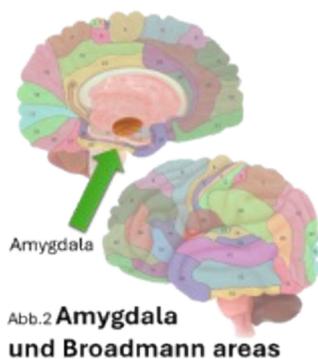

Rita Hansl, Wien

Gehirnverbindungen

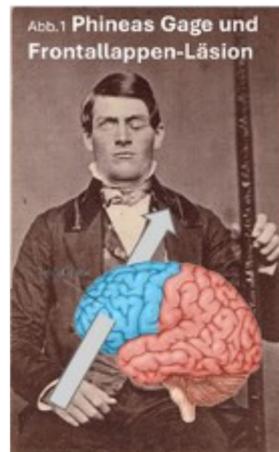
Die Brücke von Verortung zu Vernetzung

Bei einem Arbeitsunfall durchbohrte am 13. September 1848 eine Metallstange den vorderen Teil des Schädels von Phineas Gage. Was nach dem tragischen Ende eines jungen Lebens klingt, beschreibt einen der ersten Meilensteine der kognitiven Neurowissenschaften. Denn die dramatische Verletzung bescherte Gage weder den Tod noch andere deutliche körperliche oder kognitive Einschränkungen. Jedoch wurde der einst verlässliche, gesellige und ruhige Arbeiter laut seines Bekanntenkreises zu einem zunehmend impulsiven, ungehemmten und aufbrausenden Menschen. Die Schlussfolgerung der Neurowissenschaft: Der beschädigte Frontallappen muss für die Verhaltenskontrolle verantwortlich sein (Teles, 2020).

Dank zahlreicher technischer Entwicklungen kann die Funktionsweise des komplexesten menschlichen Organs heute nicht mehr nur durch Gehirnverletzungen erschlossen werden. Stattdessen verwendet die Gehirnforschung zahlreiche ausgereifte Methoden, von Tiermodellen und Genmanipulation über elektronische Gehirnstrommessungen (EEG) bis hin zu bildgebende Verfahren mittels Magnetfeldern (MRT) oder Infrarot (NIRS) (Pinti et al., 2020; Ward, 2019). In einer ersten Phase führte die Erforschung von Gehirnfunktionen zur immer weiteren Unterteilung des Gehirns in viele vermeintlich spezialisierte Einzelteile. Ein Beispiel dafür ist die weitbekannte Amygdala („Mandel“ wegen der Form und Größe) – das sogenannte



„Angstzentrum“. Obwohl ihre wichtige Rolle für Angstkonditionierung in vielen Versuchen reproduziert wurde, ist die Amygdala auch in zahlreiche andere emotionale und kognitive Prozessen involviert – nach dem Motto: „Klein, aber oho!“ Ein Grund für ihre vielseitige Einbindung könnte vor allem ihre zentrale Lage und starke Vernetzung sein. Demnach wäre ihre Relevanz nicht nur durch Spezialisierung, sondern auch durch ihre Zusammenarbeit mit anderen Strukturen begründet (Bzdok et al., 2013).



Die Erkenntnis, dass Gehirnregionen nicht nur für einen einzigen Prozess verantwortlich sind und oftmals im Einklang mit weiteren Regionen arbeiten, hat in der neurowissenschaftlichen Forschung zu einem Paradigmenwechsel von Zerteilung des Gehirns („parcellation“) hin zu Netzwerkforschung geführt. Wie auch in menschlichen Netzwerken scheint im Gehirn der Grundsatz „Teamwork makes the dream work“ zu gelten – die bisher definierten Regionen (z.B. Brodmann areas – Unterteilung in Abb.2 farblich markiert) können zwar verschiedene Dinge unterschiedlich gut, müssen aber zusammenarbeiten, um die komplexen Aufgaben unseres Alltags erfolgreich zu lösen. Der neue Fokus hat gezeigt, dass bestimmte Netzwerke in jeweils spezialisierten Bereichen wiederholt nachgewiesen werden können. So gibt es zum Beispiel das „Default mode network“ („Ruhezustandsnetzwerk“), welches beim

