didacticum
Zeitschrift für (Fach)Didaktik in Forschung und Unterricht
der Pädagogischen Hochschule Steiermark

JUDITH SCHEUCHER, NIKOLAUS KOREN, STEPHAN E. VOGEL

Die neurokognitiven Korrelate numerischer und arithmetischer Fertigkeiten

Abstract/Deutsch

Rechenfertigkeiten sind ein wichtiger Grundstein moderner Gesellschaften. Laut Schätzungen der OECD weisen jedoch rund 20 Prozent der Erwachsenen mangelhafte Rechenfertigkeiten auf (OECD, 2016). Ein besseres Verständnis über Entwicklung und optimale Förderung von Rechenfertigkeiten ist daher essenziell. Neurokognitive Forschung konnte bisher zeigen, dass Rechenprozesse auf einem komplexen Zusammenspiel von domänen-übergreifenden (z. B. Arbeitsgedächtnis, Aufmerksamkeit) und domänen-spezifischen (z. B. mentale Repräsentation numerischer Mengen) Fertigkeiten beruhen.

Der vorliegende Review-Artikel gibt einen Überblick über die aktuelle neurokognitive Literatur domänen-spezifischer Prozesse, welche dem Erlernen von Rechenfertigkeiten zugrunde liegen sowie deren Veränderung im Laufe der Entwicklung. Dabei liegt der Fokus auf dem Aufbau basisnumerischer Repräsentationen (semantisches Wissen über Ziffern und Zahlen) und arithmetischer Lösungsstrategien (Faktenabruf und prozedurales Wissen). Abschließend wird ein kritischer Blick darauf geworfen, inwieweit es atypische neurokognitive Ausprägungen bei Dyskalkulie gibt und ob sich diese durch Interventionen verändern lassen.

Key words/Deutsch

Numerische Repräsentationen, Arithmetische Strategien, Entwicklung, Dyskalkulie

Abstract/Englisch

Numeracy is an important cornerstone of modern societies. However, according to the OECD, about 20 percent of adults have poor numeracy skills. This highlights the need for a better understanding of how numeracy skills are developed and optimally promoted. In recent years, neurocognitive research has shown that arithmetic processes rely on a complex interplay of domain-general (e. g., working memory, attention) and domain-specific (e. g., mental representation of numerical quantities) skills.

The present review article provides an overview of the current neurocognitive literature *and discusses which domain-specific processes underlie the learning of arithmetic skills and how these change over the course of development. We focus on the development of basic numerical representations (semantic knowledge of digits and numbers) and arithmetic solution strategies (arithmetic facts and procedural knowledge). Finally, we take a critical look at whether there are atypical neurocognitive patterns associated with dyscalculia and whether these can be modified through intervention.*

Key words/Englisch

numerical representations, arithmetic strategies, development, dyscalculia

Einleitung

Das Erlernen von Rechenfertigkeiten ist zusammen mit der Aneignung von Lesefertigkeiten ein wichtiger Grundstein moderner Gesellschaften (Parsons & Bynner, 2005). Eine Rechenfertigkeit mit besonderem Stellenwert ist die Arithmetik, d. h. die Fertigkeit, numerische Mengen und deren symbolische Repräsentationen (z.B. Ziffern) addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren zu können. Schwierigkeiten im Erwerb dieser grundlegenden Fertigkeit stehen im Zusammenhang mit einer Vielzahl psychosozialer und sozioökonomischer Benachteiligungen. Kinder mit Rechenschwierigkeiten haben etwa häufiger sonderpädagogischen Förderbedarf (Gross et al., 2009), leiden unter Mathematikangst (Schillinger et al., 2018; Wu et al., 2012) und neigen eher zum Schulschwänzen (Reid, 2009). Auch unzählige Berufe, von Verkäufer*innen über Bankangestellte bis hin zu Berufen im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich, erfordern einen sicheren Umgang mit Zahlen und Mengen. Personen mit Rechenschwierigkeiten haben daher oft eingeschränkten Zugang zum Arbeitsmarkt (Parsons & Bynner, 2005). Aufgrund des hohen Stellenwertes, den Arithmetik in unserer Gesellschaft einnimmt, ist es wichtig, besser zu verstehen, welche Gehirnprozesse und Gehirnstrukturen dem Erlernen von Rechenfertigkeiten zugrunde liegen. Ein Verständnis über diese sogenannten neurokognitiven Korrelate der Rechenfertigkeiten ermöglicht einen zusätzlichen Einblick in fundamentale Prozesse des Rechnens und erweitert unser Wissen über Lernprozesse im Allgemeinen.

In den letzten Jahrzehnten wurden vermehrt neurowissenschaftliche Studien zur Erforschung der neurokognitiven Korrelate des Rechnens und deren Entwicklung bei Kindern durchgeführt (eng. Überblicksartikel siehe Peters & De Smedt, 2018). Hierbei ist vor allem der Einsatz bildgebender Verfahren – wie etwa die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) oder die Elektroenzephalographie (EEG) – hervorzuheben. Diese Methoden ermöglichen es, aufbauend auf Ergebnissen von Verhaltensstudien, grundlegende Modelle der Rechenentwicklung bei Kindern zu erweitern (De Smedt, Ansari, et al., 2011). Aus neurokognitiver Sicht wissen wir heute, dass das Rechnen ein sehr komplexer Prozess ist, der von mehreren kognitiven Teilprozessen und ausdifferenzierten Gehirnnetzwerken unterstützt wird (Landerl et al., 2017; Vogel & De Smedt, 2021; Vogel & Grabner, 2015). Ein erfolgreicher Erwerb arithmetischer Fertigkeiten ist durch eine funktionelle Spezialisierung der Großhirnhemisphären (die regionale, neuronale Ausdifferenzierung spezifischer mentaler Verarbeitungsprozesse) und durch eine effiziente Integration von domänen-übergreifenden und domänen-spezifischen Teilfunktionen gekennzeichnet (Vogel & De Smedt, 2021). Domänen-übergreifende Funktionen sind mentale Prozesse, die für Lernen und Informationsverarbeitung im Allgemeinen wichtig sind. Beispiele hierfür sind kognitive Funktionen wie das Arbeitsgedächtnis (d. h. ein Gedächtnissystem zur kurzzeitigen Speicherung und Manipulation von Informationen; Baddeley, 1992) oder Aufmerksamkeitsprozesse (d. h. die Fähigkeit, sich länger auf einen Gegenstand zu konzentrieren bzw. mit einem Thema zu beschäftigen). Im Gegensatz dazu sind domänen-spezifische Funktionen stärker auf eine bestimmte (schulische) Domäne beschränkt.

Ziel des vorliegenden Review-Artikels ist es, das bestehende Wissen über die beim Rechnen involvierten mentalen Teilprozesse und deren neuronale Korrelate in einem Überblick zusammenzufassen. Dazu werden zunächst einige für die Entwicklung numerischer Fertigkeiten grundlegende mentale Prozesse (z.B. numerische Mengenrepräsentation und ordinales Zahlenkonzept) und deren neuronale Korrelate diskutiert. Anschließend wird die neurokognitive Grundlage zentraler Zähl- und Rechenstrategien sowie deren Veränderung im Laufe der Entwicklung erörtert. Schließlich wird der aktuelle Wissensstand in Bezug auf atypische neurokognitive Ausprägungen bei Rechenschwierigkeiten dargelegt und inwiefern diese durch Interventionen verändert werden können. Abschließend werden die Grenzen der vorhandenen Erkenntnisse diskutiert sowie Implikationen für den Unterrichtsalltag angedeutet. Der vorliegende Artikel soll daher auch als Basis für einen kritischen Konsum „gehirnbasierter" Erklärungen in Bezug auf die Entwicklung von Rechenfertigkeiten dienen.

Basisnumerische Repräsentationen — die semantische Grundlage des Rechnens

Um arithmetische Aufgaben (d.h. Rechenaufgaben) korrekt lösen zu können, müssen im Gehirn grundlegende mentale Prozesse der Zahlenverarbeitung durchgeführt werden (Landerl et al., 2017). Durch basisnumerische Repräsentationen werden semantische Beziehungen zwischen Ziffern, Zahlwörter und Mengen hergestellt. Laut dem einflussreichen Triple-Code-Modell (Dehaene, 1992; Dehaene et al., 2003) sind dafür drei domänen-spezifische Prozesse zuständig: (1) Verständnis über Zahlensymbole (z.B. arabische Ziffern), (2) Verständnis über (geschriebene oder gesprochene) Zahlwörter, (3) Verständnis über die Bedeutung einer Anzahl (d. h., numerische Menge und relative Position von Anzahlen zueinander; Nieder, 2005). Wenngleich dieses Modell wichtige Komponenten für die Konstruktion des Verständnisses von Zahlen und Mengen aufzeigt, lässt es laut heutigem Wissenstand jedoch wichtige domänenübergreifende und dynamische Prozesse außer Acht. In den folgenden Absätzen werden wir die Grundsätze dieses Modells diskutieren und relevante Einschränkungen hervorheben.

