sie zu denken? Das philosophische Paradoxon des Ignorierens besagt, dass man keine Sache ignorieren kann, ohne sie zu selektieren. Anders gesagt: Um zu verhindern, dass ich mich mit einer Sache beschäftige, muss ich mich in irgendeiner Form mit ihr beschäftigen. Wie Studien von Mandy Viktoria Bartsch und Jens-Max Hopf vom Leibniz-Institut für Neurobiologie in Magdeburg zeigen, verarbeitet das Gehirn tatsächlich all die Dinge aktiv, die wir ignorieren wollen. Dabei scheint es das Paradoxon über die zeitliche Abfolge zu lösen: Es befasst sich erst für einen Bruchteil einer Sekunde mit dem Störreiz, um ihn anschließend auszublenden. Das geschieht in der Regel unbewusst.

nen Mechanismus verfügt, der ablehnende Eindrücke tatsächlich aktiv ausblendet. Die Kognitionswissenschaftler hatten Versuchspersonen auf einem Bildschirm nach farbigen Objekten suchen lassen, während sie deren Hirnaktivität überwachten. Überraschenderweise erschwert ein besonders auffälliger Störreiz die visuelle Suche nicht, da das Gehirn ihn aktiv unterdrückte. Das gelang allerdings nur, wenn die Teilnehmer zuvor die Farbe des ablenkenden Objekts kannten.

### Gedächtnis hilft beim Fokussieren

Offenbar klappt das nicht bei jedem gleich gut: Wie das Team um John McDonald von der Simon Fraser University im kanadischen Burnaby berichtete, können Menschen mit einer hohen Gedächtniskapazität Ablenkungen besser ausblenden als jene mit einer geringen.

Oft ahne ich aber gar nicht, was mich gleich stören wird. Bei meinem Einkauf für den griechischen Salat suche ich zum Beispiel gleichzeitig rote Tomaten und grüne Gurken – ohne zu wissen, auf was ich zuerst stoßen werde. Würde mein Gehirn erst alles Rote selektieren und andere Farben ausblenden (um sich nicht von



### Versuchsablauf

Die Versuchsperson berichtet, ob sich im linken visuellen Feld ein rotes oder grünes Objekt befindet. Da sie vorher nicht weiß, welche Farbe erscheint (50-Prozent-Chance), muss das Gehirn sich zunächst auf beide Farben vorbereiten. Per EEG und MEG registrieren die Forscher derweil, wie das Gehirn auf den Störreiz reagiert.

### Ergebnis

Der visuelle Kortex antwortet zuerst – nach etwa 100 Millisekunden – auf die störende Farbe (hier Grün) und verarbeitet erst anschließend die Farbe des Zielobjekts (Rot). Die Reaktion auf Grün ist gedämpft, während sich das Gehirn mit dem roten Kreis beschäftigt. So stört das grüne Objekt weniger.

Bananen, Avocados und Co. ablenken zu lassen), könnte ich die Gurken übersehen und umgekehrt. Was also passiert, wenn ich zuvor nicht einschätzen kann, was Ziel ist und was Ablenkung? Wie schnell kann mein Gehirn dann umschalten und die störenden Objekte wegfiltern?

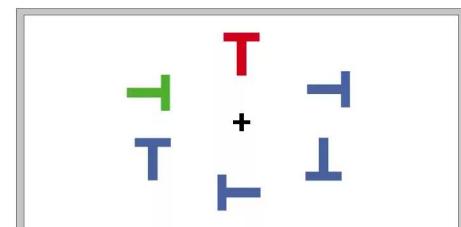
Wir haben uns diese Frage im Rahmen einer Studie am Leibniz-Institut für Neurobiologie in Magdeburg 2021 in etwas vereinfachter Form gestellt: Die Probanden sollten per Tastendruck entscheiden, ob auf der linken Bildschirmseite ein roter oder ein grüner Halbkreis auftaucht. Zeitgleich erschienen im rechten visuellen Feld Objekte, die ebenfalls rot oder grün sein konnten (siehe »Unter der Haube«).

Während der Aufgabe zeichneten wir die Hirnaktivität sowohl per Elektroenzephalografie (EEG) auf – also über auf der Kopfhaut aufliegende Elektroden – als auch per Magnetenzephalografie (MEG). Dabei sitzen die Probanden unter einer Haube mit Magnetfeldsensoren. Wir interessierten uns für so genannte ereigniskorrelierte Potenziale. Das sind Veränderungen in den Hirnströmen, die immer dann auftreten, wenn einem zum Beispiel sensorische Reize präsentiert

werden (etwa die farbigen Kreise auf dem Bildschirm) oder man etwas kognitiv verarbeitet.

Wir vermuteten, dass das Gehirn zunächst auf beide Farben gleich stark reagiert. Taucht dann beispielsweise ein roter Zielhalbkreis auf, müsste das in diesem Moment störende Grün unterdrückt werden – so dachten wir. Bezogen auf unser Gemüsebeispiel: Treffe ich zunächst auf die roten Tomaten, sollte mein Gehirn auf die Farbe Rot achten, während Grün aus dem Fokus gerät. Finde ich erst die Gurken, muss mein Gehirn dagegen das grüne Signal verstärken und das rote dämpfen. Das nahmen wir zumindest an.

Als wir dann aber zum ersten Mal auf die Daten schauten, staunten wir nicht schlecht: Das Gehirn reagierte immer zuallererst auf die ablenkende Farbe. Noch bevor es sich der eigentlichen Zielfarbe zuwandte, selektierte das Gehirn bereits 100 Millisekunden nach Erscheinen der Objekte die jetzt störende Farbe. Erst danach passierte, was wir eigentlich erwartet hatten: Identifizierte das Gehirn das Zielobjekt als rot, so verstärkte es die neuronale Antwort auf die rote Farbe, wäh-



YOUSUN KOH, NACH DONOHUE, S.E. ET AL.: CORTICAL MECHANISMS OF PRIORITIZING SELECTION FOR REJECTION IN VISUAL SEARCH. JOURNAL OF NEUROSCIENCE 38, 2018, FIG. 1A

**FINDE DAS GRÜNE T | ... und sage, wie es gedreht ist!** Obwohl die Farbe des Zielobjekts (hier grün) vorher bekannt ist, lenkt das rote Tab, da es wie das grüne T auch aus der Mehrheit der blauen Zeichen hervorsticht. Es ist also salient, man spricht von einem »Farb-Pop-out«.

rend es die Antwort auf grün rasch abschwächte und umgekehrt. Warum befasste sich das Gehirn zuerst mit der eigentlich uninteressanten Farbe?

Um der funktionellen Bedeutung dieses Mechanismus auf die Spur zu kommen, untersuchten wir seinen Einfluss auf die Reaktionszeit der Versuchsteilnehmer. Hierzu unterteilten wir die Daten in schnelle und langsame Antworten. Wir vermuteten, dass die Probanden umso langsamer waren, je mehr sie sich vorab mit der ablenkenden Farbe befasst hatten. Paradoxalement war aber genau das Gegenteil der Fall: Je stärker das Gehirn zunächst auf die ablenkende Farbe reagiert hatte, desto schneller konnten die Betreffenden anschließend die Farbe des Zielobjekts benennen.

Weitere Untersuchungen bestätigten: Was stört, wird zunächst herausgefiltert. Erst dann kann ich mich ungehindert mit dem eigentlichen Ziel beschäftigen. Das Gehirn räumt sozusagen blitzschnell seinen Arbeitsbereich auf und schafft alles beiseite, was für die Aufgabe hinderlich ist. Ähnlich wie wir das vielleicht mit unserem eigenen Schreibtisch tun, bevor wir mit der Arbeit beginnen.

Dazu passt auch, was das Team um Geoffrey Woodman von der Vanderbilt University in Nashville 2012 beobachtete. Bei einer visuellen Suchaufgabe mit mehreren farbigen Objekten half es den Versuchspersonen zu wissen, welche davon sie von vornherein ausschließen konnten (dass es beispielsweise definitiv keins der blauen Objekte sein würde). Wie Dirk van Moorselaar und Heleen Slagter von der Freien Universität Amsterdam zeigten, lässt man sich zudem weniger von einem Reiz ablenken, wenn man vorher weiß, wo er auftauchen wird. Wir nennen das Phänomen, das wir erstmals 2018 beobachteten, »selection for rejection« (zu Deutsch: auswählen, um es zu verwerten): Das Gehirn repräsentiert erst ganz kurz das störende Signal, um es anschließend besser unterdrücken zu können, sobald man sich dem Zielobjekt zuwendet.