Tagträumen und internalisiertem Denken aktiv ist – vermutlich um vorangegangene Erfahrungen und Input zu verarbeiten und einzuordnen. Es setzt sich unter anderem aus folgenden Regionen zusammen (S. Wang et al., 2020):

Precuneus: Erinnerungsabruf und Verarbeitung sozialer Informationen

Mittlerer Präfrontaler Kortex: Emotionsregulation und Selbstkontrolle (bei Phineas Gage beschädigt)

Seitlicher Parietallappen: Orientierung und Aufmerksamkeit

Unterer Temporallappen: Objekt-Erkennung und Erinnerung

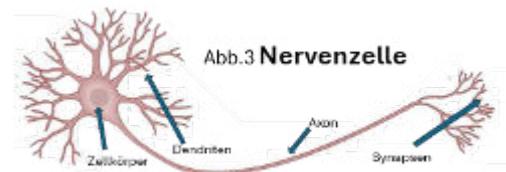
Parahippocampus: Kodierung von Erinnerungen und räumliche Orientierung

Frontalpol: höhere kognitive Funktionen wie Planung und Entscheidungsfindung

Ein anderes Netzwerk wäre zum Beispiel das sogenannte Salienz Netzwerk. Es ist nach dem lateinischen Wort *salire* für „hervorspringen“ im Sinn von „auffallen“ oder „Aufsehen erregen“ benannt. Dieses Netzwerk ist vor allem bei akutem Bedarf nach Wachsamkeit, Aufmerksamkeit und Handeln aktiv. Die verbundenen Gehirnregionen sind also dafür verantwortlich, dass wir Relevantes von weniger Relevantem unterscheiden und auf Wichtiges schnell und adäquat reagieren.

Dieser neue neurowissenschaftliche Ansatz leiht sich die Logik der Graphentheorie, eines Teilbereichs der Mathematik bzw. der theoretischen Informatik. Dabei werden Netzwerke durch „Knoten“ (= Punkte/Einzelteile) und deren Verbindungen (= „Kanten“) beschrieben. Die Qualität eines Netzwerks kann dann durch seine Effizienz, die Anzahl, Stärke und Richtung der Verbindungen sowie die Relevanz von spezialisierteren Sub-Gruppen dargestellt werden. Auch die Rolle von einzelnen Knoten kann anhand von ihren Verbindungen und ihre Lage innerhalb des Netzwerks beschrieben werden. In den Neurowissenschaften bilden Gehirnareale die „Knoten“ der Netzwerke (Bullmore & Sporns, 2009, 2012).

Damit diese Netzwerke aber gut zusammenarbeiten können und die Kommunikation zwischen den Arealen erfolgreich funktioniert, braucht es zu den Knoten auch noch physische „Verbindungen“. Nervenzellen (Neuronen) kommunizieren über elektrische Impulse. Diese werden über Nervenbahnen („Axone“) vom Zellkern der sendenden an die empfangenden Zellen übertragen. Axone verlaufen wie Kabel zwischen Nervenzellen und vernetzen das Nervensystem des gesamten Körpers.



Wie auch in einem Straßennetz werden die Verbindungen, die oft genutzt werden, ausgebaut und so zu dicken Nervensträngen, während seltener genutzte Bahnen dünner bleiben (Jeurissen et al., 2019). Auf der Annahme dieses Prinzips beruht die Forschung an strukturellen Gehirnverbindungen oder Maßen – ein wachsendes Teilgebiet der kognitiven Neurowissenschaften (Ward, 2019). Angeführt wird dieser Bereich von Initiativen wie dem Human Connectome Project, das strukturelle Gehirndaten von tausenden Personen zusammenträgt. Die verbundenen Studien verfolgen das Ziel, den feingliedrigen Aufbau des gesamten Gehirns mit seinen 86Mrd Neuronen und deren Vernetzung zu modellieren, um den Zusammenhang zwischen Struktur und Funktion zu verstehen (*Connectome - Homepage*, n.d.).

