

Naturvölker

Ethnologische Studien konnten zeigen, dass Menschen in ursprünglichen Gesellschaften, in denen keine Zahlworte entwickelt wurden, numerische Quantitäten nur durch nichtsprachliches Schätzen erfassen können. So entwickelten beispielsweise Mitglieder des Pirahã-Stammes im Amazonasgebiet Südamerikas kein echtes Zahlenkonzept und besitzen lediglich Worte für etwa „eins“, „zwei“ und „viele“ (sog. *Eins-Zwei-Viele* Zähl-system). Werden die Pirahã aufgefordert, die Anzahl von Objekten nachzuvollziehen, zeigen sie ein sehr ungenaues Unterscheidungsvermögen, sie können Anzahlen nur einschätzen, nicht aber genau zählen. Derartige ethnologische Untersuchungen zeigen, dass selbst Erwachsene auf die nichtverbale Einschätzung von Anzahlen zurückgeworfen sind, sofern ihnen ein sprachliches Zahlenkonzept fehlt. Aber selbst Erwachsene, die mit dem Umgang von Zahlensymbolen vertraut sind, können in Situationen gebracht werden, in denen sie nur noch Schätzen können. Werden Probanden angehalten, während einer numerischen Aufgabe zu sprechen (z.B. beim Aufsagen eines Gedichtes), dann wird das verbale Zähl-system derart überfordert, dass nur noch Schätzen von Anzahlen gelingt. Auch dieser Befund belegt, dass jenseits des sprachlichen Zählens noch das primitivere Mengenschätzsystem in uns schlummert.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass nichtsprachliche Tiere, vorsprachliche Kinder und Erwachsene ohne verbales Zahlenkonzept ein evolutionär ursprüngliches Quantifizierungssystem besitzen, welches unabhängig von Sprache arbeitet und erlaubt, Mengen oder Anzahlen zu repräsentieren.

3. Gehirn

Das Organ, welches Verhalten erzeugt, ist das Gehirn. Folglich muss auch das Verständnis von Anzahlen und Zahlen notwendig durch die Aktivität des Gehirns ermöglicht werden. Wenn wir verstehen wollen, wieso wir mit Anzahlen und Zahlen auf bestimmte Art und Weise umgehen können, müssen wir das Gehirn und seine Informationsträger, die Nervenzellen, erforschen. Historisch gesehen gaben Befunde an Patienten mit selektiven Störungen der Zahl- und Rechenfähigkeit Hinweise, wo im Gehirn numerische Kompetenz abgelegt sein könnte. Inzwischen vervollständigen neuere Methoden, wie funktionelle Bildgebung und Messungen der Aktivität von einzelnen Nervenzellen, das Wissen der neuronalen Grundlagen mathematischer Fähigkeiten.

Akalkulien

Probleme im Umgang mit Zahlen nach Schädigungen bestimmter Gehirnareale wurden bereits Ende des 19. Jahrhunderts in der neuropsychologischen Literatur beschrieben. Die Funktionsstörung „Akalkulie“ bezeichnet seither den Verlust der Fähigkeit zu zählen oder zu rechnen aufgrund von Hirnschäden (z.B. durch einen Schlaganfall). (Als „Dyskalkulie“ werden hingegen entwicklungsbedingte Störungen des Rechnens verstanden.) Je nach Art und Schwere der Schädigung, kann es dabei zu ganz verschiedenen Störungen des Zahlenverständnisses kommen. So wurde beispielsweise von einer Pati-

entin berichtet, die nur noch mit Zahlen bis vier umgehen konnte, während alle größeren Zahlen ausgelöscht zu sein schienen. In einer anderen Studie wurde von einem Patienten berichtet, der v.a. Probleme mit Subtraktionen und Zahlenvergleichen zeigte, während ein zweiter Patient große Schwierigkeiten mit Multiplikationen hatte, ohne dass andere Rechenarten erheblich betroffen waren. Oft handelte es sich bei diesen Patienten um Schädigungen am Übergang des Scheitellappens zum Hinterhaupt- oder Schläfenlappen (siehe Abb. 1), oder um Läsionen im Bereich des Stirnlappens. (Die Großhirnrinde ist in die vier Bereiche Stirn-, Schläfen-, Scheitel- und Hinterhauptlappen eingeteilt). Da es sich bei Rechenaufgaben um recht komplexe Prozesse handelt, die viele verschiedene kognitive Fähigkeiten erfordern, ist das Zusammenspiel verschiedener funktioneller „Module“ im Gehirn erforderlich und schon allein dadurch die eindeutige Zuordnung von numerischen Funktionen zu bestimmten Hirnareal nicht immer einfach. Es besteht aber weitgehend Einigkeit darüber, dass Bereiche des Scheitellappens eine wichtige Rolle bei vielen numerischen Aufgaben spielen.

