

HEIDELBERGER
JAHRBÜCHER
ONLINE
Band 6 (2021)

Gesellschaft der Freunde
Universität Heidelberg e.V.



Intelligenz: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

Rainer M. Holm-Hadulla, Joachim Funke & Michael Wink (Hrsg.)

HEIDELBERG
UNIVERSITY PUBLISHING

Zur Neurobiologie der Intelligenz

ANDREAS DRAGUHN

Institut für Physiologie und Pathophysiologie, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Wichtigstes biologische Korrelat von Intelligenz ist das Gehirn. Die Neurowissenschaften können deshalb dazu beitragen, ihre Naturgeschichte nachzuzeichnen, die vom Gehirn gesetzten biologischen Randbedingungen aufzuklären und kausale Mechanismen der Entstehung von Intelligenz zu finden. Sie können und sollten ihr Wissen in Bemühungen um angemessene Förderung des Potenzials von Menschen einbringen. Die neurobiologische Forschung zur Intelligenz hat Hirnregionen und Netzwerk-Eigenschaften identifiziert, die in besonderer Weise zur kognitiven Flexibilität beitragen. Keine der Erkenntnisse ist aber vollständig, vieles bleibt spekulativ oder günstigstenfalls eher deskriptiv als kausal erklärend. Alle Aussagen hängen zudem von der Definition des Begriffs Intelligenz ab, der aus der Human-Psychologie stammt und dessen Anwendung auf *andere* Tiere nicht trivial ist. Der anthropomorphe Blick, mit der wir oft über Tiere urteilen, könnte eine ähnliche Verzerrung erzeugen wie innerhalb der Menschheit die Messung von Intelligenz mit Instrumenten, die an einer weißen, gebildeten Mittelschicht optimiert wurden. Dennoch: Der Möglichkeitsraum unseres Denkens und Handelns ist wesentlich von der jeweiligen neuronalen Ausstattung geprägt, und das gilt sehr wahrscheinlich auch für Tiere. Von einer Reduktion der Intelligenz auf neurobiologische Vorgänge sind wir weit entfernt und sollten es auch bleiben, denn wir selbst sind die denkenden und handelnden Subjekte, nicht unser Gehirn. Neurobiologische Randbedingungen für Intelligenz zu kennen und zu beachten kann aber dabei helfen, angemessene Bildungs- und Lebensbedingungen für das *zoon logicon* zu schaffen.

1 Einleitung

Viele von uns haben als Kinder unter dem Mikroskop Pantoffeltierchen (*Paramecium*) beobachtet. Stößt dieser Einzeller, der eigentlich gar kein Tier ist, an ein Hindernis, so dreht er seine Schwimmrichtung um und entfernt sich. Auf ähnliche Weise reagiert er auf chemische und thermische Reize, so dass er sich in nahrungsreichen, lebensfreundlichen Umgebungen aufhält und gefährliche Gefilde meidet. Mit derartigen Verhaltensweisen schaffen es diese einfachen Organismen in den verschiedensten Habitaten zu überleben – vom Meer über Süßwasser bis zu den Pansen von Schafen. Sie sind also sehr erfolgreich und bestens an ihre jeweilige Umgebung angepasst. Sind sie deshalb intelligent? Oder gibt es Intelligenz nur in ganz bestimmten „höheren“ Tieren? Vielleicht sogar nur beim Menschen? Bei komplexen Maschinen? Ist unsere Intelligenz erblich vorgegeben oder kann sie durch Lernen und Lebenserfahrung vermehrt werden?

Diese oder ähnliche Fragen haben wir uns vielleicht alle schon gestellt, denn sie berühren unser Selbstbild und oft auch unser Selbstwertgefühl. Sie sind darüber hinaus von großer gesellschaftlicher Bedeutung. Insbesondere die ‘nature-nurture’ Debatte um angeborene oder erworbene Intelligenz hat unmittelbare Auswirkungen auf bildungs- und sozialpolitische Positionen. Das Ausmaß kognitiver Fähigkeiten ist nicht selten auch eine wertende Kategorie, sei es explizit wie bei dem utilitaristischen Philosophen Peter Singer (2013), oder implizit, wie in der alltäglichen Abwertung vermeintlich Dümmerer oder gar durch Krankheit intellektuell Eingeschränkter. Im kreationistischen Entwurf des ‘intelligent design’ ist die Intelligenz namensgebend für den Schöpfer. Aktuelle Diskussionen werfen die Frage auf, ob außer Menschen und bestimmten Tieren vielleicht auch Computer, Roboter oder Programme intelligent sein können, und eine Gruppe von Botanikern verlangt lautstark, auch Pflanzen Intelligenz zuzuschreiben (Brenner et al., 2006; Trewawas, 2016). In all diesen Diskursen spielen die materiellen Grundlagen für Intelligenz eine Rolle. Darum ist die Frage nach den physischen Bedingungen von Intelligenz berechtigt und wichtig.

Forschung zur Intelligenz baut auf einer langen und komplexen Theoriegeschichte auf, die im Wesentlichen von verschiedenen Zweigen der Psychologie bestimmt wurde. Entsprechend vielschichtig sind die Definitionen des Begriffs, zumal sich Intelligenz nicht direkt beobachten lässt – sie ist vielmehr ein Konstrukt oder eine latente Variable, die indirekt aus messbaren Größen (z. B. dem Antwortverhalten in einem Intelligenztest) erschlossen wird. In diesem Artikel soll eine

pragmatische und möglichst konsensfähige Definition zugrunde gelegt werden: Intelligenz ist die Fähigkeit, Probleme durch flexibles Handeln oder Denken zu lösen. Handeln und Denken sind dabei als intentionale Akte gemeint, die über rein reflektorische Automatismen hinausgehen, also als eigentliche *agency*. Mit dieser Definition ist eine mentale Dimension angesprochen, wenn auch in einem breiten und handlungsorientierten Sinn. Intelligent sind damit jedenfalls nur Lebewesen (oder vielleicht Maschinen), die ihr Verhalten aktiv gestalten können, d. h. es muss einen inneren „Raum“ geben, in dem die verschiedenen Handlungsoptionen repräsentiert, verglichen und bewertet werden können, ohne dass sie gleichzeitig in äußere Handlungen übersetzt werden. Das Pantoffeltierchen scheidet damit aus - jedenfalls gibt es keinerlei Hinweis darauf, dass es über den Wechsel der Schwimmrichtung vertieft nachdenken und dann entscheiden könnte. Vielmehr gehen die meisten WissenschaftlerInnen davon aus, dass Intelligenz an ein zentrales System zur Integration von Informationen und zur nachfolgenden Entscheidungsfindung gebunden ist – in der Regel also an ein Gehirn. Verschiedene Autoren benennen darüber hinaus spezifische Eigenschaften eines Gehirns, das zur Intelligenz befähigt, z. B. ein zumindest kurzzeitiges Gedächtnis, in dem relevante Kontexte präsent gehalten werden können. Wir werden hier als Minimalkonsens lediglich flexibles (aber nicht zufälliges) Verhalten, die Fähigkeit zur Kognition und die Anwendung dieser Fähigkeiten zur Lösung relevanter Probleme zugrunde legen. Den mindestens ebenso komplexen Begriff des Bewusstseins berücksichtigen wir in diesem Kontext nicht. In manchen Texten werden Intelligenz und Bewusstsein fast synonym behandelt, oft mit einer hierarchischen Benennung von „höheren“ Tieren und Menschen, die zu beidem fähig sind. Dies ist möglicherweise falsch und bedarf in jedem Fall der Rechtfertigung – im Folgenden soll jedenfalls der Fokus ausschließlich auf der Intelligenz und ihren neurobiologischen Korrelaten liegen.

2 Wozu denken? Die Evolution der Intelligenz

2.1 Sind Pflanzen intelligent?

Wer ist nach unserer Definition intelligent? Es ist offenkundig, dass Menschen diese Eigenschaften haben, wenn auch in unterschiedlichem Maß. Ebenso offenkundig scheint, dass Pflanzen sie nicht haben, denn wir haben keinen Hinweis darauf, dass sie mit Hilfe kognitiver Prozesse flexibel auf ihre aktuelle Situation

reagieren und dabei aktiv zwischen verschiedenen Handlungsoptionen wählen. Vielmehr reagieren sie einfach nach vorgegebenen Mechanismen auf physische Reize (Licht, Wasser, Temperatur, Berührung usw.). Oder? In jüngerer Zeit gibt es eine deutlich wahrnehmbare Strömung innerhalb der Pflanzenwissenschaften, die eben dies bezweifelt. Das Spektrum der Veröffentlichungen reicht von populären Büchern, die Bäumen menschenähnliche Arten von Kommunikation und Fürsorge zuschreiben (z. B. Wohlleben, 2015), bis zu Artikeln in etablierten Fachzeitschriften, in denen die Intelligenz und sogar ein Bewusstsein von Pflanzen proklamiert werden (Brenner et al., 2006; Trewavas, 2016). *Plant Neurobiology* ist zu einer eigenen kleinen Fachrichtung geworden. Kern des Arguments ist, dass Pflanzen nicht nur lokal auf Umweltreize reagieren, sondern diese als elektrische oder hormonelle Signale im Pflanzenkörper weiterleiten, in geeigneten Geweben integrieren und angepasste, systemische Reaktionen zeigen. Die quasi-neuronale Struktur der Integration liegt mal im Wurzelgewebe, mal im Bast, erfüllt aber in jedem Fall die Funktionen eines Gehirns, mit dessen Hilfe die Pflanze fühlt, denkt, und situationsgerecht handelt. Eine Arbeitsgruppe hat sogar Hinweise auf assoziatives Lernen bei Pflanzen gefunden und zieht diese Experimente als Beleg für ein Pflanzenbewusstsein an. Allerdings sind diese Ergebnisse bisher weder reproduziert worden noch stellt assoziatives Lernen ein etabliertes Kriterium für Bewusstsein dar. Das wesentliche Argument gegen die Behauptung von intelligentem Verhalten bei Pflanzen ist, dass es keinerlei Hinweise auf mentale Prozesse im oben genannten Sinne gibt und man sie deshalb auch nicht postulieren sollte (Mallatt et al., 2020).

