

Ist das menschliche Gehirn mathematisierbar?

Wir Menschen sind besonders stolz auf die Größe unseres Gehirns. Häufig heißt es, der Mensch habe das größte und komplizierteste Gehirn. Ob es das komplizierteste ist, das wissen wir nicht – das größte ist es bei weitem nicht. Es wiegt 1,2 bis 1,4 Kilogramm; das ist relativ viel, und der Mensch liegt durchaus in der Spitzengruppe, aber es gibt Tiere mit 10 Kilogramm Gehirngewicht. Was diese Tiere damit machen, ist eine andere Frage.

Eine weitere gängige Behauptung lautet, der Mensch besitze im Vergleich zu seinem Körper das größte Gehirn (relative Hirngröße). Wenn man die Gehirne verschiedener Gruppen von Wirbeltieren (Knorpel- und Knochenfische, Amphibien, Reptilien, Säugtiere, Vögel) vergleicht, kommt man auf eine einfache Beziehung, die seit langem bekannt ist: Die Gehirngröße bzw. das Gehirngewicht wird im wesentlichen bestimmt von der Körpergröße bzw. dem Körpergewicht: Kleine Tiere haben kleine, große Tiere große Gehirne. Trägt man die Gehirngrößen (Ordinate) der verschiedensten Wirbeltiergruppen gegen deren jeweilige Körpergröße (Abszisse) in doppeltlogarithmischer Weise auf, dann erhält man eine Punktwolke, die sich um eine Regressionsgerade verteilt, die eine Steigung von ungefähr 0,6 hat. Wäre die Steigung der Geraden 1, so hieße dies, daß die Gehirngröße bzw. das Gehirngewicht in demselben Maße zunimmt wie die Körpergröße bzw. das Körpergewicht. Dies würde man *isometrisches* Wachstum nennen. Das ist aber nicht der Fall, sondern die Gehirngröße nimmt langsamer zu als die Körpergröße. Dies nennt man *negativ allometrisches* Wachstum. Es bedeutet, daß das Gehirn an Größe/Gewicht zwar absolut zunimmt, relativ zur Körpergröße bzw. zum Körpergewicht aber abnimmt. Während bei sehr kleinen Tieren (z. B. Spitzmäusen) das Gehirn 10 % des Körpervolumens ausmacht, stellt es bei sehr großen Säugetieren wie den Walen 0,01 % dar. Beim Menschen beträgt der Wert rund 2 %.

Man erkennt in unserer imaginierten Darstellung auch, daß die Gehirngrößen der verschiedenen Wirbeltiergruppen Punktwolken bilden, die sich parallel zu dieser Regressionsgeraden erstrecken. Dies bedeutet, daß bei allen Wirbeltieren die Gehirngröße mit der Körpergröße in ungefähr demselben Maße zunimmt. Allerdings liegen diese Punktwolken unterhalb, auf oder oberhalb der Regressionsgeraden, was heißt, daß die unterschiedli-

chen Wirbeltiergruppen grundlegend unterschiedliche Körpergewicht-Hirngewicht-Beziehungen haben, was sich in unterschiedlichen Schnittpunkten der jeweiligen Regressionsgeraden durch diese einzelnen Punktwolken mit der y-Achse ausdrückt. Säuger und Vögel haben grundsätzlich größere Gehirne relativ zur Körpergröße, Fische, Amphibien und Reptilien grundsätzlich kleinere. Der Mensch hat also schon deshalb ein relativ großes Gehirn, weil er ein Säugetier ist. Zeichnet man ein entsprechendes Diagramm nur für Säugergehirne, so zeigt sich dieselbe Situation. Die Regressionsgerade hat eine Steigung von ca. 0,6, und einige Gehirne liegen unterhalb, andere oberhalb der Geraden und einige liegen genau darauf, haben also ein unter- oder überdurchschnittlich oder durchschnittlich großes relatives Gehirngewicht. Der Mensch liegt deutlich über der Geraden, zusammen mit anderen Menschenaffen (Schimpanse, Gorilla, Orang Utan) und Delphinen. Wale und das Nilpferd liegen darunter, und Hund, Pferd und der afrikanische Elefant liegen genau darauf.

Irgendetwas Besonderes ist also doch mit dem menschlichen Gehirn, das es aber mit den anderen Menschenaffen und den Delphinen teilt. Sie haben alle Gehirne, die wesentlich größer sind, als man allein von der Körpergröße her erwarten würde. Beim Menschen ist das Gehirn fast achtmal, beim Delphin fünfmal und beim Schimpansen immerhin noch zweieinhalbmal so groß wie im Säugerdurchschnitt. In allen Fällen kann man zeigen, daß während der Evolution dieser Tiergruppen die Gehirne an Größe bzw. Gewicht schneller zugenommen haben als der Körper. Innerhalb weniger Millionen Jahre ist das menschliche Gehirn von 450 Gramm auf rund 1.300 Gramm gewachsen.

