

Räumliches Denken

Günter Maresch (Universität Salzburg)

E-Mail: guenter.maresch@sbg.ac.at

Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Fähigkeit zum räumlichen Denken als eine der maßgeblichen Facetten der menschlichen Intelligenz erkannt und wird seit dieser Zeit von unterschiedlichen Wissenschaftszweigen beforscht. Dieser Beitrag stellt die vier maßgeblichen Gebiete der Wissenschaft vor, welche sich eingehend mit dem räumlichen Denken befassen und sich jeweils aus unterschiedlichen Perspektiven diesem nähern. Es werden die entsprechenden Herangehensweisen, Kernaussagen, Modelle und Ansätze kompakt erörtert, wodurch im Rahmen dieser Beschreibung der historischen Genese der Auseinandersetzung mit dem räumlichen Denken die Möglichkeit eröffnet wird, dieses Beschäftigungsfeld in einer umfassenderen Weise sehen zu können. Dies wiederum ist der fruchtbare Nährboden für Weiterentwicklungen auf diesem Gebiet. Schließlich wird auf das Modell der Grundroutinen des räumlichen Denkens verwiesen, welches mit der Intention entwickelt wurde, die Essenz aus den Erkenntnissen der vier Wissenschaftsgebiete, die sich eingehend mit dem räumlichen Denken beschäftigen, herauszuschälen und in einem Modell zusammenzuführen.

Einleitung

Die Fähigkeit zum räumlichen Denken ist eine der grundlegendsten kognitiven Leistungen von Menschen. Sie befähigt uns unter anderem dazu, uns in unserer Umwelt bewegen zu können, Ziele anpeilen zu können, Routen planen zu können, Distanzen und Geschwindigkeiten schätzen zu können, die Lage von räumlichen Objekten zueinander erkennen zu können, Kühlschränke und Kofferräume geschickt befüllen zu können und sperrige Gegenstände durch Stiegenhäuser und andere Räume bewegen zu können. Räumliches Denken beinhaltet zum einen die Fähigkeit, sich rein gedanklich räumliche Objekte vorstellen zu können und diese rein durch die Kraft unserer Vorstellung gedanklich drehen (Abbildung 1), spiegeln und verschieben zu können, sich von mehreren Objekten die Lage zueinander und die Lage im Raum vorstellen zu können und Objekte schneiden zu können. Dies alles sind Beispiele für die Fähigkeit, sich rein kognitiv räumliche Objekte vorstellen zu können und diese rein gedanklich manipulieren (drehen, spiegeln, schneiden, ...) zu können. Zudem beinhaltet die Fähigkeit zum räumlichen Denken das Vermögen, sich rein gedanklich an andere Positionen im Raum versetzen zu können (Abbildung 2). Wir Menschen können uns jederzeit gedanklich in ein uns bekanntes Gebäude, z. B. in die Schule,

in die wir gegangen sind, versetzen, uns dort die räumlichen Situationen und Relationen in Erinnerung holen und gegebenenfalls bestimmte Wege (z. B. von einem Klassenzimmer zur Garderobe) einer anderen Person beschreiben.

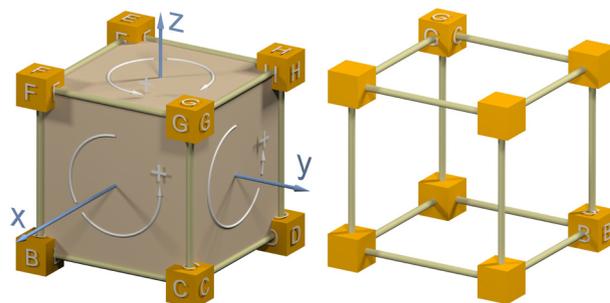


Abbildung 1: Eine exemplarische Aufgabe zum rein gedanklichen Drehen eines Würfels. Der links gegebene Würfel wird entlang den gegebenen Achsen x, y, z gedreht, bis dieser in die Lage des rechten Würfels kommt. Die noch nicht beschrifteten Würfelecken sind zu beschriften. (Eigene Grafiken, die auch in Aufgaben von RIF2.0 (<https://adi3d.at/rif20/>) enthalten sind.)

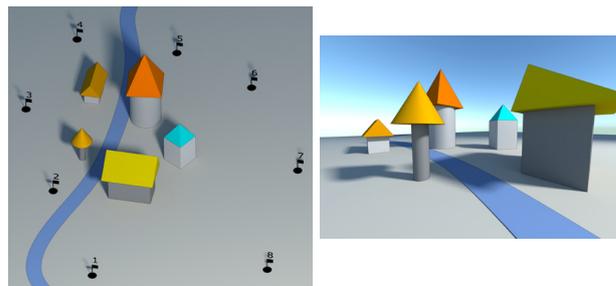


Abbildung 2: Eine exemplarische Aufgabe zum rein gedanklichen Vermögen, sich an andere Positionen im Raum versetzen zu können. Im linken Bild ist ein Foto einer kleinen Ortschaft zu sehen. Ein Photograph nimmt von den Positionen 1-8 ein Foto von der Ortschaft auf. Von welcher Position wurde das Foto rechts aufgenommen? (Eigene Grafiken, die auch in Aufgaben von RIF2.0 (<https://adi3d.at/rif20/>) enthalten sind.)

Räumliches Denken ist seit Urzeiten eine überlebensnotwendige Fähigkeit für Menschen. Mehr denn je wird sie in unserer modernen technologiestützten Welt benötigt. Das Betrachten und Analysieren der großen gesellschaftlichen Veränderungen seit der Jahrtausendwende zeigt uns, dass unsere Welt kontinuierlich digitaler, datengestützter und visueller wird (Montello, Grossner, Janelle, 2014). Während der digitale Fortschritt durch stete Berichte über digitale Errungenschaften in den Medien in unserem Bewusstsein ist und die Diskussionen um Aspekte wie Big Data und Datenschutz das Thema des Datenreichtums unserer modernen Welt kommunizieren, scheint der

Umstand, dass unsere Welt immer visueller wird, ein wenig beachtet zu sein. Der Begriff „wenig beachtet“ ist in diesem Zusammenhang in keinsten Weise gleichzusetzen mit „wenig effektiv“ bzw. „wenig bedeutend“. Ganz im Gegenteil. In nahezu allen Bereichen unseres privaten und beruflichen Alltags werden wir vermehrt mit visuellen Informationen und Herausforderungen konfrontiert, müssen diese erkennen, richtig interpretieren und schließlich passende Entscheidungen treffen. Als Beispiel dafür seien Navigationsgeräte erwähnt. Diese Geräte in unseren Fahrzeugen helfen uns potenziell enorm, den besten Weg von A nach B zu finden (Abbildung 3).

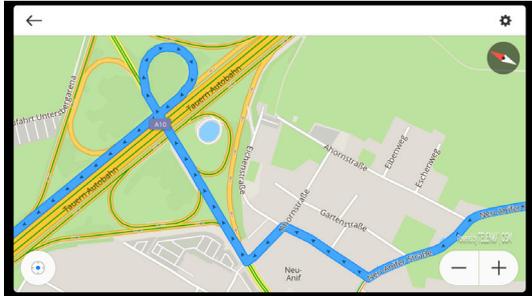


Abbildung 3: Wegverlauf, angezeigt auf einem Navigationsgerät

Bei näherer Betrachtung sind mit dem Gebrauch von Navigationssystemen allerdings einige visuelle Herausforderungen verbunden. Es ist von der Benutzerin/vom Benutzer unter anderem mit einem zumeist kurzen Blick auf das Gerät zu erkennen, ob das Gerät die tatsächliche Position des Autos in der Umwelt korrekt anzeigt, welche Objekte der realen Umwelt die einzelnen grafischen Elemente am Bildschirm symbolisch darstellen und schließlich welche der realen Abbiegemöglichkeiten in der Umwelt der am Bildschirm angezeigten Fahrroute entspricht. Dieses Übersetzen der sich kontinuierlich bewegendes Symbole am Bildschirm des Navigationsgerätes ist ein kognitiv fordernder Prozess, der ein gut ausgeprägtes Vermögen zum räumlichen Denken voraussetzt. Dass dies so ist, führen uns z. B. Berichte über Unfälle vor Augen, wo ein/e AutolenkerIn die angezeigte Route am Navigationsgerät missinterpretiert (Abbildung 4) und die nächste Seitengasse mit einem Treppengang verwechselt.



Abbildung 4: Foto eines Autounfalls, bei dem möglicherweise eine Missinterpretation der Anzeige eines Navigationsgerätes die Unfallursache darstellt (Foto: Berufsfeuerwehr Graz)

In vielen weiteren modernen Bereichen unseres privaten bzw. beruflichen Umfelds sind vermehrt visuelle Fähigkeiten von Nöten, wie z. B. beim passenden Platzieren von räumlichen Objekten zur Vorbereitung auf einen 3D-Druck, beim Steuern und Navigieren von Drohnen, beim Navigieren von fahrbaren Robotern in Kanälen, bei Operationen am Menschen via minimalinvasiver Eingriffe mithilfe von Minikameras und in der Zahntechnik, wo mit hochpräzisen Verfahren beginnend von 3D-Scans und CAD-gestützter Planung schließlich Implantate, Kronen und Zahnspangen geplant und realisiert werden.

In naher Zukunft werden wir zahlreichen weiteren visuellen Entwicklungen in unserem privaten und beruflichen Alltag begegnen (z. B. VR- und AR-Anwendungen), die eine noch bessere und differenzierte Fähigkeit zum räumlichen Denken erfordern werden als bis dato notwendig war. Z. B. werden Einkäufe in Geschäften, das Planen und Betrachten von Wohnungs(um)bauten, der Kauf von Häusern, die Anleitungen zum Aufbau von Möbeln, der Aufbau und die Installation von technischen Geräten und vieles mehr in größerem Umfang durch virtuelle Umgebungen unterstützt werden.