### Unbewusst ignoriert

Bemerkenswert ist hierbei, wie schnell das geht. In der Regel entscheidet das Gehirn innerhalb von ein paar hundert Millisekunden, was es unterdrücken soll und was nicht. Das kann zudem völlig unbewusst ablaufen. Einen Reiz, der uns nicht ab-



EISPAÑOL / GETTY IMAGES / ISTOCK

**AUFMERKSAMKEITSMAGNET** | Ein markantes Objekt zieht unwillkürlich unsere Aufmerksamkeit auf sich. Experten sprechen von »attention capture«. Das kann auch mit weniger auffälligen Dingen passieren, wenn sie so aussehen wie etwas, nach dem wir suchen – etwa rote Äpfel, wenn ich nach Tomaten suche.

lenkt, müssen wir also nicht unbedingt bewusst wahrnehmen. So bekommen wir meist gar nicht mit, was unsere grauen Zellen eigentlich leisten, damit wir ungestört unserer Aufgabe nachgehen können.

In einem psychologischen Experiment beobachteten wir beispielsweise, dass ein irrelevanter Stimulus die Reaktionszeit der Probanden nicht verlängert. Man könnte hier schnell den Eindruck gewinnen, das Gehirn hätte ihn gar nicht erst »hineingelassen«. Jetzt wissen wir aber: Es hat sich mit ihm beschäftigt, ohne dass die Person es bemerkt hat.

Warum ist das überhaupt wichtig? Forscherinnen und Forscher auf der ganzen Welt beschäftigen sich immer noch mit der Frage, wie unser Denkorgan es schafft, die für uns wichtigen Informationen aus der Umgebung herauszupicken und dabei das große Gewirr an unwichtigen Sinnesreizen zu ignorieren. Was die Sache so knifflig macht, ist die Tatsache, dass derselbe Stimulus in der einen Situation stören kann, in einer anderen aber überlebenswichtig ist.

Eine blinkende Werbeanzeige etwa kann man getrost ignorieren, ein blinkendes Warnschild sollte man hingegen ernst

nehmen. Je besser wir verstehen, wie unser Gehirn diese Auswahl trifft, desto gezielter können wir die Mechanismen nutzen. Sei es, um die Aufmerksamkeit im Straßenverkehr effizienter zu lenken oder um Schulbücher übersichtlicher zu gestalten.

So oder so ist es ein kleines evolutionäres Wunder, dass wir tagtäglich in all der Hektik und bei all dem Tohuwabohu an Reizen auch unbekannte Supermärkte mit den gewünschten Einkäufen verlassen. Oder mit ein paar mehr, aber das ist dann eine andere Art der Ablenkung. ↪

(Gehirn&Geist, 11/2022)

Bartsch, M. V. et al.: Attention expedites target selection by prioritizing the neural processing of distractor features. Communications Biology 4, 2021

Donohue, S. E. et al.: Cortical mechanisms of prioritizing selection for rejection in visual search. Journal of Neuroscience 38, 2018

Gaspelin, N., Luck, S. J.: The role of inhibition in avoiding distraction by salient stimuli. Trends in Cognitive Science 22, 2018

Van Moorselaar, D., Slagter, H. A.: Learning what is irrelevant or relevant: Expectations facilitate distractor inhibition and target facilitation through distinct neural mechanisms. Journal of Neuroscience 39, 2019

**Spektrum**  
der Wissenschaft  
**KOMPAKT**

FÜR NUR  
€ 4,99

AUFMERKSAMKEIT  
UND  
KONZENTRATION

HIER DOWNLOADEN

ALEKSEANDRANOVIC / GETTY IMAGES / ISTOCK

AUFGABE  
AUFMERKSAMKEIT

# BLEIB BEI DER SACHE!

von Anna von Hopffgarten

Sich für längere Zeit auf eine Aufgabe zu konzentrieren, erfordert ein hohes Maß an Selbstkontrolle. Hirnforscher kennen inzwischen eine Reihe neuronaler Schaltkreise, die unsere Aufmerksamkeit steuern – und haben Ratschläge, wie man sie gezielt beeinflusst.

**I**m Lesesaal der Universitätsbibliothek Heidelberg herrscht konzentrierte Stille. Hier und da hört man leises Tippen, Buchseiten rascheln, irgendwo seufzt jemand. Tag für Tag kommen Studierende hierher, um für eine Prüfung zu lernen, ein Referat vorzubereiten oder an der Abschlussarbeit zu schreiben. »In meiner WG bin ich ständig abgelenkt«, erzählt Hannah, die gerade in den letzten Zügen ihrer Hausarbeit steckt. Die bedächtige Atmosphäre in der Bibliothek hilft ihr dabei, sich auf den Stoff zu fokussieren.

Dabei sind die Verlockungen, etwas anderes zu tun, groß. Allein das Smartphone bietet gigantische Ablenkungsmöglichkeiten: Was gibt es Neues auf Social Media? Kam nicht gerade eine Eil-

meldung von »Spiegel Online« rein? Und sollte ich nicht noch schnell der besten Freundin antworten? Dazu kommen mancherorts endlos Reize aus der Umgebung – Gesprächsfetzen, klingelnde Handys, der Trubel draußen vor dem Fenster.

Das hat auch Florian während seines Studiums der Betriebswirtschaftslehre bemerkt. Der heute 35-Jährige blickt mit Unbehagen auf diese Zeit zurück: »Tag für Tag saß ich an meinen Übungsblättern oder Hausarbeiten. Sobald ich einen Absatz – oder auch nur einen einzigen Satz – geschrieben hatte, dachte ich: ›Jetzt erstmal zu Facebook!‹ Und plötzlich war schon wieder eine Stunde rum.«

»Unser Gehirn kann nur ganz wenige Sinnesinformationen gleichzeitig aufnehmen und verarbeiten«, erklärt die Neurowissenschaftlerin Sabine Kastner, die mit ihrem Team an der Princeton University im US-Bundesstaat New Jersey die

#### AUF EINEN BLICK

## Die Macht der Ablenkung

**01** Ständig prasselt eine Vielzahl an Reizen auf uns ein. Unsere Aufmerksamkeit sorgt dafür, dass das Gehirn damit nicht überfordert ist: Sie filtert alles Unwichtige aus, darunter auch belanglose Gedanken und Empfindungen.

**02** Dabei schwankt die Aufmerksamkeit periodisch. Viermal pro Sekunde steigt sie kurz an und fällt darauf wieder ab. Wer eine Konzentrationsschwäche hat, könnte in der Phase des Tiefpunkts gefangen sein, vermuten Fachleute.

**03** Wie lange man sich konzentrieren kann, ist individuell verschieden und hängt zudem vom Training ab. Allgemein förderlich sind ausreichend Schlaf, regelmäßige Bewegungspausen und kleine Arbeitsetappen.

neuronalen Grundlagen von Wahrnehmung erforscht. Damit die Reize diesen Flaschenhals nicht nach dem Zufallsprinzip passieren, hat das Gehirn ein System entwickelt, das wir Aufmerksamkeit nennen. »Das sind eine Reihe von neuronalen Mechanismen, die die ankommenden Informationen selektieren.« Was gerade wichtig ist, wird durchgelassen, der Rest einfach ausgeblendet. Das kann zum Beispiel räumlich geschehen: »Im Moment richte ich meine Aufmerksamkeit auf Sie«, sagt Kastner, die mich während unseres Videotelefonats auf ihrem Computerbildschirm sieht. »Die Vögel draußen vor dem Fenster nehme ich nicht wahr.«

Das Aufmerksamkeitsfenster kann man sich vorstellen wie einen Scheinwerferkegel. Was sich außerhalb befindet, wird nicht verarbeitet. Fachleute sprechen auch von einer »mexican-hat«-Verteilung. Wie bei einem Sombrero befindet sich die höchste Stelle, also diejenige mit der intensivsten Wahrnehmung, in der Mitte. Drumherum ist eine Senke, also ein Bereich, in dem die Wahrnehmung unterdrückt ist (siehe »Was Aufmerksamkeit mit einem Sombrero zu tun hat«).

### **Welcher Reiz schafft es ins Bewusstsein?**

Diese Art von neuronalem Filter befindet sich auf einer der ersten Verarbeitungsstufen der Sinnesreize im Gehirn – in den frühen sensorischen Arealen. Im weiteren Verlauf, im Scheitellappen und im frontalen Kortex, liegen so genannte Aufmerksamkeitsnetzwerke, die die neuronalen Filter steuern. »Das Frontalhirn bestimmt, wo die Spitze des mexikanischen Huts sein soll«, erklärt Kastner.

Wie eine Gruppe um den Neurowissenschaftler Michael Halassa vom Massachusetts Institute of Technology 2019 herausfand, bewertet der präfrontale Kortex, wie relevant die Reize sind. Erachtet er sie als unwichtig, schickt er über die Basalganglien ein hemmendes Signal an einen Teil des Thalamus – ein Kerngebiet im Zwischenhirn –, der den Informationsfluss stoppt. Dabei ist der Filter nicht auf Sehinformationen beschränkt: Lesen wir zum Beispiel einen Text in der Unibibliothek, unterdrückt er die Geräusche, etwa das Tippen und Räuspern, im Hintergrund.

