





KOGNITION Unser Gehirn ist darauf spezialisiert, Dinge blitzschnell wahrzunehmen – ob Hindernisse, Feinde oder Nahrung. Doch wie registriert es die *Abwesenheit* von etwas? Forscher suchen nach dem neuronalen Kode für das Nichts.

Ein Sinn für das Nichts

VON ANDREAS NIEDER

Auf einen Blick: Vom Nichts zur Null

1 Obwohl Kinder schon sehr früh ein Gefühl für Zahlen entwickeln, bleibt ihnen die Bedeutung von leeren Mengen bis etwa zum fünften Lebensjahr verborgen.

2 Ein möglicher Grund: Die Null als Zahl oder Menge wird im präfrontalen Kortex repräsentiert, der im Lauf der Kindheitsentwicklung erst relativ spät ausreift.

3 Deutlich früher entwickelt sich der Scheitellappen im Gehirn. Er beherbergt ein Areal, das zwar »etwas« von »nichts« unterscheiden kann, aber Letzteres noch nicht als Menge auffasst.

Im Behandlungszimmer steht eine Schale mit Gummibärchen. Lina ist begeistert. Die Kinderärztin fordert das knapp dreijährige Mädchen auf, eines davon herauszunehmen und auf den Tisch zu legen. Routiniert folgt die Kleine der Anweisung. »Kannst du auch zwei Gummibärchen abzählen?« Wieder greift Lina in die Schale und fischt ein Duo heraus. »Und weißt du auch, wie viel null sind?« Das Mädchen blickt seine Mutter fragend an und spielt verlegen mit den bunten Weingummis. Nach weiteren Tests kreuzt die Ärztin in dem gelben Vorsorgeheft das Kästchen »altersgemäß entwickelt« an.

Denn Linas Ratlosigkeit gegenüber der Zahl Null ist völlig normal. Zwar lernen Kinder schon sehr früh, mit Zahlen umzugehen – sogar Säuglinge können bereits 50 Stunden nach der Geburt die ungefähre Anzahl an Objekten und Tönen unterscheiden. Doch die Null stellt einen Sonderfall dar. Leere Mengen besitzen keine zählbaren Elemente und sind für kleine Kinder daher nur schwer vorstellbar. Einjährige verstehen zwar, dass Objekte verschwinden können. Allerdings begreifen sie deren Abwesenheit noch nicht als etwas Bedeutsames oder gar als festes Merkmal – wie es einer leeren Menge oder der Zahl Null eigen ist.

Erst mit etwa drei Jahren entwickeln Kinder ein Konzept vom »Nichts«. Sie verstehen es als eine eigene Kategorie, die sich von anderen unterscheidet. Dennoch bleibt die Null für sie lediglich ein Begriff für »Abwesenheit«. Fragt man Dreijährige etwa »Was ist kleiner, null oder eins?«, hätten die wenigsten eine Antwort darauf.

Ungefähr ab dem fünften Lebensjahr begreifen Kinder, dass das Nichts eine Menge darstellen kann, die am unteren Ende eines Zahlenstrahls zu verorten ist. Das zeigte Elizabeth Brannon mit ihrem Team von der University of Pennsylvania in Philadelphia. Die Forscher ließen vierjährige Kinder Punktemengen auf einem Touchscreen der Größe nach sortieren. Dabei sollten

die Kleinen immer das Kästchen mit der kleineren von zwei gezeigten Mengen zuerst mit dem Finger berühren (siehe »Das Nichts als Menge«, rechts). Nachdem die Kinder die Aufgabe mit Mengen von eins bis neun verstanden hatten, erschienen in einigen Versuchsdurchläufen auch leere Kästchen ohne Punkte.

Tatsächlich hielten Kinder, die mit dem ersten Teil der Aufgabe gut zurechtgekommen waren, die leeren Mengen für kleiner als die zählbaren. Hier zeigte sich der so genannte numerische Distanzeffekt: Je größer der Unterschied zwischen leerer und zählbarer Menge, desto zuverlässiger hielten sie die leere zugleich für die kleinere von beiden. Sie machten also die meisten Fehler, wenn das Vergleichskästchen einen einzigen Punkt enthielt, und die wenigsten, wenn neun Punkte abgebildet waren. Das werteten die Forscher als Beleg dafür, dass die Kinder die leeren Kästchen wirklich als Teil einer Zahlenfolge begriffen hatten.