Ein wesentlicher Vorteil von strukturellen Maßen ist, dass sie zeitlich stabiler sind als funktionale Maße (i.e. Gehirnaktivität) (Forkel et al., 2022). Die Hoffnung der Forschung ist daher, kognitive Fähigkeiten (z.B. Empathiefähigkeit) wie auch Defizite durch strukturelle Maße vorherzusagen. Auf diese Weise wurden schon zahlreiche Assoziationen festgestellt (z.B. Wang et al., 2018). Zum einen korrelieren Messwerte von kognitiven Fähigkeiten mit Eigenschaften von strukturellen Maßen. Zum anderen bestehen systematische Unterschiede in der Gehirnstruktur zwischen klinischen Populationen und gesunden Kontrollgruppen. Diese signi-

fikanten Zusammenhänge bieten eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung neuer Behandlungsmethoden und gezielter Interventionen (Forkel et al., 2022).

Ein Beispiel dafür sind eine wachsende Anzahl an Studien, die systematische Unterschiede in strukturellen Gehirnverbindungen zwischen Personen mit und ohne autistischen Verhaltenszügen aufzeigen (Li et al., 2022; Zhang et al., 2023). Die Verortung dieser Unterschiede erlaubt nicht nur Einblicke in die Funktion und Rolle der implizierten Regionen und Verbindungen. Verlässlich identifizierbare Unterschiede in Gehirnschans könnten auch als biologischer Marker von Defiziten verwendet werden. Das würde nicht nur verlässlichere Diagnosen von Defiziten und Störungen, sondern auch Prognosen für mögliche Folgen von Gehirnschädigungen liefern.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass unser Gehirn zwar aus vielen spezialisierten Arealen besteht, diese aber zusammenarbeiten müssen, um unsere komplexen Alltagsaufgaben zu bestreiten. Strukturelle Verbindungen durch Axone in Nervensträngen bilden dabei die Brücke zwischen entlegenen und nahen Einzelteilen dieser Netzwerke. Je komplexer die kognitive Aufgabe, desto mehr Regionen werden im Netzwerk verbunden (Alcalá-López et al., 2018). Eine der komplexesten Aufgaben ist die soziale Interaktion: Sie bedarf der Sprache, Erinnerung, Wahrnehmung, Emotionserkennung und -regulation sowie der Planung und Aufmerksamkeit. Diese Komplexität bedingt die Ein- und Verbindung vieler Gehirnareale, was die Fähigkeit aber zugleich auch fragil macht. Forschung im Bereich der sozialen Netzwerk-Neurowissenschaften vermutet, dass soziale Funktionen deshalb in sehr vielen psychischen (Depression, Schizophrenie, Autismus) und neurologischen Erkrankungen (Demenz, Gehirntumore und -verletzungen, Gendefekte) beeinträchtigt sind.

Auch unser anfangs genannter Protagonist Phineas Gage wurde durch die Zerstörung oder Abtrennung eines wichtigen Knotens zum Opfer dieser Fragilität. Wie so oft scheint unsere Natur ein funktionierendes Muster beizubehalten: Strukturelle Verbindung diverser Teile im Gehirn ist Grund-

lage für soziale Verbindung im menschlichen Zusammenleben, was wiederum die Basis für das Funktionieren einer gesunden Gesellschaft bildet.