Das approximative Mengensystem zur Erfassung der Anzahl

Die numerische Menge ist die Anzahl an Objekten, die durch eine Zahl dargestellt wird. Die Ziffer „3" kann beispielsweise für „drei Äpfel" oder „drei Stunden" stehen. Das Verständnis von Mengen wird bei Kindern vermutlich durch die unmittelbare Erfahrung mit realen Objekten ausgebildet. Um die Repräsentation numerischer Mengen im Gehirn zu untersuchen, werden in Studien oft Mengenvergleichsaufgaben verwendet. Hierbei müssen Studienteilnehmende so schnell wie möglich einschätzen, welche von zwei Punktewolken (nicht-symbolische Stimuli) die größere Menge darstellt, ohne die Mengen einzeln abzuzählen. Misst man die Zeit, welche die Studienteilnehmenden brauchen, um die größere Menge auszuwählen, zeigt sich der sogenannte numerische Distanzeffekt: Je größer der numerische Abstand zwischen den zwei Mengen, desto schneller kann die größere Menge bestimmt werden (Price et al., 2012). Personen können also schneller entscheiden, dass „sieben Punkte" numerisch mehr sind als „zwei Punkte", als es bei einem Vergleich von „drei versus zwei" Punkten der Fall ist (Ansari, 2008; Cantlon et al., 2009).

Neurowissenschaftliche Studien haben Hinweise darauf gefunden, dass der parietale Kortex (siehe Abbildung 1) sich schon früh in der Entwicklung auf die Verarbeitung approximativer Mengen spezialisiert (Nieder & Dehaene, 2009). Insbesondere der rechte intraparietale Sulcus (IPS) scheint dabei eine Schlüsselrolle zu spielen (Kersey & Cantlon, 2017). Bereits Säuglinge und Kleinkinder können numerische Mengen intuitiv unterscheiden und zeigen einen neuronalen Distanzeffekt im parietalen Kortex (Hyde et al., 2010; Izard et al., 2009; Xu & Spelke, 2000). Zusätzlich konnte bei nicht-menschlichen Primaten die Existenz von „Zahlenneuronen", die spezifisch auf eine numerische Menge reagieren, im parietalen und frontalen Kortex nachgewiesen werden (Nieder & Miller, 2004; Tudusciuc & Nieder, 2007). Die Reaktion dieser Neuronen entspricht dabei dem oben erwähnten Distanzeffekt in den Reaktionszeiten: Je näher die Objektanzahl an der präferierten Menge eines Neurons ist, desto stärker ist seine Aktivität. Eine kürzlich veröffentlichte Studie könnte die Existenz spezifischer „Zahlenneuronen" nun auch direkt beim Menschen belegen (Kutter et al., 2018). Mittels fMRT konnten zudem ähnliche Aktivitätsmuster bei Kindern und Jugendlichen im parietalen Kortex, oftmals in der rechten Hemisphäre, gezeigt werden (Ansari & Dhital, 2006; Kaufmann et al., 2008). Einige Studien konnten auch belegen, dass dieser neuronale Distanzeffekt mit der mathematischen Leistung korreliert: Je geringer der neuronale Distanzeffekt, desto besser das Abschneiden bei Mathematiktests (Wilkey et al., 2017). Insgesamt dürfte sich der neuronale Distanzeffekt mit Expertise und zunehmendem Entwicklungsalter verringern – vermutlich eine neuronale

Optimierung, um numerische Mengen präziser abzubilden (Ansari & Dhital, 2006; Kaufmann et al., 2008). Dennoch gibt es derzeit kaum Studien, die einen direkten kausalen Zusammenhang zwischen der neuronalen Entwicklung dieses Mengensystems und mathematischen Fertigkeiten belegen konnten. Insofern ist auch die Wirksamkeit von Interventionen, die ausschließlich auf die Schulung des numerischen Mengensystems abzielen, empirisch nicht belegt und deswegen umstritten (Vogel & De Smedt, 2021; Wilkey & Ansari, 2020).

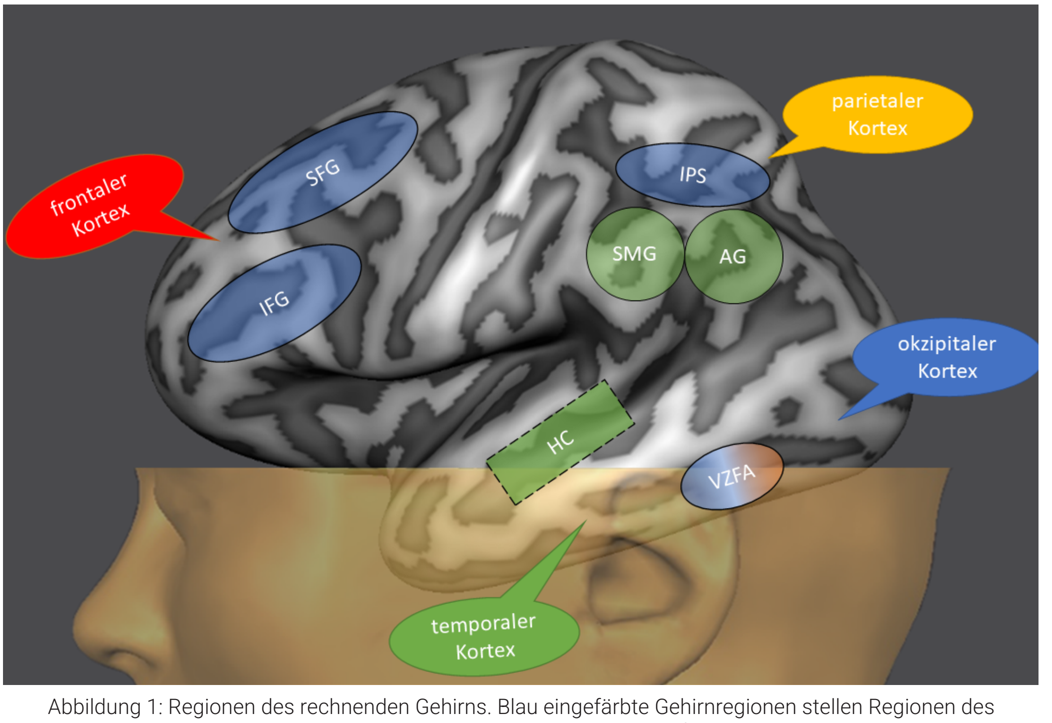

Abbildung 1: Regionen des rechnenden Gehirns. Blau eingefärbte Gehirnregionen stellen Regionen des Netzwerkes beim Verwenden prozeduraler Strategien dar. Grün eingefärbte Gehirnregionen sind Teil des Netzwerkes für arithmetischen Faktenabruf. Strichlierte Umrandungen stehen für medial (im Inneren des Gehirns) gelegene Regionen. SFG = superiorer frontaler Gyrus, IFG = inferiorer frontaler Gyrus, IPS = intraparietaler Sulcus, SMG = supramarginaler Gyrus, AG = angularer Gyrus, VZFA = visuelle Zahlenform-Areal, HC = Hippocampus.

Zahlensymbole zur Erfassung der numerischen Menge

Neben der Wahrnehmung numerischer Größen ist die Entwicklung symbolischer Repräsentationsformen ein zentraler Aspekt der arithmetischen Kompetenzentwicklung (Merkley & Ansari, 2016; Vogel & De Smedt, 2021). Es wird davon ausgegangen, dass Zahlensymbole, welche laut Triple-Code-Modell im okzipitalen Kortex verarbeitet werden, den im IPS repräsentierten Größen durch assoziatives Lernen zugeordnet werden (Piazza, 2010). Für diese sogenannte „Mapping-Hypothese" sprechen ähnliche Distanzeffekte wie bei der Wahrnehmung von nicht-symbolischen Anzahlen. Mit anderen Worten, wenn Personen einen Zahlenvergleich mit Symbolen bearbeiten, zeigen sich sowohl in den Reaktionszeiten (Moyer & Landauer, 1967) als auch auf neuronaler Ebene ähnliche distanzbasierte Aktivierungsmuster im parietalen Kortex (Naccache, 2001; Piazza et al., 2004, 2007; Vogel et al., 2015; Vogel, Goffin, et al., 2017). Zudem konnten

Studien eine Verbindung zwischen visuellen Arealen im okzipitalen Kortex und dem intraparietalen Sulcus im parietalen Kortex nachweisen (Santens et al., 2010).

Jüngere Studien weisen jedoch auf Unterschiede bei der Verarbeitung symbolischer und nicht-symbolischer Information hin (Leibovich & Ansari, 2016; Núñez, 2017a, 2017b). So zeigt sich bei der Verarbeitung von Zahlensymbolen oft eine linksseitige Aktivierung im parietalen Kortex, während bei Anzahlen die Aktivität stärker rechtsseitig auftritt (Emerson & Cantlon, 2015; Kaufmann et al., 2011; Sokolowski et al., 2017; Vogel et al., 2015). Die Repräsentation von Mengen durch Symbole scheint demnach eher ein Zusammenspiel diverser kognitiver Prozesse zu sein (Vogel & De Smedt, 2021).

Die Bedeutung der Rangordnung von Zahlen

Eine Zahl kann nicht nur eine bestimmte Menge (z. B. drei Äpfel) bezeichnen, sondern auch für das dritte Element einer Reihe stehen (z. B. der dritte Apfel). Letzteres bezieht sich auf die Rangordnung von Zahlen, also auf die relative Position von Anzahlen zueinander (ordinales Zahlkonzept). Obwohl ein rudimentäres, ordinales Zahlenverständnis bereits im Säuglingsalter besteht (Brannon, 2002; Suanda et al., 2008), entwickelt sich ein klares Verständnis über die systematische Beziehung zwischen Zahlen erst in der Auseinandersetzung mit Ziffern und Zahlwörtern (Lyons et al., 2016; Reynvoet & Sasanguie, 2016). Diese kulturelle Errungenschaft ermöglicht es uns zu wissen, dass beispielsweise die Zahl „4“, vor der Zahl „5“ steht, und auf die Zahl „3“ folgt (Lyons et al., 2016).