Der letzte Erkenntnissschritt erfolgt schließlich ab einem Alter von sechs oder sieben Jahren, wenn Kinder in der Schule die Null als echte Zahl kennen lernen. Nach und nach prägen sie sich die arithmetischen Regeln ein – etwa, dass null plus oder minus eine positive Zahl immer letztere ergibt.

Außenseiter unter den Zahlen

Doch auch viele Erwachsene haben noch Schwierigkeiten mit dem Sonderling unter den Zahlen. In einer Studie stellten Forscher Grundschullehrern allerhand Fragen zur Null. Dabei waren sich viele der Teilnehmer etwa unsicher, ob sie eine echte Zahl sei, und verrechneten sich wiederholt bei bestimmten Aufgaben.

Warum tun wir uns so schwer mit dem Nichts? Ein möglicher Grund ist die besondere Arbeitsweise des Gehirns. Unser Denkorgan und die Sinnesorgane sind im Lauf der Evolution gerade dazu entstanden, um *etwas*, zum Beispiel Sinnesreize, zu registrieren. Ein Hindernis, einen Angreifer, einen Fortpflanzungspartner – all das können wir wahrnehmen, weil es sich um reale Dinge handelt. Auch die zählbaren Elemente einer Menge stellen Reize dar, die unser Sinnessystem verarbeiten kann. Ohne solche Stimuli sind Nervenzellen jedoch im Ruhezustand. Ohne Licht vermittelt eine Sehzelle keine optische Information; ohne Schall überträgt ein Hörneuron keine akustischen Signale, und so weiter.



UNSER EXPERTE

Andreas Nieder ist Professor für Tierphysiologie am Institut für Neurobiologie der Universität Tübingen.

Das Konzept der Null oder des Nichts muss daher jenseits der Sinnessysteme auf einer höheren Verarbeitungsstufe entstehen, und zwar durch Erfahrung. Genau so wie Kinder lernen, dass bellende Vierbeiner zur Kategorie »Hund« gehören, erfahren sie, dass die Abwesenheit von Sinnesreizen eine leere Menge darstellen und somit von Bedeutung sein kann. Weil jedes mentale Konzept im Gehirn der Aktivität von Nervenzellen bedarf, sollte auch das Konzept des Nichts auf bestimmte Weise neuronal repräsentiert sein.

Genau das untersuchte ich mit meiner Arbeitsgruppe an der Universität Tübingen an Rhesusaffen. Jedoch wollten wir nicht einfach nur testen, ob ein Neuron registriert, ob ein Reiz vorhanden ist oder nicht – was trivial ist. Vielmehr mussten wir eine Situation schaffen, in der die so genannte Reizenergie konstant war und somit keinen Einfluss auf die Nervenaktivität hatte, die Tiere aber dennoch manchmal etwas wahrnahmen und manchmal nicht. Das gelang uns mit sehr schwachen Reizen, deren Intensität an der Wahrnehmungsschwelle der Affen lag.

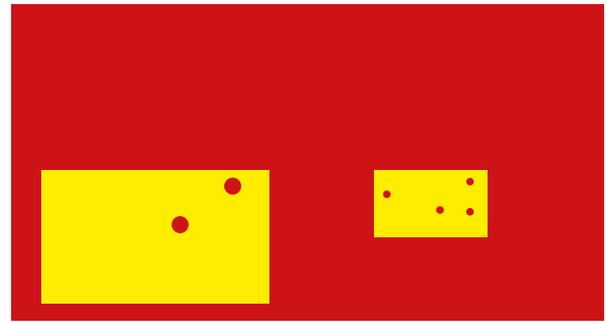
Wir zeigten den Versuchstieren auf einem Monitor jeweils ein Quadrat in verschiedener Helligkeit – von deutlich bis kaum wahrnehmbar –, und sie sollten durch Betätigung eines Hebels zeigen, ob sie das Kästchen sahen oder nicht (siehe »Etwas oder nichts?«, S. 58). In der Hälfte der Durchgänge blieb der Monitor einfach schwarz. Wir interessierten uns vor allem für die Durchgänge mit den ganz schwachen Reizen, da sich die Tiere hier oft unsicher waren. Den gleichen Stimulus bewerteten sie manchmal als »gesehen« und manchmal als »nicht gesehen«. Das erlaubte es uns zu untersuchen, wie die Nervenzellen im Gehirn das subjektive Empfinden von »nichts« oder »etwas« unabhängig von der Reizintensität repräsentierten.