Das „Verhalten“ einer Pflanze basiert nicht auf kognitiven Prozessen. Die Blätter wenden sich zum Licht, weil sie entsprechend aufgebaut sind und es aufgrund ihrer physischen Eigenschaften tun müssen. Die Venusfliegenfalle schnappt zu, weil ihre Sensoren und Effektoren bei hinreichender Reizung durch ein Insekt eben so reagieren müssen - nach allem, was wir wissen, ist dazu kein innerer Abwägungsprozess notwendig, der unserem Entscheiden oder Denken auch nur nahekäme. Daher können wir davon ausgehen, dass in der Pflanze „niemand zuhause“ ist, den wir nach seinen oder ihren Gefühlen und Gedanken fragen könnten (Taiz et al., 2019). Dies mindert nicht die erstaunliche, oft geheimnisvolle und extrem reiche Anpassung der Pflanzen an ihre Umwelt, und es lässt viel Raum für einen respektvollen und sogar emotionalen Umgang mit diesen Lebewesen. In der einigermaßen bizarren Diskussion um das Pflanzengehirn und Pflanzenbewusst-

sein spiegelt sich aber nichts als die anthropomorphe Übertragung von Intelligenz und (Selbst)-Bewusstsein auf Pflanzen, die ihnen in keiner Weise gerecht wird. Die Plant Neurobiology ist im Begriff, einen dem Zeitgeist geschuldeten, vollkommen evidenzfreien Wissenschaftsmythos zu schaffen. Damit tut sie den Pflanzen und ihren Bewahrern und Nutzern langfristig wahrscheinlich keinen Gefallen, denen mit einem realistischen Verständnis der jeweiligen Organismen besser gedient wäre. Wir können aus diesem Beispiel ganz allgemein ableiten, dass die Anpassung eines Lebewesens an seinen Lebensraum nicht hinreichend für die Zuschreibung von Intelligenz ist. Zur Intelligenz gehören aktives Handeln, das Auswählen aus verschiedenen Handlungsoptionen und die damit verbundenen mentalen Prozesse.

2.2 Bewegung macht schlau – die Ursprünge

Ein intelligenter Organismus muss nach dem oben Gesagten also das Relevante einer Situation erfassen können, er muss verschiedene Handlungsoptionen haben, und zwischen Wahrnehmung und Handeln muss ein Denkprozess im weitesten Sinne liegen, also eine Auswahl aus einem mentalen Raum von Möglichkeiten, der nicht mit der bereits vollzogenen Handlung identisch ist. Dieser mittlere Schritt unterscheidet intelligentes Verhalten von automatisierten Reiz-Reaktionsschemata, wie sie zum Beispiel motorische Reflexe darstellen. Sein Ort ist, nach allem was wir wissen, das Gehirn. Daher führt die Frage nach der Intelligenz zwangsläufig zur Frage nach der Entstehung von zentralisierten Nervensystemen im Tierreich (Miller, 2009). Nervengewebe hat sich in drei der fünf Stämme von mehrzelligen Tieren entwickelt, nämlich den Rippenquallen (*Ctenophora*), Nesseltieren (*Cnidaria*) und den Zweiseitentieren (*Bilateria*, diese Gruppe umfasst die meisten Tiere mit gewohnt symmetrischem Aufbau wie Fische, Vögel, Säugetiere, Krebse, Spinnen, Insekten usw.). Dagegen haben Schwämme (*Porifera*) und Placozoa (millimetergroße mehrzellige „Scheibentiere“) kein Nervensystem, möglicherweise haben sie dies sogar im Verlauf ihrer Evolution verloren (Ryan und Chiodin, 2015). Auffällig ist, dass die mit einem Nervensystem ausgestatteten Tiere in der Regel mobil sind, d. h. sich aktiv in der Umwelt bewegen können. Schwämme und Placozoa dagegen bewegen sich entweder überhaupt nicht aktiv oder nur unkoordiniert-amöboid. Daher sehen viele Autoren einen engen Zusammenhang zwischen senso-motorischem Verhalten und der Evolution von Nervensystemen. Dies wird gerne mit der bekannten Geschichte von den Seescheiden illustriert, die als schwimmfähige Larven ein Gehirn haben und nach der Anheftung an einen

Stein als sesshafte Erwachsene dieses Gehirn abbauen und verdauen, weil sie es nicht mehr brauchen.

Diese Geschichte ist amüsant, besonders wenn sie mit ironischen Analogien über die allzu menschliche Neigung zu einer gewissen Behäbigkeit garniert wird. Sie ist aber in der Sache übertrieben - erwachsene Seescheiden verfügen sehr wohl über ein zentrales Ganglion und sensorische wie motorische Neurone, mit denen sie ihr Fressverhalten, ihre Fortpflanzung und einfache Schutzreflexe koordinieren können. Sie regulieren mit Hilfe dieses einfachen Nervensystems hauptsächlich ihr inneres Milieu, ähnlich wie unser (sehr ausdifferenziertes und zellreiches) Darm-Nervensystem. Was man ziemlich sicher sagen kann ist also, dass sie kaum mehr Intelligenz als unser Verdauungssystem haben dürften. Für wirklich intelligentes Verhalten bedarf es eines komplexen zentralen Nervensystems, das dem Tier oder dem Menschen hilft, intentional, also zielgerichtet, zu handeln. Der kolumbianisch-amerikanische Neurophysiologe Rodolfo Llinas verweist darauf, dass Gehirne vor allem Vorhersagen ermöglichen, indem sie in einer internen Repräsentation die Folgen von Bewegungen oder Handlungen vorwegnehmen (Llinas und Roy, 2009). Dazu braucht das Tier oder der Mensch sinnvoll gefilterte sensorische Informationen, die das für die jeweilige Situation Wichtige hervorheben. Die aktuellen Informationen müssen mit den bereits gespeicherten integriert werden, um daraus Vorhersagen über den Erfolg einer Handlung abzuleiten. Die Regeln, nach denen Handlungsentscheidungen gefällt werden, können durch Lernen geformt und so den individuellen Lebenserfahrungen angepasst werden. In diesem Sinne ist das Gehirn also ein Organ, das vorausschauendes Verhalten ermöglicht und permanent durch Lernen optimiert. Dies alles ergibt nur dann Sinn, wenn aktives Verhalten auch möglich ist. So hat die Anekdote über die Seescheiden doch ihren richtigen Kern – wer sich nicht bewegt, braucht eigentlich kein Gehirn.

2.3 Scala naturae?

Die Larve einer Seescheide werden wir trotz ihres aktiven Schwimmens nicht in der Nähe menschlicher Intelligenz verorten, weil die Vielfalt des Verhaltens und damit der Horizont von Möglichkeiten und Entscheidungen sehr begrenzt erscheinen. Selbst wenn diese Sicht anthropomorph geprägt sein und der Larve Unrecht tun sollte, so lässt sich doch sicher sagen, dass sich beim Menschen Intelligenz und Gehirn in einer ganz besonderen und aufwändigen Weise entfaltet haben. Unser Gehirn konsumiert ungefähr 15–20% der Energie, die wir in Ruhe

verbrauchen. Wir werden sehr unreif geboren, und es ist vor allem die Reifung des Gehirns, die uns für mehr als ein Jahrzehnt in der elterlichen Fürsorge hält. Als Spezies haben wir unsere Umwelt so stark verändert, dass man vom Erdzeitalter des Anthropozäns spricht. Wir haben also in großem Maß durch aktives Handeln neue, kreative Lösungen für Probleme oder Bedürfnisse geschaffen. Dass dies auch destruktiv sein kann und uns heute vor große Probleme stellt ändert nichts an der Tatsache, dass Intelligenz in dem hier beschriebenen Sinne beim Menschen extrem ausgeprägt ist.