Um das ordinale Zahlenkonzept im Gehirn zu untersuchen, wird häufig eine Verifikationsaufgabe von Zahlenreihen verwendet (z. B. Sommerauer et al., 2020). Teilnehmende müssen hierbei so schnell wie möglich entscheiden, ob Zahlen in geordneter (aufsteigender oder absteigender) oder nicht geordneter Reihenfolge dargestellt sind (z. B. 4-5-6 oder 6-4-5). Bei diesen Zahlenreihenaufgaben zeigt sich ein umgekehrter Distanzeffekt. Dieser besagt, dass Zahlenfolgen mit kleinen Abständen (z. B. 2-3-4) schneller und mit weniger Fehlern verarbeitet werden als Zahlenfolgen mit größeren Abständen (z. B. 3-6-9; Sommerauer et al., 2020; Vogel et al., 2017, 2019, 2021). Mehrere Reaktionszeitstudien konnten belegen, dass diese Indikatoren der ordinalen Zahlenverarbeitung mit individuellen Rechenfertigkeiten signifikant zusammenhängen (Lyons et al., 2014; Sasanguie et al., 2017; Vogel, Haigh, et al., 2017; Vogel et al., 2021).

Bisher haben nur wenige Studien die Entwicklung der neuronalen Mechanismen des ordinalen Zahlenverständnisses bei Kindern untersucht (Vogel & De Smedt, 2021). Die bisherigen Ergebnisse zeigen einen altersabhängigen Anstieg an Aktivität in Regionen des linken IPS (Kaufmann et al., 2009; Kucian et al., 2011; Matejko et al., 2019; McCaskey et al., 2018; Sommerauer et al., 2020), was darauf hindeutet, dass sich dieser Bereich des Gehirns mit zunehmendem Alter auf die Verarbeitung des ordinalen Zahlkonzeptes spezialisiert. Zudem konnten Studien zeigen, dass die neuronale Verarbeitung des ordinalen Zahlkonzeptes von der arithmetischen

Expertise abhängt (McCaskey et al., 2018; Sommerauer et al., 2020) und auch im Zusammenhang mit domänen-übergreifenden Gehirnnetzwerken steht, welche mit dem Arbeitsgedächtnis und dem Zugriff auf semantische Information im Langzeitgedächtnis assoziiert sind (Sommerauer et al., 2020). Dies deutet auf die Wichtigkeit domänen-übergreifender Teilprozesse hin, die für die Konstruktionen symbolischer Zahlenrepräsentationen wohl unentbehrlich sind. Die „Mapping-Hypothese", die sich vom Triple-Code-Modell ableitet und hauptsächlich auf domänen-spezifische Prozesse bezieht, erscheint im Lichte dieser Erkenntnisse als zu vereinfacht. Insbesondere die eindimensionale Assoziation zwischen Mengen und Symbolen erscheint für die Konstruktion eines inhaltsreichen Ziffernverständnisses zu kurz gegriffen. Ziffern beinhalten weitaus mehr semantische Information (z. B. ordinales Zahlkonzept) als eine ausschließliche Verknüpfung mit Mengen.

Zusammenfassend kommen Zahlen in unterschiedlichen Kontexten unterschiedliche Bedeutungen zu. Während die Interpretation dieser unterschiedlichen Bedeutungen von Zahlen im Erwachsenenalter normalerweise hochautomatisiert abläuft, entwickeln sich diese Fertigkeiten im Kindesalter durch funktionelle Spezialisierung unterschiedlicher Gehirnsysteme, welche die neurokognitive Grundlage für spätere Rechenfertigkeiten schaffen (Lyons et al., 2016). In den letzten Jahren finden sich vermehrt Hinweise, dass besonders die Verarbeitung der Rangordnung von Zahlen eine wichtige Rolle für die Entwicklung von Rechenfertigkeiten darstellt (Lyons & Ansari, 2015). Ein wichtiger Schritt zum Erwerb dieser kognitiven Repräsentationsform dürfte das explizite Zählen von numerischen Mengen sein.

Vom Zählen numerischer Mengen zum Rechnen

Zählen ist für die Entwicklung des symbolischen Repräsentationssystems und des Rechnens elementar und interagiert mit dem ordinalen Zahlkonzept (Butterworth, 2005). Es ermöglicht Kindern die exakte Bestimmung der Objektanzahl durch die Verwendung von Zahlwörtern und arabischen Ziffern. Der Erwerb der Zählkompetenz beginnt etwa mit zwei Jahren und entwickelt sich graduell bis in das Vorschulalter. Ein wichtiger Entwicklungsschritt ist dabei das Verständnis des kardinalen Zahlkonzeptes, laut dem das letzte Wort der Zählsequenz der Anzahl der gezählten Objekte entspricht (Butterworth, 2005; Gelman & Gallistel, 1986). Das kardinale Zahlkonzept verschränkt sich mit einem weiteren wichtigen konzeptuellen Verständnis: Dem Wissen, dass jede Zahl genau eine Vorgängerzahl (n - 1) und eine Nachfolgerzahl (n + 1) aufweist (Carey, 2004; Geary & VanMarle, 2018; Sarnecka & Carey, 2008). Dieses Verständnis entwickelt sich zunächst im kleinen Zahlenraum (vier bis fünf Objekte) und wird in weiterer Folge auf den größeren Zahlenraum extrapoliert. Somit kann jede beliebige infinite Zahl durch das Addieren einer weiteren Zahl konstruiert werden (Carey & Barner, 2019; Wynn, 1990).

Bisher ist nur sehr wenig über die neurokognitiven Mechanismen, die dem Zählen und der Entwicklung dieser wichtigen Prinzipien zugrunde liegen, bekannt. Die wenigen vorhandenen neurowissenschaftlichen Studien deuten auf die Involviertheit eines fronto-parietalen Netzwerkes hin, das insbesondere beim Zählen größerer Objektmengen (größer als fünf Objekte) aktiv ist (Vuokko et al., 2013). Das Zählen kleinerer Objektmengen (weniger als fünf Objekte) funktioniert sehr schnell und fehlerfrei und wird auch als Subitizing bezeichnet (Hyde, 2011). Hierbei werden interessanterweise weitere Aktivierungsmuster im temporo-parietalen Kortex sichtbar. Während die fronto-parietalen Aktivierungen auf die Involviertheit des bereits besprochenen approximativen Mengensystems und des ordinalen Zahlkonzeptes hinweisen, deuten die temporo-parietalen Aktivierungen auf das Eingebundensein eines weiteren neurokognitiven Systems hin: dem Object File System (Feigenson et al., 2004; Hyde, 2011). Dieses visuelle Verarbeitungssystem ermöglicht das präzise und schnelle Erfassen einzelner Objektinformationen, wie etwa Form und Position eines Objektes im visuellen Sichtfeld. Da das Object File System eine präzise und exakte Erfassung einzelner Objekte ermöglicht, wird diesem System eine wichtige Rolle bei der konzeptuellen Entwicklung des kardinalen Zahlkonzeptes und dem Verständnis der Vor- und Nachfolgerzahl im kleinen Zahlenraum (bis fünf Items) zugeschrieben. Studien haben gezeigt, dass dieses System ein Kapazitätslimit von vier bis maximal fünf Objekten aufweist und bereits im Alter von zwölf Monaten voll entwickelt ist (Oakes et al., 2006). Somit könnte dieses kognitive System eine wichtige Rolle in der Entwicklung zentraler Zählprinzipien spielen. Zusammenfassend deuten diese Ergebnisse auf eine funktionelle Zusammenführung unterschiedlicher kognitiver Wissensrepräsentationen hin, die es uns schlussendlich ermöglicht, effizient mit Zahlen und Mengen zu operieren. Die neurokognitiven Mechanismen, die diese funktionelle Integration unterstützen, werden derzeit intensiv erforscht.

Neurokognitive Korrelate des Rechnens

Die oben beschriebenen basisnumerischen Repräsentationen (numerische Mengenrepräsentation und Repräsentation der Rangordnung von Zahlen) sowie der integrative Prozess des Zählens scheinen eine wichtige Basis für die Entfaltung kompetenter Rechenfertigkeiten zu sein. Doch wie sieht der eigentliche Rechenprozess aus? Was geschieht im Gehirn bei der Lösung arithmetischer Aufgaben (d. h. Rechenaufgaben)? Es erscheint einleuchtend, dass „2 x 3“ anders gelöst wird als „12 x 7“, doch worin genau bestehen diese Unterschiede? Um diese Frage zu untersuchen, werden üblicherweise arithmetische Aufgaben mit unterschiedlichen Operationen (Addition, Subtraktion, Multiplikation oder Division) und variierender Schwierigkeit vorgegeben. Arithmetische Aufgaben können, basierend auf ihrer Schwierigkeit, in zwei grobe Kategorien eingeteilt werden. Kleine Aufgaben (z. B. 2 x 4) werden sehr schnell und meist fehlerfrei gelöst (Stazyk et al., 1982). Große Aufgaben (z. B. 12 x 3) sind üblicherweise schwieriger und führen häufiger zu fehlerhaften Lösungen. Die genaue Grenze zwischen großen und kleinen Aufgaben wird in verschiedenen Studien allerdings unterschiedlich definiert

(Ashcraft, 1992). Zusätzlich hängt die Schwierigkeit einer arithmetischen Aufgabe auch vom Alter und den individuellen Rechenfertigkeiten ab (Dowker & Cohen Kadosh, 2015; Lemaire & Siegler, 1995). Nichtsdestotrotz zeigten sich konsistente Unterschiede in den Verhaltensmaßen (Antwortgeschwindigkeit und Fehlerrate) zwischen kleinen und großen Aufgaben (z. B. De Smedt, Holloway, & Ansari, 2011). Diese Unterschiede implizieren, dass zwei unterschiedliche mentale Strategien eingesetzt werden, um zur Lösung der arithmetischen Aufgabe zu gelangen.

