

Wie und Was sieht unser Gehirn

Wenn wir uns mental räumliche Objekte vorstellen und diese mit Hilfe des Raumvorstellungsvermögens rein gedanklich transformieren (z. B. verschieben, drehen, spiegeln, skalieren) und mental Relationen (z. B. Schnitte, Boolesche Operationen) zwischen räumlichen geometrischen Objekten erzeugen oder unsere Position im Raum mental wechseln (perspective taking; Hegarty und Waller, 2004), dann sind die gleichen Areale im Gehirn aktiv als beim konkreten Sehvorgang selbst (Lang, 2014, S. 109). Um daher (besser) verstehen zu können, wie unsere visuelle Wahrnehmung und Raumvorstellung anatomisch und neurologisch funktioniert – wie wir räumliche Objekte wahrnehmen und im wahrsten Sinne des Wortes uns den „Raum vorstellen“ –, ist es sinnvoll, den *Vorgang des Sehens* näher zu betrachten.

Sehen ist eine der herausforderndsten und beeindruckendsten Leistungen unseres Gehirns. Zumindest die Hälfte der Areale des Gehirns sind an einer faszinierenden Verschachtelung von neurologischen Vorgängen beteiligt, wenn wir uns in unserer Umwelt „umschauen“, Objekte an deren spezifischen Charakteristika (wieder)erkennen (wie Gesichter, Landschaften oder diverse mathematisch-geometrischen Objekte), mit diesen Objekten interagieren (diese bearbeiten, bewegen oder uns in Bezug zu diesen bewegen) und uns schließlich diese Objekte dauerhaft merken.

Der Sehvorgang beginnt bei der Retina, die Innenseite unserer Augäpfel. Wenn spezielle, unterschiedlich lichtempfindliche Zellen (drei verschiedene Arten von sogenannten *Zapfen*, die für das Farbsehen verantwortlich sind und *Stäbchen*, die das Schwarz/Weiß-Sehen ermöglichen) der Retina durch Photonen angeregt werden, beginnt bereits im Auge der erste Selektions- und Filterprozess der Lichtreize. Z. B. werden Kontraste deutlich überzeichnet interpretiert. Die schließlich im Verhältnis von etwa 1:126 komprimierten Daten (Nänni, 2008) werden von der Retina beider Augen über die jeweiligen Sehnerven an die Sehnervkreuzung weitergeleitet. Hier werden die Bilder der entsprechenden Sehfelder unserer Augen derart umgeleitet, dass jeweils die Bilder des linken Sehfelds beider Augen zum rechten Kniehöcker (eines Anhangs des Thalamus im Zwischenhirn) und die Bilder des rechten Sehfelds beider Augen zum linken Kniehöcker weitergeleitet werden.

Im Kniehöcker angelangt, werden die Lichtreize erneut hochgradig interpretiert, gefiltert und mit unseren individuellen Erfahrungen abgeglichen und schließlich an den primären visuellen Cortex (im Allgemeinen als V1 bezeichnet) weitergeleitet. Dieser ist im hinteren Bereich unseres Gehirns angesiedelt und ist etwa 25cm² groß (Lang, 2014). Ca. 200 Millionen Zellen

sind ab diesem Zeitpunkt beschäftigt, sich um die Interpretation der empfangenen Lichtreize zu kümmern. Bis zu diesem Teil des Gehirns werden über alle bisherigen Stationen hinweg die Lichtreize *retinotop* übertragen. Dies bedeutet, dass das empfangene Bild in gleicher Ansicht dargestellt und übertragen wird, wie dieses auch in der Retina zu sehen ist. Mit der Einschränkung, dass genau die Bereiche, die in der Retina auf den Ort unseres schärfsten Sehens fallen (dem sogenannten gelben Fleck bzw. *macula lutea* genannt), deutlich überproportional dargestellt werden.

Ab dem primären visuellen Cortex sind zahlreiche bemerkenswerte Auswertungsmechanismen im Gange, um aus den übertragenen Lichteindrücken Objekte und Bewegungen identifizieren zu können und Reaktionen darauf vorzubereiten. Im Jahr 1982 wurde von Ungerleider und Mishkin aufgrund zahlreicher Untersuchungen am V1 und der anschließenden visuellen Gehirnareale V2, V3, V4, ITG (inferior temporal gyrus), ... erkannt, dass sich der Weg der Weiterverarbeitung der Lichtreize im Gehirn in zwei Bahnen teilt: Der ventralen (ventral pathway) und der dorsalen Sehbahn (dorsal pathway).