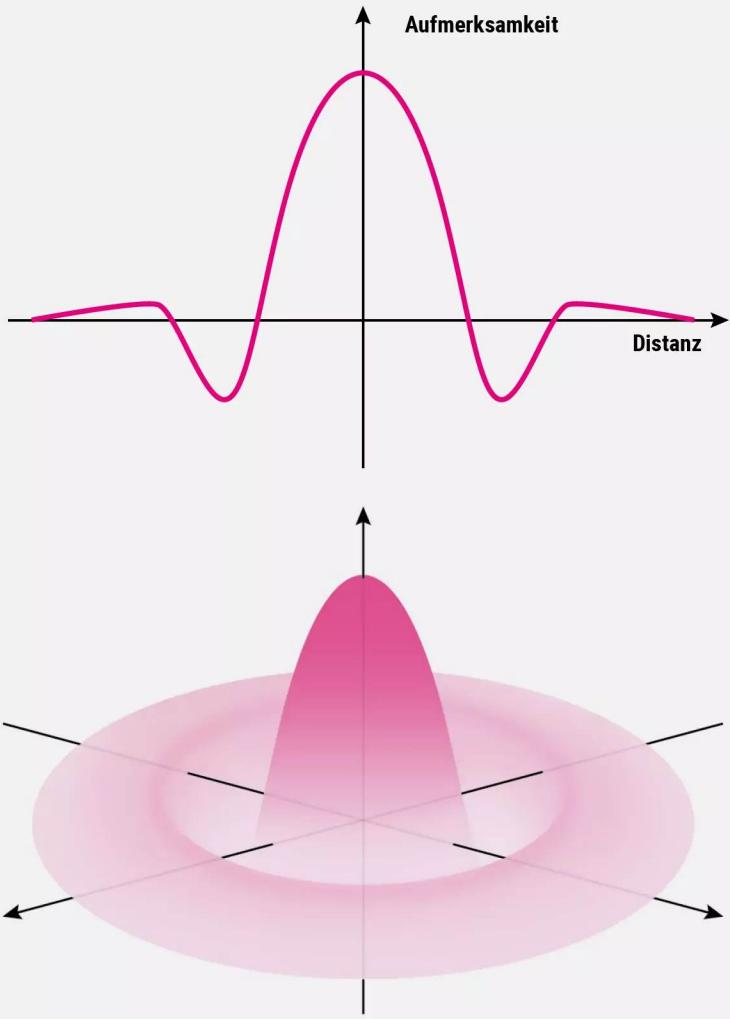
Und wenn die aussortierten Reize wichtiger sind als anfangs angenommen? Für den Fall hat sich das Gehirn

»Sobald ich einen Absatz oder auch nur einen Satz geschrieben hatte, dachte ich: ›Jetzt erstmal zu Facebook!«

Florian, ehemaliger Student

# Was Aufmerksamkeit mit einem Söbrero zu tun hat

Fokussieren wir mit unseren Augen einen Gegenstand, der uns interessiert, blendet unser Gehirn die Umgebung aus. Die Aufmerksamkeit verteilt sich dabei räumlich in Form eines mexikanischen Huts: In der Mitte, also an der Hutspitze, nehmen wir am meisten wahr. Drum herum (an der Basis der Hutkrempe) kommt eine Senke, in der die Wahrnehmung unterdrückt ist. Noch weiter außen ist die Aufmerksamkeit wieder etwas höher, aber längst nicht so hoch wie in der Mitte.



# »Unser Gehirn kann nur ganz wenige Sinnesinformationen gleichzeitig aufnehmen und verarbeiten«

Sabine Kastner, Neurowissenschaftlerin

abgesichert, wie Studien aus Kastners Team zeigen. Man könnte ja annehmen, der Aufmerksamkeitsscheinwerfer würde kontinuierlich leuchten. Doch stattdessen scheint er zu blinken: Viermal pro Sekunde steigt die Konzentration kurzzeitig an. »Dann nehmen wir das, worauf wir uns fokussieren, am intensivsten wahr«, erklärt Kastner. Daraufhin lässt sie wieder nach, so dass wir den Fokus leichter auf etwas anderes lenken können. Das Gehirn hat somit die Möglichkeit, immer wieder neue Ziele zu finden. »Wir glauben, dass dieses Auf und Ab bei Menschen mit Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) beeinträchtigt ist«, sagt die Neurowissenschaftlerin. Die Betroffenen sind

möglicherweise in der Phase des Tiefpunkts gefangen.

Wonach aber entscheidet das Gehirn, womit es sich intensiver beschäftigen will? Hier kommt die Salienz ins Spiel, im Deutschen würde man »Auffälligkeit« sagen. Ein salienter Reiz passiert die Filter mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als ein nicht salienter. Das kann ein besonders lautes Geräusch sein oder aber etwas völlig Überraschendes. So sind neue, unbekannte Reize salienter als solche, an die wir uns schon gewöhnt oder die wir bereits erwartet haben.

Manche Informationen drängen sich evolutionär bedingt besonders schnell in unser Bewusstsein. Dazu gehören beispielsweise Bewegungen – eine rennende

Spinne oder das Schlängeln einer Schlange – sowie bestimmte Farben: Rote Beeren im grünen Busch springen uns eher ins Auge als weiße.

Worauf wir uns fokussieren, kann allerdings individuell sehr unterschiedlich sein und vom Kontext und unseren Zielen abhängen. »Wenn ich in einer Menschenmenge meine Freundin suche, wird ihr Gesicht in meinem Gehirn eine viel höhere Salienz einnehmen als andere Gesichter«, sagt Sabine Kastner. Und hungrigen Menschen fallen Lebensmittel schneller auf als satten. Interessiert uns der Lernstoff nicht sonderlich, hat er es im Kampf um die Aufmerksamkeit besonders schwer. Das bekam auch Florian während seines BWL-Studiums zu spü-

ren: »Ich war nur am Rechnen und Auswendiglernen«, erzählt er.

Dass insbesondere soziale Medien einen ungeheuren Sog ausüben können, liegt an einer weiteren Vorliebe unserer Aufmerksamkeit: emotionale Reize und solche, die Lohn und Anerkennung versprechen. Zu erfahren, wie viele Likes die neue Instagram-Story hat, kann das Belohnungssystem im Gehirn stark stimulieren.

Dar Meshi und sein Team von der Michigan State University gehörten zu den ersten Forschern, die Menschen im Hirnscanner untersuchten, während diese soziale Medien nutzten. Wie die Neurowissenschaftler feststellten, wurde bei den Versuchspersonen ein Netzwerk von Hirnregionen immer dann aktiv, wenn ein neuer Like-Daumen unter ihrem Post erschien. Dazu zählten unter anderem der ventromediale präfrontale Kortex und das ventrale Striatum – wichtige Akteure des Belohnungssystems. Diese Areale springen auch beim Sex an, wenn uns Geld angeboten wird oder wir Drogen konsumieren. Meshi und seinen Kolleginnen und Kollegen zufolge reagieren sie sogar dann, wenn wir die Bilder oder Storys

anderer liken oder einfach nur nachsehen, was die Freunde so treiben.

Florian war frustriert davon, dass er sich ständig selbst ablenkte. Mal waren es die sozialen Medien, mal die Zeitung oder sogar der Abwasch, die plötzlich attraktiver erschienen als die Arbeit. Wie es der Zufall so wollte, lernte er in dieser Zeit eine amerikanische Austauschstudentin kennen, die wegen ihrer ADHS-Diagnose eine riesige Packung des konzentrationsfördernden Medikaments Adderall dabei hatte. Der Hauptwirkstoff Dexamphetamine gehört zur Gruppe der Amphetamine und wird neben Methylphenidat, als Ritalin bekannt, zur Behandlung von ADHS bei Kindern und Jugendlichen eingesetzt. In Deutschland wird Dexamphetamine unter dem Handelsnamen Attentin vertrieben.