Die erste dieser beiden Strategien ist die prozedurale Strategie. Dabei werden mehrere Rechenschritte (z. B. Zählen, Zerlegung etc.) durchgeführt (Campbell & Xue, 2001; LeFevre, Bisanz, et al., 1996). Dies ist oft beim Lösen großer Aufgaben der Fall. Eine Aufgabe wie „12 x 3“ kann zum Beispiel in zwei einfachere Teilaufgaben aufgespalten („10 x 3 = 30“ und „2 x 3 = 6“) und deren Ergebnisse schlussendlich addiert werden. Diese Extraschritte vereinfachen zwar die Aufgabe, haben allerdings auch Nachteile. Die Aufgabe wird dadurch zeitaufwändiger und jeder zusätzliche Rechenschritt erhöht die Wahrscheinlichkeit, einen Fehler zu machen. Wenn arithmetische Aufgaben wiederholt gelöst werden, kann es vorkommen, dass sämtliche Zwischenschritte übersprungen werden und die korrekte Antwort direkt aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen wird (Campbell & Xue, 2001; LeFevre, Bisanz, et al., 1996). Dies bildet die zweite Strategie zur Lösung arithmetischer Aufgaben: Faktenabruf (Ashcraft, 1992; Peters & De Smedt, 2018). Statt aufwändige und fehleranfällige Rechenschritte durchzuführen, wird die Lösung einfach erinnert. Im Laufe der Entwicklung der Rechenfertigkeiten findet ein Wechsel von prozeduralen Strategien hin zum Faktenabruf statt (Lemaire & Siegler, 1995; Peters & De Smedt, 2018). Diese Verlagerung tritt besonders bei einfachen arithmetischen Aufgaben auf, welche im Schulalltag häufig gelöst werden. Der Wechsel von rein prozeduralen Strategien hin zu stärkerer Verwendung des Faktenabrufs ist ein wichtiger Grundstein für die Entwicklung von Rechenfertigkeiten. Dieser Entwicklungsschritt ist jedoch kein abrupter Wechsel. Ineffiziente (Rechen-)Strategien sind vom Kindes- bis ins Erwachsenenalter vorhanden, im Laufe der Entwicklung ändert sich jedoch die Häufigkeit, mit der diese Strategien angewandt werden – allerdings wird keine der Strategien an keinem der Zeitpunkte exklusiv angewandt (LeFevre, Sadesky, et al., 1996; Siegler, 1996). Diese graduelle Veränderung in der Verwendung von Rechenstrategien ist nicht nur auf Verhaltensebene, sondern auch auf neuronaler Ebene sichtbar. In der Beschreibung der neuronalen Korrelate des Rechnens gehen wir zuerst auf Studien ein, die diese beiden Strategien unabhängig von Altersunterschieden untersucht haben. Danach befassen wir uns mit entwicklungsbedingten Unterschieden des Rechnens und atypischen Mustern bei Kindern mit Rechenschwierigkeiten.

Neurokognitive Korrelate des Prozeduralen Rechnens und des Faktenabrufes

Eine Reihe von Studien mit bildgebenden Verfahren konnte eine Vielzahl miteinander verbundener Gehirnareale aufzeigen, die an der Lösung arithmetischer Aufgaben (z. B. De Visscher et al., 2018; Grabner et al., 2009; Molko et al., 2003; Stanescu-

Cosson et al., 2000) beteiligt sind. Das rechnende Gehirn besteht somit aus einem komplexen Netzwerk an diversen Gehirnregionen, die mit der Lösung kleiner und großer Aufgaben assoziiert sind (Grabner et al., 2009; Polspoel, De Visscher et al., 2019; Stanescu-Cosson et al., 2000; Tschentscher & Hauk, 2014). Dabei scheinen weit verbreitete Regionen des präfrontalen Kortex, insbesondere der inferiore frontale Gyrus, der superiore frontale Gyrus und das Cingulum, Regionen des parietalen Kortex, insbesondere der IPS, sowie visuelle Regionen des okzipitalen Kortex, insbesondere der fusiforme Gyrus, beim Lösen schwieriger arithmetischer Aufgaben involviert zu sein (siehe Abbildung 1). Im Gegensatz dazu besteht das Netzwerk beim Lösen leichter arithmetischer Aufgaben aus relativ eng begrenzten Regionen des angularen Gyrus, des supramarginalen Gyrus und des Hippocampus.

Diese funktionellen und anatomischen Unterschiede entsprechen grob den oben diskutierten Verhaltensmustern. Das größere fronto-parietale-okzipitale Netzwerk kann mit einem Mosaik von domänen-übergreifenden und domänen-spezifischen Funktionen assoziiert werden, die bei der Anwendung von komplexeren prozeduralen Strategien zur Lösung arithmetischer Aufgaben relevant sein dürften. Der IPS scheint dabei für die symbolische und nicht-symbolische Mengen-/Ordinalkonzeptverarbeitung zuständig zu sein, der inferiore frontale Gyrus für die Unterdrückung ähnlicher, aber falscher Lösungen (Heidekum et al., 2019) und andere Regionen des frontalen Kortex für die exekutive Kontrolle diverser Rechenschritte (Menon, 2014; Peters & De Smedt, 2018). Bestimmte Regionen des okzipitalen Kortex reagieren auf die visuellen Eigenschaften von Zahlensymbolen (z. B. arabischen Ziffern; Arsalidou & Taylor, 2011; Vatansever et al., 2020; Yeo et al., 2017). Dieses visuelle Zahlenform-Areal (engl. visual number form area) befindet sich in der Nähe des fusiformen Gyrus (Shum et al., 2013).

Das zweite Netzwerk wird typischerweise mit phonologischen Prozessen während des Faktenabrufs aus dem Langzeitgedächtnis (verbaler Abruf von Fakten) assoziiert. Dies scheint über Regionen des angularen Gyrus und des supramarginalen Gyrus zu erfolgen, welche generell bei der phonologischen Verarbeitung eine relevante Rolle spielen (Grabner et al., 2009). Für die Enkodierung der arithmetischen Fakten im Kindesalter scheint insbesondere der Hippocampus, der sich im Inneren des Temporallappens befindet, eine wichtige Funktion zu übernehmen. Im Allgemeinen ist der Hippocampus eine essenzielle Struktur, um gelernte Inhalte im Langzeitgedächtnis zu enkodieren. In diesem Zusammenhang scheint er, gemeinsam mit dem frontalen Kortex, Lösungen von arithmetischen Aufgaben als arithmetische Fakten in das Langzeitgedächtnis zu überführen (Peters & De Smedt, 2018).

Überschneidende und differenzierte Gehirnaktivierungen werden auch in Zusammenhang mit unterschiedlichen Operationen (z. B. Multiplikationen und Additionen) diskutiert (Peters & De Smedt, 2018). So zeigen Additionen oftmals stärkere Aktivierungen in parietalen Bereichen, während das Lösen von Multiplikationen oft Aktivierungen in Regionen des frontalen Kortex und in hinteren

Regionen des linken temporalen Kortex aufweisen (Zhou et al., 2007). Diese Unterschiede werden oftmals mit unterschiedlichen Erfordernissen der Operationen assoziiert. So scheinen Additionen stärker auf die semantische Repräsentation von numerischen Mengen zuzugreifen als Multiplikationen. Regionale Aktivierungsunterschiede wurden auch für Subtraktionen versus Multiplikationen gezeigt. Die genauen Ursachen für mögliche Operationsunterschiede sind aber nach wie vor nicht geklärt und in manchen Studien werden diese auch nicht (Grabner et al., 2021; Polspoel et al., 2017) oder mit geringer Effektstärke beobachtet (Brunner et al., 2021). Insofern erscheinen insbesondere die unterschiedlichen Strategien zur Lösung arithmetischer Aufgaben (d. h. prozedurale Strategien und Faktenabruf) im Vordergrund der neurokognitiven Entwicklung zu stehen.

Die oben beschriebenen Gehirnnetzwerke zum Lösen arithmetischer Probleme bestehen nicht nur aus den erwähnten Gehirnarealen, sondern auch auf den Verbindungen (Bahnen weißer Substanz) zwischen ihnen (Matejko & Ansari, 2015). Hierbei sind für arithmetische Fertigkeiten besonders die Bahnen, welche den frontalen und parietalen Kortex verbinden (superiorer longitudinaler Fasciculus, arcuater Fasciculus), sowie jene, die den präfrontalen Kortex und den okzipitotemporalen Kortex verbinden (inferiorer longitudinaler Fasciculus) relevant (Polspoel, Vandermosten et al., 2019). Effiziente Verbindungen zwischen den relevanten Gehirnregionen stellen einen wichtigen Faktor zum erfolgreichen Erwerb von Rechenfertigkeiten dar (Bulthé et al., 2019; Park et al., 2014).