Die entwicklungsgeschichtlich jüngere *ventrale Sehbahn* ist für das Erkennen und Speichern („Merken“) von räumlichen Objekten zuständig, also dem „Was“. Hingegen wird der entwicklungsgeschichtlich älteren *dorsalen Sehbahn* zugesprochen, für das „Wann“ und „Wo“ verantwortlich zu sein. Demnach werden in der dorsalen Sehbahn räumliche Objekte verortet (es wird also die räumliche Lage erkannt), Bewegungen der Objekte analysiert, zeitliche Verläufe betrachtet und schließlich konkrete Handlungen initiiert und mit den motorischen Arealen des Gehirns umgesetzt. Jahrelang wurde von einer durchaus rigorosen Trennung dieser beiden Sehwege (ventral und dorsal) ausgegangen.

Aktuelle Studien zeigen jedoch (Goodale und Milner, 2018; Haan et al., 2018), dass die den beiden Sehwegen zugeordneten Gehirnareale zwar die oben beschriebenen Aufgaben maßgeblich übernehmen, die beiden Sehwege aber nicht so stark getrennt voneinander agieren als in den letzten drei Jahrzehnten angenommen. Vielmehr sind neuronale Netzwerke quer über die entsprechenden Gehirnareale verflochten und interagieren hochgradig untereinander.

Die räumliche Orientierung als bisher noch nicht diskutierte Komponente des Raumvorstellungsvermögens, wird als die Fähigkeit angesehen sich *mental* in andere Positionen im Raum versetzen zu können (Perspektivenwechsel, perspective taking; Hegarty und Waller, 2004). Das reale Bewegen in Umgebungen ist ebenfalls Teil der Fähigkeit zur Orientierung im Raum. An der Entschlüsselung unsers inneren „Navigationssystems“ arbeiten seit

über vier Jahrzehnten John O’Keefe und das Ehepaar May-Britt und Edvard Moser und erhielten für Ihre bahnbrechenden Entdeckungen auf diesem Gebiet 2014 den Nobelpreis für Psychologie/Medizin (Nobelpreis, 2014; Fyhn et al., 2004; Hafting et al., 2005; Sargolini et al., 2006). Da es sich aber hier um keine rein mentale Tätigkeit handelt, ist diese Fähigkeit des realen Bewegens im Raum streng genommen nicht Teil des Raumvorstellungsvermögens. Nur die Fähigkeit sich *mental* an andere Positionen im Raum denken zu können, wird als Teilfacette des Raumvorstellungsvermögens gesehen. Der Sitz der räumlichen Orientierung wird im Bereich der ältesten Gehirnareale des menschlichen Gehirns verortet, nämlich dem Hippocampus und dem direkt anliegenden enthorinalen Cortex. In einer ausgeklügelten Zusammenarbeit von sogenannten Ortszellen und Gitterzellen gelingt es, uns *mental* (als Teil des Raumvorstellungsvermögens) und *real* in Umgebungen zu orientieren.

Zusammen mit den zur ventralen und dorsalen Sehbahn gehörigen Gehirnarealen (V1, V2, V3, V4, V5, V6, ITG, ...) bilden die Areale, die uns räumliche Orientierung ermöglichen (Hippocampus und enthorinaler Cortex), diejenigen Gehirnregionen, mit denen wir „Sehen“, diverse Objekte (wieder)erkennen und unsere Handlungen entsprechend dazu passend vorbereiten. Diese „Sehareale“ des Gehirns agieren nicht unabhängig von den anderen Bereichen des Gehirns, sondern sind mit diesen in einer vielschichtigen Verflechtung in kontinuierlichem Austausch und bewerten, filtern, interpretieren und speichern optische Eindrücke je nach unseren individuellen Erfahrungen.