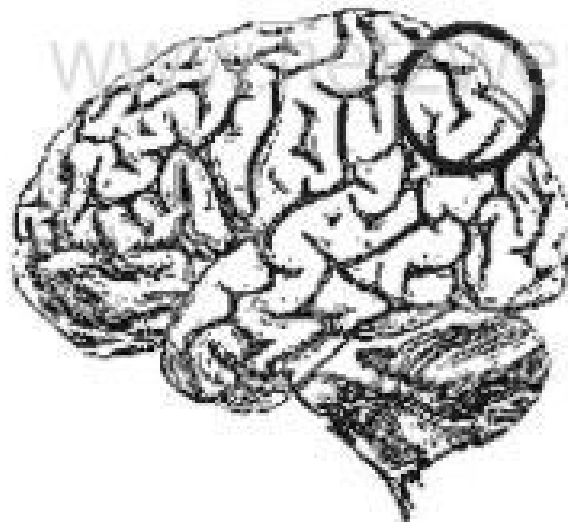


Abb. 1: Seitliche Ansicht eines Menschengehirns (links entspricht anterior, stirnseitig). Der eingekreiste Bereich des Scheitellappens spielt eine wichtige Rolle bei der Repräsentation von Anzahlen und Zahlen. Schädigungen in diesen Arealen führen häufig zu Akalkulien.

Bildgebende Verfahren

Im Zuge der Entwicklung sog. bildgebender Verfahren konnte die Verarbeitung numerischer Information auch zunehmend am intakten Gehirn untersucht werden. Bei diesen bildgebenden Verfahren handelt es sich um verschiedene Methoden, die Stoffwechselaktivität im Gehirn sichtbar zu machen. Die grundlegende Idee hinter diesen Ansätzen ist, dass Teile des Gehirns immer dann besonders aktiv sind und Energie (z.B. Zucker) und Sauerstoff verbrauchen, wenn Nervenzellen (Neuronen) in diesen Bereichen Information verarbeiten. Vergleicht man folglich die Aktivierung im Gehirn eines

Probanden, der mit Zahlen operiert mit der Aktivität des gleichen Probanden während er andere kognitive Aufgaben bearbeitet (z.B. Sprachaufgaben erledigt), so sollte der Unterschied in den Aktivierungsmustern den Ort rechenspezifischer Leistungen offenbaren. Mittels funktioneller Bildgebung konnte gezeigt werden, dass beim Menschen Neuronen innerhalb einer bestimmten Furche des Scheitellappens, der sog. 'Sulcus intraparietalis', aktiviert werden, wenn Menschen Anzahlen (Mengen von Punkten) zu sehen bekommen, selbst wenn diese Anzahlen nicht bewusst wahrgenommen werden. Dieser (und andere) Befunde deutet darauf hin, dass dieser Bereich des Gehirns sehr wahrscheinlich die Kardinalität von Mengen spontan repräsentiert, vielleicht sogar von Geburt an spezifisch auf Quantitäten geeicht sein könnte. Immerhin können bereits Säuglinge Anzahlen unterscheiden, ohne dass sie während ihres noch kurzen Lebens ausführliche Erfahrung damit gemacht haben könnten.

Erst Sprache aber ermöglicht symbolische Repräsentationen, und Zahlen sind die Symbole für den Umgang mit namenseicher Information. Nur Menschen sind in der Lage, symbolische, rekursive Zahlenrepräsentationen zu bilden, die es ihnen erlauben, Zahlen produktiv für echtes Zählen und Arithmetik zu benutzen. Diese Unterscheidung könnte zu dem Schluss führen, dass die sprachliche und nichtsprachliche Erfassung von Anzahlen auf zwei völlig getrennt arbeitenden neuronalen Systemen beruht. Dies ist jedoch nicht der Fall; es scheint vielmehr so zu sein, dass numerische Quantität – ungeachtet dessen, ob durch Objektmengen oder Zahlsymbole angegeben – übereinstimmende Gehirnareale aktiviert. So konnte gezeigt werden, dass der Sulcus intraparietalis spezifisch hohe Aktivierung für Ziffern zeigte, und dies sowohl für geschriebene als auch für gesprochene Zahlenwörter. Dies deutet darauf hin, dass die Aktivierung durch numerische Information im Sulcus intraparietalis automatisch (d.h. unabhängig von der Verhaltensrelevanz), modalitätsunabhängig (visuell und auditorisch) und unabhängig von der Notation (d.h. als gesprochenes oder geschriebenes Zahlenwort, oder als arabische Ziffer oder ausgeschriebenes Wort) stattfindet.