Wie verändern sich die neuronalen Korrelate des Lösens arithmetischer Aufgaben im Laufe des Alters?

Im Vergleich zu Erwachsenen zeigt sich bei Kindern eine stärkere Aktivierung in diversen Bereichen des präfrontalen Kortex (Dowker & Cohen Kadosh, 2015; Peters & De Smedt, 2018). Aktivierungsmuster im unteren präfrontalen Kortex dürften, zusammen mit Aktivierungen im parietalen Kortex, grundsätzliche exekutive Funktionen (z. B Inhibition irrelevanter Informationen) ermöglichen, um die Aufmerksamkeit für relevante Aspekte aufrechtzuhalten (Dowker & Cohen Kadosh, 2015). Regionen des oberen präfrontalen Kortex dürften für Arbeitsgedächtnisprozesse eine wichtige Rolle spielen, welche bei der Manipulation von Zahlen (z. B. Zerlegen einer Aufgabe in Teilschritte) wichtig sind (Menon et al., 2000). Im jungen Alter spielt der frontale Kortex also eine wichtige Rolle beim Rechnen. Mit zunehmendem Alter und steigender Expertise kommt es zu einem fronto-parietalen Shift, d. h. es findet sich relativ gesehen weniger Aktivität in frontalen Regionen und mehr Aktivität in parietalen Regionen (Davis et al., 2009; Kucian et al., 2008; Prado et al., 2014; Rivera et al., 2005). Die Abnahme an Aktivität im frontalen Bereich steht vermutlich für eine geringere Involviertheit domänen-übergreifender Funktionen, welche insbesondere beim Erwerb der Zahlensemantik und der Ausführung prozeduraler Rechenstrategien relevant sind. Das Zerlegen arithmetischer Aufgaben in Teilschritte und das Übertragen von Teillösungen zur Berechnung der nächsten Teilaufgabe benötigen sehr viele Planungs- und

Steuerungsfunktionen (exekutive Kontrolle) sowie das Arbeitsgedächtnis. Je automatisierter diese Prozesse ablaufen und je spezifischer Regionen in der Lage sind, zentrale Informationen zu bearbeiten (v. a. domänen-spezifische), desto geringer scheinen diese Aktivierungen auszufallen. Eine Gehirnregion, welche sich im Laufe der Entwicklung auf eine solche domänen-spezifische Verarbeitung spezialisiert, ist der linke IPS. Diese Gehirnregion ist durch eine Zunahme der Aktivität in Abhängigkeit vom Alter und Entwicklungsstand der numerischen Fertigkeiten gekennzeichnet (Emerson & Cantlon, 2015).

Diese altersbedingten Aktivierungsunterschiede sind den zuvor beschriebenen Aktvierungsunterschieden zwischen prozeduralen Strategien und Faktenabrufstrategien sehr ähnlich, da diese auch mit dem Alter korrelieren (je älter, desto mehr Faktenabruf). Dennoch gibt es auch spezifische Veränderungen innerhalb der Strategien. So konnte etwa gezeigt werden, dass Regionen im parietalen Kortex beim prozeduralen Lösen arithmetischer Aufgaben mit zunehmendem Alter eine geringere Aktivität aufweisen. Diese altersabhängige Abnahme an Aktivität tritt jedoch nicht beim Faktenabruf auf. Umgekehrt zeigen Regionen, die mit phonologischer Verarbeitung assoziiert sind (z. B. der inferiore frontale Gyrus) zunehmende Aktivierung beim Faktenabruf, nicht aber bei prozeduralen Strategien (Prado et al., 2014). Ähnlich verändert sich auch die Rolle des Hippocampus im Laufe der Entwicklung. Im Vergleich zu Erwachsenen zeigt sich bei Kindern eine stärkere Aktivierung dieser Gehirnregion während des Faktenabrufs (Peters & De Smedt, 2018). Ein Grund dafür ist, dass der Hippocampus im jungen Alter daran beteiligt ist, arithmetische Fakten im Langzeitgedächtnis abzuspeichern. Mit zunehmender arithmetischer Erfahrung hat der Hippocampus weniger „Arbeit", da es weniger neue Fakten gibt, die gespeichert werden müssen. Insofern ist eine zentrale Erkenntnis, dass, wenn Kinder das Konzept des Rechnens verstanden haben und dieses durch Übung als Fakten abspeichern, sie wesentlich schneller und mit weniger Fehlern auch komplexere Aufgaben lösen können. Neurokognitive Ressourcen, die dadurch nicht mehr für das Lösen einfacher arithmetischer Aufgaben belegt sind (z. B. Arbeitsgedächtnis, Inhibition), können so für schwerere Aufgaben oder das Finden kreativer Lösungen verwendet werden.

Allgemein ist in Bezug auf die Entwicklung neuronaler Prozesse des Rechnens wichtig zu erwähnen, dass entwicklungsbedingte Veränderungen in den relevanten funktionellen Gehirnsystemen nicht ausschließlich linear sind. Chang et al. (2016) weisen beispielsweise darauf hin, dass bei der Entwicklung rechnerischer Fertigkeiten bestimmte Gehirnareale besonders im Jugendalter eine ausgeprägte Aktivität aufweisen. Darüber hinaus ist es wichtig zu berücksichtigen, dass bisherige neurowissenschaftliche Erkenntnisse zur Entwicklung von Rechenfertigkeiten hauptsächlich auf Querschnittstudien beruhen. Längsschnittstudien, die zur Untersuchung der Entwicklung neuronaler Prozesse unabdinglich sind, wurden bisher nur selten durchgeführt.

Schwierigkeiten beim Rechnen — Dyskalkulie

Weltweit weisen etwa 5–7% der Personen persistierende Schwierigkeiten auf, arithmetische Kompetenzen zu erlernen. Als Rechenstörung oder Dyskalkulie wird eine schwerwiegende Beeinträchtigung des Erlernens grundlegender numerisch-arithmetischer Fertigkeiten bei ausreichender Intelligenz und Schulbildung bezeichnet (WHO, 2019). Bisherige Studien konnten zeigen, dass eines der Symptome eine eingeschränkte Verwendung arithmetischer Lösungsstrategien ist (Fritz et al., 2019; Geary, 2011). Aktuelle Studienergebnisse deuten darauf hin, dass sowohl genetische, kognitive, neurobiologische als auch diverse Umwelteinflüsse eine atypische Entwicklung von bestimmten Gehirnregionen begünstigen können, welche wiederum die Aneignung arithmetischer Kompetenzen erschwert (Butterworth, 2005; Geary, 2011). Eine konkrete Erklärung dafür ist schwierig, da es bisher nur eine begrenzte Anzahl an Langzeitstudien als Datenbasis gibt und daher keine eindeutige Urache-Wirkung-Differenzierung möglich ist (Vogel & De Smedt, 2021). Bisherige Erklärungshypothesen umfassen jedoch sowohl Veränderung auf domänen-spezifischer als auch auf domänen-übergreifender Ebene (Saga et al., 2021). Die vorherrschenden domänen-spezifischen Hypothesen gehen entweder von einem neurokognitiven Defizit bei der Verarbeitung und Darstellung numerischer Größen oder von einem Defizit beim Zugang zu numerischen Größen über symbolische Darstellungen (z. B. arabische Ziffern) aus (Üstün et al., 2021; Rousselle & Noël, 2007; Butterworth, Varma & Laurillard, 2011). Die Konsequenz ist bei beiden Erklärungen ähnlich: Kinder mit Dyskalkulie haben Schwierigkeiten, eine genaue Darstellung symbolischer Zahlen zu entwickeln, was in weiterer Folge auch den Erwerb arithmetischer Fertigkeiten beeinträchtigt. Die vorherrschende domänen-übergreifende Hypothese sieht die Rolle des Arbeitsgedächtnisses und der exekutiven Funktionen als entscheidende Faktoren. Es wird insbesondere die Schwierigkeit, irrelevante Informationen im Arbeitsgedächtnis zu unterdrücken, als Hauptursache für schlechte Leistungen bei arithmetischen Aufgaben angesehen (Geary, 2011).