Es gibt keine eindeutige Antwort darauf, wie es im Lauf der Evolution zu der starken Hirnentwicklung der Hominiden kam. Die einschlägigen Theorien lassen sich grob in physische und soziokulturelle Begründungen unterscheiden (zusammengefasst in Hofman, 2019). Einige Autoren nehmen an, dass wechselnde Umweltbedingungen (Klima, Nahrungsverfügbarkeit usw.) schnelle Anpassungsvorgänge der frühen Hominiden erforderlich machten (Rosati, 2017). Dies habe einen starken evolutiven „Druck“ auf die Flexibilisierung des Verhaltens ausgeübt, zumal wir keine hoch spezialisierten biologischen Anpassungen haben, sondern eher Generalisten sind. Andere Autoren betonen die Bedeutung der Gruppenbildung, die Kommunikation und Lernfähigkeit zu Schlüsselqualifikationen gemacht haben (Herrmann et al., 2007; van Schaik und Burkart, 2011). Damit entstanden eine immer differenziertere Sprache und eine Erweiterung des inneren Vorstellungsraums, also des Denkens. Von dort ist es nicht weit bis zur Ausbildung von Kultur, also einem kollektiven System von Wissen und Praktiken, das in einem oft „kulturelle Evolution“ genannten Prozess eine Eigendynamik entfaltet hat und heute unser Denken prägt. Die unterschiedliche Geschwindigkeit von biologischer und kultureller Evolution führt dazu, dass wir Technik, Kunst und Kultur auf heutigem Niveau mit einem Gehirn bewältigen, dessen moderne Struktur sich vor 200.000 bis ca. 35.000 Jahren herausgebildet hat (Hauser, et al., 2014; Stern, 2017; Neubauer et al., 2018). Es ist für unser Selbstverständnis und für den Umgang miteinander hilfreich, sich hier und da an die enge Verwandtschaft zu unseren frühen, in der Natur lebenden Vettern zu erinnern.

Nun ist die Existenz eines Nervensystems wohl Voraussetzung für „biologische Intelligenz“ (dieser Ausdruck hat sich zur Abgrenzung von maschineller oder künstlicher Intelligenz eingebürgert). Nervengewebe ist aber, wie unser Darmnervensystem zeigt, nicht unbedingt hinreichend für „höhere“ Formen der Kognition. Damit sind wir bei der Frage, welche Ausprägungen von Intelligenz wir bei

verschiedenen Tieren finden und wie diese mit der Struktur ihres jeweiligen Nervensystems zusammenhängen. Diese Frage gehört zu den spannendsten Problemen der Neurobiologie, und hat wie zu erwarten keine einfache Antwort. Schon hinter dem unscheinbaren Wort „höher“ verbirgt sich ein hierarchisches Konzept des Lebenden, das ideengeschichtlich als *Scala naturae* Karriere gemacht hat. Es ist auch in der modernen Wissenschaft noch wirksam. Aber können wir wirklich eine aufsteigende Leiter von Intelligenzen nachweisen, die bei der Seescheidenlarve beginnt und über Insekten, Frösche, Hunde und Affen bis zum Menschen führt? Woran orientiert sich eine solche Hierarchie, wie sind die Unterschiede messbar? Schimmert hier auf dem Umweg über die Neurobiologie der Wunsch durch, der Mensch möge sich doch letztlich als Krone der Schöpfung erweisen? Übersehen wir, welche Komplexität andere Lebensformen ausgebildet haben – die damit eben nur anders an die Umwelt angepasst sind, aber in keiner sinnvollen Hierarchie unterhalb des Menschen stehen? Die Antwort auf diese Fragen ist, wie so oft, eher ein informiertes „Jain“ als eine plakative Schlagzeile.

Tiere zeigen ein sehr breites Spektrum von Verhaltensweisen zu denen auch flexible Problemlösungen gehören, die nach unserer Definition eindeutig auf Intelligenz hinweisen. Da die sprachliche Ebene weitestgehend fehlt, lässt sich tierische Intelligenz nur auf der Verhaltensebene messen. Hierzu werden verschiedene Kategorien herangezogen, die jeweils in Experimenten oder Beobachtungsstudien operationalisiert werden müssen (Manger, 2013). Etablierte Kriterien für Intelligenz sind beispielsweise Werkzeuggebrauch, Verständnis für Quantitäten, komplexe soziale Gefüge, Lernen durch Imitation, innovative Problemlösungen und Einsicht in die Intentionen anderer. In experimentellen Kontexten wird zusätzlich die Fähigkeit zum Erlernen von Sprache getestet sowie die Erkenntnis des eigenen Bildes im Spiegel. Letzteres wird als Hinweis auf ein Selbstbewusstsein interpretiert und ist nur bei wenigen Spezies nachweisbar (Elefanten, Delphine, Menschenaffen, bestimmte Vögel).

In all diesen Kategorien zeigen Tiere erstaunliche Leistungen, denen man schwer das Prädikat intelligenten Verhaltens absprechen kann. Besonders herausragende kognitive Fähigkeiten findet man bei den Menschenaffen, aber auch bei Raben- und Papageienvögeln. Um die geistige Leistungsfähigkeit von Walen und Delphinen hat sich dagegen ein Disput entzündet, möglicherweise auch als Reaktion auf die manchmal etwas übersteigerte Betonung der „Weisheit der Wale“ in der Populärliteratur. Fachleute zeichnen ein differenziertes Bild, das auf unser

noch lückenhaftes Wissen verweist sowie auf die Unterschiede zwischen Zahn- und Bartenwalen (erstere sind vermutlich deutlich intelligenter). Insgesamt besteht aber kein Zweifel, dass es sehr flexibles Verhalten und Kognition bei Walen und Delphinen gibt (Manger, 2013; Güntürkün, 2014). Ebenso wenig lässt sich übersehen, dass alle, auch die intelligentesten Tiere, einen großen Abstand zu den Leistungen des Menschen haben. Besonders bei sprachlichen Fähigkeiten, Abstraktionen und Werkzeuggebrauch sind wir unseren Verwandten sehr deutlich überlegen.

3 Gibt es „intelligente Gehirne“?

3.1 Is big beautiful?

Zweifellos besteht ein Zusammenhang zwischen biologischer Intelligenz und dem Gehirn. Konkret stellt sich damit die Frage, wodurch sich die Hirne verschieden intelligenter Tiere und des Menschen unterscheiden. Kann man aus der Hirnstruktur direkt auf die Intelligenz eines Tiers schließen? Ist der Zusammenhang kausal? Verstehen wir vielleicht sogar die zugrunde liegenden neuronalen Prozesse? Ist der Mensch graduell oder kategorial vom Tier zu unterscheiden? Die Fragen nach der biologischen Bedingtheit des Geistigen und nach der Sonderstellung des Menschen zieht sich durch die gesamte Geschichte der Hirnforschung. So wurde der Arzt und frühe Hirnforscher Franz Joseph Gall zu Beginn des 19. Jahrhunderts mit dem Vorwurf des Materialismus konfrontiert, als er – allerdings nach heutigem Verständnis pseudowissenschaftlich – versuchte, Persönlichkeitsmerkmale und Begabungen in bestimmten Regionen des Gehirns zu verorten. Zu dem Widerstand gegen seine Lehre (der 1802 zu einem Lehrverbot durch den österreichischen Kaiser Franz II. führte) trug besonders bei, dass er die meisten „Fakultäten“ (Fähigkeiten) sowohl bei Menschen wie bei Tieren verortete. Diese Verwandtschaft in geistigen Dingen war skandalös! Die moderne neurobiologische Intelligenzforschung stellt die grundsätzliche Verwandtschaft zwischen Menschen und Tieren nicht mehr in Frage. Die Materialismus-Debatte lebt allerdings in anderen Kontexten wie der Frage nach der Willensfreiheit oder nach dem Bewusstsein von Maschinen weiter.

Bezüglich der Intelligenz erweist es sich als äußerst schwierig, präzise diejenigen Eigenschaften von Gehirnen zu definieren, die mit den kognitiven Fähigkeiten und der Flexibilität des Verhaltens verschiedener Tierarten und des Menschen

korrelieren (für eine Übersicht siehe Dicke und Roth, 2016). Frühe Versuche gingen einfach vom Hirngewicht aus. Tatsächlich kann man bei Menschen und ihre nächsten Verwandten eine Abstufung finden, die gut mit der Einschätzung der Intelligenz korreliert – mit 1200 bis 1400 g stehen wir in dieser Gruppe an der Spitze, gefolgt von Menschenaffen mit bis knapp 600 g, und weiteren Affen mit meist unter 200 g. Schädelfunde von Hominiden legen zudem ein Hirnwachstum in der Evolution des Menschen nahe, wobei der Neanderthaler sogar ein etwas schwereres Gehirn hatte als der moderne Mensch. Sobald wir aber breiter ins Tierreich schauen hinken die Vergleiche – so sind z. B. die Gehirne von Elefanten, Walrossen und Walen deutlich schwerer als die des Menschen. Nach Dicke und Roth (2016) liegen die Hirngewichte von Säugetieren zwischen 0,074 (Bambusfleddermaus) und 10.000 g (Pottwal, Orca). Es ist unwahrscheinlich, dass dieser über 100.000-fache Unterschied proportional zu ihrer unterschiedlichen Intelligenz ist. Offenbar spielt das Körpergewicht eine wichtige Rolle – die Korrelation zwischen beiden Größen ist so stark, dass die Unterschiede im Hirngewicht zu 90% durch die Unterschiede im Körpergewicht erklärt werden können. Man hat versucht, diesen Effekt durch den Quotienten aus Hirngewicht/Körpergewicht herauszurechnen, aber auch so kam kein brauchbares Maß heraus. Der Blauwal rutscht nun mit einem Hirn von 0.005% des Körpergewichts auf einen der letzten Plätze, während kleine Säuger bei 10% und der Mensch bei 2% liegen. Der Grund hierfür ist, dass das Hirngewicht nicht linear mit dem Körpergewicht der Spezies ansteigt, sondern langsamer. Der von H. Jerison vorgeschlagene Enzephalisationsquotient berücksichtigt diesen Zusammenhang innerhalb jeder Klasse von Tieren und fragt, ob bei einer bestimmten Tierart das Hirngewicht unter- oder oberhalb des für diese Gruppe charakteristischen Trends liegt (Jerison, 1973). Diese vergleichende Zahl korreliert besser mit der beobachteten Verhaltensflexibilität bzw. Intelligenz. Der Mensch steht nun mit einem 7-fach über den Erwartungswert erhöhten relativen Hirngewicht an der Spitze. Aber auch dieses Maß ist nicht perfekt, sondern zeigt bei mehreren Spezies deutliche Abweichungen von einer plausiblen Anordnung. Kurz: Simple Maße für die Hirnleistung scheint es nicht zu geben, schon gar nicht nach dem Motto „big is intelligent“.