Räumliches Denken

Der Begriff „räumliches Denken“ (im Englischen zumeist als *spatial skills* bezeichnet, manchmal auch *spatial thinking* bzw. *spatial ability*) wird als Überbegriff für die diversen Begriffe wie Raumdenken, Raumvorstellung(svermögen), visuelle Wahrnehmung, räumliche Wahrnehmung, Raumwahrnehmung oder Raumintelligenz verwendet. Die Analyse der Beschreibungen und Definitionsversuche der erwähnten Begriffe zeigt (vgl. etwa Hegarty, 2010; Maier, 1994), dass diese oftmals von unterschiedlichen Personen und Wissenschaftsgebieten deutlich unterschiedlich beschrieben und verwendet werden. Die Unterbegriffe sind nicht als Synonyme für den Begriff „räumliches Denken“ zu verstehen, sondern beziehen sich im Allgemeinen auf spezifische räumliche Teilfähigkeiten, die in unterschiedlichen Kontexten in der Literatur oftmals unterschiedlich beschrieben und verwendet werden. Als verbindender, gemeinsamer Überbegriff für die menschliche Fähigkeit, vom Auge empfangene optische Reize ins Gehirn leiten zu können, diese interpretieren zu können und daher räumliche Objekte als diese erkennen zu können, sich räumliche Objekte mental vorstellen zu können (mit oder ohne vorherige optische Reize), diese gedanklich manipulieren zu können, sich rein in der Vorstellung an unterschiedliche Positionen im Raum versetzen zu können, Bewegungsabläufe wahrnehmen und interpretieren zu können und (fein)motorische räumliche Bewegungen ausführen zu können, wird der Begriff „räumliches Denken“ verwendet (Abbildung 5).

Räumliches Denken

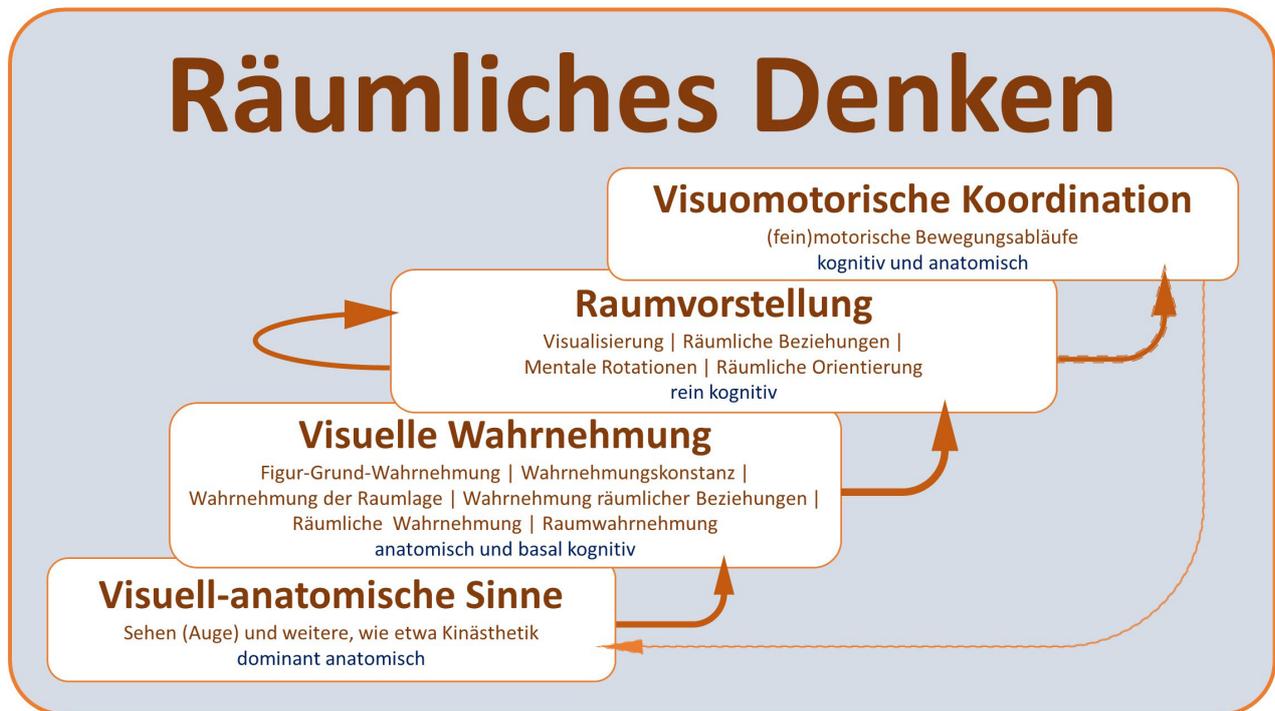


Abbildung 5: Die aufbauenden Stationen räumlichen Denkens. Grundlegend werden *Sinne(sorgane)* benötigt, um optische Reize empfangen zu können. Die Facetten der *visuellen Wahrnehmung* helfen, die optischen Reize, unterstützt von weiteren Sinneseindrücken wie Hören oder Kinästhetik, zu filtern, zu interpretieren und damit grundlegend zu analysieren. Mithilfe der faszinierenden Möglichkeit des rein gedanklichen Operierens mit räumlichen Objekten können diese nun (rein gedanklich) je nach Zweck manipuliert werden, wir können uns rein gedanklich je nach Bedarf an anderen Positionen des Raumes versetzen und können somit unser *Raumvorstellungsvermögen* einsetzen. Gegebenenfalls planen wir dabei auch (*fein*)motorische Bewegungsabläufe, führen diese durch, sehen die Ergebnisse der Durchführung und kommen somit in einen schleifenartigen Ablauf des räumlichen Denkens (rechte Pfeile in der Abbildung). Dem gegenüber benötigen wir z. B. bei kreativen Prozessen (wie dem Entwerfen eines Hauses) keinerlei optischen Reize, um räumlich zu denken (siehe linker Pfeil in der Abbildung). Wir setzen hier rein unser Raumvorstellungsvermögen ein, um Neues gedanklich zu entwerfen oder Lösungen von räumlich-geometrischen Problemen zu entwickeln.

Der Überbegriff „räumliches Denken“ beinhaltet somit folgende Fähigkeiten:

- » Empfangen des optischen Reizes (über das Auge) und Weiterleiten über diverse Stationen bis hin zum Gehirn
- » Grundlegende Interpretation des optischen Reizes und kognitiver Abgleich des optischen Reizes mit Erfahrungen auf den diversen Stationen vom Auge bis hin zum Gehirn und damit schließlich die Fähigkeit, räumliche Objekte „erkennen“ bzw. „kennenlernen“ zu können
- » Planen und Durchführen von (*fein*)motorischen Reaktionen auf optische Reize (siehe zu den ersten drei Listenpunkten auch Abbildung 6)
- » Rein gedankliches Vorstellen von räumlichen Objekten (ohne vorherigen optischen Reiz)
- » Rein gedankliches Manipulieren von räumlichen Objekten (Drehen, Schieben, Spiegeln, Skalieren, ...)
- » Sich rein gedanklich an andere Positionen im Raum versetzen zu können

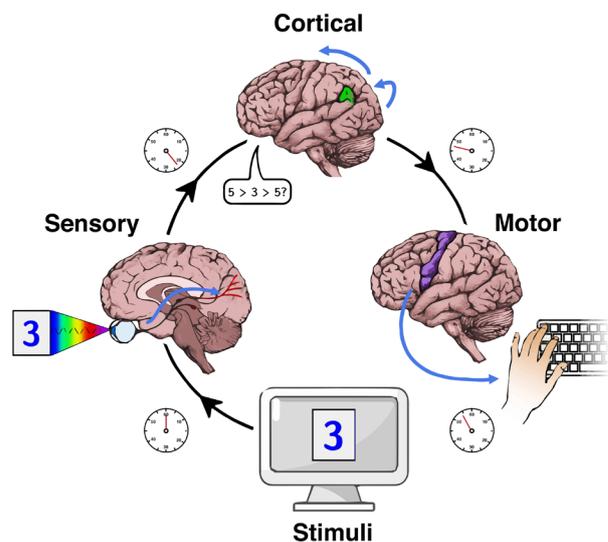


Abbildung 6: Schrittweise Darstellung einer exemplarischen Tätigkeit, die räumliches Denken benötigt. Hier: Tippen der Ziffer „3“. (Grafik: Emily Willoughby)

Räumliches Denken als Voraussetzung für MINT-/STEM-Berufsfelder

Eine gut ausgeprägte Fähigkeit zum räumlichen Denken unterstützt nicht nur unser Tun im privaten Alltag, sondern erleichtert, fördert bzw. ermöglicht sogar oftmals erst eine berufliche Karriere in den Berufsfeldern der Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (MINT; Science, Technology, Engineering, Mathematics – STEM).

Im Jahre 2009 zeigten Wai und seine KollegInnen (Wai Lubinski und Benbow, 2009) im Rahmen der Auswertung einer Studie überzeugend, dass eine gut ausgeprägte Fähigkeit zum räumlichen Denken die maßgebliche Schlüsselqualifikation für erfolgreiches berufliches Wirken in den MINT-/STEM-Bereichen ist. Von 400.000 amerikanischen OberstufenschülerInnen der 9. bis zur 12. Schulstufe wurde mithilfe zahlreicher Tests neben weiteren Fähigkeiten auch das Raumvorstellungsvermögen getestet. 11 Jahre nach dem Schulabschluss (Matura, Abitur) wurden von diesen 400.000 AbsolventInnen im Rahmen einer weiteren Befragung unter anderem deren Berufe erhoben.

Dabei hat sich gezeigt, dass 45 % derjenigen, die einen Dokortitel im Bereich der MINT-/STEM-Bereiche besitzen, unter den besten 4 % der Raumvorstellungstestung während der Schulzeit waren. Ziemlich genau 90 % derjenigen, die einen Dokortitel im Bereich der MINT-/STEM-Bereiche aufweisen können, waren unter den besten 23 % im Bereich der Raumvorstellungstests während der Schulzeit (Abbildung 7).