Während die Affen ihrer Aufgabe nachgingen, registrierten wir die elektrischen Impulse der Nervenzellen mittels haarfeiner Mikroelektroden, die ins Stirnhirn der Tiere eingebracht waren. Da das Gehirn keine Schmerzrezeptoren besitzt, spürten die Affen nichts von den Elektroden; alle potenziell schmerzhaften operativen Eingriffe hatten wir vorab unter Vollnarkose durchgeführt.

Tatsächlich fanden wir im Präfrontalkortex zwei Gruppen von Nervenzellen, deren Aktivität die jeweilige Antwort der Primaten anzeigte. Der eine Neuronentyp erhöhte immer dann seine Impulsrate, wenn die Tiere das Quadrat gesehen hatten. Der andere, die so genannten Nichts-Neurone, war hingegen aktiv, wenn sie den Reiz nicht sahen, blieb aber stumm, wenn sie ihn wahrgenommen hatten.

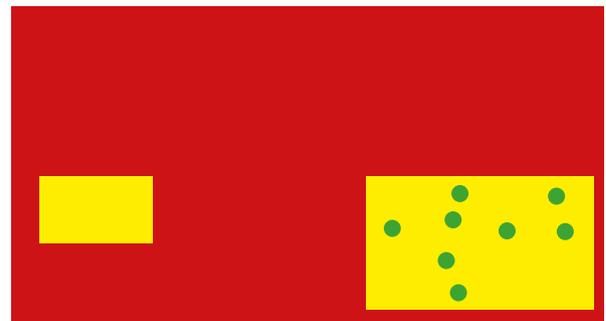
Dabei war die Entladung dieser Zellen keine simple Reaktion auf das Quadrat. Denn unabhängig davon, ob der Reiz tatsächlich vorhanden war, stimmte die Impulsrate der Neurone immer mit der Entscheidung der Affen überein. Unser Fazit: Die Abwesenheit eines Rei-