Die Forschung ist deshalb vor Allem in zwei Richtungen weitergegangen: erstens hat man gefragt, welche Teile des Gehirns die kognitive Leistungsfähigkeit besonders stark beeinflussen, und zweitens wurde versucht, Intelligenz mit der Feinstruktur der neuronalen Netzwerke zu korrelieren (Kaas und Herculano-

Houzel, 2017). Der erste Ansatz führt, nicht überraschend, zu einer Betonung des Neokortex (Hirnmantel oder Hirnrinde), der oft stark vereinfachend schlechthin mit Denken und Bewusstsein identifiziert wird. Tatsächlich ist das Volumen des Kortex beim Menschen im Vergleich zu anderen Spezies überproportional groß. Dies trifft noch mehr auf den frontalen Kortex zu, der bei Primaten und besonders beim Menschen ganz besonders ausgeprägt ist (Semendeferi et al., 2002). Andere Autoren betonen zusätzlich die Bedeutung von Arealen im Scheitellappen und sprechen vom fronto-parietalen Komplex als entscheidendes Merkmal der kortikalen Leistungsfähigkeit beim Menschen. Sehr vergrößert und bei aller Skepsis gegen zu schematische Lokalisationstheorien kann man sagen, dass (prä)-frontale Hirnteile besonders für Handeln, Entscheiden und rationale Impulskontrolle stehen, während der Parietalkortex multimodale sensorische und motorische Impulse integriert und auf diese Weise unser Bild vom aktuellen Kontext generiert. Bei den Arealen ist gemeinsam, dass sie als so genannte Assoziationskortex keine direkten Beziehungen zu Sinnessystemen oder motorischen Zentren haben. Das relative Ausmaß dieser Assoziationsareale ist beim Menschen außergewöhnlich hoch, während Tiere mit eingeschränkterem Verhaltensrepertoire überwiegend direkt mit der Peripherie verbundene primär-sensorische oder -motorische Areale haben (Abb. 1). Sie liegen gewissermaßen oberhalb dieser peripheren Systeme, indem sie Impulse aus anderen Kortexarealen integrieren und auch nur auf dem Umweg über andere Kortexareale auf das Verhalten wirken. Sie bieten also eine zusätzliche Ebene an neuronaler Leistung, deren mentales Korrelat sich bildhaft als der von unmittelbarem Wahrnehmen und Handeln befreite „Innenraum“ der Kognition beschreiben lässt.

Aber Vorsicht: In derartigen Formulierungen schwingt leicht eine Gleichsetzung von Hirnstrukturen und geistigen Prozessen mit, die den ganz verschiedenen begrifflichen Kategorien nicht angemessen ist. Ebenso falsch ist es, Funktionen zu schematisch bestimmten Hirnregionen zuzuordnen. Das Gehirn arbeitet nach heutigem Verständnis als Netzwerk, so dass bei allen relevanten kognitiven Prozessen zahlreiche Regionen in komplexen raum-zeitlichen Aktivitätsmustern zusammenspielen. Man kann einzelnen Regionen aus diesem Grund bestenfalls eine besondere Relevanz für bestimmte Funktionen zuschreiben, aber niemals eine Identität, die weder den räumlich verteilten Funktionen noch der zeitlichen Dynamik ständig wechselnder Aktivitätsmuster gerecht würde. Neben dem Kortex sollten auch andere Bereiche des Gehirns nicht unterschätzt werden. Aus der Be-

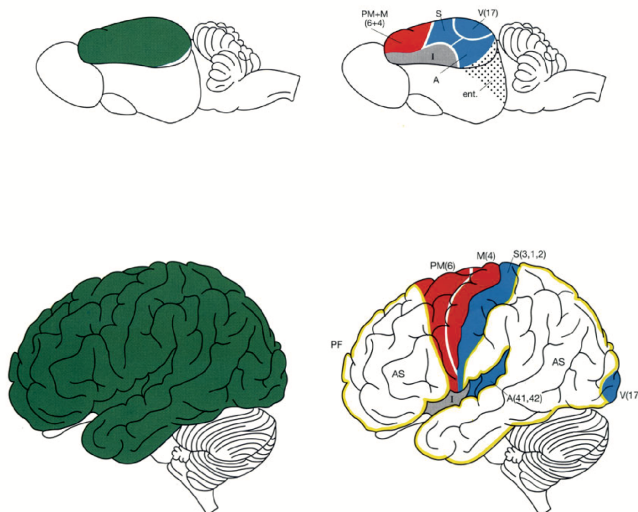


Abbildung 1: Vergleich des Gehirns eines Menschen und eines Igels. In den schematischen Skizzen ist der Neokortex jeweils grün gefärbt, motorische Areale rot und sensorische blau. Im linken Teil der Abbildung fällt die Dominanz des Neokortex beim Menschen auf, dessen Fläche durch die Faltung noch verstärkt wird. Im rechten Teil wird deutlich, dass der Kortex des Igels überwiegend aus Arealen besteht, die direkte sensorische oder motorische Funktionen haben. Beim Menschen ist dagegen der überwiegende Teil des Kortex als Assoziationskortex mit nicht direkt mit peripheren Sensoren oder Effektoren verbunden (weiße Areale). Nachdruck aus Hofman, 2019, mit freundlicher Genehmigung des Verlags.

obachtung von Patienten gibt es zum Beispiel Hinweise, dass auch das Kleinhirn (Zerebellum) neben seiner unbestrittenen motorischen Funktion wesentlich zur kognitiven Leistungsfähigkeit beiträgt (Schmahmann, 2010). Ähnlich verhält es sich mit den Basalganglien, einem Komplex verschiedener subkortikaler Kerngebiete, der klinisch primär mit Bewegungsstörungen in Zusammenhang gebracht wird, aber ebenso wichtig für die Initiierung und Auswahl von Handlungsoptionen und für die Flexibilität des Handelns ist. Neurodegenerative Erkrankungen des Kleinhirns oder der Basalganglien können neben eher somatischen neurologischen Symptomen auch Intelligenzminderungen bis hin zur Demenz verursachen.

3.2 Der Blick ins Innenleben des Gehirns: neuronale Netzwerke

Anatomische Unterteilungen des Gehirns liefern also bereits einige Hinweise für die strukturellen Grundlagen der Intelligenz, allerdings ohne die entstehenden Leistungen überzeugend zu erklären. Weiterführend ist hierfür die komplementäre Forschung an der Feinstruktur der neuronalen Netzwerke (Sporns et al., 2000). Der Kortex ist bei allen Säugetieren grundsätzlich ähnlich aufgebaut, nämlich in (meist 6) Schichten von Nervenzellen. Es gibt allerdings erhebliche Unterschiede zwischen den Spezies sowie innerhalb jeder Art zwischen verschiedenen funktionell spezialisierten Arealen. Dies zeigt sich in unterschiedlich dicken und zellreichen Schichten verschiedener kortikaler Regionen, was bereits vor über 100 Jahren beschrieben und hypothetisch als funktionelle Spezialisierung gedeutet wurde (Brodmann, 1909). Für die Überlegungen zur Intelligenz sind verschiedene anatomische Parameter von Bedeutung: die Anzahl (kortikaler) Neurone, ihre Packungsdichte, die Anzahl der Synapsen, und nicht zuletzt die Dicke der Axone, also der neuronalen Fortsätze, die elektrische Impulse zwischen den Nervenzellen übertragen. Letzteres mag zunächst überraschen, aber die Dicke dieser „Kabel“ bestimmt ihre Leitungsgeschwindigkeit, und dies scheint einen entscheidenden Vorteil bei der schnellen und komplexen Informationsverarbeitung in neuronalen Netzwerken zu bieten. Zur Leitungsgeschwindigkeit tragen auch isolierende Umhüllungen der Axone durch bestimmte Gliazellen bei. Es gibt verschiedene Typen dieser Zellen, die früher als Stützzellen bezeichnet und bezüglich ihrer funktionellen Bedeutung sträflich vernachlässigt wurden. Tatsächlich könnten die nicht-neuronalen Zellen des Gehirns einen wichtigen Beitrag zur Intelligenz leisten, der durch die informationstheoretisch geprägte Metaphorik der neuronalen „Verschaltungen“ und „Signale“ vielleicht unterschätzt wird.