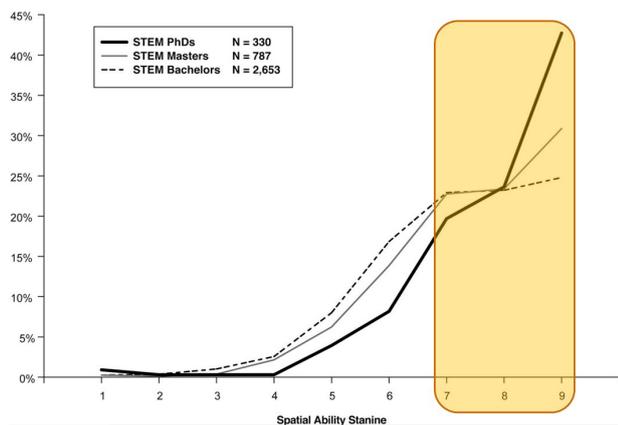


Abbildung 7: Wie gut waren DoktorInnen, Master- bzw. BachelorabsolventInnen, die im MINT-/STEM-Bereich arbeiten, bei Raumvorstellungstests während ihrer Oberstufenzeit? (Grafik aus Wai et al., 2009)

Allein anhand der Ergebnisse dieser Studie ist eindrucksvoll zu erkennen, dass die Fähigkeit zum räumlichen Denken eine *der* Schlüsselqualifikationen dafür ist, um im mathematisch-informatisch-naturwissenschaftlich-technischen Bereich beruflich reüssieren zu können.

Räumliches Denken als Voraussetzung für erfolgreiches schulisches Lernen

Eine gut ausgeprägte Fähigkeit zum räumlichen Denken ist nicht nur eine grundlegende wichtige Fähigkeit zum Bewältigen vieler Tätigkeiten unseres privaten und beruflichen Alltags, sondern ist bereits in jungen Jahren während der Schulzeit ein Vermögen, welches deutlich hilft, das Lernen in unterschiedlichen Bereichen zu erleichtern bzw. sogar erst zu ermöglichen. Frostig hat in den 1970er-Jahren deutliche Zusammenhänge von visuellen Fähigkeiten und dem Vermögen, Schreiben und Lesen zu lernen, festgestellt. Hawes und seine Kollegen (Hawes, Tepylo und Moss, 2015) haben herausgefunden, dass unter anderem bei grundlegenden mathematischen Tätigkeiten wie dem Umformen einfacher Terme von z. B. $5 + _ = 7$ auf $_ = 7 - 5$ diejenigen SchülerInnen deutlich im Vorteil sind, die eine gute Fähigkeit zum räumlichen Denken mitbringen. Weitere Studien mit ähnlichen Ergebnissen zeigen insgesamt, dass eine gut entwickelte Fähigkeit zum räumlichen Denken Menschen bei weit über den MINT-/STEM-Bereich hinausgehenden Tätigkeiten hilft bzw. diese erst ermöglicht.

Trainierbarkeit des räumlichen Denkens

Die Wichtigkeit der Fähigkeit zum räumlichen Denken wurde in den obigen Kapiteln angesprochen und exemplarisch argumentiert. In einem logischen nächsten Schritt kann daher die Forderung nach einer eingehenden Förderung dieser Fähigkeit im schulischen Kontext aufgestellt werden. Als Voraussetzung dafür muss allerdings noch der Aspekt betrachtet werden, ob das räumliche Denken trainierbar ist oder ob es eine angeborene Fähigkeit darstellt, die in einem bestimmten Maße bei Menschen verfügbar ist, aber nicht durch Training und Förderung weiterentwickelt werden kann.

Generell können in der Literatur des 20. Jahrhunderts zwei gegensätzlich erscheinende Standpunkte gefunden werden. Zum einen der Standpunkt, dass das Vermögen zum räumlichen Denken eine rein genetisch bedingte Fähigkeit eines Menschen darstellt und durch Förderung de facto nicht weiterentwickelt werden kann. Zum anderen wird dem gegenüber oftmals festgehalten, dass die Fähigkeit zum räumlichen Denken eine im hohen Maße trainierbare und steigerbare ist und dass maßgeblich die aktive Förderung der räumlichen Fähigkeiten den Ausschlag dafür gibt, wie gut diese Fähigkeit bei einem Individuum ausgeprägt ist. Der aktuelle Stand der Forschung geht davon aus, dass beide Aspekte zutreffend sind und diese nicht disjunkte Ausprägungen darstellen. Montello, Grossner und Janelle stellen dazu fest: „One common misunderstanding in this regard is the notion that just because some trait is genetically deter-

mined, it is necessarily immutable, and that because some trait is modifiable, it must be caused by experiences after birth (or conception) rather than by genetics. Neither of these complementary claims are true." (Montello et al., 2014). Die Fähigkeit zum räumlichen Denken ist einerseits in einem bestimmten Maße individuell bei Menschen genetisch angelegt, kann aber andererseits zudem im hohen Maße durch Förderung und Training gesteigert werden (z. B. Glück, Kaufmann, Dünser, Steigbügl, 2005). Montello und seine KollegInnen schreiben dazu weiters: „Spatial learning in educational and everyday settings is important because it holds the promise of improving spatial thinking, which in turn holds the promise of contributing to a host of desirable outcomes, including generating economic development, making more user-friendly and functional technology, fostering equitable access to employment, and generally helping people realize their potential." (Montello et al., 2014). Es wird neben der großen allgemeinen Nützlichkeit des räumlichen Denkens unter anderem auch hier betont, dass die explizite und implizite aktive Förderung der räumlichen Denkfähigkeit im Schulunterricht erfolversprechend zu sein scheint und davon ausgegangen werden kann, dass ein variantenreiches, strukturiertes Training im schulischen Kontext Menschen substanziell dabei fördert und unterstützt, in vielen Bereichen des privaten und beruflichen Tuns erfolgreicher zu sein.

Die vier generischen Stränge des räumlichen Denkens

Die Einsicht, dass das räumliche Denken (1) eine lebenspraktische wichtige Fähigkeit darstellt, (2) eine der maßgeblichen Schlüsselkompetenzen einer modernen Gesellschaft ist und (3) durch Training verbessert werden kann, leitet uns direkt zur Frage über, wie nun dieses menschliche Vermögen sinnvoll und strukturiert gefördert und trainiert werden kann.

Dazu benötigt es im ersten Schritt eine eingehende Auseinandersetzung mit derjenigen publizierten Literatur, die sich mit dem räumlichen Denken beschäftigt und wertvolle Beiträge dazu leistet. In diesem Kapitel wird in kompakter Weise die Essenz dieser Literaturrecherche zusammengefasst und der Leserin/dem Leser dadurch die Möglichkeit angeboten, das Themenfeld „räumliches Denken“ aus einer umfassenden Perspektive betrachten zu können und in größeren Zusammenhängen zu sehen.

Dabei ist bemerkenswert, dass genau vier Wissenschaftsbereiche verortet werden können, die sich aus unterschiedlichen Traditionen und Blickwinkeln heraus und zu unterschiedlichen Zwecken mit dem räumlichen Denken beschäftigt haben. Diese vier großen Bereiche und damit maßgeblichen Stränge des räumlichen Denkens sind:

1. Strang: Entwicklungspsychologie

Die Entwicklungspsychologie geht in Bezug auf das räumliche Denken hauptsächlich der Frage nach, wie sich dieses im Laufe der ersten Lebensjahre entwickelt. Zumeist werden dabei die einzelnen Phasen, die Monate bzw. Jahre dauern können, bereits mit dem Zeitpunkt der Geburt beginnend bis zum Alter von etwa 14 Jahren betrachtet und untersucht. Maßgebliche entwicklungspsychologische Modelle in Bezug auf das räumliche Denken wurden von Stückrath (1968), dem Forscher-Ehepaar van Hiele (1978), Piaget und Inhelder (1971), Thurstone (1955) und Bruner (1960) in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt.

Stückrath (1969) beschreibt in seinem Modell der Stufen der Raumorientierung, dass sich bei einem Kind in der frühen Kindheit im Alter von 0-1 Jahren im Allgemeinen der sogenannte Leibraum entwickelt und anschließend im Alter von 2-6 Jahren der Ichraum. Im Alter von 6-14 Jahren entwickeln sich danach jeweils in drei Unterstufen unterteilt der Handlungsraum und der Laufräum.

Das Ehepaar von Hiele beschreibt 1978 fünf Niveaustufen, die bei der Entwicklung des geometrisch/räumlichen Denkens durchlaufen werden: (0) anschauungsgebundenes Denken, (1) Analysieren geometrischer Figuren und Beziehungen, (2) erstes Ableiten und Schließen, (3) geometrisches Schließen/Deduktion und (4) strenge, abstrakte Geometrie.

Piaget teilt die großen generellen Entwicklungsphasen eines Kindes in vier Stufen ein und beschreibt diese Phasen im Rahmen seiner Stufentheorie. Die vier Phasen der Stufentheorie lauten: (1) sensomotorische Phase. Diese Phase wird im Alter von etwa 0 – 1 ½ Jahren bei der Entwicklung durchlaufen. Anschließend folgt die (2) präoperative Phase, die etwa im Alter von 1 ½ – 7 Jahren erkennbar ist. An diese Phase schließt die Phase (3), die konkret-operationale Phase an. Diese Phase wird im Allgemeinen von Kindern im Alter von 7 – 11/12 Jahren durchlaufen. Schließlich entwickeln sich Kinder weiter zur Phase (4), der formal-operationalen Phase, die ab dem 11. bzw. 12. Lebensjahr beobachtbar ist. Erst ab dieser Phase ist es Kindern im Allgemeinen möglich, abstrakte Strukturen erfassen und nachvollziehen zu können. Dies ist auch die Phase, wo unter anderem erstmals (einfache) mathematische Beweise nachvollzogen werden können. Im Buch „Die Entwicklung des räumlichen Denkens beim Kinde“ – die Originalausgabe wurde 1948 mit dem Titel „La représentation de l'espace chez l'enfant“ in Französisch verfasst – beschreibt Piaget gemeinsam mit Inhelder (1971) auf 565 Seiten sehr ausführlich die Entwicklung des räumlichen Denkens von der Geburt bis hin zum jungen Erwachsenenalter. Es werden detailreich Entwicklungsstufen wie die der stereognostischen Wahrnehmung, des projektiven Raumes und des euklidischen Raumes beschrieben.