Auch im Bereich der neurobiologischen Korrelate von Dyskalkulie gibt es bisher nur wenige Studien (De Smedt et al., 2019; Kaufmann et al., 2011; Kucian & von Aster, 2015). Zusammenfassend finden diese Studien häufig eine Deaktivierung in Hirnregionen, die mit der Verarbeitung nichtsymbolischer und symbolischer Zahlensemantik verbunden sind, insbesondere des IPS (Kaufmann et al., 2009; Mussolin et al., 2010; Price et al., 2007). Dies deutet darauf hin, dass Kinder mit Dyskalkulie im Vergleich zu Kindern mit typischer Entwicklung ähnliche Hirnnetzwerke nutzen, doch scheint die Effizienz der beteiligten Hirnregionen bei der Verarbeitung numerischer Informationen verändert zu sein. Hierbei wäre die einfachste Erklärung eine eingeschränkte Funktion des intraparietalen Sulcus bei der Verarbeitung numerischer Größen (d. h. eine domänen-spezifische Ursache). Bei genauerer Betrachtung der Datenlage scheint das Gesamtbild aber etwas komplexer zu sein. Studien bei Kindern mit Dyskalkulie konnten auch stärkere

Aktivierung im linken intraparietalen Sulcus, im frontalen Kortex und in visuellen Bereichen finden, was möglicherweise darauf hindeutet, dass Kinder mit Dyskalkulie zusätzliche kognitive Ressourcen einsetzen, um Schwierigkeiten bei der Verarbeitung von Mengen zu kompensieren (Kaufmann et al., 2009; McCaskey et al., 2018). Da die notwendigen Längsschnittstudien derzeit noch fehlen, ist eine Ursache-Wirkung-Differenzierung der unterschiedlichen Aktivierungsmuster nicht möglich (Vogel & De Smedt, 2021). Die Ergebnisse einer aktuellen Längsschnittstudie von Kuhl et al. (2021) deuten darauf hin, dass eine Veranlagung für die Entwicklung einer Dyskalkulie bereits in der frühen Kindheit durch atypische Aktivierung des fronto-parietalen Netzwerkes nachweisbar sein könnte. Eine Längsschnittstudie von McCaskey et al. (2020) ergab, dass sich diese atypische Entwicklung auch auf struktureller Ebene zeigt. Kinder mit Dyskalkulie wiesen über den gesamten Entwicklungsverlauf hinweg reduziertes Volumen an grauer und weißer Substanz in Regionen des numerischen Netzwerkes auf. Ergebnisse von Moreau et al. (2019) deuten jedoch darauf hin, dass strukturelle Unterschiede (z. B. in der grauen Substanz) zwischen Personen mit und ohne Dyskalkulie möglicherweise nur subtil und nicht so konsistent sind wie bisher berichtet.

Diskussion

Auch wenn es auf den ersten Blick wie ein einfacher Prozess erscheinen mag, beinhaltet das Lösen arithmetischer Aufgaben viele unterschiedliche mentale Teilprozesse. Rechnen ist ein komplexer Prozess, der von domänen-übergreifenden und domänen-spezifischen Gehirnnetzwerken unterstützt wird (Amalric & Dehaene, 2019; Landerl et al., 2017; Vogel & De Smedt, 2021; Vogel & Grabner, 2015). Kompetente Rechenfertigkeiten entwickeln sich aus einer vielschichtigen Interaktion spezifischer Gehirnregionen und Wissensrepräsentationen. Eine Erweiterung des Triple-Code-Modells erscheint daher angebracht, um dem aktuellen Erkenntnisstand gerecht zu werden. So stellt die Hinzunahme spezifischer domänen-übergreifender Funktionen eine wichtige Erweiterung dar, um neurokognitive Lernprozesse besser abzubilden, insbesondere auch um pädagogische Konzepte zu beschreiben. Die graduelle und sinnvolle Überführung von langsamen und fehleranfälligen prozeduralen Strategien hin zum raschen Abruf akkurater Fakten fällt in diesen Bereich. Da das Zuarbeiten der jeweiligen Gehirnregionen und deren Funktionen von Aufgabenschwierigkeit, Entwicklungsalter, individuellen Unterschieden und erworbenen Fertigkeiten abhängt, ist auch hier die Beschreibung des Triple-Code-Modells unzureichend, da dieses die eben beschriebenen Dynamiken in ein rigides „Mapping" zwischen drei Komponenten überführt. In Anbetracht dieser Erkenntnisse erscheint der gezielte Aufbau eines multidimensionalen Referenzsystems zur Abbildung der Zahlensemantik als ein sinnvolles Lern- und Entwicklungsziel im pädagogischen Kontext. Die Entwicklung dieses semantischen Referenzsystems sollte auf einer Wissenskonstruktion beruhen, in der unterschiedliche symbolische und nicht-symbolische Beziehungsmuster systematisch erarbeitet und durch konkrete Prozeduren und Anwendungen in mögliche Rechenprozesse überführt werden (im Sinne einer sensomotorischen Integration). Die Fokussierung auf eines der in diesem Artikel beschriebenen Teilsysteme (z. B. eine Verbesserung des approximativen Mengensystems) erscheint aus heutiger Sicht als zu kurz gegriffen.

Ein mögliches Leitbild für einen derartigen Konstruktionsprozess könnte die Theorie der konstruktiven Operatoren sein (Arsalidou et al., 2018; Pascual-Leone, 1995; Pascual-Leone et al., 2015). In diesem Modell werden drei unterschiedliche Ebenen von Schemata beschrieben: Die figurative, die operative und die exekutive Ebene. Das erste Schema bedient multidimensionale Wahrnehmungen und Repräsentationen von Objekten oder Konzepten (z. B. Wissen über die Zahlensemantik der Menge und der Rangordnung). Das zweite repräsentiert objekt- und konzeptspezifische Anwendung (z. B. Wissen über die Manipulation numerischer Mengen, um sie zu addieren oder zu subtrahieren). Zuletzt beschreibt das exekutive Schema generalisierte Handlungsabläufe, um komplexere Aufgaben in kleinere Komponenten zu zerlegen (z. B. Wissen über die Zerlegung komplexer arithmetischer Aufgaben in Teilaufgaben). Erst durch die handlungsbasierte Interaktion dieser Teilebenen, insbesondere der figurativen und der operativen und den unterschiedlichen (domänen-übergreifenden und domänen-spezifischen) Gehirnregionen, die diese Schemata bedienen, kann – aus unserer Sicht – ein differenziertes Wissens- und Repräsentationssystem zum effektiven und kompetenten Lösen arithmetischer Aufgaben bereitgestellt werden.

Unser Verständnis der neurokognitiven Mechanismen des Rechnens hat sich in den letzten Jahren zwar deutlich erweitert, doch bleiben zahlreiche Fragen offen. Ein Großteil des Wissens über die Mechanismen des rechnenden Gehirns beruht nach wie vor auf Studien mit Erwachsenen oder auf Querschnittstudien, welche zwei Altersgruppen (z. B. Kinder und Erwachsene) vergleichen. Um die allmähliche Entwicklung kognitiver Funktionen und die damit verbundenen Veränderungen neuronaler Netzwerke zu verstehen, sind Längs- und Querschnittstudien notwendig, welche spezifische Funktionen in genau definierten Altersbereichen untersuchen (Karmiloff-Smith, 2010).

Schulbildung und Gehirnentwicklung beeinflussen sich gegenseitig (Zacharopoulos et al., 2021). Ein wichtiger Aspekt für zukünftige Studien ist daher, inwieweit Kontextfaktoren wie das häusliche Umfeld und die Schule die Entwicklung numerischer und arithmetischer Fertigkeiten beeinflussen. Verhaltensbezogene Daten bisheriger Studien weisen darauf hin, dass dieser Bildungskontext die Entwicklung numerischer und arithmetischer Fertigkeiten vorhersagen kann (Susperreguy et al., 2020). Allerdings ist noch ungeklärt, wie diese Kontextfaktoren die in diesem Artikel beschriebenen arithmetischen Gehirnnetzwerke beeinflussen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die weitere Forschung ist es, zwischen Ursachen und Folgen zu unterscheiden, insbesondere in Bezug auf Dyskalkulie. Wie im Artikel erwähnt, berichten Studien von Zusammenhängen zwischen funktionellen und strukturellen Gegebenheiten des arithmetischen Gehirnnetzwerkes und individuellen Leistungsunterschieden. Diese beruhen jedoch fast ausschließlich auf Daten von Querschnittstudien, bei denen nicht zwischen Ursachen und Folgen unterschieden werden kann. Hinzu kommt, dass in Studien häufig Kinder in einem sehr breiten Altersbereich untersucht wurden, in dem massive Veränderungen in der Gehirnentwicklung stattfinden (Giedd & Rapoport, 2010). Ohne Daten von Längsschnittstudien ist daher nicht klar, ob Rechenschwierigkeiten auf Beeinträchtigungen des arithmetischen Gehirnnetzwerks zurückzuführen sind oder ob Rechenschwierigkeiten zu Abweichungen in diesem Netzwerk führen.

In Bezug auf Dyskalkulie deuten bisherige Forschungsergebnisse auf eine atypische strukturelle und funktionelle Entwicklung des arithmetischen Netzwerkes hin (Saga et al., 2021). Dies könnte zu einer weniger effizienten Integration bei der Verarbeitung von Informationen führen, was mit der Hypothese des Zugangsdefizits einhergeht (Üstün et al., 2021). Aktuelle Daten deuten darauf hin, dass die beobachteten atypischen Ausprägungen in funktionellen Gehirnnetzwerken durch spezifische Interventionen verändert werden können (Jolles et al., 2016; Michels et al., 2018). In Bezug auf Letzteres ist allerdings wichtig zu erwähnen, dass „direkte" Implikationen für die Praxis nicht einfach so möglich sind, sondern interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftler*innen und Lehrenden erfordern (für eine Diskussion siehe Howard-Jones et al., 2016). Dies ist ein vielversprechender Ansatz für künftige Interventionen, allerdings bedarf es weiterer Forschung, um verlässliche Schlussfolgerungen ziehen zu können.