Multipliziert man die Fläche und Dicke des Kortex mit der durchschnittlichen Neuronendichte, so kommt man auf die Gesamtzahl von Neuronen, die beim Menschen mit ca. 15 Milliarden maximal ist, gefolgt von Elefanten, Menschenaffen und Orcas. Allerdings sind diese Zahlen mit großen methodischen Unsicherheiten versehen. Ähnliches gilt für die Synapsenzahl, wobei klar ist, dass einzelne Nervenzellen typischerweise tausende oder zehntausende von Synapsen anderer Zellen empfangen, was die enorme Komplexität der neuronalen Netzwerke unterstreicht. Mit modernsten Methoden versucht man heute, durch serielle elektronenmikroskopische Schnitte einzelne Hirnregionen möglichst vollständig bezüglich ihrer Mikrostruktur zu rekonstruieren. Dies erweist sich allerdings als eine große expe-

rimentelle und datenanalytische Herausforderung, und bis zu einer vergleichenden Übersicht aller relevanten Kortexareale bei zahlreichen Spezies ist es noch ein sehr weiter Weg.

Mikro- und Makrostruktur sowie die Funktion des Kortex stehen übrigens in mehrfacher Hinsicht miteinander in Beziehung. Weithin bekannt ist die starke Faltung des Kortex beim Menschen, die zu „Hirnwindungen“ und „Hirnfurchen“ führt (wissenschaftlich als *Gyri* und *Sulci* bezeichnet). Diese Form ist wahrscheinlich eine Anpassung an die evolutive Zunahme der Gesamtfläche des Kortex, die im begrenzten Raum der Schädelkapsel Platz finden muss (der wiederum durch ganz andere Einflussgrößen wie den weiblichen Geburtskanal beschränkt sein könnte). Die Faltung des Kortex erlaubt eine besonders hohe lokale Konnektivität, weil Nervenzellen dadurch näher zusammengebracht werden (Herculano-Houzel et al., 2010). Kurze Leitungswege erhöhen wiederum die Verarbeitungsgeschwindigkeit in den Netzwerken, die wir oben schon als wichtigen Parameter identifiziert haben. Ausreichende Konnektivität bei kurzen Wegen scheint bei Walen zum begrenzenden Faktor zu werden, so dass diese riesigen Tiere einen recht dünnen Kortex und viel darunter liegende weiße Substanz (das makroskopische Korrelat der Axonbündel) aufweisen. Diese Architektur wird teilweise als Argument gegen übertriebene Vorstellungen von der Intelligenz der Wale ins Feld geführt. Charakteristisch ist schließlich die modulare Struktur der neuronalen Netzwerke: Lokal sind die Nervenzellen meist sehr stark miteinander vernetzt und bilden funktionelle Einheiten, während Axone zu anderen Modulen deutlich seltener sind (Sporns und Betzel, 2016). Diese Beschränkung ist einerseits eine Notwendigkeit – im Extremfall, dass jedes Neuron mit jedem anderen Neuron direkt verbunden wäre, würde das Volumen der weißen Substanz jedes erdenkliche Maß sprengen. Andererseits lässt sich mit den Methoden der „Network Science“ zeigen, dass die Kombination hoher lokaler mit einer deutlich niedrigeren langreichweitigen Konnektivität eine sehr effiziente Kommunikation über das gesamte System hinweg erlaubt. Dieser *small world* Effekt zeigt sich eindrucksvoll in sozialen Netzwerken, die ähnlich organisiert sind. Wenn man im Ausland eine beliebige Person trifft stellt man nicht selten fest, dass man eine gemeinsame Bekannte hat. Faktisch sind wir weltweit über weniger als 10 Zwischenstationen mit den allermeisten anderen Menschen verbunden.

Eine weitere Konsequenz der extrem gesteigerten lokalen Konnektivität und des modularen Aufbaus ist die strukturelle und funktionelle Spezialisierung ver-

schiedener Areale (Brodmann, 1909; Dicke und Roth, 2016; Hofman, 2019), die Grundlage für die oben erwähnten Lokalisationstheorien geistiger Prozesse ist. Hier zeigen sich charakteristische Unterschiede zwischen den Spezies, die zum Teil direkt mit ihrem je verschiedenen Verhalten in ihrer Umwelt in Verbindung gebracht werden können. Am leichtesten sieht man das an denjenigen Arealen, die eng an sensorische oder motorische Funktionen gekoppelt sind. Nicht umsonst sind laut- und sprachverarbeitende Kortexareale beim Menschen besonders ausgeprägt, bei Katzen dominieren visuelle Kortexareale, viele Nagetiere haben dagegen eine relativ *große* Repräsentation von olfaktorischen Kortizes. Möglicherweise ist die oben beschriebene Modularisierung und Spezialisierung von Kortexarealen auch der Hintergrund der Hemisphärenasymmetrie beim Menschen, bei der z. B. Sprachverarbeitung ganz überwiegend links stattfindet. Bei Tieren mit weniger spezialisierten kognitiven Fähigkeiten, z. B. bei Ratten, ist diese Asymmetrie wesentlich schwächer.

Alle Theorien zum Zusammenhang zwischen Kortex-Architektur und Intelligenz stehen vor einem massiven Problem: Vögel. Die Gehirne dieser Tiere haben auf den ersten und zweiten Blick wenige Gemeinsamkeiten mit denen der Säuger, vor allem haben sie keinen typischen Neokortex (Abb. 2).

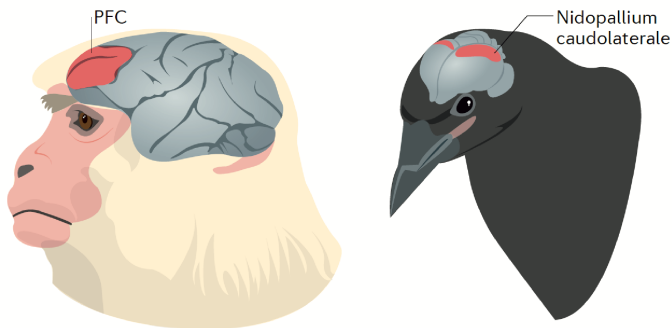


Abbildung 2: Unterschiedliche Hirnarchitekturen bei vergleichbaren Leistungen. Intelligentes Verhalten wie Werkzeuggebrauch, flexible Problemlösung, komplexe Kommunikation und Umgang mit quantitativen Größen sind bei Affen und Rabenvögeln vergleichbar. Dennoch unterscheiden sich ihre Gehirne grundlegend im Aufbau. Erst in jüngerer Zeit wurde das weit hinten liegende Areal des „Nidopallium caudolaterale“ als funktionell äquivalent zum präfrontalen Kortex der Primaten identifiziert. Nachdruck aus Nieder, 2016, mit freundlicher Genehmigung des Verlags.

Trotzdem erreichen Rabenvögel (*Corvidae*) und Papageien (*Psittaciformes*) die Intelligenz von Menschenaffen. Sie benutzen Werkzeuge, können eine hoch differenzierte sprachliche Kommunikation erlernen, erweisen sich in der Natur wie im Labor als hochkreative Problemlöser und sind erstaunlich gut im „Rechnen“ (Nieder, 2020). Wie kann es sein, dass solche kognitiven Leistungen mit einem ganz anders gearteten Gehirn möglich sind? Neuere Forschungen tendieren dahin, dass der Hirnmantel (*Nidopallium*) der Vögel hinsichtlich neuronaler Konnektivität und Effizienz doch wesentliche Eigenschaften des Neokortex von Säugetieren aufweist (Stacho et al., 2020; Herculano-Houzel, 2020). Insbesondere das so genannte *Nidopallium caudolaterale* der Vögel scheint für die Organisation komplexer und flexibler Verhaltensweisen unabdingbar. Und genau in diesem Netzwerk finden sich Zelltypen und Konnektivitätsmuster, die denen des (frontalen) Kortex von Primaten gleichen. Aus Ähnlichkeiten und Abweichungen kann die vergleichende Intelligenzforschung wertvolle Hinweise auf die biologischen Bedingungen von Intelligenz gewinnen. Ähnliches gilt für Berichte von Menschen mit massiven Fehlbildungen des Kortex, die trotzdem eine relativ hohe Intelligenz aufweisen und ihr Leben bestens meistern (Feuillet et al., 2007). Leider sind solche Fälle die Ausnahme, während viele kortikale Läsionen und Reifungsstörungen mit erheblicher Intelligenzminderung einhergehen.