Thurstone (1955) wendet sich in seiner Arbeit der Frage zu, wie sich die aus seiner Sicht sieben grundlegenden Facetten der Intelligenz (= sieben primären mentalen Fähigkeiten) über die Lebensjahre hinweg entwickeln.

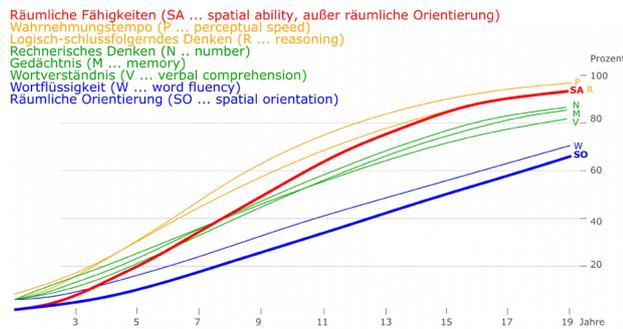


Abbildung 8: Verlaufskurve von acht Intelligenzbereichen. Sieben primäre Intelligenzfaktoren nach Thurstone (inkl. dick rot: Räumliche Fähigkeiten) und zusätzlich „Räumliche Orientierung“ (SO) (dick blau). Die blauen Intelligenzbereiche entwickeln sich eher langsam, die grünen durchschnittlich schnell. Die orangen Intelligenzbereiche entwickeln sich lt. Thurstones Beobachtungen am schnellsten.

In der Grafik (Abbildung 8) wird speziell die Facette space bzw. spatial ability (SA) hervorgehoben, indem die Kurve dick rot eingetragen ist. Aus dem Verlauf der Kurve lässt sich ablesen, dass das größte Steigerungspotential für das räumliche Denken im Alter von etwa 3-15 Jahren vorhanden ist. Ab dem etwa 14. Lebensjahr sind demnach bereits etwa 80 % der Fähigkeit zum räumlichen Denken entwickelt. Aktuelle Forschungsergebnisse (Wilhelm, Maresch, 2017) zeigen, dass diese Kurve für nahezu alle Bereiche des räumlichen Denkens bestätigt werden kann. Der Bereich der räumlichen Orientierung hingegen entwickelt sich deutlich langsamer als die anderen räumlichen Fähigkeiten. Die Entwicklungskurve für die räumliche Orientierung (in Abbildung 8 dick blau; SO) verläuft etwas unterhalb der eingetragenen Kurve W der Wortflüssigkeit. Im Rahmen der Auswertung von Studiendaten ist zu beobachten, dass erst etwa ab dem 25. Lebensjahr die räumliche Orientierungsfähigkeit zu annähernd 100 % entwickelt ist.

Der US-amerikanische Entwicklungspsychologe Bruner (1960/1970) entwickelte als eines seiner zahlreichen Prinzipien und Theorien das sogenannte EIS-Prinzip. Der Name dieses Prinzips steht als Akronym für die drei Handlungsaktivitäten enaktiv, ikonisch und symbolisch. Lernen funktioniert nach Bruner genau dann erfolgreich, wenn die erste Entwicklungsstufe enaktiv erlebt wird. In dieser Stufe sollten Kinder demnach zahlreichen Tätigkeiten nachgehen bzw. mit mannigfaltigen Aktivitäten gefördert werden, die auf unterschiedlichste Art und Weise auf haptischem Tun, aktivem Angreifen, Falten, Kleben, Laufen, Hüpfen und weiteren enaktiven Tätigkeiten basieren. Dieses aktive Greifen ist nach Hüther (2013) eine

sinnvolle bzw. oftmals sogar notwendige Vorstufe des späteren Begreifens. In einer weiteren Entwicklungsstufe sind Kinder dazu in der Lage, ikonische Darstellungen von den haptisch erfassten Objekten anzufertigen. Diese Stufe bildet den notwendigen Übergang zur dritten Entwicklungsstufe, bei der Kinder bzw. Jugendliche sich mit Lerninhalten auf symbolischer Ebene auseinandersetzen können. Am Beispiel Würfel betrachtet, sollten Kinder zu Beginn der Beschäftigung mit einem Würfel beispielsweise einen Holzwürfel oder Moosgummiwürfel haptisch angreifen und diesen in möglichst unterschiedlichsten Situationen enaktiv erleben (z. B. Werfen, Stapeln, Würfeln). Auf der ikonischen Entwicklungsstufe sollten junge Kinder Skizzen und einfache Konstruktionszeichnungen von Würfeln in unterschiedlichen Darstellungsformen anfertigen können. Schließlich sind SchülerInnen ab der symbolischen Entwicklungsstufe befähigt, an einem Würfel auf symbolischer Ebene Berechnungen (wie z. B. Oberfläche, Volumen) anzustellen und diesen somit auf abstrakter Ebene zu behandeln.

Die ersten in diesem Kapitel genannten EntwicklungspsychologInnen haben explizit Modelle zur Entwicklung des räumlichen Denkens erstellt. Bruners EIS-Prinzip adressiert nicht explizit die Raumvorstellung, lässt aber auch sehr gut Interpretationen für die Entwicklung bzw. Förderung des räumlichen Denkens zu, da es sehr große strukturelle Parallelitäten zu den vier zuvor genannten Modellen von Stückrath, van Hiele, Piaget, Inhelder und Thurstone beinhaltet.

2. Strang: Visuelle Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung ist in gewisser Weise eine Vorstufe des Raumvorstellungsvermögens. Das Raumvorstellungsvermögen adressiert – wie der Name eigentlich schon treffend beschreibt – die Fähigkeit eines Menschen, sich gedanklich räumliche Objekte vorstellen und diese gedanklich transformieren zu können, Relationen zwischen mehreren dieser mentalen Objekte erkennen zu können und selbst mental unterschiedliche räumliche Positionen einnehmen zu können. Es geht also um das rein kognitive Vermögen eines Menschen, sich räumliche Objekte vorstellen zu können, diese drehen, spiegeln, verschieben und verschneiden zu können und sich rein gedanklich an andere Positionen im Raum versetzen zu können. Das betrifft unter anderem die Fähigkeit, sich eine Szene auf einem Bild aus einer anderen Perspektive vorstellen zu können oder sich auch gedanklich an andere Orte versetzen zu können und daher z. B. auch Wegrouten beschreiben zu können. Das Raumvorstellungsvermögen ist daher eine rein kognitive Fähigkeit unseres menschlichen Gehirns (siehe dazu auch Abbildung 5). Es werden daher keinerlei realen optischen Reize und keinerlei realen Bewegungen im Raum benötigt.

Es handelt sich um ein rein kognitives „Gedankenspiel“. Anzumerken ist, dass im Gehirn die selben Areale beim tatsächlichen Betrachten eines räumlichen Objekts (also beim tatsächlichen Sehen) und beim Denken an diese Objekte aktiviert werden. Die Areale werden aber auf zwei gänzlich unterschiedlichen Wegen aktiviert: Beim Sehen über den optischen Nerv, der von der Retina der Augen beginnend Richtung Gehirn die optischen Reize weiterleitet und beim Raumvorstellen über das rein kognitive Denken an die entsprechenden räumlichen Objekte.

Bei der visuellen Wahrnehmung geht es in einer Vorstufe (zum reinen kognitiv-gedanklichen Operieren mit räumlichen Objekten) um die anatomische Aufnahme und basal-kognitive Verarbeitung optischer Reize. Es werden dabei die über die Augen empfangenen optischen Reize vom Gehirn bzw. dessen vorgelagerten Arealen gefiltert und relevante Informationen extrahiert und interpretiert. Diese anatomischen und basalen kognitiven Schritte ermöglichen schließlich danach das „Erkennen“ von räumlichen Objekten durch Abgleich mit Erinnerungen bzw. „Kennenlernen“ und Merken von neuen räumlichen Objekten. Die Fähigkeit zur visuellen Wahrnehmung ist somit eine wichtige Stufe, um gegebenenfalls anschließende rein kognitive und motorische Schritte folgen lassen zu können. Entweder gedankliche Weiterverarbeitung der optischen Reize durch das Raumvorstellungsvermögen (Drehen, Spiegeln, Verschieben, Schneiden, ... der wahrgenommenen räumlichen Objekte) oder auch die Vorbereitung und Durchführung von motorischen Reaktionen (wie Flucht, Ausweichen, ...) darauf.

Der eindeutige und klare Unterschied der beiden Begriffe Raumvorstellung und visuelle Wahrnehmung wird an dieser Stelle nochmals deutlich betont. Visuelle Wahrnehmung beinhaltet das anatomische Vermögen, optische Reize über die Augen und deren Retina aufzunehmen und diese über die entsprechenden basalen vorgelagerten Gehirnareale ans Gehirn (und hier speziell an den primären visuellen Cortex) weiterleiten zu können und schließlich räumliche Objekte zu erkennen oder gegebenenfalls diese neu kennenzulernen. Dem deutlich gegenüber steht das Raumvorstellungsvermögen, also das rein gedankliche kognitive Operieren mit räumlichen Objekten (Drehen, Spiegeln, Schneiden, ...) und die Fähigkeit, sich rein gedanklich in andere räumliche Positionen versetzen zu können.