Diese Erfahrungen rühren von allen Sinnen (auditiv, olfaktorisch, gustatorisch, visuell oder taktil). Diesbezügliche Studien zeigen, dass Objekte umso besser erkannt und umso dauerhafter gespeichert werden, wenn möglichst viele unterschiedlichen Sinneserfahrungen zu diesen Objekten im Gehirn vorhanden sind. Haptische Erfahrungen erleichtern im Besonderen deutlich das dauerhafte Erfassen und Merken von räumlichen mathematisch-geometrischen Objekten (Hirsch und Maresch, 2015).

Ein weiterer Aspekt, der das dauerhafte Memorieren von räumlichen mathematisch-geometrischen Objekten deutlich erleichtert, ist unter anderem Aufmerksamkeit. Nachgewiesenermaßen haben nur diejenigen Objekte, denen wir Aufmerksamkeit schenken, gute Chancen, auch tatsächlich dauerhaft behalten werden zu können (Lang, 2014).

Der Vortrag bei der GDM-Tagung 2019 beleuchtet zum einen die teils überraschenden neurologisch-anatomischen Facetten des Schworgangs näher, stellt die anatomischen Abläufe (Areale, Wege/Bahnen, Verzweigungs-/Interpretations-/Filterstellen und deren Funktionen) und Grundlagen der

visuellen Wahrnehmung und des Raumvorstellungsvermögens (Pomberger und Maresch, 2018) vor, hilft somit grundlegend, die Begriffe visuelle Wahrnehmung und Raumvorstellung zu verstehen und zu trennen und eröffnet zum anderen die Diskussion über die mannigfaltigen Beziehungen zum Mathematikunterricht.

Literatur

- Eagleman, D. (2017). *The Brain – Die Geschichte von dir*. München: Pantheon Verlag.
- Fyhn, M., Molden, S., Witter, M.P., Moser, E.I., & Moser, M.B. (2004) Spatial representation in the entorhinal cortex. *Science* 305, 1258-1264.
- Goodale, M., & Milner, D. (2018). Two visual pathways – Where have they taken us and where will they lead in future? *Cortex* (98, 2018). Elsevier.
- Haan, E., Jackson, S., & Schenk, T. (2018). Where are we now with ‘What’ and ‘How’? *Cortex* (98, 2018). Elsevier.
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M.B., & Moser, E.I. (2005). Microstructure of spatial map in the entorhinal cortex. *Nature* 436, 801-806.
- Hegarty, M., & Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*, 32(2), 175-191.
- Hirsch, M., & Maresch, G. (2015). Wodurch wird das Raumvorstellungsvermögen gefördert? SketchUp, Skateboard oder Skulpturen? *Mathematik im Unterricht* (6). Universität Salzburg.
- Lang, R. (2014). *Sehen – Wie sich das Gehirn ein Bild macht*. Stuttgart: Reclam.
- Mulligan, J. (2015). Looking within and beyond the geometry curriculum: connecting-spatial reasoning to mathematics learning. *ZDM Mathematics Education*. Springer.
- Nänni, J. (2008). *Visuelle Wahrnehmung: Eine interaktive Entdeckungsreise durch unser Sehsystem*. Salenstein: Niggli.
- Nobelpreis (2014). The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2014. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2014/summary/> (4.1.2019)
- Pomberger, T., & Maresch, G. (2018). Geschlechterspezifische Unterschiede beim Raumvorstellungsvermögen. *Mathematik im Unterricht. Band 9*. Raleigh (USA): Lulu Press und <http://eplus.uni-salzburg.at/miu/>. Salzburg: Universität Salzburg.
- Sargolini, F., Fyhn, M., Hafting, T., McNaughton, B.L., Witter, M.P., Moser, M.B., & Moser, E.I. (2006). Conjunctive representation of position, direction, and velocity in the entorhinal cortex. *Science* 312, 758-762.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior*, 549-586. Cambridge, MA: MIT Press.
- Zöggeler, M., & Maresch, G. (2018). Raumvorstellungsvermögen und mathematische Kompetenzen Vorstellung einer Studie bei zweitsemestrigen Lehramt-Mathematik-Studierenden. *Mathematik im Unterricht. Band 9*. Raleigh (USA): Lulu Press und <http://eplus.uni-salzburg.at/miu/>. Salzburg: Universität Salzburg.