3.3 Krone der Schöpfung?

Im Zusammenhang mit Intelligenz und hochstehenden kulturellen Leistungen ist seit Langem die besondere Größe und Bedeutung des Frontalhirns beim Menschen betont worden. Tatsächlich lässt sich für die Größe des frontalen, und besonders des präfrontalen Kortex eine Reihung aufstellen, die in vieler Hinsicht unserer Intuition von Intelligenz und kognitiver Flexibilität nahekommt. Der präfrontale Kortex des Menschen zeichnet auch bezüglich seiner Netzwerkstruktur aus, nämlich durch eine besonders zellreiche Schicht 4 (so genannte granuläre Schicht nach dem gekörnt erscheinenden mikroskopischen Bild; Elston et al., 2006; Donahue et al., 2018). Die zunehmende „Frontalisation“ wird häufig als Beleg für die evolutive Sonderstellung des Menschen dargestellt, wobei wir schon darauf hingewiesen haben, dass Lokalisationstheorien geistiger Funktionen nicht unkritisch angewandt werden sollten, ebenso wie die anthropozentrische Idee einer *Scala naturae*. Die Lokalisation aller „höheren“ geistigen und sozialen Errungenschaften im Frontallappen hat im zwanzigsten Jahrhundert sogar zu einem medizinischen

Exzess geführt. Seit den dreißiger Jahren wurden die schwer behandelbaren Patienten mit Schizophrenie, Zwangsstörungen und anderen Erkrankungen zu Tausenden „psychochirurgisch“ mittels Leukotomie („Durchschneidung der weißen Substanz“) oder Lobotomie („Lappenabtrennung“) behandelt. Dabei wurden die Verbindungen des Frontalhirns mit dem Thalamus und mit anderen Kortexregionen großflächig durchtrennt. Diese aus heutiger Sicht brutale und verstümmelnde Methode wurde sogar 1949 mit dem Nobelpreis für den Portugiesen António Egas Moniz geadelt, und sie galt eine Zeitlang als große therapeutische Hoffnung. Dass die Patienten danach lebenslang unter den Folgen schwerer Persönlichkeits- und Antriebsstörungen zu leiden hatten führte erst in den sechziger und siebziger Jahren zum Ende dieses fatalen Irrwegs.

Bis heute findet sich in der Fachliteratur über den Frontalkortex das aristotelische Ideal des Menschen als *zoon logicon* (oder *animal rationale*) wieder, einschließlich moralisierender Äußerungen, nach denen nur ein intakter (prä-)frontaler Kortex uns davon abhält, triebhaft, kriminell, übergriffig und gemeinschaftsschädlich zu handeln (Wise, 2008). Er ist als Organ der „exekutiven Kontrolle“ eng mit Problemlösungsstrategien und also der menschlichen Intelligenz verbunden. Die Hervorhebung des präfrontalen Kortex ist sicher oft überzeichnet, aber nicht völlig unplausibel, da Läsionen des präfrontalen Kortex tatsächlich eine verminderte Impulskontrolle, Änderungen der Persönlichkeit und Verminderung der Fähigkeit zu rationalen Entscheidungen zur Folge haben können. Kritisch sollte man allerdings einfordern, die kategoriale Unterscheidung zwischen moralischen Werten und hirnbedingten Verhaltensdispositionen zu beachten. Das denkende, entscheidende und handelnde Subjekt ist eine Person, und nicht ein Gehirn (Janich, 2009). Allerdings sind Denken, Entscheiden und Handeln des Menschen nicht von ihren biologischen Grundlagen unabhängig, und diese sind untrennbar mit dem Gehirn verbunden.

Könnte die weitere Evolution den Menschen zu einem Wesen mit einem noch größeren und effizienteren Kortex und noch größeren intellektuellen Fähigkeiten machen? Dem weiteren Wachstum scheinen relativ enge Grenzen gesetzt - schon beim jetzigen Menschen ist die Zunahme von Kortexvolumen und -konnektivität mit einem erheblichen, überproportionalen Zuwachs an weißer Substanz (also den „Kabeln“) erkaufte worden (Rilling, 2014). Dies lässt sich nicht beliebig steigern, wie man an den besonders dünnen Kortizes und dem großen Volumen der weißen Substanz bei Walen sehen kann. Außerdem verbraucht das Gehirn

bei etwa 2% Gewichtsanteil bereits jetzt über 15% unserer Energie, und seine Reifung dauert bis in die dritte Lebensdekade. Theoretiker sehen voraus, dass der intensive Metabolismus des Gehirns bei weiterer Zunahme echte Probleme der Wärmeabfuhr verursachen wird (Bullmore und Sporns, 2012; Hofman, 2009) - so werden Fragen von Raumbedarf, Energieverbrauch und Temperaturregulation zu limitierenden Faktoren, ganz ähnlich wie in der Computertechnik.

4 Feine Unterschiede – warum sind wir nicht alle gleich klug?

4.1 Kluge Köpfe?

Aus dem Bisherigen ergibt sich eine komplexe Beziehung zwischen Hirnstruktur und -funktion verschiedener Spezies und ihrer relativen kognitiven Leistungsfähigkeit. Wie sieht es aber mit der Varianz innerhalb der menschlichen Spezies aus? Drei Fragen haben die Forschung seit Langem beschäftigt. Gibt es ein strukturelles oder neurophysiologisches Korrelat unterschiedlich hoher Intelligenz bei Menschen? Sind unterschiedliche Intelligenzniveaus angeboren oder erworben? Kann man die Intelligenz gezielt fördern oder schädigen?

Intelligenz ist ein Konstrukt der Psychologie, also nicht primär eine physische Eigenschaft des Gehirns. Dennoch: So wie es Unterschiede in Größe und Aufbau des Gehirns zwischen intelligenter Spezies gibt ist auch zu erwarten, dass das psychologische Merkmal der Intelligenz nicht vom Gehirn unabhängig ist. In schrecklicher Weise zeigt sich dies bei neurodegenerativen Erkrankungen wie der Alzheimer-Krankheit, bei der mit dem Nervengewebe die Intelligenz unwiederbringlich verlorengeht. Ähnliches gilt für viele weitere angeborene oder erworbene Störungen des Gehirns, wobei die Auswirkungen auf die Intelligenz nicht nur vom Ausmaß, sondern auch stark vom Ort der Schädigung abhängen. Die isolierte Läsion eines primären, direkt mit einem Sinnes- oder Motorsystem verbundenen Areals kann durchaus auf den Ausfall dieser einen Funktion beschränkt bleiben, wie zum Beispiel nach einer Schädigung des primären visuellen Kortex. Die resultierende – meist partielle – Anopsie macht die bewusste Wahrnehmung von Objekten im betroffenen Ausschnitt des Gesichtsfelds unmöglich, alle anderen Fähigkeiten bleiben aber erhalten. Eine diffuse Schädigung assoziativer („höherer“) Kortexareale (z. B. Frontal- und Parietalhirn), zum Beispiel nach einem länger anhaltenden Sauerstoffmangel, hat dagegen in der Regel stärkere Auswirkungen auf die Intelligenz. Aus der mit Läsionen einhergehenden Psychopathologie kön-

nen wir also indirekt auf den unterschiedlich wichtigen Beitrag verschiedener Hirnregionen zur Intelligenz schließen. Die Neurophysiologie und -psychologie zieht häufig solche Schlüsse: „Bei Ausfall von X ist die Funktion Y regelmäßig betroffen, also ist X wichtig für Y“. Dieses Argument zeigt aber nur eine notwendige Bedingung an. Es bedeutet keineswegs, dass die Funktion Y allein durch X verursacht würde oder gar identisch mit X ist. Sie kann und wird in aller Regel multikausal entstehen, also in einem systemischen Geschehen, das am besten als komplexes Netzwerk von Kausalbeziehungen zu beschreiben ist. Dabei gibt es nicht nur aufwärts gerichtete Ursache-Wirkungs-Ketten (Gene → Moleküle → Zellen → Netzwerke → Gehirn → Verhalten), sondern auch „Abwärtskausalität“ von komplexen zu einfacheren Ebenen. Beispielsweise verursachen soziale Interaktionen durchaus Veränderungen auf Ebene der Zellen und Synapsen. Aus all diesen Gründen ist die Frage nach dem einen und genau benennbaren Ort der Intelligenz falsch gestellt.

Trotz der großen Komplexität gibt es aber identifizierbare strukturelle und funktionelle Einflussfaktoren auf die Intelligenz. Dazu gehört zunächst einmal die Größe des Gehirns, die wir schon beim Vergleich verschiedener Spezies als relevante, aber sehr grobe Messgröße kennen gelernt hatten. Versuche zur Korrelation von Intelligenz und Hirngröße reichen bis in den Beginn der humanen Neuropsychologie zurück. So publizierte etwa der britische Naturforscher Sir Francis Galton einen Aufsatz über „Head growth in students at the University of Cambridge“ (Galton, 1888). Wie zu erwarten wird die Korrelation zwischen Hirnvolumen und Intelligenz beim Menschen stärker, wenn man anstelle des gesamten Gehirns auf den Kortex fokussiert, insbesondere auf die wichtigen frontalen und parietalen Assoziationsareale (Jung und Haier, 2007). Ein weiterer interessanter Zusammenhang konnte mit Methoden der funktionellen Bildgebung gezeigt werden, die heute ein dominanter Ansatz der kognitiven Neurowissenschaften ist. Bei der Lösung von Aufgaben korreliert der Energieverbrauch des Gehirns negativ mit der Intelligenz. Salopp gesagt: je intelligenter eine Person ist, umso weniger muss sie sich beim Problemlösen anstrengen. Es geht also offenbar um die Effizienz der Prozesse, ganz ähnlich wie ein trainierter Sportler eine Übung mit Leichtigkeit absolviert, während ein Untrainierter an seine Grenzen kommt (Neubauer und Fink, 2009). Neuere Studien mit hochauflösenden Verfahren weisen darauf hin, dass die Dichte an Zellfortsätzen im Kortex intelligenter Individuen geringer (!) ist als bei weniger Intelligenten (z. B. Genc et al., 2018; Abb. 3).