Die Fähigkeit zur visuellen Wahrnehmung wird eingehend seit ca. Mitte des 20. Jahrhunderts erforscht. Frostig (1979) hat dazu ein Modell von fünf Teilbereichen der visuellen Wahrnehmung erstellt. Diese umfassen: (1) Figur-Grund-Wahrnehmung, (2) Wahrnehmungskonstanz, (3) Wahrnehmung der Raumlage, (4) Wahrnehmung räumlicher Beziehungen und (5) visuomotorische Koordination (Frostig, 1979). Die Unterteilung von Aufgaben zur

visuellen Wahrnehmung in diese fünf unterschiedlichen Bereiche ist gut geeignet, differenziert Ausprägungsgrade der visuellen Wahrnehmung von Menschen erkennen zu können. Die visuelle Wahrnehmung adressiert im Allgemeinen Kinder ab dem Alter von etwa 3-12 Jahren. Die Altersgruppe von den noch jüngeren Kindern wird in Hinblick auf deren Fähigkeiten zum räumlichen Denken von der Entwicklungspsychologie befohrt – dem ersten generischen Strang der Forschung zum räumlichen Denken. Die Altersgruppe der ab etwa zwölf Jahre alten Kinder und Jugendlichen wurde in den vergangenen etwa 70 Jahren häufig mittels faktoranalytischer Herangehensweise untersucht.

3. Strang: Faktoranalytische Modelle

Während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde in der sogenannten präfaktoriellen Phase der Raumvorstellungsforschung (Maresch, 2013) von diversen ForscherInnen das Konstrukt der menschlichen Intelligenz näher untersucht. Dabei wurde diese vermehrt nicht mehr eindimensional und undifferenziert gesehen, sondern es wurden unterschiedliche Modelle der menschlichen Intelligenz aufgestellt, die mehrdimensional mannigfaltige differenzierbare Bereiche der Intelligenz beschrieben (Thurstone, 1938; Spearman, 1904; Cattell, 1963). Zum Beispiel umfasste das Intelligenzmodell von Thurstone (1938) sieben unterschiedliche primäre mentale Fähigkeiten (primary mental abilities): space, perceptual speed, numerical ability, memory, reasoning, word fluency und verbal relations. Grundsätzlich hatten alle die zu dieser Zeit aufgestellten Intelligenzmodelle die Gemeinsamkeit, dass diese unter anderem die Intelligenzfacette „space“ (Raumvorstellungsvermögen) beinhalteten. Aufgrund dieser Tatsache wurden in weiterer Folge – cum grano salis in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in der sogenannten faktoriellen Phase der Raumintelligenzforschung (Maresch, 2013) – die Facette „Raumvorstellungsvermögen (space)“ von zahlreichen ForscherInnen näher untersucht. Dabei wurde methodisch oftmals faktoranalytisch vorgegangen. Dies bedeutet, dass zumeist Versuchspersonen eine Vielzahl an Aufgaben in Zusammenhang mit ebenen bzw. räumlichen geometrischen Fragestellungen zur Bearbeitung vorgelegt bekommen haben. Anschließend wurde im Rahmen der Auswertung der Tests mittels faktoranalytischer mathematischer Berechnungen versucht zu erkennen, welche von den Testaufgaben die Versuchspersonen mit eher gleicher Wahrscheinlichkeit gelöst haben bzw. welche weiteren Testaufgaben b, c, d, ... auch korrekt gelöst wurden, wenn die Versuchsperson das Beispiel a richtig gelöst hat. Dieses faktoranalytische Vorgehen mit passenden zugrundeliegenden mathematischen Rechenmodellen sollte ermöglichen zu erkennen, welche Testaufgaben inhaltlich „verwandt“ sind, welche Testaufgaben also inhaltliche Gemeinsamkeiten haben, daher mit gleichartigen

Überlegungen und dadurch auch mit ziemlich gleich hoher Wahrscheinlichkeit gelöst werden. Auf diesem Wege wurde gehofft, dass einzelne Bereiche – aufgrund des faktoranalytischen Vorgehens „Faktoren“ genannt – gefunden werden, die inhaltlich zusammenhängen und die somit unterschiedliche Bereiche des Raumvorstellungsvermögens (= Faktoren) erkennen lassen. Es wurden auf diesem Weg während der faktoriellen Phase der Raumintelligenzforschung (1950-1994) zahlreiche Modelle des Raumvorstellungsvermögens aufgestellt (Thurstone, 1950; French, 1951; Guilford, 1956; Rost, 1977; Lohman, 1979; McGee, 1979; Linn & Petersen, 1985; Lohman, 1988; Carroll, 1993), die das gemeinsame Bemühen verbindet, auf faktoranalytischem Weg passende Modelle des Raumvorstellungsvermögens zu finden. Dabei wurden zumeist von den ForscherInnen Modelle mit zwei bzw. drei Faktoren formuliert. Manche Modelle wiesen bis zu neun unterschiedliche Faktoren auf (Lohmann, 1988; Carroll, 1993). Maier hat in seinem bemerkenswerten Werk „Räumliches Vorstellungsvermögen“ (1994) die faktoranalytischen Modelle der Raumvorstellung erstmals im deutschsprachigen Bereich ausführlich zusammengefasst und erörtert. Er schlägt selbst in diesem Buch fünf der erwähnten Faktoren als insgesamt stimmige Essenz der Faktoren der Raumvorstellung vor. Die Jahre nach 1994 waren davon geprägt, unterschiedliche dieser in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelten faktoranalytischen Modelle einzusetzen und diese Modelle unter anderem auf innere Konsistenz und Trennschärfe der Faktoren und damit auf deren Tragfähigkeit hin zu prüfen. Dabei wurde bewusst, dass diejenigen Modelle des Raumvorstellungsvermögens, die auf faktoranalytischem Weg entwickelt wurden, unter anderem bedingt durch die fehlende Trennschärfe der beschriebenen Faktoren, wenig belastbar sind.

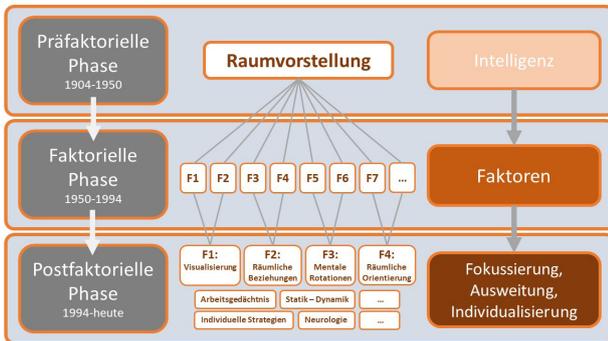


Abbildung 9: Die drei Phasen der Raumvorstellungsforschung

Ab etwa dem Jahr 2010 kam zusätzlich die Erkenntnis hinzu, dass Versuchspersonen, die Raumvorstellungsaufgaben bearbeiten, dies mit zumeist deutlich unterschiedlichen individuellen Strategien machen und damit nicht die von den EntwicklerInnen von Tests intendierten Bearbeitungsstrategien verwenden. Daher wurde schließlich klar, dass der Zugang über die faktoranalytische Auswertung von Lösungshäufigkeiten von

Aufgaben nicht dazu dienen kann, ein tragfähiges Modell zum Raumvorstellungsvermögen zu entwickeln (Souvignier, 2000).

Die Zeitphase ab 1994 wird daher auch die postfaktorielle Phase der Raumvorstellungsforschung (Abbildung 9) genannt (Maresch, 2013), da erkannt wird, dass unter anderem individuelle Lösungsstrategien beim Bearbeiten von Aufgaben eine wichtige Rolle spielen, dass auch weitere Aspekte wie z. B. das Arbeitsgedächtnis oder die Dynamik bis hin zur Feinmotorik die Lösungswahrscheinlichkeit von Raumvorstellungsaufgaben maßgeblich beeinflussen und daher auch diese Aspekte in einer Gesamtsicht des räumlichen Denkens beachtet werden müssen. Der faktoranalytische Strang der Forschung zum Raumvorstellungsvermögen hat in seinen knapp 50 Jahren (etwa 1950-1994) einen maßgeblichen Beitrag zur Analyse der Intelligenzfacette „space“ beigetragen, hat zahlreiche Ansätze und Anregungen geliefert und war somit ein idealer Nährboden, auf dessen Basis die später entwickelten Forschungsansätze aufbauen konnten.

4. Strang: Neurologie

Bis weit in das 20. Jahrhundert hinein war es Forschenden nur schwerlich bzw. gar nicht möglich, am lebenden menschlichen Gehirn Untersuchungen durchzuführen und daraus substanzielle Erkenntnisse gewinnen zu können. Im Jahr 1971 wurde die Magnetresonanztomographie (MRT) von Lauterbur erfunden, 1973 wurde diese Errungenschaft publiziert und im Jahr 2003 erhielt er dafür den Nobelpreis für Medizin. Die funktionelle Magnetresonanztomographie (abgekürzt fMRT bzw. fMRI) wurde 20 Jahre nach der MRT entwickelt. Maßgeblich beteiligt daran war Belliveau mit seinen KollegInnen. Sie publizierten im Jahr 1991 erstmals Ergebnisse von funktioneller Magnetresonanztomographie an Menschen. Seit dieser Zeit wurden einige weitere ähnliche Verfahren entwickelt, die heute allesamt unter dem Überbegriff der sogenannten „bildgebenden Verfahren“ zusammengefasst werden. Alle diese Verfahren verbindet die gemeinsame Eigenschaft, dass diese Einblicke in die inneren Strukturen des Gehirns ermöglichen, ohne dass dabei operativ in den Schädel eingedrungen werden muss. Diese technischen Entwicklungen erwiesen sich von unschätzbarem Wert, da es dadurch seit etwa 50 Jahren möglich wurde, substanzielle neue wissenschaftliche Erkenntnisse auf diesem nicht invasivem Weg gewinnen zu können.