Man weiß oder ahnt inzwischen auch, woran das liegt, nämlich an einer Verjugendlichung des menschlichen Bauplans – Pädomorphismus genannt –, in deren Rahmen beim Gehirnwachstum ein paar Zellteilungszyklen dazugekommen sind, und das führt zu einer sehr raschen Größenzunahme in fast allen Teilen des Gehirns. Die Hirnrinde als Sitz des Bewußtseins oder das Stirnhirn als Sitz von Vernunft und Verstand sind dabei zwar noch etwas größer geworden, aber auch dies unterliegt allgemeinen Wachstumsgesetzen, denn es findet sich auch bei den anderen Tieren mit sehr großen Gehirnen. Wir stellen also fest, daß die Größe unseres menschlichen Gehirns und auch der Teile, auf die wir besonders stolz sind wie die Großhirnrinde und insbesondere das Stirnhirn, ziemlich klaren Wachstumsgesetzen unterliegen, die gut mathematisierbar sind. Das menschliche Gehirn liegt „im Trend“ und zeigt hierbei nirgendwo spektakuläre Ausreißer.

Nun kommt es sicher nicht nur auf die Gehirngröße an, sondern vornehmlich darauf, „was drin ist“. Gehirne bestehen bekanntlich aus Nervenzellen (wir sehen von den Gliazellen als Stütz- und Versorgungszellen einmal ab). Wenn die Großhirnrinde (Cortex) Sitz

von Bewußtsein, Verstand, Intelligenz und Sprache ist, dann ist zu erwarten, daß die Leistungsfähigkeit in diesem Bereich mit der Zahl der Nervenzellen (Neurone) zusammenhängt. Wenn man dies ausrechnet, so kommt man beim Menschen auf eine Zahl von rund 12 Milliarden Cortex-Neuronen. Allerdings haben Elefanten und Wale nur etwas weniger, nämlich 11 bzw. 10 Milliarden.

Drei Fragen ergeben sich in diesem Zusammenhang. Die erste Frage lautet, warum es beim Menschen nicht mehr sind, wenn doch der Mensch in seinen geistigen Leistungen den Elefanten und auch den Walen bzw. Delphinen deutlich überlegen ist, was man aufgrund sehr vieler Untersuchungen und ohne ein Mensch-Chauvinist zu sein, zugeben muß. Die zweite Frage lautet, warum der Mensch immerhin mehr, wenngleich nicht viel mehr Cortex-Neurone hat, wobei doch Elefanten und Wale viel größere Gehirne (4 – 10 kg) und auch Hirnrinden haben. Und die dritte Frage lautet, ob es denn wirklich im wesentlichen auf die Neuronenzahl ankommt.

Untersucht man die Großhirnrinden von Elefanten, Walen und Delphinen (die zoologisch gesehen Wale sind) und vergleicht sie mit der Hirnrinde des Menschen, so stellt man fest, daß der Mensch eine viel dickere Großhirnrinde hat und daß hierin noch die Zellpackungsdichte erheblich höher ist. Dies erklärt die höhere Zahl an Cortex-Neuronen beim Menschen. Aber können eine Milliarde Neurone mehr den großen intellektuellen Unterschied zwischen Mensch einerseits und Elefant und Walen/Delphinen, die ja durchaus als sehr klug gelten, erklären? Sofort fällt einem die Verknüpfungsdichte zwischen den Neuronen ein. Allerdings ist die bei all diesen Großhirnrinden mehr oder weniger gleich, soweit wir das wissen: Jedes Cortex-Neuron ist beim Menschen, Elefanten und Wal mit ca. 30.000 anderen über Kontaktpunkte, Synapsen genannt, verbunden. In Fall eines jeden Gehirns kommen wir auf eine astronomisch hohe Zahl von Verknüpfungen, die etwa eine halbe Trillion umfaßt.

Dennoch: Wie kann man sich den „intellektuellen“ Unterschied zwischen Mensch einerseits und Elefant, Wal und Delphin (und natürlich auch den anderen Menschenaffen) andererseits erklären? Bei dem weiteren Studium fällt auf, daß die Fortsätze (Axone) der Neurone in der menschlichen Großhirnrinde eine viel höhere Leitungsgeschwindigkeit aufweisen als die des Elefanten und der Wale/Delphine, schätzungsweise eine dreimal höhere. Dies hängt unter anderem mit der viel dickeren Myelinscheide (der Isolationsschicht) der Axone zusammen. Hinzu kommt, daß wegen der geringeren Größe des menschlichen Cortex die Abstände zwischen den Nervenzellen viel kleiner sind. Dies bedeutet: Die menschliche Großhirnrinde kann sehr viel schneller arbeiten. Untersuchungen am Menschen haben übrigens ergeben, daß der Intelligenzquotient einer Person signifikant mit

der Leitungsgeschwindigkeit seiner corticalen Axone korreliert, die übrigens interindividuell durchaus schwankt. Bei den gigantischen Neuronen-Netzwerken innerhalb der Großhirnrinde macht die bloße Verarbeitungsgeschwindigkeit schon sehr viel aus.