A) Vergleich zweier zählbarer Mengen

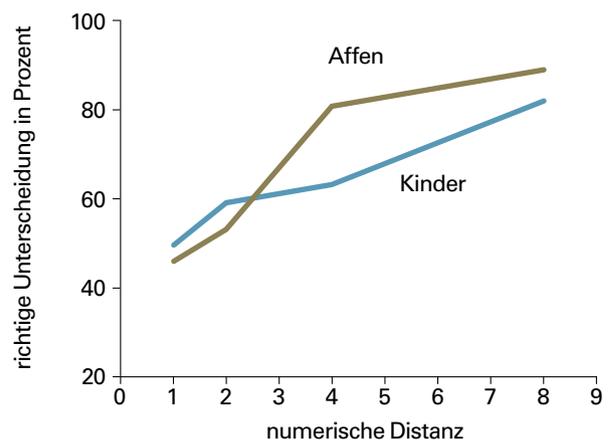


MIT FRODL, GEN, VON ANDREAS NIEDER

B) Vergleich von leerer mit zählbarer Menge

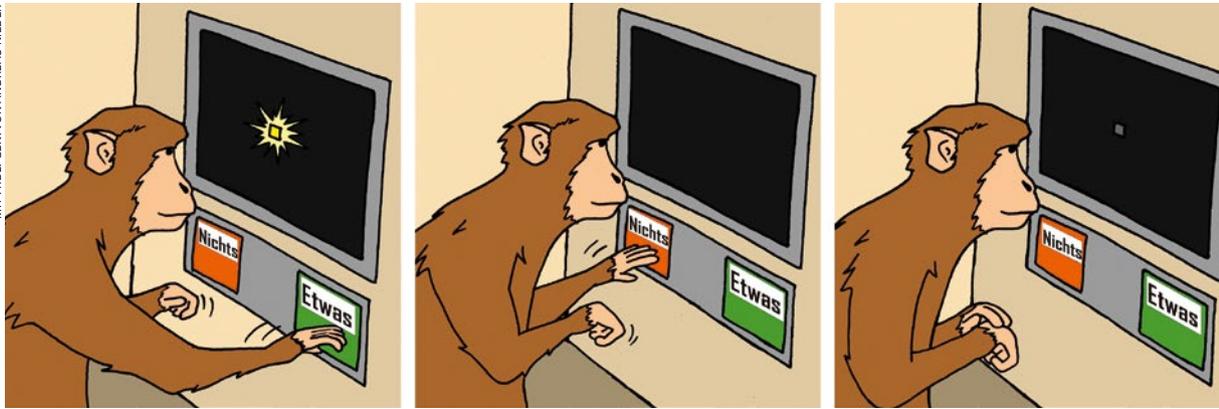


C) Distanzeffekt für leere Mengen



Das Nichts als Menge

In einer Studie zum Zahlenverständnis lernten vierjährige Kinder sowie Affen, Mengen in aufsteigender Reihenfolge zu sortieren, indem sie diese auf einem Touchscreen nacheinander berührten. Die Mengen waren dabei als Farbpunkte auf gelben Flächen dargestellt. Zum Beispiel mussten sie zuerst eine Fläche mit zwei und dann eine mit vier Punkten antippen (A). Hin und wieder erschien aber auch ein gelbes Kästchen ohne Punkte (B). Wieder galt es, zwei Mengen in der richtigen Reihenfolge zu berühren. Sowohl die Kinder (blaue Linie in C) als auch die Affen (braune Linie) machten dabei umso weniger Fehler, je größer die numerische Distanz zur leeren Menge war.



Etwas oder nichts?

An Rhesusaffen untersuchten Forscher, wie das »Nichts« im Gehirn kodiert ist. Dazu blendeten sie auf einem Monitor jeweils ein Quadrat in verschiedener Helligkeit ein. Die Tiere sollten angeben, ob sie es sahen oder nicht, während Elektroden in ihrer Hirnrinde die neuronale Aktivität registrierten. In einigen Durchgängen blieb der Monitor schwarz. Von besonderem Interesse waren die Durchgänge mit den ganz schwachen Reizen (Bild rechts), da die Tiere den gleichen Stimulus manchmal wahrnahmen und manchmal nicht. So konnten die Forscher ausschließen, dass die Nervenzellen im Gehirn lediglich auf die Anwesenheit des Quadrats reagierten, nicht aber auf das subjektive Empfinden von »etwas« oder »nichts«.

zes, das Nichts, kann Nervenzellen im Gehirn erregen und wird nicht – wie man vielleicht annehmen würde – durch den Ruhezustand von Neuronen kodiert.

Diese Art der Nervenaktivität hat allerdings noch keinerlei quantitative Bedeutung, da sie lediglich die Abwesenheit eines Reizes signalisiert. Erst wenn das Gehirn eine leere Menge am unteren Ende eines Zahlenkontinuums verortet, können wir davon ausgehen, dass es diese tatsächlich als Quantität oder Zahl auffasst.

Wir gingen also einen Schritt weiter und registrierten die Hirnaktivität von Affen, die gelernt hatten, Punktemengen von null bis vier der Größe nach zu sortieren. Tatsächlich gelang es den Tieren, leere Mengen neben solche mit einem Punkt zu platzieren. Dabei zeigte sich wie bei den vierjährigen Kindern der numerische Distanzeffekt – ein Hinweis darauf, dass die Affen die leeren Mengen ebenfalls als Teil eines Zahlenstrahls auffassten.

Wie wir von früheren Studien wussten, gibt es im Affengehirn Nervenzellen, die bestimmte Zahlen repräsentieren. Sie befinden sich im ventralen intraparietalen Areal (kurz: VIP) im hinteren Scheitellappen sowie im Präfrontalkortex (siehe auch *Gehirn&Geist* 4/2011, S. 58). Das Besondere an diesen Neuronen: Sie haben »Lieblingzahlen«, auf die sie mit vermehrter Entladung reagieren. Je weiter eine Zahl im Zahlenkontinuum von der Lieblingszahl entfernt liegt, desto schwächer feuert das Neuron. Offenbar existiert der numerische Distanzeffekt also auch auf neuronaler Ebene.