Literatur:

Amalric, M. & Dehaene, S. (2019). A distinct cortical network for mathematical knowledge in the human brain. *NeuroImage, 189*, 19–31. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.001

Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience, 9(4)*, 278–291. https://doi.org/10.1038/nrn2334

Ansari, D., De Smedt, B. & Grabner, R. H. (2012). Neuroeducation – A Critical Overview of an Emerging Field. *Neuroethics, 5(2)*, 105–117. https://doi.org/10.1007/s12152-011-9119-3

Ansari, D. & Dhital, B. (2006). Age-related Changes in the Activation of the Intraparietal Sulcus during Nonsymbolic Magnitude Processing: An Event-related Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18(11)*, 1820–1828. https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.11.1820

Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M. & Pascual-Leone, J. (2018). Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience, 30*, 239–250. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002

Arsalidou, M. & Taylor M. J. (2011). Is 2+2=4? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *Neuroimage, 54(3),* 2382-93. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009

Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: A review of data and theory. *Cognition, 44(1–2)*, 75–106. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90051-I

Baddeley, A. (1992). Working Memory. *Science, 255(5044)*, 556–559. http://science.sciencemag.org/

Berteletti, I., Prado, J. & Booth, J. R. (2014). Children with mathematical learning disability fail in recruiting verbal and numerical brain regions when solving simple multiplication problems. *Cortex, 57*, 143–155. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.04.001

Brannon, E. M. (2002). The development of ordinal numerical knowledge in infancy. *Cognition, 83(3)*, 223–240. https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00005-7

Brannon, E. M. (2006). The representation of numerical magnitude. *Current Opinion in Neurobiology, 16(2)*, 222–229. https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.03.002

Brunner, C., Koren, N., Scheucher, J., Mosbacher, J. A., De Smedt, B., Grabner, R. H. & Vogel, S. E. (2021). Oscillatory Electroencephalographic Patterns of Arithmetic Problem Solving in Fourth Graders. OSF Preprints. https://doi.org/https://doi.org/10.31219/osf.io/tmhce

Bulthé, J., Prinsen, J., Vanderauwera, J., Duyck, S., Daniels, N., Gillebert, C. R., Mantini, D., Op de Beeck, H. P. & De Smedt, B. (2019). Multi-method brain imaging reveals impaired representations of number as well as altered connectivity in adults with dyscalculia. *NeuroImage, 190*, 289–302. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.06.012

Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 46(1)*, 3–18. https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00374.x

Butterworth, B., Varma, S. & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: from brain to education. *Science, 332(6033),* 1049-53. https://doi.org/10.1126/science.1201536

Campbell, J. I. D. & Xue, Q. (2001). Cognitive arithmetic across cultures. *Journal of Experimental Psychology: General, 130(2)*, 299–315. https://doi.org/10.1037/0096-3445.130.2.299

Cantlon, J. F., Platt, M. L. & Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences, 13(2)*, 83–91. https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.007

Carey, S. (2004). Bootstrapping & the origin of concepts. *Daedalus, 133(1)*, 59–68. https://doi.org/10.1162/001152604772746701

Carey, S. & Barner, D. (2019). Ontogenetic Origins of Human Integer Representations. *Trends in Cognitive Sciences, 23(10)*, 823–835. https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.07.004

Chang, T.-T., Metcalfe, A. W. S., Padmanabhan, A., Chen, T. & Menon, V. (2016). Heterogeneous and nonlinear development of human posterior parietal cortex function. *NeuroImage, 126*, 184–195. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.053

Crespo, V. R. (2019). *How does the child's brain process numerical magnitude? Implications for learning mathematics*. IBE Science of Learning Portal.Verfügbar unter: https://solportal.ibe-unesco.org/articles/how-does-the-childs-brain-process-numerical-magnitude-implications-for-learning-mathematics/

Davis, N., Cannistraci, C. J., Rogers, B. P., Gatenby, J. C., Fuchs, L. S., Anderson, A. W. & Gore, J. C. (2009). Aberrant functional activation in school age children at-risk for mathematical disability: A functional imaging study of simple arithmetic skill. *Neuropsychologia, 47(12)*, 2470–2479. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.04.024

De Smedt, B., Ansari, D., Grabner, R. H., Hannula-Sormunen, M., Schneider, M. & Verschaffel, L. (2011). Cognitive neuroscience meets mathematics education: It takes two to Tango. *Educational Research Review, 6(3)*, 232–237. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2011.10.003

De Smedt, B., Holloway, I. D. & Ansari, D. (2011). Effects of problem size and arithmetic operation on brain activation during calculation in children with varying levels of arithmetical fluency. *NeuroImage, 57(3)*, 771–781. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.12.037

De Smedt, B., Peters, L. & Ghesquière, P. (2019). Neurobiological Origins of Mathematical Learning Disabilities or Dyscalculia: A Review of Brain Imaging Data. In *International Handbook of Mathematical Learning Difficulties* (pp. 367–384). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97148-3_23

De Visscher, A., Vogel, S. E., Reishofer, G., Hassler, E., Koschutnig, K., De Smedt, B. & Grabner, R. H. (2018). Interference and problem size effect in multiplication fact solving: Individual differences in brain activations and arithmetic performance. *NeuroImage, 172*, 718–727. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.01.060

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition, 44(1–2)*, 1–42. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P. & Cohen, L. (2003). THREE PARIETAL CIRCUITS FOR NUMBER PROCESSING. *Cognitive Neuropsychology, 20(3–6)*, 487–506. https://doi.org/10.1080/02643290244000239

Dowker, A. & Cohen Kadosh, R. (2015). Part V: Neuroscience of Mathetmetics. In *The Oxford Handbook for Numerical Cognition* (pp. 443–634). New York: Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.001.0001

Emerson, R. W. & Cantlon, J. F. (2015). Continuity and change in children's longitudinal neural responses to numbers. *Developmental Science, 18(2)*, 314–326. https://doi.org/10.1111/desc.12215

Feigenson, L., Dehaene, S. & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences, 8(7)*, 307–314. https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002

Fritz, A., Haase, V. G. & Räsänen, P. (Hrsg.). (2019). *International Handbook of Mathematical Learning Difficulties*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97148-3

Geary, D. C. (2011). Consequences, Characteristics, and Causes of Mathematical Learning Disabilities and Persistent Low Achievement in Mathematics. *Journal of Developmental & Behavioral Pediatrics, 32(3)*, 250–263. https://doi.org/10.1097/DBP.0b013e318209edef

Geary, D. C. & VanMarle, K. (2018). Growth of symbolic number knowledge accelerates after children understand cardinality. *Cognition, 177*, 69–78. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.04.002

Gelman, R. & Gallistel, C. R. (1986). *The child's understanding of number*. Cambridge: Harvard University Press.

Giedd, J. N. & Rapoport, J. L. (2010). Structural MRI of Pediatric Brain Development: What Have We Learned and Where Are We Going? *Neuron, 67(5)*, 728–734. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.08.040

Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G., Ebner, F. & Neuper, C. (2009). To retrieve or to calculate? Left angular gyrus mediates the retrieval of arithmetic facts during problem solving. *Neuropsychologia, 47(2)*, 604–608. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.10.013

Grabner, R. H., Brunner, C., Lorenz, V., Vogel, S. E. & De Smedt, B. (2021). Fact retrieval or compacted counting in arithmetic—A neurophysiological investigation of two hypotheses. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. https://doi.org/10.1037/xlm0000982

Gross, J., Hudson, C. & Price, D. (2009). The long term costs of numeracy difficulties. In *Every Child a Chance Trust and KPMG*, London. www.everychildachancetrust.org

Heidekum, A. E., Grabner, R. H., De Smedt, B., De Visscher, A. & Vogel, S. E. (2019). Interference during the retrieval of arithmetic and lexico-semantic knowledge modulates similar brain regions: Evidence from functional magnetic resonance imaging (fMRI). *Cortex, 120*, 375–393. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.06.007

Howard-Jones, P. A., Varma, S., Ansari, D., Butterworth, B., De Smedt, B., Goswami, U., Laurillard, D. & Thomas, M. S. C. (2016). The principles and practices of educational neuroscience: Comment on Bowers (2016). *Psychological Review, 123(5)*, 620–627. https://doi.org/10.1037/rev0000036

Hyde, D. C. (2011). Two systems of non-symbolic numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience, 5(NOVEMBER)*, 1–8. https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00150

Hyde, D. C., Boas, D. A., Blair, C. & Carey, S. (2010). Near-infrared spectroscopy shows right parietal specialization for number in pre-verbal infants. *NeuroImage, 53(2)*, 647–652. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.030

Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S. & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(25)*, 10382–10385. https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106

Jolles, D., Supekar, K., Richardson, J., Tenison, C., Ashkenazi, S., Rosenberg-Lee, M., Fuchs, L. & Menon, V. (2016). Reconfiguration of parietal circuits with cognitive tutoring in elementary school children. *Cortex, 83*, 231–245. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.08.004

Karmiloff-Smith, A. (2010). Neuroimaging of the developing brain: Taking "developing" seriously. *Human Brain Mapping, 31(6)*, 934–941. https://doi.org/10.1002/hbm.21074

Kaufmann, L., Vogel, S. E., Starke, M., Kremser, C. & Schocke, M. (2009). Numerical and non-numerical ordinality processing in children with and without developmental dyscalculia: Evidence from fMRI. *Cognitive Development, 24(4)*, 486–494. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.09.001

Kaufmann, L., Vogel, S. E., Wood, G., Kremser, C., Schocke, M., Zimmerhackl, L. & Koten, J. (2008). A developmental fMRI study of nonsymbolic numerical and spatial processing. *Cortex, 44(4)*, 376–385. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.003

Kaufmann, L., Wood, G., Rubinsten, O. & Henik, A. (2011). Meta-Analyses of Developmental fMRI Studies Investigating Typical and Atypical Trajectories of Number Processing and Calculation. *Developmental Neuropsychology, 36(6)*, 763–787. https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549884

Kersey, A. J. & Cantlon, J. F. (2017). Neural Tuning to Numerosity Relates to Perceptual Tuning in 3–6-Year-Old Children. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience, 37(3)*, 512–522. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0065-16.2016

Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., Gälli, M., Martin, E. & von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage, 57(3)*, 782–795. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.070

Kucian, K. & von Aster, M. (2015). Developmental dyscalculia. *European Journal of Pediatrics, 174(1)*, 1–13. https://doi.org/10.1007/s00431-014-2455-7

Kucian, K., von Aster, M., Loenneker, T., Dietrich, T. & Martin, E. (2008). Development of Neural Networks for Exact and Approximate Calculation: A fMRI Study. *Developmental Neuropsychology, 33(4)*, 447–473. https://doi.org/10.1080/87565640802101474

Kuhl, U., Sobotta, S. & Skeide, M. A. (2021). Mathematical learning deficits originate in early childhood from atypical development of a frontoparietal brain network. *PLOS Biology, 19(9)*, e3001407. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001407

Kutter, E. F., Bostroem, J., Elger, C. E., Mormann, F. & Nieder, A. (2018). Single Neurons in the Human Brain Encode Numbers. *Neuron, 100(3)*, 753–761.e4. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.08.036

Landerl, K., Vogel, S. E. & Kaufmann, L. (2017). Dyskalkulie: Modelle, Diagnostik, Intervention (3., überarb. Aufl.). Basel: Ernst Reinhardt Verlag.