Wir sehen also, daß die Leistungsfähigkeit von Gehirnen einschließlich des menschlichen Gehirns von fundamentalen physikalischen und biologischen Prinzipien bestimmt wird, die ohne weiteres mathematisierbar sind. Können wir diese Überlegungen weiter treiben? Bekanntlich kann man heutzutage mit Hilfe der sogenannten funktionellen Kernspintomographie die Aktivität des menschlichen – und natürlich auch tierischen – Gehirns messen. Was man dabei mißt, ist die Stoffwechselaktivität und die damit verbundene Veränderung des Blutflusses im Gehirn. Dabei gilt folgende höchst bemerkenswerte Gesetzmäßigkeit: Eine erhöhte geistig-psychische Tätigkeit (Aufmerksamkeit, Nachdenken, starke Gefühlsaufwallungen) hängt mehr oder weniger linear mit einer erhöhten Aktivität von Nervenzellen in bestimmten Hirnzentren zusammen. Diese wiederum hängt mehr oder weniger linear mit der Stoffwechselaktivität der Zellen und ihrer Bestandteile, vornehmlich mit ihrem Sauerstoff- und Zuckerverbrauch, zusammen, und diese Stoffwechselaktivität hängt wiederum mehr oder weniger linear mit der Erhöhung bzw. Erniedrigung des Blutflusses (über den Sauerstoff- und Zuckertransport) zusammen. Geist benötigt Energie, und dies läßt sich in relativ simplen Gleichungen der Physiologie und Chemie ausdrücken.

Ein weiterer überraschender Zusammenhang ist die große Parallelität der Hirnentwicklung in der organischen und psychischen Entwicklung des Kindes: Die Myelinisierung der Axone, die Ausreifung der Dendriten der Nervenzellen, besonders der feinverzweigenden sekundären und tertiären Dendriten, laufen aufs Engste parallel zu der Weise, wie Kinder sich psychisch entwickeln, wann sie bestimmte Bewußtseinsstufen, wann sie soziales Bewußtsein entwickeln. Hierzu gehört das erstaunliche Faktum, daß der über den Augen liegende Teil des Stirnhirns, der sogenannte orbitofrontale Cortex, bis zum 18. Lebensjahr hin ausreift, genau dann, wenn junge Menschen hoffentlich zu ein bißchen Verstand und Vernunft kommen. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung der Sprache. Mit zweieinhalb Jahren beginnen Kinder, eine syntaktisch-grammatikalische Sprache zu entwickeln, und genau dann ist das sogenannte Broca-Areal im Stirnhirn halbwegs ausgereift, das die Grundlage unserer menschlichen syntaktisch-grammatikalischen Sprache bildet. Diese Sprache unterscheidet uns von den anderen Tieren, und ihre Evolution vor ca. 60.000 Jahren scheint die damals bereits vorhandenen geistigen Fähigkeiten des Menschen ungeahnt gesteigert zu haben, so wie es später die Erfindung der Schrift und die Erfindung des Computers taten: ein scheinbar kleiner Schritt mit großer Wirkung.

Alles zusammengefaßt: Niemand kann das Gehirn zur Zeit berechnen, aber es zeichnet sich in allem, was man immer subtiler untersucht, durch eine große Gesetzmäßigkeit aus, die bis in die höchsten, kompliziertesten Dinge hineingeht, das heißt in die Sphären des Geistes. Ob man jemals den Inhalt von Gedanken systematisch lesen wird, wissen wir nicht, aber ein früherer Mitarbeiter von mir, John Haynes, hat kürzlich zeigen können, daß man aufgrund der Kenntnis der aktuellen Aktivitätslage von Nervenzellen in den primären, unbewußt arbeitenden Sinnesarealen der Großhirnrinde vorhersagen kann, was eine Drittelsekunde später im Bewußtsein auftauchen wird. Das bedeutet, daß auch das Entstehen von Bewußtsein in bestimmtem Maße berechenbar ist. Das rückt unser Gehirn zumindest in die Nähe der Mathematik. Geist übersteigt nicht die Natur, sondern fügt sich in deren Gesetzmäßigkeiten ein – welche besondere Eigenschaften Geist auch immer haben mag.