Wenn das Gehirn Zahlen registriert, werden diese zuerst im hinteren Scheitellappen repräsentiert. Die

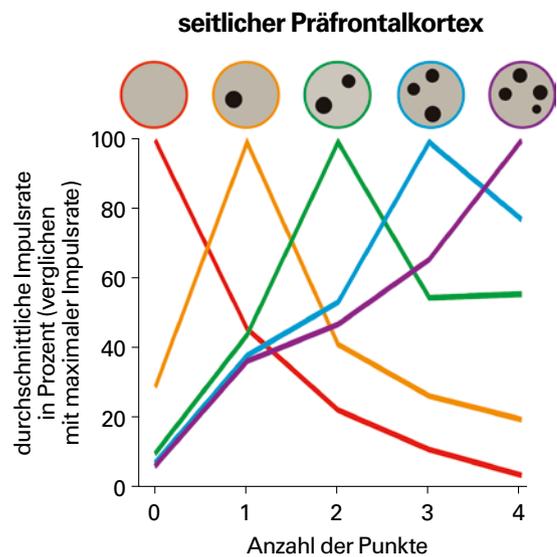
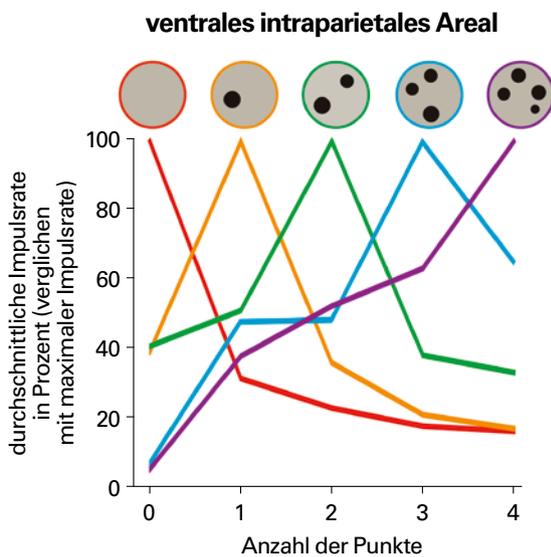
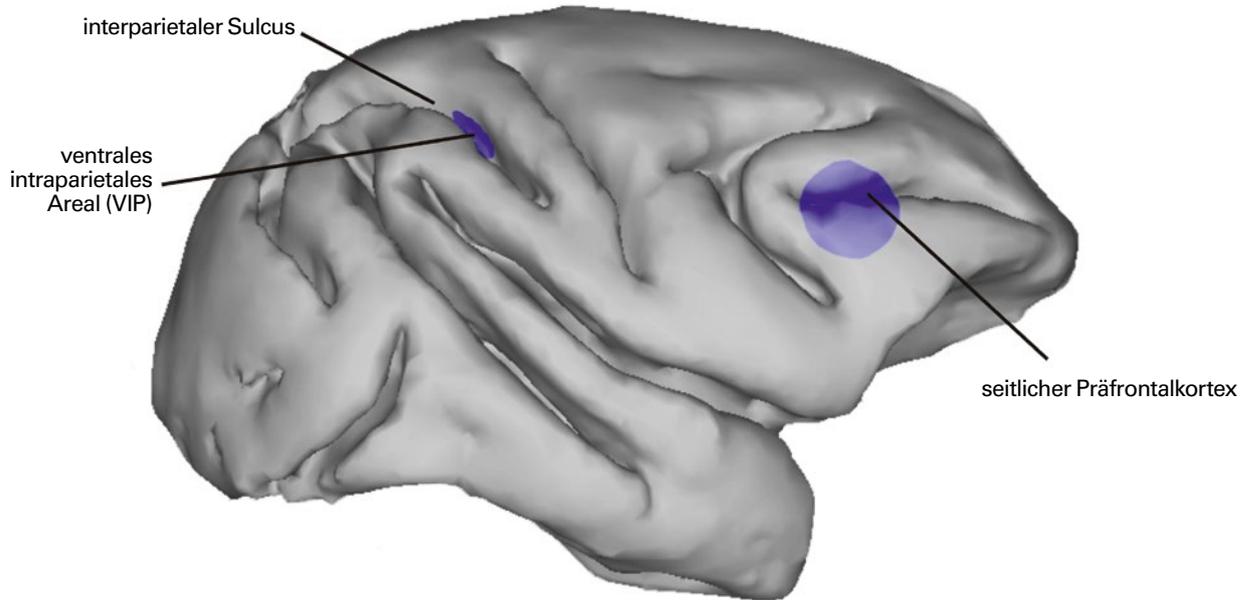
dortigen Zahlenneurone geben ihre Information dann an den Präfrontalkortex weiter, der das höchste kognitive Verarbeitungszentrum in unserem Gehirn darstellt.