Literaturverzeichnis

Alcalá-López, D., Smallwood, J., Jefferies, E., Van Overwalle, F., Voegeley, K., Mars, R. B., Turetsky, B. I., Laird, A. R., Fox, P. T., Eickhoff, S. B., & Bzdok, D. (2018). Computing the Social Brain Connectome Across Systems and States. *Cerebral Cortex*, *28*(7), 2207–2232. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx121>

Bullmore, E., & Sporns, O. (2009). Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(3), 186–198. <https://doi.org/10.1038/nrn2575>

Bullmore, E., & Sporns, O. (2012). The economy of brain network organization. *Nature Reviews Neuroscience*, *13*(5), 336–349. <https://doi.org/10.1038/nrn3214>

Bzdok, D., Laird, A., Zilles, K., Fox, P., & Eickhoff, S. (2013). An Investigation of the Structural, Connectional, and Functional Subspecialization in the Human Amygdala. *HUMAN BRAIN MAPPING*, *34*(12), 3247–3266. <https://doi.org/10.1002/hbm.22138>

Connectome—Homepage. (n.d.). Retrieved July 4, 2025, from <https://www.humanconnectome.org/>

Forkel, S. J., Friedrich, P., Thiebaut de Schotten, M., & Howells, H. (2022). White matter variability, cognition, and disorders: A systematic review. *Brain Structure & Function*, *227*(2), 529–544. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02382-w>

Jeurissen, B., Descoteaux, M., Mori, S., & Leemans, A. (2019). Diffusion MRI fiber tractography of the brain. *NMR in Biomedicine*, *32*(4), e3785. <https://doi.org/10.1002/nbm.3785>

Li, M., Wang, Y., Tachibana, M., Rahman, S., & Kagitani-Shimono, K. (2022). Atypical structural connectivity of language networks in autism spectrum disorder: A meta-analysis of diffusion tensor imaging studies. *Autism Research*, *15*(9), 1585–1602. <https://doi.org/10.1002/aur.2789>

Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., & Burgess, P. W. (2020). The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1464(1), 5–29.

<https://doi.org/10.1111/nyas.13948>

Teles, R. V. (2020). Phineas Gage's great legacy. *Dementia & Neuropsychologia*, 14(4), 419–421. <https://doi.org/10.1590/1980-57642020dn14-040013>

Wang, S., Tefler, L. J., Taren, A. A., & Smith, D. V. (2020). Functional parcellation of the default mode network: A large-scale meta-analysis. *Scientific Reports*, 10(1), 16096. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72317-8>

Wang, Y., Metoki, A., Alm, K. H., & Olson, I. R. (2018). White matter pathways and social cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 90, 350–370. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.04.015>

Ward, J. (2019). *The Student's Guide to Cognitive Neuroscience* (4th edition). Taylor & Francis Ltd.

Zhang, K., Fu, Z., Lai, Q., Zhao, Y., Liu, J., & Cao, Q. (2023). The shared white matter developmental trajectory anomalies of attention-deficit/hyperactivity disorder and autism spectrum disorders: A meta-analysis of diffusion tensor imaging studies. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry*, 124, 110731. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2023.110731>

Die Oberösterreicherin **RITA HANSL** ist Psychologin und PhD-Studentin im Bereich der sozialen Neurowissenschaften. Nach einem FSJ in der Jugendfürsorge in Medellín, Kolumbien, hat ihr erstes Bachelorstudium am Amsterdam University College ihr Interesse am Funktionieren des menschlichen Gehirns geweckt. Der Berufswunsch „klinische Psychologin“ führte sie wieder zurück nach Österreich, wo sie an der Universität Wien das Bachelor- und Masterstudium der Psychologie absolvierte. Vor allem das forschungsorientierte Masterprogramm und die andauernde wissenschaftliche Mitarbeit in der pädiatrischen Neuroonkologie and der MedUni Wien lenkten Ihren professionellen Fokus zurück in die neurowissenschaftliche Forschung, wo sie seit Juni 2024 in einem ERC-Projekt die neuronalen Netzwerke der Empathie und der Perspektivenübernahme erforscht. Rita Hansl ist seit 2023 PRO SCIENTIA Stipendiatin.