### **Boom der Stimulanzien**

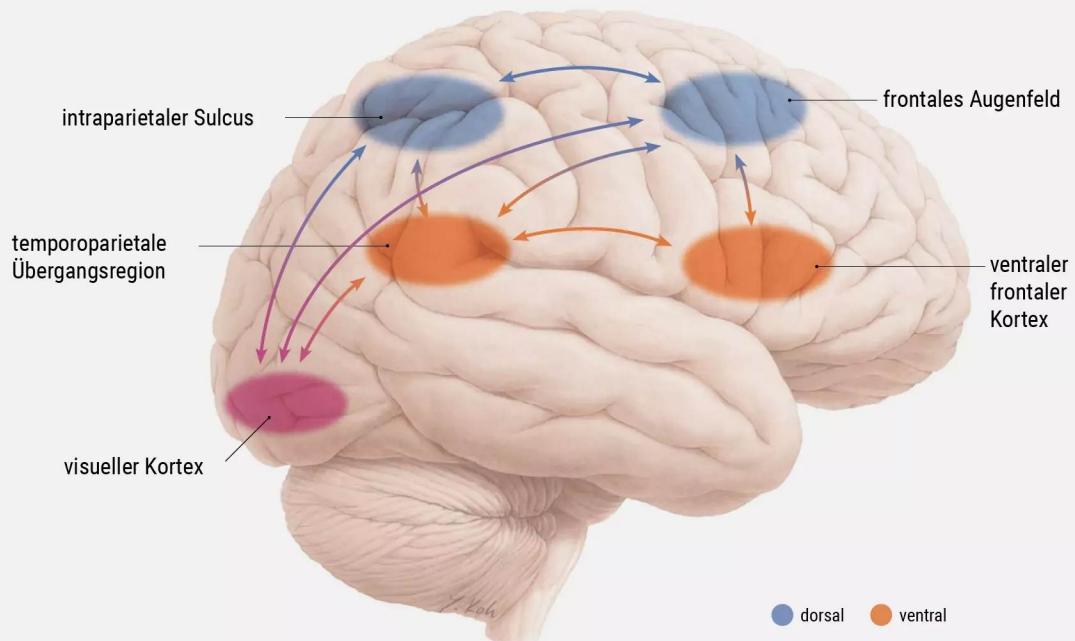
»In den USA essen sie das Zeug wie Smarties«, erzählt Florian. Tatsächlich ist die Zahl der ADHS-Diagnosen in den USA in den letzten Jahren stark angestiegen, und die Dosen der verschriebenen Stimulanzien ebenfalls. Erhielten 1997 noch knapp 6 Prozent aller 3- bis 17-Jährigen eine

»Guter Schlaf ist weitaus effektiver, als sich mit Stimulanzien aufzuputschen«

Sabine Kastner

# Filterstationen im Kopf

Verschiedene Schaltkreise im Gehirn beeinflussen, welche Reize in der Umgebung wir beachten und welche wir ausblenden. Das dorsale Aufmerksamkeitsnetzwerk (blau) umfasst Regionen im Frontal- und Scheitellappen. Es wird immer dann aktiv, wenn wir unsere Aufmerksamkeit aus innerem Antrieb auf etwas lenken, etwa weil es uns interessiert oder wir etwas suchen. Das ventrale Netzwerk (orange) hingegen wird durch besonders auffällige Reize angeregt – zum Beispiel einen lauten Schrei oder ein blinkendes Licht. Es besteht aus dem ventralen frontalen Kortex und der temporoparietalen Übergangsregion. Die beiden Netzwerke tauschen sich über Querverbindungen auch untereinander aus.



ADHS-Diagnose, waren es 2018 schon fast 10 Prozent. Von ihnen bekamen 62 Prozent Medikamente wie Adderall oder Ritalin.

Aber auch der nicht bestimmungsgemäße Gebrauch von Amphetaminen und Methylphenidat zur Konzentrationssteigerung hat in den USA laut Studien zugenommen. Manche Medien schreiben gar vom neuen »College Crack«. Bei einer Befragung aus dem Jahr 2013 gaben 9,3 Prozent aller teilnehmenden Collegestudenten an, im Vorjahr mindestens einmal ein Stimulans zum nicht medizinischen Gebrauch eingenommen zu haben. 2003 waren es nur 5,4 Prozent. Andere Erhebungen ergaben noch weitaus höhere Zahlen, darunter auch eine Fragebogenstudie aus Deutschland von 2013: Von 2569 Studierenden ohne ADHS-Diagnose gaben 20 Prozent an, im vergangenen Jahr Medikamente wie Ritalin eingenommen zu haben, um ihre kognitive Leistung zu steigern.

Obwohl Florian keine ADHS-Diagnose hatte, reizte es ihn, das Mittel einmal zum Arbeiten auszuprobieren. »Ich wollte wissen, ob es mir beim Konzentrieren hilft.« So gab ihm die amerikanische

Freundin ein paar Tabletten ab. Erst merkte er kaum einen Unterschied. Doch als er die Dosis erhöhte, passierte etwas Merkwürdiges in seinem Kopf: »Ich weiß noch genau, wie ich in der Uni saß und morgens mit dem Übungszettel zum Thema Makroökonomie begann. Plötzlich war Abend. Der Tag war völlig an mir vorbeigegangen, weil ich konzentriert Aufgabe für Aufgabe durchgearbeitet hatte.« So begann er, die Tabletten regelmäßiger einzunehmen, und besorgte sich später noch Ritalin im Darknet. »Zu horrenden Preisen«, erzählt er.

Amphetamine und Methylphenidat wirken auf das System der Katecholamine im Gehirn. Dazu zählen die Botenstoffe Dopamin, Noradrenalin und Adrenalin. Die Stimulanzien sorgen entweder dafür, dass mehr von den Botenstoffen ausgeschüttet wird oder dass ihre Wiederaufnahme gehemmt wird. Folglich können sie länger im Gehirn wirken.

»Die größte Dichte an Dopaminrezeptoren findet sich im Frontalhirn«, erklärt Sabine Kastner. »Die Mittel wirken daher unmittelbar auf die Selbstkontrollzentren, die mit den Aufmerksamkeitsnetzwerken zusammenarbeiten.« Aber ver-

»Wir können uns nicht über Stunden konzentrieren«

Anja Baethge, Arbeits- und Organisationspsychologin

**FRAGWÜRDIGE HILFSMITTEL** | Amphetamine wie das US-Medikament Adderall und Methylphenidat (Ritalin) sind ausschließlich zur Behandlung von ADHS zugelassen. Allerdings nutzen immer mehr Gesunde die Mittel zum Hirndoping.



ALAMY / KRISTOFFER TRIPPLAAR  
bessern die auch als Hirndopingmittel bekannten Substanzen wirklich die kognitive Leistung? Das untersuchten die Neurowissenschaftlerin Martha Farah und ihr Team von der University of Pennsylvania. Sie verabreichten Collegestudenten ohne Anzeichen von ADHS entweder den Amphetaminmix Adderall oder ein Placebo. Dann führten sie mit ihnen allerhand kognitive Tests durch, unter anderem zur Konzentration. Das

Überraschende: Die »gedopten« Versuchspersonen schnitten im Schnitt nicht besser ab als die Mitglieder der Placebo-Gruppe.

Wieso aber sind die Mittel dennoch so beliebt unter Studierenden? Das könnte an einem anderen Effekt liegen: Farah und ihre Kollegen fragten die Teilnehmer nach Abschluss der Tests, wie gut sie abgeschnitten zu haben glaubten. Wer zuvor Adderall eingenommen hatte, schätz-

te die eigene Leistung deutlich besser ein als die Placebo-Kandidaten. Und Studien zufolge erhöht ein positives Selbstbild die Motivation. Wer annimmt, etwas gut zu beherrschen, beschäftigt sich in der Regel gerne damit – und das wiederum ist förderlich, wenn man sich längere Zeit darauf fokussieren möchte.

Sabine Kastner hält es für sehr problematisch, wenn Gesunde zu solchen Neurostimulanzen greifen: »Die Pille mag für

den Moment dabei helfen, die Nacht durchzulernen. Aber auf Dauer kann sie süchtig machen.« Außerdem zählen Schlafstörungen zu den häufigsten Nebenwirkungen, wie auch Florian feststellen musste. »Ich war innerlich aufgewühlt und konnte oft nicht einschlafen«, erzählt er. Und hier kommt ein weiteres Problem hinzu: Damit sich die Lerninhalte im Langzeitgedächtnis festschreiben, benötigen wir genügend Nachtschlaf. Schlafmangel beeinträchtigt zudem die Leistung des Arbeitsgedächtnisses und das Konzentrationsvermögen, wie Studien zeigten. Man verstärkt mit den Mitteln also indirekt das Ursprungsproblem. Deshalb bringt Kastner ihren Studierenden zu Beginn einer Vorlesungsreihe erst einmal bei, wie man am besten lernt. »Guter Schlaf ist da weitaus effektiver, als sich mit Stimulanzen aufzuputschen.«

Neben einer erholsamen Nachtruhe gibt es weitere Strategien, um seine Aufmerksamkeitsspanne zu erhöhen. Die Neurowissenschaftlerin ist davon überzeugt, dass sich die sensorischen Filter und die Kontrollzentren im Gehirn zumindest etwas trainieren lassen, etwa durch regelmäßiges Lesen.



Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Selbstkontrolle. Studien zufolge kann es bereits helfen, das Smartphone vom Schreibtisch zu verbannen. In einem trubeligen Umfeld sollte man zudem seine Aufmerksamkeit bewusst von ablenkenden Reizen wegsteuern. Der US-amerikanische Psychologe Walter Mischel – bekannt durch seinen Marshmallow-Test – untersuchte in den 1980er Jahren an Kindern verschiedene Strategien, Ablenkungen zu widerstehen. Die jungen Teilnehmerinnen und Teilnehmer im Vor-

**RITALIN | Methylphenidat, bekannt als Ritalin, wird zur Behandlung von ADHS eingesetzt.**

schulalter sollten eine eher langweilige Aufgabe bearbeiten, für die sie sich aber konzentrieren mussten. Sie wussten: Wenn sie diese erfolgreich abschlossen, durften sie zur Belohnung mit einem attraktiven Spielzeug spielen. Im selben Raum befand sich jedoch eine sprechende und blinkende Spielzeugkiste mit einem Clownsgesicht, die »Mr. Clown Box«.

## 7 Tipps zum Konzentrieren

**1** Unterteilen Sie die Arbeit in Etappen! Das mehrt die Erfolgserlebnisse, die ihrerseits motivierend wirken.

**2** Legen Sie regelmäßige Pausen ein! Am besten einmal pro Stunde für fünf bis zehn Minuten. Tun Sie dabei etwas völlig anderes als bei der Arbeit, etwa Blumengießen oder Gymnastik.

**3** Verlieren Sie Ihr Ziel nicht aus den Augen: »Wofür mache ich das gerade?« Das kann die Motivation steigern.

**5** Schlafen Sie genug! Müdigkeit senkt die Aufmerksamkeitsspanne stark. Außerdem wird Gelerntes nur im Langzeitgedächtnis überführt.

**4** Sorgen Sie für möglichst wenig Ablenkung; verbannen Sie etwa das Smartphone aus dem Blickfeld. Denn das wirkt bereits durch seine bloße Anwesenheit störend.

**6** Suchen Sie sich nach Möglichkeit anspruchsvolle Aufgaben. Laut Studien unterdrücken wir Ablenkungen effektiver, wenn wir kognitiv gefordert sind. Das liegt an der Aktivität eines Aufmerksamkeitsnetzwerks im Gehirn.

**7** Beginnen Sie mit der nächsten Aufgabe erst, wenn Sie die vorherige abgeschlossen haben! Denn Unerledigtes merken wir uns besser als Erledigtes, wie der Zeigarnik-Effekt besagt. Das stört beim Arbeiten.

Während die Kinder die Aufgaben beackerten, forderte Mr. Clown sie immer wieder zum Spielen auf: »Come play with me!«, ertönte es aus den Lautsprechern.

Die Kinder entwickelten unterschiedliche Taktiken, um sich von der Kiste nicht ablenken zu lassen, darunter so genannte Wenn-dann-Pläne: »Wenn Mr. Clown mich zum Spielen auffordert, werde ich ihn nicht ansehen.« Die Box bewusst auszublenden, war dabei noch effektiver, als sich lediglich intensiv auf die Aufgabe zu konzentrieren. Ebenfalls hilfreich war es, sich das Ziel der Anstrengung vor Augen zu führen: »Ich arbeite weiter, damit ich später mit den tollen Spielsachen spielen kann.« Auch bei Erwachsenen können solche Selbstinstruktionen die Willenskraft stärken, wie Experimente zeigen.

Besonders von Ablenkung geplagt sind Menschen, die geistig anspruchsvolle Tätigkeiten in einem Großraumbüro ausführen. Die Arbeits- und Organisationspsychologin Anja Baethge von der Medical School Hamburg hält daher nicht viel von solchen Arbeitsumgebungen: »Wenn wir uns selbst unterbrechen, tun wir das in der Regel in einem für uns günstigen Moment.« Komme die Störung von au-

ßen, beanspruche das unser kognitives System ungleich mehr. »Stellen Sie sich vor, Sie schreiben einen Text und haben schon die nächsten drei Sätze im Kopf. Dann spricht Sie Ihr Kollege an. In der Zeit müssen Sie die Sätze im Gedächtnis behalten«, erklärt Baethge. Das sei anstrengend und führe zu Fehlern. Die Psychologin empfiehlt daher, sich auf eine Etikette zu einigen: Zeiten, zu denen man ansprechbar ist, oder klare Zeichen, etwa ein rotes oder grünes Kärtchen auf dem Monitor.

### **Unerledigtes ist aufdringlich**

Außerdem ist es hilfreich, eine Aufgabe erst einmal komplett zu beenden, bevor man sich mit der nächsten beschäftigt. Das liegt am so genannten Zeigarnik-Effekt. Demnach erinnert man sich besser an Unerledigtes als an abgeschlossene Aufträge. Nehmen wir an, die Studentin Hannah schreibt gerade an einem Kapitel ihrer Hausarbeit, und ihr E-Mail-Programm piept. Sie sieht hinein, liest den Betreff »Übungsblatt bitte Freitag abgeben«, wendet sich dann aber wieder ihrer ursprünglichen Tätigkeit zu. Von nun an geistert die unerledigte Aufgabe (das

Übungsblatt) in ihrem Kopf herum, und sie kann sich nicht mehr so gut auf die Hausarbeit konzentrieren.

Anja Baethge gibt allerdings zu bedenken, dass wir oft zu viel von uns erwarten. »Wir können uns nicht über Stunden konzentrieren«, sagt sie. Es sei wichtig, regelmäßig Pausen zu machen. Viele Menschen würden damit erst warten, bis sie ermüdet sind. Aber das sei ineffektiv. »Man ist am produktivsten, wenn man jede Stunde für fünf bis zehn Minuten pausiert«, erklärt Baethge.

Und hier lauert eine weitere Falle: Wer einen Bürojob hat, verbringt seine Pausen gerne damit, E-Mails zu checken, im Internet zu surfen oder in sozialen Netzwerken zu stöbern. Dabei raten Psychologinnen und Psychologen, besser etwas zu tun, was sich stärker von der eigentlichen Arbeit unterscheidet – also keine Tätigkeiten am Schreibtisch oder Bildschirm. Anja Baethge empfiehlt Bewegung: Gymnastikübungen, einen kleinen Spaziergang oder Blumengießen. Die kurzen Aufgabenwechsel helfen gegen Habituation, also Gewöhnung, welche zwangsläufig die Aufmerksamkeit schwinden lässt.

Auch Florian goss, bevor er zu den

Neurostimulanzien griff, in seinen Pausen gerne die Blumen, blieb aber trotzdem selten für längere Zeit konzentriert bei der Sache. »Mich hat der Lernstoff nicht besonders interessiert«, gibt er zu. Mit Abschluss seines Studiums beendete er seine Experimente mit Ritalin und Co. Als er die Abschlussarbeit abgegeben hatte, war sein Vorrat aufgebraucht. »Damit war das abgehakt«, sagt er. In seinem Job hat er nun andere Strategien gefunden, sich zu konzentrieren. Die Pillen braucht er dafür nicht mehr.



(Gehirn&Geist, 4/2023)

Bitsko, R. H. et al.: Mental health surveillance among children – United States, 2013–2019. Morbidity and Mortality Weekly Report Supplements 71, 2022

Helfrich, R. et al.: Neural mechanisms of sustained attention are rhythmic. *Neuron* 99, 2018

Ilieva, I., Farah, M. J.: Enhancement stimulants: Perceived motivational and cognitive advantages. *Frontiers in Neuroscience* 7, 2013

Nakajima, M. et al.: Prefrontal cortex regulates sensory filtering through a basal ganglia-to-thalamus pathway. *Neuron* 103, 2019

Sörqvist, P. et al.: Concentration: The neural underpinnings of how cognitive load shields against distraction. *Frontiers in Human Neuroscience* 10, 2016

Ohrgeräusche | Wie Tinnitus entsteht

Gleichgewichtsorgan | Starker Sinn für tiefen Bass

Usher-Syndrom | Gentherapie gegen Gehörlosigkeit

# GANZ OHR

In der Welt  
des Hörens

FÜR NUR  
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN



SEHEN

# UNSER WICHTIGSTER **SINN?**

von Fabian Hutmacher

Die Mehrheit der Menschen empfindet die Augen als ihre wichtigsten Sinnesorgane. Doch was ein Ausfall anderer Sinne bedeuten würde, ist uns womöglich nur weniger bewusst.

**D**er Verlust welcher Ihrer fünf Sinne – Sehen, Hören, Tasten, Riechen, Schmecken – würde Ihnen am meisten Sorgen bereiten? Falls Sie sich fürs Sehen entscheiden, sind Sie in guter Gesellschaft: Die Mehrheit der Menschen empfindet das Sehen als ihren wichtigsten Sinn. Forscherinnen und Forschern geht es offenbar ähnlich. In der einschlägigen Fachliteratur finden sich viel mehr Studien zur visuellen Wahrnehmung als zu allen anderen Sinneskanälen. Weshalb ist das eigentlich so?