Vielleicht, so vermuteten wir, würden manche der Neurone auch auf leere Mengen reagieren. Und tatsächlich fanden wir einige Nervenzellen, welche die Null beziehungsweise leere Mengen als Lieblingszahl hatten. Dabei fiel uns etwas Interessantes auf: Null-Neurone im Areal VIP, das am Anfang des Zahlennetzwerks der Großhirnrinde steht, entluden sich heftig bei leeren, aber kaum bei zählbaren Mengen (siehe »Neurone mit Lieblingszahlen«, rechts). Für sie ist die Null offenbar nicht Bestandteil eines Zahlenkontinuums, sondern einfach nichts im Vergleich zu etwas.

Die Null als Nachzügler

Ganz anders verhielten sich Null-Neurone auf einer höheren Verarbeitungsstufe der Großhirnrinde, im Präfrontalkortex. Auch dort reagierten Nervenzellen auf leere Mengen, jedoch zeigten sie den neuronalen Distanzeffekt: Sie entluden sich auch bei zählbaren Mengen, und zwar zunehmend schwächer, je größer die Menge war. Offenbar verändert sich die neuronale Repräsentation des Nichts auf ihrem Weg durch das Gehirn.

Diese zweistufige Verarbeitung könnte ein Grund dafür sein, dass die Null als Zahl erst relativ spät in der Menschheitsentwicklung gebräuchlich wurde (siehe »Woher die Zahl Null kommt«, S. 60). Denn der Präfrontalkortex gehört zu den stammesgeschichtlich jüngsten Teilen des Gehirns und reift auch im Lauf der Kindheitsentwicklung erst spät aus.



Neurone mit Lieblingszahlen

Das Gehirn von Rhesusaffen beherbergt zwei Areale, deren Nervenzellen Zahlen repräsentieren: das ventrale intraparietale Areal in der Tiefe des intraparietalen Sulcus im Scheitellappen (siehe Hirngrafik oben) sowie ein Bereich im seitlichen Präfrontalkortex. Dabei haben verschiedene Zellen jeweils ganz eigene »Lieblingszahlen«. Einige entladen sich zum Beispiel am stärksten, wenn die Tiere eine Menge mit zwei Punkten sehen (grüne Linien in den Graphen unten), andere, wenn die Tiere drei Punkte sehen (blau) und so weiter. Beide Regionen enthalten auch Zellen, die auf leere Mengen reagieren, so genannte Null-Neurone (rot). Ganz präzise repräsentieren die Nervenzellen die betreffenden Zahlen allerdings nicht, denn sie antworten auch schwach auf die benachbarten Mengen. Im seitlichen Präfrontalkortex (Graph unten rechts) zeigen auch die Null-Neurone diesen Distanzeffekt; sie reagieren ebenfalls leicht auf die Zahlen eins, zwei und drei. Auf einer niedrigeren Verarbeitungsstufe, im ventralen intraparietalen Areal (Graph unten links), weisen die Null-Neurone den Distanzeffekt allerdings kaum auf. Sie unterscheiden lediglich »nichts« von »etwas«.

Woher die Zahl Null kommt

Die Null als Zahl ist eine überraschend junge Entdeckung der Menschheitsgeschichte. Zunächst diente sie lediglich als eine Art Leerzeichen, um eine freie Position bei der Notation von Zahlen zu markieren. Bei diesem Positionssystem erhält eine Ziffer ihren Wert entsprechend ihrer Position innerhalb der Zahl. So stellen die Ziffern in unserem Dezimalsystem, von rechts nach links gelesen, die Einer, Zehner, Hunderter und so weiter dar. Die »3« in der Zahl 302 steht zum Beispiel für »dreihundert«, in der Zahl 203 aber für »drei«. Dieses System erfordert ein Zeichen, das die Abwesenheit einer Ziffer an einer bestimmten Position markiert.

Zu diesem Zweck führten die Babylonier im alten Mesopotamien erstmals um 400 v. Chr. die Zahl Null ein. Sie nutzten dafür zwei schräge Keilschriftzeichen (𐀀). Unabhängig davon entwickelten die Maya in Mittelamerika etwa zur gleichen Zeit ein schalenartiges Zeichen (0) als Platzhalter. Einen

eigenen Zahlenwert hatte die Null bis dahin aber noch nicht.