Jenseits der Extraktion von Anzahlsinformation per se bedarf sprachliche numerische Kompetenz zusätzlicher kognitiver Komponenten. Weitere Funktionen, die u.U. eng mit dem Sprachsystem verflochten sind, müssen aktiviert werden, um verbale numerische Leistungen zu ermöglichen. Ferner aktivieren einfache Rechenvorgänge (z.B. Subtraktion) typischerweise verteilte neuronale Netzwerke einschließlich des Stirn- und Scheitellappens. Insgesamt lässt sich also sagen, dass spezifische Aspekte im Umgang mit Zahlen zuweilen hirnanatomisch lokalisiert sein könnten. Um numerische Kompetenz voll zur Geltung bringen zu können, müssen wir allerdings auf einen Verbund von Funktionen zugreifen, die im Gehirn über mehrere Areale der Großhirnrinde (Kortex) und darunter liegender subkortikaler Strukturen verteilt sein können.

Nervenzellen

Bildgebende Verfahren haben den großen Vorteil, dass sie am Menschen ohne weitere Eingriffe vorgenommen werden können. Wie oben erwähnt, messen solche Verfahren allerdings die Hirnaktivität nur indirekt, indem sie den Stoffwechselumsatz des Gehirns

registrieren. Wie allerdings der Stoffwechselumsatz mit den elektrischen Signalen von Nervenzellen, die als eigentliche Träger (oder physikalische Korrelate) geistiger Vorgänge zu verstehen sind, zusammenhängt, ist nach wie vor unklar. Bildgebende Verfahren erlauben zwar eine relativ gute Lokalisierung von Hirnfunktionen, die darunter liegenden neuronalen Mechanismen bleiben aber verborgen.

Um zu verstehen, wie Nervenzellen numerische Information verarbeiten und wie es bei Schädigungen von Nervengewebe zu Akalkulien kommt, müssen die elektrischen Signale einzelner Neuronen mittels Mikroelektroden gemessen werden. Deshalb vervollständigten jüngst an nicht-humanen Primaten ermittelte Einzelzellkorrelate und -mechanismen die Erkenntnisse über die neurobiologischen Grundlagen der Zahlenverarbeitung. Dies ist möglich, da sich (wie oben angedeutet) das nichtsprachliche Mengenverständnis, welches als evolutionärer Ursprung des Zahlengebrauchs zu verstehen ist, auch bei Tieren nachweisen lässt. Tatsächlich fanden sich im Scheitel- und Stirnlappen von Affen, die auf die Unterscheidung von Anzahlen trainiert waren, zahlreiche Nervenzellen, die selektiv auf Anzahlen abgestimmt waren. D.h., solche Nervenzellen „interessierten sich“ speziell für eine bestimmte Anzahl; sie generierten für diese bevorzugte Anzahl vermehrt Aktionspotentiale. Anzahlselektive Nervenzellen reagierten mit maximaler Entladungsrate auf eine bevorzugte Anzahl, sie waren gewissemaßen auf eine ‚Lieblingszahl‘ abgestimmt. Je weiter (hinsichtlich des numerischen Abstands) die gezeigte Anzahl von der jeweiligen Lieblingszahl einer Nervenzelle entfernt war, desto weniger Aktionspotentiale erzeugten die Neuronen. Auf diese Weise zeigten anzahlselektive Nervenzellen ein Abstimmverhalten, das als Abstimmkurve dargestellt werden kann (siehe Abb. 2).

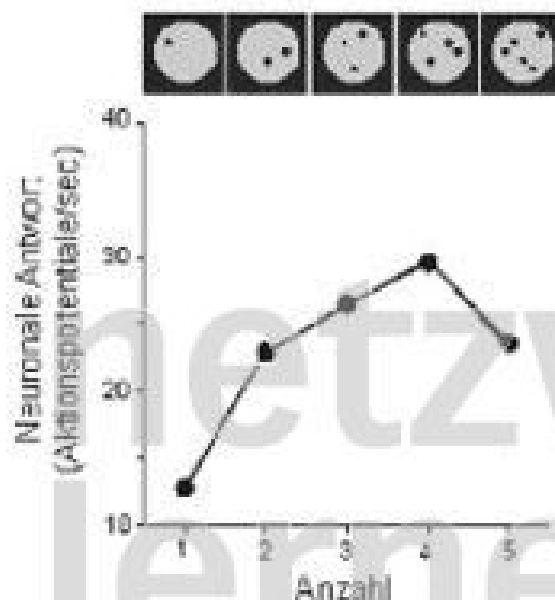


Abb. 2: Anzahlselektive Nervenzelle. Manche Nervenzellen im Stirn- und Scheitellappen des Primatengehirns sind selektiv auf Anzahlen abgestimmt. Die dargestellte Nervenzelle erzeugt am meisten Aktionspotentiale für die Anzahl 4 dargestellt mittels Punkte auf einem hellen Hintergrund (Beispielreize sind über dem Diagramm gezeigt). Somit ist 4 die ‚Lieblingszahl‘ dieser Zelle.