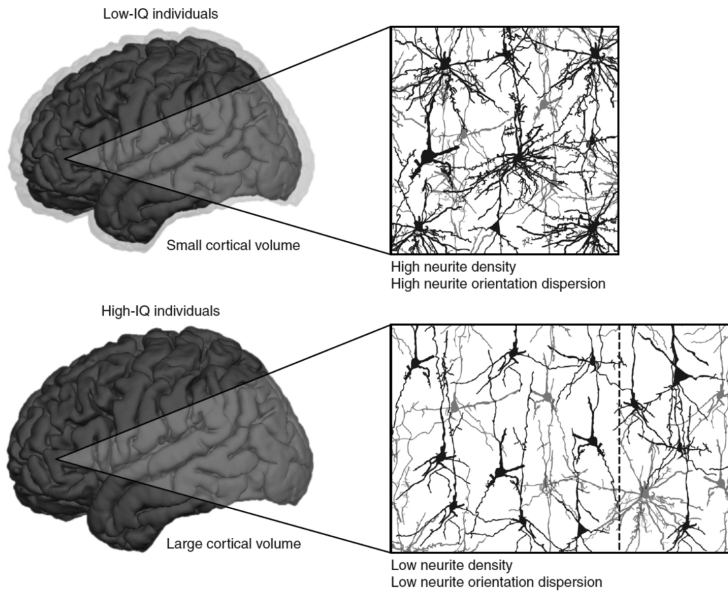


Abbildung 3: Individuelle Intelligenz und kortikale Netzwerke. Strukturelle Korrelate der Intelligenz sind weder zwischen noch innerhalb einer Spezies leicht zu definieren. Die Abbildung fasst Resultate einer neueren Studie zusammen, nach der Menschen mit höherer Intelligenz einen größeren Neokortex haben als Menschen mit geringerem IQ. In der Feinstruktur zeigt sich jedoch eine deutlich geringere Komplexität der neuronalen Fortsätze, an denen die Signalübertragung zwischen Nervenzellen stattfindet. Vermutlich sind in dem höher leistungsfähigen Gehirn selektiv die funktionell wichtigen Verbindungen gestärkt und besonders effizient angeordnet worden. Nachdruck aus Genc et al., 2018, unter ‚Creative Commons License‘.

Dies deutet auf eine geringere synaptische Interaktion hin als bei weniger Intelligenz, was zunächst überrascht. Es könnte aber sein, dass die Leistungsfähigkeit des Kortex nicht einfach mit der Zell- und Synapsenzahl ansteigt, sondern dass in besonders leistungsfähigen Netzwerken nur diejenigen Verbindungen erhalten bleiben, die auch wirklich benötigt werden.

Es scheint also ein Optimum der Konnektivität zu geben, passend zum Prinzip des „sparse coding“, nach dem in den neuronalen Netzwerken immer nur eine kleine Minderheit der Neurone aktiv ist. Tatsächlich entstehen während der Kindheitsentwicklung nicht einfach neue Synapsen, sondern wenig genutzte Verbindungen werden in großem Maß abgebaut – dieses synaptische „Pruning“ wird

als erfahrungsabhängiger Reifungsprozess betrachtet, der dazu führt, dass nur die wirklich funktionell wichtigen Verbindungen erhalten bleiben. Diese notwendigen Umbauvorgänge auf Netzwerk-Ebene liefern eine physiologische Begründung für die Forderung, Kindern und Jugendlichen die Auseinandersetzung mit einer reichhaltigen, senso-motorisch und intellektuell förderlichen Umwelt zu ermöglichen. Das hat praktische Konsequenzen für die Ermutigung zu Erfahrungen jenseits zweidimensionaler Bildschirme, aber auch für die sehr konsequente Behandlung aller Sinnes- oder Bewegungseinschränkungen in der Kindheit (das Wort „doof“ kommt von „taub“ und spiegelt den irreversiblen Verlust an Bildungsfähigkeit schwerhöriger Kinder in einer Zeit, als dieses Leiden nicht erfolgreich behandelt werden konnte).

4.2 Nature via nurture

Es gibt also durchaus physische Korrelate der unterschiedlichen Intelligenz von Menschen, sowohl auf struktureller wie auf funktioneller Ebene. Das führt direkt zu der Frage, ob diese Eigenschaften angeboren sind oder durch Erfahrung und Übung geformt werden können. Das „nature-nurture“ Problem beschäftigt Wissenschaft und Öffentlichkeit seit Langem, nicht zuletzt weil es große Auswirkungen auf unser Selbstverständnis und auf (bildungs)-politische Konzepte hat. Bekannt geworden sind die so genannten Zwillingsstudien, in denen Kinder mit 100- oder 50-prozentig identischen Genomen verglichen wurden. Untersucht wurden dabei auch Zwillinge, die in unterschiedlichen Umgebungen aufgewachsen sind, z. B. durch Adoption, so dass man genetisch identische Menschen mit unterschiedlichen Erfahrungen vergleichen konnte. Insgesamt haben diese und andere Studien einen großen Einfluss der Gene auf die Intelligenz ergeben (mit großen Schwankungen der Abschätzungen zwischen etwa 30–80%). Allerdings muss diese Aussage durch mehrere Argumente relativiert werden. Erstens gibt es nicht „das“ Intelligenzgen, sondern einzelne Genvarianten tragen immer nur minimal zur Erklärung von Intelligenzunterschieden bei, so dass es sich offenbar um eine komplexe, polygenetisch verursachte Eigenschaft handelt. Zweitens ist es so, dass die meisten untersuchten Zwillinge in einer gemeinsamen und sehr ähnlichen Umgebung aufwachsen sind. Dies gilt selbst bei adoptierten Kindern, die meist in Familien mit gehobenem Bildungsstand und mindestens mittleren Einkommensverhältnissen vermittelt wurden, also ebenfalls in ähnliche Verhältnisse. Bei gleichen Umweltbedingungen und Erfahrungen sind aber die dann noch verbleibenden Unterschiede naturgemäß

genetisch bedingt, so dass dieser Faktor wohl systematisch überschätzt wurde. Drittens ist es nach heutigem Verständnis nicht (oder nur in Ausnahmefällen) adäquat, genetische Faktoren als deterministisch anzusehen. Vielmehr ist es so, dass nicht nur die Gene den Organismus bestimmen, sondern dass die Interaktion eines Organismus mit der Umwelt auch Rückwirkungen auf die Expression, also gewissermaßen den Gebrauch, der genetischen Anlagen hat. Man spricht von Genregulation, epigenetischen Faktoren und Gen-Umwelt-Interaktionen. Daher hat der britische Autor Mat Ridley vorgeschlagen, anstelle einer *nature versus nurture* eine *nature via nurture*-Debatte zu führen (Ridley, 2003, zitiert nach Stern, 2017).

Variable Randbedingungen können also selbst bei gleichen Genen zu einer Varianz des resultierenden „Phänotyps“ führen. Aus demselben Grund ist der statistisch messbare Einfluss der Gene in sozioökonomisch schwachen Schichten geringer als in reicheren Milieus. In den Mittelschichten der westlichen Industrieländer sind Ernährung, Zugang zu Bildung, Gesundheitsfürsorge usw. weitgehend einheitlich und zufriedenstellend gelöst. Also gibt es weniger umweltbedingte Varianz, so dass in diesen Gruppen die genetische Varianz stärkeren Einfluss hat. In ärmeren Gesellschaften sind dagegen die Unterschiede der Lebensbedingungen größer, so dass sich diese Faktoren stärker auswirken. Auch dass man bei älteren Menschen eine stärkere genetische Komponente findet als bei jungen ist so zu erklären – ältere Personen haben stabilere und weniger unterschiedliche Lebenssituationen als Jugendliche. Die Frage, ob unsere Intelligenz durch die Gene bestimmt wird, erweist sich somit als interessant, vielschichtig und weniger „bedrohlich“ für den Wunsch nach Formbarkeit von Intelligenz, als man annehmen könnte. Trotz und mit allen genetisch vorgegebenen Randbedingungen ist das Gehirn plastisch und kann sich je nach Umgebung und Erfahrungen besser oder schlechter entwickeln. Das gilt ganz besonders in den ersten Lebensjahren, in denen man also ganz besonders auf gute Bedingungen achten sollte (Stern, 2017).