Oft wird angenommen, dass wir uns die Welt in erster Linie über die Augen

erschließen und unser Gehirn entsprechend auf die Verarbeitung visueller Reize spezialisiert ist. Doch ist dieser Eindruck tatsächlich richtig? Dass sehende Menschen sich bei den meisten Verrichtungen ihres Alltags in irgendeiner Weise auf die visuelle Wahrnehmung verlassen, ist offenkundig. Der Verlust des Sehens wäre daher sicher ein herber Einschnitt. Andererseits können auch blinde Menschen mit etwas Unterstützung durchaus aktiv am Leben teilnehmen. Und ob es uns wirklich weniger einschränken würden, wenn wir einen unserer anderen Sinne verlören, bleibt dabei ebenfalls offen.

Nehmen wir zum Beispiel den Tastsinn. Ein vollständiger Funktionsausfall des Berührungsempfindens ist überaus selten, aber er kommt vor – und hat dra-

matische Auswirkungen, wie das Beispiel von Ian Waterman zeigt. Durch eine Virusinfektion, die einen Großteil seiner Sinnesnerven vom Hals abwärts schädigte, verlor der Patient das Gefühl für seinen Körper und dessen Position im Raum. Er konnte fortan weder sitzen noch stehen, vom Laufen ganz zu schweigen. Erst durch mühsames, monatelanges Training gelang es ihm, einige dieser Fähigkeiten zurückzuerlangen. Dabei lernte er, die Stellung und Bewegung seiner Glieder permanent visuell zu kontrollieren. Allein schon dieser Fall zeigt: Der Ausfall anderer Sinnesmodalitäten kann uns mindestens genauso sehr einschränken wie der Verlust des Sehens.

Prüfen wir eine zweite weit verbreitete Annahme: die Spezialisierung des menschlichen Gehirns auf die Verarbei-

# Der Ausfall anderer Sinnesmodalitäten kann uns mindestens genauso sehr einschränken wie der Verlust des Sehens

tung visueller Reize. Trotz der Tatsache, dass die visuellen Areale innerhalb des menschlichen Neokortex beträchtlichen Raum einnehmen, ist auch dieses Narrativ auf den zweiten Blick weniger klar. Zum einen ist mittlerweile bekannt, dass Verarbeitungsprozesse im Gehirn nicht in streng unterteilten Modulen ablaufen – so verarbeiten die »visuellen« Areale durchaus häufig auch nichtvisuelle Informationen. Zum anderen ist die Größe eines Hirnareals nur ein möglicher Parameter unter vielen zur Bestimmung der Wichtigkeit. Man könnte beispielsweise die Anzahl der Rezeptortypen oder die absolute Größe des jeweiligen Sinnesorgans als Indikator heranziehen. Und hier nimmt das Sehen bei Weitem keinen Spitzenplatz innerhalb der Sinnesmodalitäten ein.

Hinzu kommt ein weiterer, ziemlich entscheidender Faktor: Die Bedeutung, die wir den verschiedenen Sinnen beimessen, unterliegt historischen und kulturellen Schwankungen. Dass uns das Sehen derart wichtig erscheint, hat vielleicht auch damit zu tun, dass wir in einer von visuellen Medien geprägten Gesellschaft leben. So wurden Informationen und Geschichten vor der kulturellen Revolution des Buchdrucks sehr oft mündlich tradiert.

Ist das Sehen also unser wichtigster Sinn? Ja und nein. Oder besser gesagt: Es kommt darauf an, aus welchem Blickwinkel man es betrachtet. Vielleicht ist die Frage auch einfach falsch gestellt, weil sie uns zwingt, etwas in eine Rangreihenfolge zu bringen, was sich nicht gut mit

den Kategorien wichtig und weniger wichtig beschreiben lässt. Jeder unserer Sinne erschließt uns einen Ausschnitt unserer Umwelt. Unser Leben wäre sicherlich ärmer und weniger facettenreich, wenn wir auf einen unserer Sinne verzichten müssten – ganz egal auf welchen. ↗

(Spektrum.de, 01.04.2023)

Hutmacher, F.: Why is there so much more research on vision than on any other sensory modality? *Frontiers in Psychology* 10, 2019

Robles-De-La-Torre, G.: The importance of the sense of touch in virtual and real environments. *IEEE Multimedia* 13, 2006

Majid, A. et al.: Differential coding of perception in the world's languages. *PNAS* 115, 2018



VERKNÜPFUNG

# WIR SEHEN, WAS WIR **HÖREN**

von Anton Benz

Geräusche helfen, Objekte schnell zu erkennen. Hören wir ein Zwitschern, erfassen wir deshalb einen Vogel sehr viel rascher. Was aber, wenn das Geräusch nicht zum Gesehenen passt?

Welchem Sinnesorgan trauen Sie eher: Ihren Augen oder Ihren Ohren? Die meisten Menschen würden auf diese Frage wohl eher zu den Augen tendieren. Doch Geräusche können einen großen Einfluss auf unsere Wahrnehmung haben – auch auf das, was wir zu sehen glauben.

Wie sehr akustische Reize unsere visuelle Wahrnehmung beeinflussen, demonstrierten Fachleute der University of California in San Diego und der École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Sie zeigten 185 Versuchspersonen schematische Abbildungen von zwei miteinander

kombinierten Objekten – also etwa eine Mischung aus Flugzeug und Rabe oder aus Hammer und Seehund. Diese »Morphs« waren aus unterschiedlich großen Anteilen beider Gegenstände zusammengesetzt. Manchmal war also mehr Flugzeug als Rabe zu erkennen oder umgekehrt. Zudem bekamen die Probanden zu verschiedenen Zeitpunkten während der Experimente Geräusche vorgespielt, die entweder zu einem der beiden Objekte passten oder nichts damit zu tun hatten.

Im Anschluss sollten die Probanden rekonstruieren, was sie eben gesehen hatten. Dazu sollten sie mit einem Schieberegler das richtige »Mischverhältnis« der Gegenstände reproduzieren. Es zeigte sich: Wurde beispielsweise ein hämmerndes Geräusch abgespielt, während eine Mischung aus Hammer und Seehund zu

sehen war, zogen die Versuchspersonen den Regler stärker in Richtung Hammer, als sie es allein auf Grund der Abbildung getan hätten. Außerdem reagierten sie schneller.

Dieser Effekt trat aber nicht auf, wenn das Geräusch vor oder nach der Einblendung erklang. Es gehe also nicht um mit dem Ton verknüpfte Erwartungen oder um nachträgliche Bewertungen des Gesehenen, schlussfolgern die Autorinnen und Autoren. Die Wahrnehmung an sich werde durch die Zugabe von auditiven Informationen verändert. »Unsere Studie demonstriert, wie wichtig es ist, die visuelle Verarbeitung als einen integrativen und nicht als einen isolierten Prozess zu untersuchen«, schreiben sie in ihrer Veröffentlichung im Fachmagazin »Psychological Science« ↗



TASTSINN

# DIE **MACHT** DER GEDANKEN

von Anna Lorenzen

Die mentale Einstellung kann unsere Sinne beeinflussen. Das zeigt eine Studie, in der Probanden mit einer Hypnose weisgemacht wurde, ihre Finger seien kleiner oder größer als in Wirklichkeit.

Werden unsere Sinnesindrücke durch mentale Vorgänge beeinflusst? Diese Frage spaltet die Forschungsgemeinde: Die einen denken, dass die sensorische Wahrnehmung abgeschirmt von höheren kognitiven Prozessen abläuft. Die anderen gehen von einem wechselseitigen Einfluss aus. Um hier Klarheit zu schaffen, führte ein Team um Marius Markmann von der Ruhr-Universität Bochum ein elegantes Experiment zum Tastsinn durch. 24 Probanden sollten ihren Zeigefinger entspannt auf eine Vorrichtung legen. Daraufhin wurde ihnen wiederholt mit zwei Nadeln spürbar, aber schmerzlos in den Finger gepikst. Hierbei variierte der Abstand,

den die zwei Nadeln zueinander hatten, von 0,7 bis 2,5 Millimeter.