Erst im 7. Jahrhundert n. Chr. erkannte der indische Mathematiker Brahmagupta die Null als echtes mathematisches Konzept. In seinem in Sanskrit und in Versform geschriebenen Buch »Brahmasphutasiddhanta« aus dem Jahr 628 n. Chr. definierte er erstmals Rechenregeln dafür, etwa »wenn null zu einer Zahl addiert oder von einer Zahl subtrahiert wird, bleibt diese Zahl unverändert«, oder »eine Zahl, die mit null multipliziert wird, wird selbst zur Null.«

Die Ziffer, wie wir sie heute kennen (»0«), tauchte ebenfalls erstmals in Indien auf. Auf einer Inschrift im Tempel von Gwalior, die auf 876 n. Chr. datiert wird, wurde die Null zusammen mit anderen Zahlen benutzt, um die Maße eines Blumengartens zu berechnen.

Die Araber brachten die Null um 1200 n. Chr. zusammen mit den anderen indoarabischen Ziffern von 1 bis 9 und dem dezimalen

Stellenwertsystem ins Abendland, das bis dahin immer noch mit den umständlichen römischen Ziffern zählte. Der deutsche Begriff »null« leitet sich aus dem Lateinischen »nulla figura« ab, was so viel wie »keine echte Zahl« bedeutet.

Im Mittelalter wollte anfänglich niemand etwas mit der Null zu tun haben; das »Nichts« war schließlich das Chaos, aus dem Gott die Welt erschaffen hatte. Im Lauf der folgenden Jahrhunderte setzte sich jedoch die Null und die indoarabische Notation als universelles Zahlensystem durch.

Es ist nicht übertrieben zu sagen, dass die Inder mit der Einführung der Null als Zahl eine mathematische Revolution begründeten und einen der größten Fortschritte der Menschheitsgeschichte einläuteten. Mit der Null waren plötzlich ganz neue Rechenoperationen möglich; sie eröffnete eine völlig neue mathematische Welt, welche die Grundlage für Wissenschaft und Technik bildet.

Doch welcher Mechanismus erlaubt es Nervenzellen überhaupt, die Abwesenheit von Reizen durch neuronale Aktivität zu kodieren? Schließlich gibt es ohne Reiz auch keine Energie, die die Sinneszellen dazu veranlasst, eine Erregungskaskade im Gehirn in Gang zu setzen.

Nach einem jüngst von Xiao-Jing Wang von der New York University vorgestellten Modell könnte das Prinzip des Verstärkungslernens hier eine entscheidende Rolle spielen. Der Algorithmus simulierte dabei die Arbeitsweise von Nervenzellen und zeigte, dass bestimmte Neurone immer dann ihre Aktivität erhöhen, wenn auf »richtiges« Verhalten eine Belohnung folgt. Diese Zel-

len könnten durch positives Feedback auf eine neue Reizkategorie wie Mengen trainiert werden. Wenn also ein Kind dafür belohnt wird zu lernen, dass die Abwesenheit von Dingen eine leere Menge darstellt, könnten sich Zellen, die ursprünglich gar nichts mit Zahlen zu tun hatten, zu typischen Null-Neuronen wandeln.

Wie unsere Untersuchungen zeigen, ist die Repräsentation des »Nichts« ein mühevoller Prozess für das Gehirn. Dass die Null erst so spät in der Menschheitsgeschichte auftaucht und Kinder sowie Erwachsene immer wieder damit ringen, könnte zumindest teilweise Resultat dieses neuronalen Kraftakts sein. ★

QUELLEN

Merten, K., Nieder, A.: Active Encoding of Decisions about Stimulus Absence in Primate Prefrontal Cortex Neurons. *In: PNAS* 109, S. 6289–6294, 2012

Nieder, A.: Representing Something out of Nothing: The Dawning of Zero. *In: Trends in Cognitive Science* 20, S. 830–842, 2016

Ramirez-Cardenas, A. et al.: Neuronal Representation of Numerosity Zero in the Primate Parieto-Frontal Number Network. *In: Current Biology* 26, S. 1285–1294, 2016

Weitere Quellen im Internet: www.spektrum.de/artikel/1570806