In Bezug auf das räumliche Denken bzw. den Sehvorgang formulierten Ungerleider und Mishkin 1982 das bahnbrechende Konzept der zwei unterschiedlichen Sehpfade (Two cortical visual systems) im Gehirn (Ungerleider und Mishkin, 1982). Dieses Konzept beschreibt, wie vom primären visuellen Cortex (V1, das orange Areal in Abbildung 10),

der im hinteren Bereich des Gehirns liegt, ausgehend, visuelle Reize weiterverarbeitet werden. Dabei erkannten Ungerleider und Mishkin, dass die Weiterverarbeitung in zwei unterschiedlichen Bahnen verläuft. Einerseits werden räumliche Objekte an sich (Farbe, Textur, Form, Größe, ...) in Arealen abgespeichert und erkannt, die im sogenannten ventralen pathway verlaufen. Dieser ventrale Sehpfad (auch ventral stream bzw. ventral pathway genannt, siehe Abbildung 10) beginnt im primären visuellen Cortex und verläuft Richtung Schläfenlappen. Dieser Sehpfad wird oftmals als „Was“-Bahn bezeichnet (Nänni, 2008), da in den entsprechenden Gehirnarealen räumliche Objekte (wie Gesichter, Häuser, Bäume, Würfel, Kegel, Kugel, ...), also das „Was“ gespeichert und erkannt werden. Demgegenüber verläuft der dorsale Sehpfad von V1 aus nach hinten oben im Gehirn und wird als „Wo und Wann“-Bahn bezeichnet. Es wird in diesen Gehirnarealen bzgl. der räumlichen Objekte erkannt, wo sich diese befinden und zudem die zeitlichen Abläufe von bewegten Objekten erfasst und interpretiert. Aus diesen Gehirnarealen heraus entstehen auch konkrete Anweisungen für Handlungen. Es besteht hier enger Konnex zu den motorischen Arealen, die die motorische Umsetzung der konkreten Handlungen einleiten.

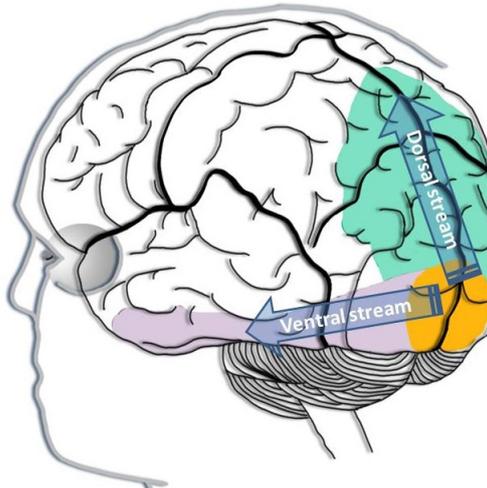


Abbildung 10: Schematische Darstellung der beiden visuellen Sehpfade (ventraler Sehpfad und dorsaler Sehpfad) (Grafik: Andrey Vyshedskiy, Shreyas Mahapatra, Rita Dunn)

Die Theorie der zwei unterschiedlichen Sehpfade, in denen optische Reize nach der Weiterleitung von den Augen in den primären visuellen Cortex mehr oder weniger getrennt voneinander weiterverarbeitet werden, war für viele Jahre ein äußerst fruchtbarer Ausgangspunkt dafür, die konkreten Prozesse der Verarbeitung von optischen Reizen im Gehirn zu erforschen.

Die modernen bildgebenden Verfahren haben einen maßgeblichen Teil dazu beigetragen, dass in den letzten Jahren auf diesem Gebiet bedeutende Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Als aktueller Stand der Forschung hat sich mittlerwei-

le etabliert, dass das Konzept der zwei Sehpfade und damit der klaren Trennung der Verarbeitung von optischen Reizen im Gehirn in die Was-Bahn und Wo/Wann-Bahn in dieser ursprünglichen Form nicht bestätigt werden kann. Es zeigt sich vielmehr, dass sämtliche Gehirnareale, die an der Verarbeitung visueller Reize beteiligt sind, in hochgradig vernetzter Art und Weise Informationen austauschen und vernetzt sind. Die Theorie der Trennung der visuellen Reize nach dem primären visuellen Cortex in mehr oder weniger disjunkt verlaufende Sehpfade gilt mittlerweile als überholt und ist der Ansicht gewichen, dass alle Gehirnareale, die mit der Verarbeitung von visuellen Reizen beschäftigt sind, sich in mannigfaltiger Art und Weise neuronal kontinuierlich austauschen (Freud, Plaut, Behrmann, 2016).

Neben dem kognitiven Erkennen und Operieren mit räumlichen Objekten geht es beim räumlichen Denken auch um das gedankliche Wechseln von räumlichen Perspektiven und somit um räumliche Orientierungsfähigkeit. Die räumliche Orientierung wird maßgeblich in zwei zueinander benachbarten Gehirnbereichen behandelt. Einerseits im enthorinalen Cortex und andererseits im Hippocampus. Im enthorinalen Cortex befinden sich die sogenannten Raster- bzw. Gitterzellen, welche in sechseckiger Form angeordnet sind und die Eigenschaft besitzen, dass sie die genaue räumliche Position erkennen können. Im Hippocampus wiederum sind sogenannte Ortszellen vorhanden, die sich jeweils die Eigenschaften eines bestimmten Ortes merken können, aber nicht wissen, wo sich dieser Ort befindet. Durch die Zusammenarbeit von Raster- und Ortszellen ist es möglich, einerseits durch die Rasterzellen zu wissen, wo man sich befindet und andererseits durch die Ortszellen abrufbereit zu haben, welche Eigenschaften dieser Ort hat. Diese beiden Hirnregionen bilden bedingt durch die faszinierende Zusammenarbeit der Raster- und Ortszellen unser inneres Navigationssystem.

Die Erforschung dieser Strukturen unserer räumlichen Orientierungsfähigkeit wurde maßgeblich von dem britisch-amerikanischen Forscher O'Keefe und dem norwegischen Forscherehepaar Moser (Moser, 2014; Moser et al., 2014) beeinflusst, wofür die drei Genannten 2014 den Nobelpreis für Medizin erhielten.

Sehen und räumliches Denken benötigt insgesamt mehr als die Hälfte der Gehirnareale (Nänni, 2008). Beim Denken an räumliche Objekte werden die gleichen Gehirnareale als beim realen Betrachten dieser Objekte aktiviert. Die Erkenntnisse der Neurologie zeigen, dass räumliches Denken ein hochkomplexer Prozess ist, der in zahlreichen unterschiedlichen Gehirnarealen, die für jeweils spezifische Aufgaben angelegt sind, verarbeitet wird und wo noch viele offene Fragen uns auch hinkünftig beschäftigen werden. Zusätzlich sind diejenigen Areale, die mit der Verarbeitung von



Abbildung 11: Generische Stränge des räumlichen Denkens

optischen Reizen im Gehirn bzw. auch schon davor auf den Zwischenstationen zwischen Auge und Gehirn beschäftigt sind (wie z. B. Kniehöcker), in ständigem Austausch mit denjenigen Teilen des Gehirns, wo verwandte Erfahrungen unterschiedlicher Sinne gespeichert werden.

Mithilfe dieses kontinuierlichen Austausches werden auf allen Stationen der Verarbeitung von optischen Reizen diese gefiltert, interpretiert, mit Erfahrungen abgeglichen und komprimiert. Erst diese Verdichtung von optischen Reizen ermöglicht es einem menschlichen Gehirn, die unglaublich hohe Zahl an optischen Eindrücken kognitiv verarbeiten zu können.

Die Neurologie liefert seit etwa 50 Jahren in Bezug auf das räumliche Denken markante Hinweise darauf, dass optische Reize in unterschiedlichen spezifizierten Gehirnarealen, die in ständigem neuronalem Austausch untereinander sind, verarbeitet werden.

Aus diesem Wissen lässt sich die Forderung ableiten, dass die unterschiedlichen räumlichen Denkweisen kontinuierlich strukturiert und differenziert trainiert werden sollten.

Eine systematische Förderung des räumlichen Denkens, welche darauf abzielt, möglichst alle am Sehen und räumlichen Denken beteiligten Gehirnareale in einem ausgewogenen Verhältnis anzusprechen, die kognitiven Möglichkeiten der einzelnen Areale zu trainieren und den neuronalen Austausch zwischen den Arealen zu fördern, scheint daher ein naheliegender und vielversprechender Ansatz zu sein.

Die generischen Stränge des räumlichen Denkens im Überblick

Die Fähigkeit zum räumlichen Denken wird seit etwa 140 Jahren von unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen untersucht.

Konkret werden dabei vier Stränge erkannt: (1) Entwicklungspsychologie, (2) visuelle Wahrnehmung, (3) faktoranalytische Modelle und (4) Neurologie. Jeder dieser Stränge blickt aus einer anderen Perspektive, mit unterschiedlichen Methoden, Traditionen und Zielsetzungen auf die räumliche Denkfähigkeit.

Die Aussagen, Befunde und entwickelten Modelle und Ansätze der einzelnen Forschungszweige spiegeln diese Verschiedenartigkeit wider. Abbildung 11 fasst kompakt relevante Begriffe der jeweiligen Stränge schlagwortartig zusammen und zeigt, welcher Altersgruppe das Hauptinteresse des jeweiligen Stranges gilt.

Der Blick auf diese in vielen Parametern heterogene Landschaft der vier Wissenschaftszweige, die sich maßgeblich mit dem räumlichen Denken und dessen Teilgebieten beschäftigen, lässt erkennen, dass es zahlreiche Bemühungen und große Fortschritte gab und gibt, die Grundlagen des räumlichen Denkens zu erforschen.

Durch das Besprechen der grundlegenden Ansichten dieser Forschungstraditionen und das Gegenüberstellen der Modelle der vier Stränge und deren adressierter Altersgruppen zeigt sich deutlich, dass es oft nur wenig Gemeinsamkeiten und Überlappungen zwischen den Bereichen gibt.

Ganzheitliches Modell der Grundroutinen des räumlichen Denkens

Ein besonderer Reiz der Weiterentwicklung und des Fortschritts im Bereich des räumlichen Denkens besteht nun darin, Brücken zwischen den vier Strängen zu bauen und die vier Bereiche unter einem gemeinsamen Dach zu vereinen, indem die relevanten Erkenntnisse und Facetten der einzelnen Stränge herausgeschält und in einem gemeinsamen Modell zum räumlichen Denken zusammengeführt werden. Als Vorschlag für ein derartiges Modell wurde das Modell der *Grundroutinen des räumlichen Denkens* (Maresch, 2020) entwickelt, welches insgesamt acht Grundroutinen zum räumlichen Denken beinhaltet (Abbildung 12).