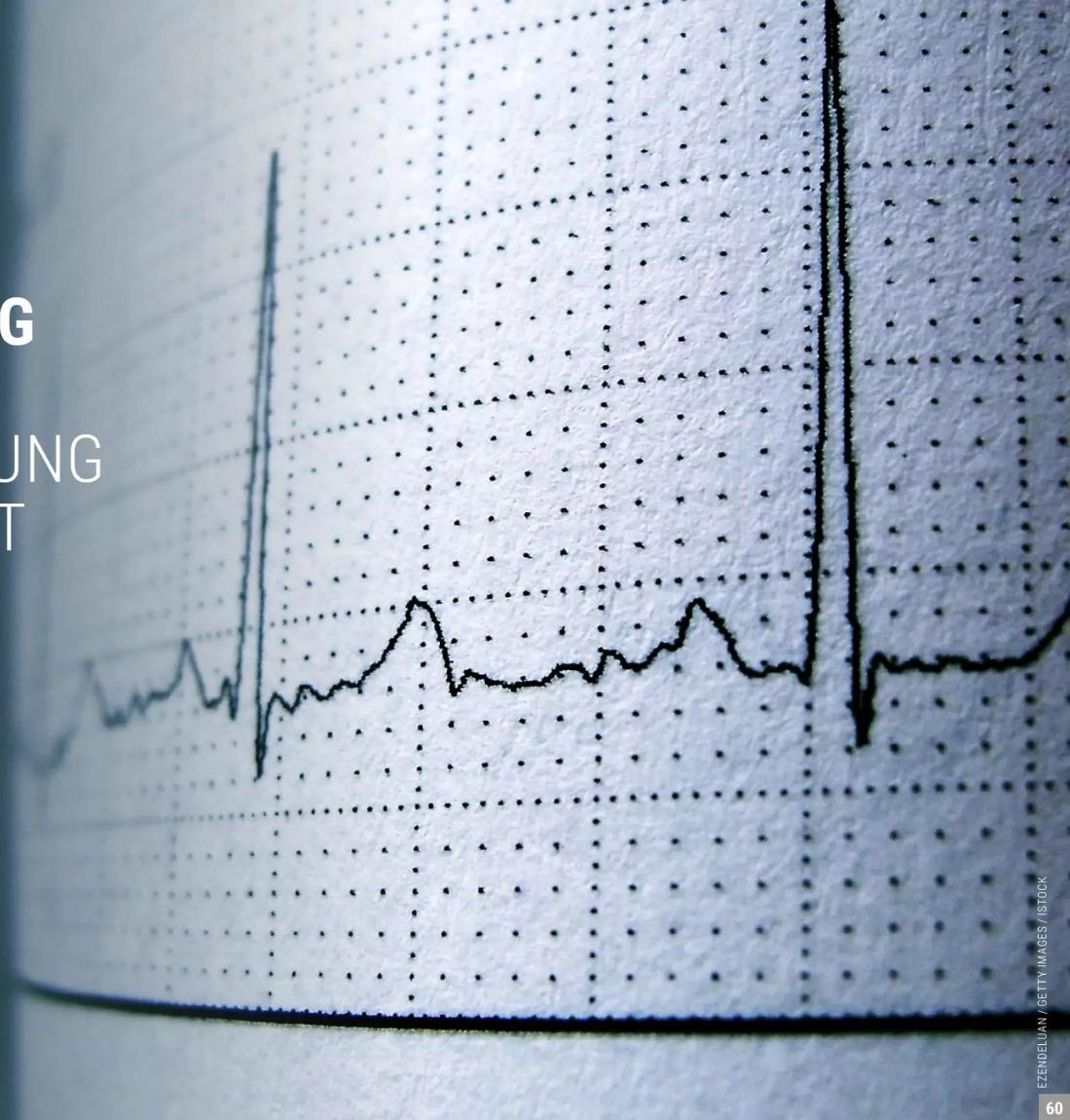
Die Freiwilligen sollten angeben, ob sie den Stich von einer oder von zwei Nadeln spürten. Zuvor waren sie vier verschiedenen Bedingungen ausgesetzt worden: Ihnen wurde unter Hypnose suggeriert, ihr Zeigefinger sei fünfmal größer oder aber kleiner als in Wirklichkeit, ein anderes Mal erhielten sie eine reine Hypnose ohne eine solche Suggestion. In der Kontrollbedingung fand nichts von allem statt. Hatte sich eine Versuchsperson einen deutlich größeren Finger vorgestellt, so war sie besser darin, zwei getrennte Stiche wahrzunehmen. Hingegen verschlechterte sich die taktile Empfindlichkeit, wenn ihr suggeriert worden war, ihr Finger sei kleiner. Allein die mentale Einstellung hatte somit den Tastsinn verändert. Bei reiner Hypnose ohne Suggestion stellte sich keiner der Effekte ein.

Um die zu Grunde liegenden Hirnprozesse zu untersuchen, führten Markmann und seine Kollegen während der Testung ein EEG bei den Probanden durch. Das Team beobachtete, dass die Suggestionen elektrische Potenziale verändern, die mit kognitiven Vorgängen wie Aufmerksamkeit und Erwartungen einhergehen. Bei reiner Hypnose fand sich der Zusammenhang jedoch nicht. »Unsere Studie liefert einen weiteren Baustein, der die Idee unterstützt, dass Top-down-Einflüsse auf die Wahrnehmung tatsächlich existieren«, betont Hubert Dinse, der ebenfalls an der Studie beteiligt war. »Überzeugungen, die wir haben, verändern die Art, wie wir die Welt erleben.« ↗

HERZ UND HIRN

# WIE DER **HERZSCHLAG** UNSERE WAHRNEHMUNG BEEINFLUSST

von Daniela Mocker



Während unser Herz Blut durch den Körper pumpt, werden Hirnwellen gedämpft, die Reize ins Bewusstsein dringen lassen. Dadurch können uns Informationen durch die Lappen gehen.

Unser Herzschlag gibt auch den Takt vor, in dem unser Gehirn arbeitet. Auf dieses spannende Phänomen sind Wissenschaftler bereits in früheren Studien gestoßen. Es hängt mit den zwei Phasen zusammen, in die Mediziner unseren Herzrhythmus unterteilen: Während der systolischen Phase zieht sich das Herz zusammen und pumpt Blut in den Körper. In der anschließenden diastolischen Phase fließt das Blut dann wieder zum Herzen zurück. Das wirkt sich anscheinend auch auf das Gehirn aus. So konnten Forscher etwa beobachten, dass Menschen Reize, mit denen sie während der systolischen Phase konfrontiert werden – etwa einen milden Elektroschock –, mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit wahrnehmen. Woher das röhrt, hat ein Team um Esra Al

vom Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig und von der Humboldt-Universität zu Berlin genauer untersucht. Die Wissenschaftler rekrutierten dazu 37 Freiwillige, denen sie im Labor schwache Elektroschocks an den Fingern verabreichten. Die Teilnehmer mussten dabei angeben, ob sie die Stromschläge gespürt hatten oder nicht. Parallel dazu maßen Al und ihre Kollegen den Herzschlag der Probanden per EKG und die Hirnwellen per EEG.

Dabei entdeckten sie wie schon zuvor, dass die Versuchspersonen Stromstöße, die ihnen während der Systole verabreicht wurden, etwas seltener bemerkten als solche, die sie in der diastolischen Phase erreichten. Der Unterschied war zwar klein, aber statistisch signifikant, wie die Forscher im Fachmagazin »PNAS« schreiben. Das Phänomen schien dabei mit der so genannten P300-Komponente der Hirnaktivität zusammenzuhängen. Diese Ausbuchtung im EEG tritt genau 300 Millisekunden nach der Wahrneh-

mung eines Reizes auf und wird auch mit Bewusstsein assoziiert. Während der systolischen Phase war P300 bei den Teilnehmern tendenziell unterdrückt – Informationen wurden also nicht bewusst wahrgenommen. Je stärker das Gehirn dabei auf den Herzschlag reagierte, desto seltener registrierten die Teilnehmer die Reize.

Vermutlich soll dieser Prozess eigentlich verhindern, dass wir unseren Puls ständig wahrnehmen. Als Nebeneffekt bleiben dabei aber offenbar auch schwache äußere Reize auf der Strecke. Außerdem könnte der Zusammenhang zwischen Herzrhythmus und Hirnaktivität erklären, warum Herz- und Hirnleiden oft Hand in Hand gehen, sagen Al und ihre Kollegen. So leiden Menschen mit Herzerkrankungen etwa oft auch unter kognitiven Einbußen, obwohl die dafür zuständigen Hirnregionen eigentlich gar nicht betroffen sind. ↗

---

Daniela Mocker ist Wissenschaftsjournalistin und stellvertretende Chefredakteurin von Spektrum der Wissenschaft.

(Spektrum – Die Woche, 18/2020)



INNERER TAKTGEBER

# ZEIT VERGEHT IM **RHYTHMUS** UNSERES **HERZSCHLAGS**

von Anton Benz

Ob uns Zeit langsam oder schnell vorkommt, ändert sich kontinuierlich. Womöglich hängt die Zeitwahrnehmung von unserem Herzschlag ab. Das könnte auf Blutdrucksensoren in den Gefäßwänden zurückzuführen sein, die Signale an das Gehirn senden und die Zeit verkürzt oder ausgedehnter erscheinen lassen.