Damit sind wir bei der letzten Frage: Was können wir tun, um Intelligenz zu fördern, und welche Fehler sollten vermieden werden? Auch hier beginnen wir mit einem Blick in die Pathologie: Schwere Mangelsituationen können die Intelligenz eines Kindes schon während der Embryonalentwicklung senken – ein wichtiges Beispiel hierfür ist Jodmangel, der zum früher so genannten Kretinismus mit geistiger Retardierung führte und heute eigentlich durch entsprechende Prophylaxe nicht mehr auftreten dürfte. Andere frühkindliche Schadensmechanismen sind

Alkohol- oder (in diesem Punkt weniger dramatisch) Tabakkonsum der Schwangeren, aber auch Unterernährung oder psychosoziale Vernachlässigung von Kindern nach der Geburt. Als Extremfall sei an den Hospitalismus vernachlässigter Heimkinder erinnert, deren Intellekt und Sozialverhalten durch Reizdeprivation und fehlenden Kontakt schwer geschädigt werden. Zuwendung, Stimulation durch Neues, vielfältige Anreize und Ermutigung zu Aktivität und Lernen sind aber auch im normalen Leben nicht überall gleich verteilt, und sie scheinen wesentliche Determinanten der Intelligenzentwicklung von Kindern zu sein. Dazu gehört auch die frühe sprachliche Förderung, die in gebildeten Familien mit hoher Zuwendung automatisch erfolgen wird, in anderen Umgebungen aber eben nicht. Durch schlechte Startbedingungen entstehen Benachteiligungen, besonders für Kinder aus sozioökonomisch schwachen Gesellschaftsschichten. Sie können nur durch intensive institutionelle Förderung ausgeglichen werden, die früh einsetzen muss, denn das einmal Versäumte lässt sich nur mühsam und oft nicht vollständig aufholen. Das Sprichwort „Was Hänschen nicht lernt, lernt Hans nimmermehr“ ist fatalistischer als die moderne Neurowissenschaft, Pädagogik und Psychologie akzeptieren kann und sollte, aber es ist eben auch nicht ganz falsch.

Zusammengefasst: Die teilweise genetisch angelegte Intelligenz kann sich erst durch gute physische Bedingungen, vielfältige Reize und förderliche soziale Interaktionen voll entfalten, und dies geschieht ganz besonders in den ersten Lebensjahren. Dass diese gut belegte Einsicht Folgen für die Ausgestaltung eines chancengerechten Bildungs-, Sozial- und Gesundheitssystemen haben sollte versteht sich.

Literatur

- Brenner ED, Stahlberg R, Mancuso S, Vivanco J, Baluska F, van Volkenburgh E (2006) Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling. *Trends Plant Sci* 11:413–419.
- Brodmann K (1909) Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues. Barth, Leipzig.
- Bullmore E, Sporns O (2012) The economy of brain network organization. *Nat. Rev. Neurosci* 13:336–349.
- Dicke U, Roth G (2016) Neuronal factors determining high intelligence. *Philos Trans R Soc Lond Ser B* 371:20150180.

- Donahue CJ, Glasser MF, Preuss TM, Rilling JK, Van Essen DC (2018) Quantitative assessment of prefrontal cortex in humans relative to nonhuman primates. *Proc Natl Acad Sci US*. 115:E5183–E5192.
- Elston GN, Benatives-Piccione R, Elston A, Zietsch B, Defelipe J, Manger P, Casagrande V, Kass JH (2006) Specializations of the granular prefrontal cortex of primates: implication for cognitive processing. *Anat Rec A: Discov Mol Cell Evol Biol* 288A:26–35.
- Feuillet L, Dufour H, Pelletier J (2007) Brain of a white-collar worker. *Lancet* 370:262.
- Galton F (1888) Head growth in students at the University of Cambridge. *Nature* 38:14–15.
- Genç E, Fraenz C, Schlüter C, Friedrich P, Hossiep R, Voelkle MC, Ling JM, Güntürkün O, Jung RE (2018) Diffusion markers of dendritic density and arborization in gray matter predict differences in intelligence. *Nature Comm* 9:1905.
- Güntürkün O (2014) Is dolphin cognition special? *Brain Behav Evol* 83:177–180.
- Hauser MD, Yang C, Berwick RC, Tattersall I, Ryan MJ, Watumull J, Chomsky N, Lewontin RC (2014) The mystery of language evolution. *Front Psychol* 5,410.
- Herculano-Houzel S, Mota B, Wong P, Kaas JH (2010) Connectivity-driven white matter scaling and folding in primate cerebral cortex. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.* 107:19008–19013.
- Herculano-Houzel S (2020) Birds do have a brain cortex—and think. *Science* 369:21567–21568.
- Herrmann E, Call J, Hernandez-Lloreda MV, Hare B, Tomasello M (2007) Humans have evolved specialized skills of social cognition: the cultural intelligence hypothesis. *Science* 317:1360–1366.
- Hofman MA (2019) On the Nature and Evolution of the Human Mind. *Progr Brain Res* 250:251–283.
- Janich P (2009) *Kein neues Menschenbild. Zur Sprache der Hirnforschung.* Suhrkamp Verlag, Frankfurt.
- Jerison HJ (1973) *Evolution of the Brain and Intelligence.* Academic Press, New York.
- Jung RE, Haier RJ (2007) The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: converging neuroimaging evidence. *Behav Brain Sci* 30:135–154.
- Kaas JH, Herculano-Houzel S (2017) What makes the human brain special: key features of brain and neocortex. In: Opris, I., Casanova, M.F. (Eds.), *Physics of the Mind and Brain Disorders.* Springer Publishing, Switzerland, pp. 3–22.
- Llinas RR, Roy S (2009) The ‘prediction imperative’ as the basis for self-awareness. *Phil Trans R Soc B* 364:1301–1307.

- Mallatt J, Blatt MR, Draguhn A, Robinson DG, Taiz L (2020) Debunking a myth: plant consciousness. *Protoplasma*, <https://doi.org/10.1007/s00709-020-01579-w>.
- Manger PR (2013) Questioning the interpretations of behavioral observations in cetaceans: is there really support for a special intellectual status for this mammalian order? *Neuroscience* 250:664–696.
- Miller G (2009) On the Origin of The Nervous System. *Science* 325:24–26.
- Neubauer AC, Fink A (2009) Intelligence and neural efficiency. *Neurosci Biobehav Rev* 33:1004–1023.
- Nieder A (2016) The neuronal code for number. *Nat Rev Neurosci* 17:366–382.
- Nieder A (2020) Absolute Numerosity Discrimination as a Case Study in Comparative Vertebrate Intelligence. *Front. Psychol.* 11:1843.
- Ridley M (2003) *Nature via Nurture: Genes, Experience, and What Makes us Human*. HarperCollins Publishers, New York.
- Rilling JK (2014) Comparative primate neuroimaging: insights into human brain evolution. *Trends Cogn Sci* 18:46–55.
- Rosati AG (2017) Foraging cognition: reviving the ecological intelligence hypothesis. *Trends Cogn Sci* 21:691–702.
- Ryan JF, Chiodin M (2015) Where is my mind? How sponges and placozoans may have lost neural cell types. *Phil Trans R Soc B* 370: 20150059.
- Schmahmann JD (2010) The role of the cerebellum in cognition and emotion: personal reflections since 1982 on the dysmetria of thought hypothesis, and its historical evolution from theory to therapy. *Neuropsychol Rev* 20:236–260.
- Semendeferi K, Lu A, Schenker N, Damasio H (2002) Humans and great apes share a large frontal cortex. *Nat Neurosci* 5:272–276.
- Singer, P. (2013). *Praktische Ethik*. Stuttgart: Reclam.
- Sporns O, Betzel RF (2016) Modular brain networks. *Ann Rev Psychol* 67:19.1–19.28.
- Sporns O, Tononi G, Edelman GM (2000) Connectivity and complexity: the relationship between neuroanatomy and brain dynamics. *Neural Netw* 13:909–922.
- Stacho M, Herold C, Rook N, Wagner H, Axer M, Amunts K, Güntürkün O (2020) A cortex-like canonical circuit in the avian forebrain. *Science* 369:1585.
- Stern E (2017) Individual differences in the learning potential of human beings. *NPJ Sci Learn* 2:2.
- Taiz L, Alkon D, Draguhn A, Murphy A, Blatt M, Hawes C, Thiel G, Robinson DG (2019) Plants Neither Possess nor Require Consciousness. *Trends Plant Sci* 24:677–687.
- Trewavas A (2016) Intelligence, cognition, and language of green plants. *Front Psychol* 7:588.

- Van Schaik CP, Burkart JM (2011) Social learning and evolution: the cultural intelligence hypothesis. *Philos Trans R Soc B* 366:1008–1016.
- Wise SP (2008) Forward frontal fields: phylogeny and fundamental function. *Trends Neurosci* 31:599–608.
- Wohlleben P (2015) *Das geheime Leben der Bäume*. Ludwig Verlag, München.

Über den Autor

Andreas Draguhn ist seit 2002 Professor und Direktor am Institut für Physiologie und Pathophysiologie der Universität Heidelberg. Er studierte in Bonn Medizin sowie begleitend Physik und Philosophie und ist seither als Neurophysiologe tätig. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Funktion neuronaler Netzwerke, insbesondere koordinierte Aktivitätsmuster von Nervenzellen im Zusammenhang mit Gedächtnisvorgängen. Er war an mehreren interdisziplinären Initiativen beteiligt, u. a. als Fellow am Marsilius-Kolleg der Universität Heidelberg sowie seit 2008 als Vize-Direktor des Interdisziplinären Zentrums für Neurowissenschaften (IZN). Von 2009–2017 war er Mitglied/Sprecher des Fachkollegiums „Neurowissenschaft“ der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG). 2014–2018 war er Studiendekan der medizinischen Fakultät Heidelberg, 2018–2019 Dekan.

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Andreas Draguhn
Institut für Physiologie und Pathophysiologie
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 326
69120 Heidelberg

E-Mail: andreas.draguhn@physiologie.uni-heidelberg.de

Homepage:

<http://www.medizinische-fakultaet-hd.uni-heidelberg.de/Draguhn-Andreas-Prof-Dr.110991.0.html>