Die ersten fünf Stufen (Visualisierung, Formkonstanz, Raumlage, Raumtransformationen und Objektkombinationen) verstehen sich als aufbauende Stufen. Kinder und Jugendliche entwickeln diese Stufen im Allgemeinen aufeinander folgend, wobei die Fähigkeit zur Visualisierung die grundlegendste Stufe darstellt. Darauf aufbauend wird die Fähigkeit zum Erkennen von Formkonstanzen, von Raumlagen, Raumtransformationen und schließlich von Objektkombinationen in dieser aufsteigenden Reihenfolge entwickelt. Studienergebnisse von Hofer (2020) und Wallinger (2020) bestätigen diesen strukturellen Aufbau und die inhaltliche Konsistenz der ersten fünf Grundroutinen. Die weiteren drei grundlegenden Routinen des räumlichen Denkens sind Dynamik, Feinmotorik und räumliche Orientierung.



Abbildung 12: Die acht Grundroutinen des räumlichen Denkens
Die einzelnen Stufen des Modells der Grundroutinen beschreiben konkrete räumliche Fähigkeiten, sind an Inhalten ausgerichtet und sind daher wiederum unabhängig davon, mit welcher Strategie Lernende die Aufgaben der entsprechenden Stufen bearbeiten. Das vordringlichste Anliegen bei der Konzeption des Modells war es, die grundlegenden Aussagen, Erkenntnisse, Faktoren und Facetten der vier generisch-historischen Stränge des räumlichen Denkens herauszuschälen und diese in einer neuen übergreifenden und ganzheitlichen Struktur stimmig zu vereinen. Das entwickelte Modell soll als ganzheitliches Modell auch dem Zweck dienen, für Lernende auf allen Entwicklungs- und Alters-

stufen eine Orientierung bieten zu können, welche Facetten des räumlichen Denkens bereits bis zu welcher Tiefe entwickelt sind. Das Modell der acht Grundroutinen des räumlichen Denkens wurde im Jahr 2020 publiziert (Maresch, 2020). In dieser Erstveröffentlichung werden sämtliche Stufen ausführlich beschrieben, deren Grundfunktionen erörtert, Teilfähigkeiten aufgelistet, Teilaspekte genannt, exemplarische Übungen vorgestellt, Bezüge zu den vier generisch-historischen Strängen des räumlichen Denkens beschrieben und unter anderem auch Bezüge zum Schreiben und Lesen hergestellt.

Zusammenfassung

1879 beschrieb Galton die Intelligenzfacette des räumlichen Denkens als „visualising faculty“, indem er schreibt: „Memories that are extremely vivid may at the same time be very mobile, and capable of blending together. Much instruction on these matters can be derived from those who possess the power of what is called the visualising faculty, in a high degree. The objects of their memory are conspicuous images“. Das Ende des 19. Jahrhunderts gilt unter anderem durch die Beschreibung von Galton als die Zeit, wo die menschliche Intelligenz mehr und mehr in den Fokus von Untersuchungen und wissenschaftlicher Beschäftigung rückte. Diverse ein- und mehrdimensionale Intelligenzmodelle wurden seit dieser Zeit entwickelt, in denen die unterschiedlichsten Teilbereiche der Intelligenz formuliert bzw. postuliert wurden. Nahezu alle Intelligenzmodelle haben die Gemeinsamkeit, dass das räumliche Denken (space) als grundlegende Facette der Intelligenz erkannt wurde und in den diversen Strukturmodellen beinhaltet ist.

Die Fähigkeit zum räumlichen Denken ist bei Menschen hochgradig individuell unterschiedlich entwickelt. Eine Erkenntnis, die Galton mit den Worten „I do not know any faculty that varies so much as this in different persons. None can vary more, because its range lies between perfection and nothingness.“ (Galton, 1879) beschreibt. Unter anderem dieser Umstand und auch die Tatsache, dass das räumliche Denken ein grundlegender Teilaspekt zahlreicher Intelligenzmodelle ist, bot Vielen ausreichend Motivation, um sich diesem spezifischen Teil der menschlichen Intelligenz eingehender zu widmen. Zumindest vier markant unterschiedliche Herangehensweisen an die Auseinandersetzung mit dem räumlichen Denken sind erkennbar.

Diese vier generischen Stränge des räumlichen Denkens sind: Der Strang der Entwicklungspsychologie, der Strang der visuellen Wahrnehmung, der Strang der faktoranalytischen Modelle und schließlich als jüngster Strang jener der Neurologie. Jeder dieser Stränge betrachtet das For-

schungsfeld jeweils aus unterschiedlichen Perspektiven, spezifiziert zumeist die Untersuchungen auf bestimmte Altersgruppen und formuliert daher verschiedenartige Modelle, Ansätze und Thesen. In diesem Beitrag werden die vier bedeutenden Zugangsweisen, deren VertreterInnen und Kernaussagen kompakt erörtert, wodurch ein ganzheitlicher Blick eröffnet wird.

Eine reizvolle Weiterentwicklung auf dem Gebiet des räumlichen Denkens besteht darin, die Essenz der vier Stränge herauszuschälen und diese in einem ganzheitlichen Modell zu vereinen. Auf einen Vorschlag für ein derartiges Modell wird im abschließenden Teil des Beitrags als Modell der Grundroutinen des räumlichen Denkens verwiesen. Von den insgesamt acht Stufen des Modells verstehen sich die ersten fünf Stufen als aufbauende Stufen, wobei die Fähigkeit zur Visualisierung die grundlegendste Stufe darstellt. Daran schließen die Stufen des Erkennens von Formkonstanzen, von Raumlagen, von Raumtransformationen und von Objektkombinationen an. Ergebnisse von Studien (Hofer, 2020; Wallinger, 2020) zeigen, dass die Fähigkeiten, die mit den einzelnen Stufen verbunden sind, steigenden Komplexitätsgrad aufweisen und dass Kinder und Jugendliche diese Fähigkeiten in der im Modell ausgewiesenen Reihenfolge durchlaufen. Die weiteren drei Stufen des Modells (Dynamik, Feinmotorik und räumliche Orientierung) wurden in allen vier generischen Strängen als essenzielle räumliche Fähigkeiten erkannt und daher als stimmige Komplettierung in das Modell der Grundroutinen des räumlichen Denkens aufgenommen. Die einzelnen Grundroutinen des Modells werden in der Erstveröffentlichung (Maresch, 2020) detailliert beschrieben, argumentiert und Bezüge zu den vier Strängen und zum Lesen und Schreiben hergestellt. Erste Untersuchungen zeigen, dass das Modell als stimmige strukturelle Basis für die Entwicklung von Lernmaterialien über alle Altersstufen hinweg verwendbar ist und speziell auch daher zur umfassenden Diagnose der räumlichen Fähigkeiten eingesetzt werden kann.

Anhang: Begriffserläuterungen

In der Literatur sind zahlreiche Begriffe rund um das Themenfeld „räumliches Denken“ in Verwendung. Jeder dieser Begriffe beschreibt eine bestimmte Facette (spezifische Fähigkeit, konkretes Phänomen, ...).

Oftmals ist zu bemerken, dass diese Begriffe salopp verwendet, sehr offen und breit beschrieben bzw. großzügig behandelt werden. Die nachfolgenden Begriffserläuterungen einiger der häufig verwendeten Begriffe in Bezug auf räumliches Denken soll die Spezifika der einzelnen Begriffe hervorheben und dadurch die korrekte Verwendung ermöglichen.

Raumdenken, Raumintelligenz

Beide Begriffe sind Synonyme für den Begriff räumliches Denken (siehe unten). Beide Begriffe werden selten verwendet und kommen de facto in der Literatur nicht vor. Es sind daher auch keinerlei konkrete Definitionen bzw. Beschreibungsversuche bekannt. Entsprechend der Verwendung der Begriffe im Kontext ist zu erkennen, dass die Begriffe Raumdenken und Raumintelligenz sehr großzügig zahlreiche Facetten des räumlichen Denkens beinhalten und dass diese daher auch als Synonyme zum Begriff „räumliches Denken“ zu verstehen sind.

Raumvorstellungsvermögen (kurz: Raumvorstellung)

Das Raumvorstellungsvermögen ist die Fähigkeit eines Individuums, sich räumliche Objekte mental vorstellen zu können, diese rein gedanklich manipulieren (schieben, skalieren, drehen, spiegeln, ...) zu können, Relationen zwischen mehreren räumlichen Objekten erkennen zu können und sich rein in der Vorstellung an unterschiedliche Positionen im Raum versetzen zu können (also sich den Raum aus anderen Perspektiven vorstellen zu können). Raumvorstellung(svermögen) ist daher eine rein kognitive Leistung und inkludiert keinerlei reale Tätigkeiten (wie reales Betrachten von räumlichen Objekten oder Durchführen von (fein)motorischen Bewegungsabläufen).

Raumwahrnehmung

Das Gehirn verfügt über zahlreiche Möglichkeiten, aus dem zweidimensionalen Bild unserer Umwelt auf die Retina (= Netzhaut, Innenwand des Auges) ein räumliches, dreidimensionales Abbild erzeugen zu können. Diese Fähigkeit, die Raumwahrnehmung genannt wird, entsteht durch das Zusammenspiel einer Vielzahl von unterschiedlichen Interpretationen der visuellen Wahrnehmung, wie z. B. monokulares/binokulares Sehen, Farbinterpretationen, vertraute Größe, Überlappungen, Schatten, Texturdichte, Querdisparität, Muskelbewegungen der Linse, Bewegungsparallaxe und inkludiert dabei auch die Reize und Eindrücke weiterer Sinnesquellen (z. B. Kinästhetik, Hören).