**E**rst rast sie unaufhaltsam davon, dann scheint sie stehen zu bleiben: Unsere Empfindung von Zeit ist alles andere als konstant. Fachleute um Irena Arslanova von der University of London berichten, dass sich die Zeitwahrnehmung sogar mit jedem Herzschlag verändert. In einem ersten Experiment lernten 28 Versuchspersonen, die Dauer von zwei visuellen oder zwei akustischen Reizen zu unterscheiden. Ein Stimulus jeden Reizpaars wurde dabei 200 Millisekunden, der andere 400 Millisekunden lang präsentiert. Dann sahen die Probandinnen und Probanden entweder

ein Muster oder hörten einen Ton und sollten abschätzen, ob die Länge der Darbietung eher dem kürzeren oder dem längeren Probereiz entsprach. Der Clou: Diese Stimuli wurden jeweils entweder während eines Herzschlags (Systole) oder zwischen zwei Kontraktionen (Diastole) eingespielt.

Während der Systole empfanden die Freiwilligen die Dauer kürzer, als sie eigentlich war; bei der Diastole war genau das Gegenteil der Fall. Rechnerisch ergibt sich durch die Verzerrung in beide Richtungen wieder eine korrekte Einschätzung. Laut den Fachleuten lässt sich das Phänomen womöglich auf Blutdrucksensoren in den Gefäßwänden zurückführen, die Signale an das Gehirn senden: Zwischen den Herzschlägen sinkt ihre Aktivität, dadurch hat das Denkorgan

wieder mehr Kapazität für die Verarbeitung anderer Reize. Dieses Mehr an Sinnesindrücken könnte die Zeit ausgedehnter erscheinen lassen.

»Das Muster des Zusammenziehens und Ausdehnens zeigt, wie unsere Zeitwahrnehmung ständig vom inneren physiologischen Zustand beeinflusst wird«, erklärt Irena Arslanova. Eine Forschungsgruppe von der Cornell University in Ithaka (USA) veröffentlichte parallel dazu ein ähnliches Resultat: Sie demonstrierte, dass bei einer niedrigeren Herzschlagrate die Zeit gefühlt langsamer vergeht und schneller, wenn sich der Puls beschleunigt. ↗

---

Anton Benz hat »Philosophie-Neurowissenschaften-Kognition« studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Magdeburg.

(Spektrum Gesundheit, 6/2023)



GUTE FRAGE

# WARUM SCHLIESSEN WIR BEIM GENIESSEN **DIE AUGEN?**

von Polly Dalton

Ob wir uns vor Staub oder direkter Sonne schützen oder einfach nur einschlafen wollen: Gründe, die Augen zu schließen, gibt es viele. Mitunter tun wir das auch, wenn uns angenehme Reize in ihren Bann ziehen. Wer hat nicht schon einmal die Lider heruntergeklappt, als das Lieblingslied im Radio lief, man die Lippen zu einem Kuss spitzte oder gar einen Orgasmus erlebte? Nur, wieso tun wir das?

**D**as Gehirn verarbeitet permanent riesige Mengen an Sinnesdaten, und zwar vor allem mit dem Ziel, die wichtigen Signale von weniger relevanten zu unterscheiden. Mit anderen Worten, es selektiert die wesentlichen Informationen, um diese genauer wahrnehmen und entsprechend darauf reagieren zu können.

2007 und 2008 zeigten Forschungsteams unter der Leitung von Nilli Lavie

vom University College London, dass unsere Fähigkeit, auf visuelle Reize zu reagieren, umso schwächer ausfällt, je mehr sich andere Umgebungsreize in den Vordergrund drängen. In einem Experiment hörten Testpersonen zum Beispiel unvergessene, leise Töne, während sie gleichzeitig visuellen Mustern ausgesetzt waren. Die Töne wurden von denjenigen genauer wahrgenommen, die die Sehindrücke leichter ausblenden konnten.

Gilt das auch für den Tastsinn? Gemeinsam mit meiner Kollegin Sandra Murphy ließ ich Versuchsteilnehmer kurze Vibratoren spüren, die an der linken oder der rechten Hand aufraten, ohne dass die Probanden wussten, wann oder

wo die Hand stimuliert werden würde. Gleichzeitig blitzten verschiedene Buchstabenpuzzles auf einem Bildschirm auf, und die Probanden mussten entscheiden, ob soeben ein X oder ein N zu sehen gewesen war (eines von beiden stimmte). Manchmal war das X oder N dabei umgeben von Kreisen, so dass es leichter zu entdecken war. Bei anderen Gelegenheiten wurde das X oder N inmitten von anderen Buchstaben präsentiert, die ziemlich ähnlich aussahen (etwa H, K oder Z). Nun war das Ziel schwieriger zu finden, da die so genannte Wahrnehmungslast größer ausfiel.

Nach jeder Stimulation baten wir die Teilnehmer anzugeben, ob sie zusammen

---

**Polly Dalton** ist Professorin für Kognitionspsychologie am Royal Holloway College der University of London. Sie erforscht unter anderem, wie Denken und Fühlen unsere Wahrnehmung beeinflussen.



mit den Buchstaben eine Vibration bemerkten hatten. Wie sich zeigte, waren die Personen unter hoher visueller Belastung weniger empfindlich für Berührungsreize. Offenbar schwächt es den Tastsinn, wenn gleichzeitig andere Sinne stimuliert werden; dadurch sinkt die Genauigkeit der Wahrnehmung.

Bedenkt man nun, dass unsere Lippen, die Zunge und andere erogene Zonen zu den empfindlichsten Partien des menschlichen Körpers gehören und häufig intensive Lustgefühle vermitteln, so wird klar, weshalb wir beim Genießen oft die Augen schließen: um es noch mehr auszukosten.

2006 postulierten Chiara Della Libera und Leonardo Chelazzi von der Universität Verona (Italien), dass auch Belohnungen die selektive Aufmerksamkeit beeinflussen können. Wenn man Menschen einem bestimmten Reiz aussetzt und sie dafür belohnt, dass sie diesen ignorieren, dann richten sie beim nächsten Mal weniger Aufmerksamkeit darauf. Chelazzi stellte gemeinsam mit Clayton Hickey von der University of Birmingham zu-

dem fest: Belohnt man Teilnehmer umgekehrt dafür, dass sie sich auf einen bestimmten Reiz konzentrieren, können sie diesen anschließend schlechter ausblenden, selbst wenn sie ihn dann als Ablenkung betrachten.

Offenbar richten Menschen, die einen Reiz mit Freude assoziieren, ihre Aufmerksamkeit verstärkt darauf. Anders ausgedrückt: Bereiten uns taktil Empfindungen wiederholt Lust, so engt sich unsere Aufmerksamkeit auf die Quellen dieser Empfindungen ein. Und das klappt umso effektiver, je besser wir andere Sinneskanäle ausschalten. Das kann so weit gehen, dass wir einfach mal die Augen schließen. ↵

(Gehirn&Geist, 5/2023)

Anderson, B.: The attention habit: How reward learning shapes attentional selection. Annals of the New York Academy of Sciences 1369, 2016  
 Dalton, P., Murphy, S.: Out of touch? Visual load induces numbness. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance 42, 2016

# Spektrum HÖRBÜCHER

**Unsere Magazine  
sind jetzt hörbar**

Im Abo nur 8,99 € im Monat und jederzeit kündbar.

Jetzt eine Woche gratis testen!

HIER INFORMIEREN

# Spektrum der Wissenschaft

# DIE WOCHE

# Das wöchentliche digitale Wissenschafts- magazin

**Lernen Sie jetzt Spektrum DIE WOCHE kennen!**

## Jetzt lesen!

Als Kombi-  
paket mit App  
und PDF

IM  
NEUEN  
LOOK!



KOMMUNIKATION

Auch Katzen erkennen, wann ihre Besitzer mit ihnen sprechen

Oft könnte man meinen,  
Katzen hören nur das, was  
sie auch hören wollen.

VON DANIELA MÖCKER



# Gibt es eine Renaissance der Kernkraft?

NR  
01  
05/2023

**Spektrum**  
der Wissenschaft  
**DIE WOCHE**

**SPORT**  
**Muskeln halten das Herz-Kreislauf-System fit – sogar im Schlaf**

Sport tut gut – vor allem unserem Herzen. Doch wie und was sollte man trainieren? Wie Sport auf unsere Gesundheit wirkt und warum schon kurzes, intensives Training effektiv ist.



**MIKROBIOM**  
Bakterien helfen beim Schutz bedrohter Arten

- » Auch Katzen erkennen, wann ihre Besitzer mit ihnen sprechen
- » Klimawandel verringert Zahl der Bestäuber drastisch
- » Jahreszeit bringt außergewöhnliche Temperaturrekorde
- » Achsenzeit: Ein moderner Mythos

**Spektrum.de**