Räumliches Denken

Als verbindender, gemeinsamer Überbegriff für die menschliche Fähigkeit, vom Auge empfangene optische Reize ins Gehirn leiten zu können, diese interpretieren und daher räumliche Objekte erkennen zu können, sich räumliche Objekte mental vorstellen zu können, diese gedanklich manipulieren zu können, sich rein in der Vorstellung an unterschiedliche Positionen im Raum versetzen zu können, Bewegungsabläufe wahrnehmen und interpretieren sowie (fein)motorische räumliche Bewegungen ausführen zu können, wird der Begriff „räumliches Denken“ verwendet. Räumliches Den-

ken baut oftmals auf optischen Sinneseindrücken auf und beinhaltet die anatomische und basal-kognitive Fähigkeit zur visuellen Wahrnehmung, die rein gedankliche Fähigkeit zur Raumvorstellung und schließlich die entsprechenden (fein)motorischen räumlichen Abläufe (Abbildung 5).

Räumliche Wahrnehmung

Fähigkeit zur Bestimmung räumlicher Verhältnisse in Bezug zum eigenen Körper. Die Vertikale und Horizontale hat in diesem Kontext eine Sonderstellung. Linn und Petersen (1985) schreiben dazu: „... subjects are required to determine spatial relationships with respect to the orientation of their own bodies ...“. Guilford (1964) formuliert: „Ein dritter Faktor ‚Space III‘ ... scheint ein Vermögen zur Orientierung in der Schwerkraftrichtung (der Vertikalen) anzudeuten.“ und weiters, dass „... der Space III-Faktor von der Schwerkraftwirkung auf den Organismus und der gelernten Fähigkeit, sie richtig zu interpretieren, abzuhängen scheint.“ und als „kinästhetischer Systemfaktor“ gedeutet werden kann. Räumliche Wahrnehmung ist daher als anatomisch-kinästhetische Fähigkeit eines Individuums zu sehen, speziell die Vertikale in Bezug zur Lage des eigenen Körpers erkennen zu können. Sie stellt daher die Fähigkeit eines Individuums dar, die Lage des eigenen Körpers in Bezug zur Umwelt erkennen zu können.

Visuelle Wahrnehmung

Bei der visuellen Wahrnehmung geht es in einer Vorstufe (zum rein kognitiv-gedanklichen Operieren mit räumlichen Objekten) um die anatomische Aufnahme und basal-kognitive Verarbeitung optischer Reize. Es werden dabei die über das Auge empfangenen optischen Reize vom Gehirn bzw. dessen vorgelagerten Arealen gefiltert und relevante Informationen extrahiert und interpretiert. Diese anatomischen und basalen kognitiven Schritte ermöglichen schließlich im Gehirn das „Erkennen“ von räumlichen Objekten durch Abgleich mit Erinnerungen bzw. „Kennenlernen“ von noch unbekanntem räumlichen Objekten.

Literatur

- J. W. Belliveau, D. N. Kennedy, R. C. McKinstry, B. R. Buchbinder, R. M. Weisskoff, M. S. Cohen, J. M. Vevea, T. J. Brady, B. R. Rosen: Functional mapping of the human visual cortex by magnetic resonance imaging. In *Science*. Band 254, 1991, S. 716–719, doi:10.1126/science.1948051, PMID 1948051.
- Bruner, J. (1970). *Der Prozeß der Erziehung („The Process of Education“)*, 1960). 5. Auflage (1980). Berlin: Berlin-Verlag.
- Carroll, J. B. (1993): *Human cognitive abilities. A survey of factor-analytical studies*. Cambridge University Press, New York.
- Cattell, R. B. (1963). Theory of Fluid and Crystallized Intelligence: A Critical Experiment. *Journal of Educational Psychology* 54.
- French, J. W. (1951): *The description of aptitude and achievement tests in terms of rotated factors*. Chicago: University of Chicago Press.
- Freud, E., Plaut, D. C., Behrmann, M. (2016). ‚What‘ Is Happening in the Dorsal Visual Pathway. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 20, No. 10. Elsevier Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2016.08.003> 773.
- Frostig, M. (1979). *Visuelle Wahrnehmungsförderung*. Hannover: Schroedel.
- Galton, F. (1879). *Generic images*. *Nineteenth Century*, 6 (1879), pp. 157-169.
- Glück, J., Kaufmann, H., Dünser, A., Steigbügl, K. (2005). Geometrie und Raumvorstellung – Psychologische Perspektiven. *Informationsblätter der Geometrie (IBDG)*, 24 (2005), 1; 4 - 11.
- Guilford, J. P. (1956): The structure of intellect. *Psychological Bulletin*, Vol 53(4), S. 267-293.
- Hawes, Z., Tepylo, D., & Moss, J. (2015). Developing spatial thinking: Implications for early mathematics education In B. Davis and Spatial Reasoning Study Group (Eds.). *Spatial reasoning in the early years: Principles, assertions and speculations* (pp. 29-44). New York, NY: Routledge.
- Hegarty, M. (2010). Components of Spatial Intelligence. *Psychology of Learning and Motivation*, Volume 52. Elsevier Inc.. DOI: 10.1016/S0079-7421(10)52007-3.
- Hofer, M. (2020). *Untersuchung zu den Grundroutinen des räumlichen Denkens und Handelns*. Masterarbeit an der Universität Salzburg.
- Hüther, G. (2013). *Was wir sind und was wir sein könnten: Ein neurobiologischer Mutmacher*. Fischer.
- Kelley, T. L. (1928). *Crossroads in the mind of man – A Study of Differentiable Mental Abilities*. California: Stanford University Press.
- Lauterbur, P. C. (1973). Image Formation by Induced Local Interactions: Examples of Employing Nuclear Magnetic Resonance. *Nature*. 242, Nr. 5394, 1973, S. 190–191. doi:10.1038/242190a0.
- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985): Emergence and characterization of sex differences on spatial ability: a meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479-1498.

- Lohman, D. F. (1988). Spatial abilities as traits, processes, and knowledge. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (Vol. 40, pp. 181-248). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Lohman, D. F. (1979). *Spatial abilities: A review and re-analysis of the correlational literature* (Technical Report No. 8). Stanford University, Aptitude Research project, Stanford, CA.
- Maier, H. P. (1994). *Räumliches Vorstellungsvermögen: Komponenten, geschlechtsspezifische Differenzen, Relevanz, Entwicklung und Realisierung in der Realschule*. Europäische Hochschulschriften: Reihe 6, Psychologie, Band 493.
- Maresch, G. (2020). Die Grundroutinen des räumlichen Denkens und Handelns. In Zumbach, J, Maresch, G., Strahl, A., Fleischer, T. (Hrsg.) *Neue Impulse in der Naturwissenschaftsdidaktik*. Münster: Waxmann. 121-133.
- Maresch, G. (2013). Spatial Ability – The Phases of Spatial Ability Research. *Journal for Geometry and Graphics*, 17(2), 237-250. Lemgo: Helderermann.
- McGee, M. G. (1979): Human spatial abilities: psychometric studies and environmental, genetic, hormonal and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86(5), 889-918.
- Montello, D. R., Grossner, K. E., & Janelle, D. G. (Eds.). (2014). *Space in mind: Concepts for spatial learning and education*. Cambridge (Massachusetts): MIT Press. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>.
- Moser, E. I., Roudi, Y., Witter, M. P., Kentros, C., Bonhoeffer, T., Moser, M. B. (2014). Grid cells and cortical representation. *Nature Reviews Neuroscience*. 15(7), 466-481.
- Moser, E. I. (2014). *Grid Cells and the Entorhinal Map of Space*. Vortrag zur Verleihung des Nobelpreises, 7. Dezember 2014. www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/edvard-moser-lecture.html
- Nänni, J. (2008) *Visuelle Wahrnehmung: Eine interaktive Entdeckungsreise durch unser Sehsystem*. Salenstein (CH): Niggli Verlag.
- Piaget, J., Inhelder, B. et al. (1971). *Die Entwicklung des räumlichen Denkens beim Kinde*. Übers.: Heipcke, R. 1. Aufl. Stuttgart: Klett.
- Rost, D. H. (1977): *Raumvorstellung. Psychologische und pädagogische Aspekte*, Beltz, Weinheim.
- Souvignier, E. (2000): Förderung räumlicher Fähigkeiten - Trainingsstudien mit lernbeeinträchtigten Schülern. *Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie, Band 22*.
- Spearman, C. (1904): General Intelligence, objectively determined and measured. *American Journal of Psychology*, 15, 201-293.
- Stückrath, F. (1968). *Kind und Raum. Psychologische Voraussetzungen der Raumlehre in der Volksschule*. 3. Aufl. München: Kösel.
- Thurstone, L. L. (1955). *The differential growth of mental abilities*. Chapel Hill, North Carolina: Univ. of North Carolina Psychometrie Laboratory, No. 14.
- Thurstone, L. L. (1950). *Some primary abilities in visual thinking*. Psychometric Laboratory Research Report No. 59. University of Chicago Press, Chicago.
- Thurstone, L.L. (1938): *Primary Mental Abilities*. Chicago, Illinois, The University of Chicago Press.
- Ungerleider LG, Mishkin M (1982) Two cortical visual systems. S. 549-586. In DJ Ingle, MA Goodale, RJW Mansfield (Hrsg.) *Analysis of visual behavior*. MIT Press: Cambridge, MA.
- van Hiele. P. M., van Hiele-Geldorf, D. (1978). Die Bedeutung der Denkebenen im Unterrichtssystem nach der deduktiven Methode. In Steiner, H. G.: *Didaktik der Mathematik*, S. 127-139, Wiss. Buchgesellschaft Darmstadt.
- Wallinger, S. (2020). *Untersuchungen zu fünf Grundroutinen des räumlichen Denkens*. Masterarbeit an der Universität Salzburg.
- Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P, (2009). Spatial Ability for STEM Domains: Aligning Over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies Its Importance. *Journal of Educational Psychology*. Vol. 101, No. 4, 817-835. DOI: 10.1037/a0016127.