LeFevre, J.-A., Bisanz, J., Daley, K. E., Buffone, L., Greenham, S. L. & Sadesky, G. S. (1996). Multiple routes to solution of single-digit multiplication problems. *Journal of Experimental Psychology: General, 125(3)*, 284–306. https://doi.org/10.1037/0096-3445.125.3.284

LeFevre, J.-A., Sadesky, G. S. & Bisanz, J. (1996). Selection of procedures in mental addition: Reassessing the problem size effect in adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 22(1)*, 216–230. https://doi.org/10.1037/0278-7393.22.1.216

Leibovich, T. & Ansari, D. (2016). The symbol-grounding problem in numerical cognition: A review of theory, evidence, and outstanding questions. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale, 70(1)*, 12–23. https://doi.org/10.1037/cep0000070

Lemaire, P. & Siegler, R. S. (1995). Four aspects of strategic change: Contributions to children’s learning of multiplication. *Journal of Experimental Psychology: General, 124(1)*, 83–97. https://doi.org/10.1037/0096-3445.124.1.83

Lyons, I. M. & Ansari, D. (2015). Numerical Order Processing in Children: From Reversing the Distance-Effect to Predicting Arithmetic. *Mind, Brain, and Education, 9(4)*, 207–221. https://doi.org/10.1111/mbe.12094

Lyons, I., Price, G. R., Vaessen, A., Blomert, L. & Ansari, D. (2014). Numerical predictors of arithmetic success in grades 1–6. *Developmental Science, 17(5)*, 714–726. https://doi.org/10.1111/desc.12152

Lyons, I., Vogel, S. E. & Ansari, D. (2016). On the ordinality of numbers: A review of neural and behavioural studies. *Progress in Brain Research, 227*, 187–221. https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.010

Matejko, A. A. & Ansari, D. (2015). Drawing connections between white matter and numerical and mathematical cognition: A literature review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 48*, 35–52. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.11.006

Matejko, A. A., Hutchison, J. E. & Ansari, D. (2019). Developmental specialization of the left intraparietal sulcus for symbolic ordinal processing. *Cortex, 114*, 41–53. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.11.027

McCaskey, U., von Aster, M., Maurer, U., Martin, E., O'Gorman Tuura, R. & Kucian, K. (2018). Longitudinal Brain Development of Numerical Skills in Typically Developing Children and Children with Developmental Dyscalculia. *Frontiers in Human Neuroscience, 11*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00629

McCaskey, U., von Aster, M., O'Gorman, R. & Kucian, K. (2020). Persistent Differences in Brain Structure in Developmental Dyscalculia: A Longitudinal Morphometry Study. *Frontiers in Human Neuroscience, 14*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00272

Menon, V., Rivera, S. M., White, C. D., Glover, G. H. & Reiss, A. L. (2000). Dissociating Prefrontal and Parietal Cortex Activation during Arithmetic Processing. *NeuroImage, 12(4)*, 357–365. https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0613

Menon, V. (2014). Arithmetic in the Child and Adult Brain. Cohen Kadosh, R. & Dowker, A. (Hrsg.), The Oxford Handbook of Mathematical Cognition (S. 502–530). New York: Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.041

Merkley, R. & Ansari, D. (2016). Why numerical symbols count in the development of mathematical skills: evidence from brain and behavior. *Current Opinion in Behavioral Sciences, 10*, 14–20. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.006

Michels, L., O'Gorman, R. & Kucian, K. (2018). Functional hyperconnectivity vanishes in children with developmental dyscalculia after numerical intervention. *Developmental Cognitive Neuroscience, 30*, 291–303. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.03.005

Molko, N., Cachia, A., Rivière, D., Mangin, J.-F., Bruandet, M., Le Bihan, D., Cohen, L. & Dehaene, S. (2003). Functional and Structural Alterations of the Intraparietal Sulcus in a Developmental Dyscalculia of Genetic Origin. *Neuron, 40(4)*, 847–858. https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00670-6

Moreau, D., Wiebels, K., Wilson, A. J. & Waldie, K. E. (2019). Volumetric and surface characteristics of gray matter in adult dyslexia and dyscalculia. *Neuropsychologia, 127*, 204–210. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.02.002

Moyer, R. S. & Landauer, T. K. (1967). Time required for Judgements of Numerical Inequality. *Nature, 215(5109)*, 1519–1520. https://doi.org/10.1038/2151519a0

Mussolin, C., Mejias, S. & Noël, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition, 115(1)*, 10–25. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.006

Naccache, L. (2001). The Priming Method: Imaging Unconscious Repetition Priming Reveals an Abstract Representation of Number in the Parietal Lobes. *Cerebral Cortex, 11(10)*, 966–974. https://doi.org/10.1093/cercor/11.10.966

Nieder, A. & Miller, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 101(19)*, 7457–7462. https://doi.org/10.1073/pnas.0402239101

Nieder, A. (2005). Counting on neurons: the neurobiology of numerical competence. *Nature Reviews Neuroscience, 6(3)*, 177–190. https://doi.org/10.1038/nrn1626

Nieder, A. & Dehaene, S. (2009). Representation of Number in the Brain. *Annual Review of Neuroscience, 32(1)*, 185–208. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.051508.135550

Núñez, R. E. (2017a). Is There Really an Evolved Capacity for Number? *Trends in Cognitive Sciences, 21(6)*, 409–424. https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.03.005

Núñez, R. E. (2017b). Number – Biological Enculturation Beyond Natural Selection. *Trends in Cognitive Sciences, 21(6)*, 404–405. https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.03.013

Oakes, L. M., Ross-Sheehy, S. & Luck, S. J. (2006). Rapid Development of Feature Binding in Visual Short-Term Memory. *Psychological Science, 17(9)*, 781–787. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01782.x

OECD. (2016). Skills Matter: Further Results from the Survey of Adult Skills. (OECD Skills Studies). OECD. https://doi.org/10.1787/9789264258051-en

Park, J., Li, R. & Brannon, E. M. (2014). Neural connectivity patterns underlying symbolic number processing indicate mathematical achievement in children. *Developmental Science, 17(2)*, 187–202. https://doi.org/10.1111/desc.12114

Parsons, S. & Bynner, J. (2005). Does numeracy matter more? National Research and Development Centre for adult literacy and numeracy. www.ioe.ac.uk/bedfordgroup

Pascual-Leone, J. (1995). Learning and Development as Dialectical Factors in Cognitive Growth. *Human Development, 38(6)*, 338–348. https://doi.org/10.1159/000278340

Pascual-Leone, J., Pascual-Leone, A. & Arsalidou, M. (2015). Neuropsychology still needs to model organismic processes "from within." *Behavioral and Brain Sciences, 38*, e83. https://doi.org/10.1017/S0140525X14000983

Peters, L. & De Smedt, B. (2018). Arithmetic in the developing brain: A review of brain imaging studies. *Developmental Cognitive Neuroscience, 30*, 265–279. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.05.002

Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences, 14(12)*, 542–551. https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.008

Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D. & Dehaene, S. (2004). Tuning Curves for Approximate Numerosity in the Human Intraparietal Sulcus. *Neuron, 44(3)*, 547–555. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014

Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D. & Dehaene, S. (2007). A Magnitude Code Common to Numerosities and Number Symbols in Human Intraparietal Cortex. *Neuron, 53(2)*, 293–305. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022

Polspoel, B., De Visscher, A., Vandermosten, M., Vogel, S. E., Grabner, R. H. & De Smedt, B. (2019). The neural substrates of the problem size and interference effect in children's multiplication: An fMRI study. *Brain Research, 1714*, 147–157. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2019.03.002

Polspoel, B., Peters, L., Vandermosten, M. & De Smedt, B. (2017). Strategy over operation: neural activation in subtraction and multiplication during fact retrieval and procedural strategy use in children. *Human Brain Mapping, 38(9)*, 4657–4670. https://doi.org/10.1002/hbm.23691

Polspoel, B., Vandermosten, M. & De Smedt, B. (2019). Relating individual differences in white matter pathways to children's arithmetic fluency: a spherical deconvolution study. *Brain Structure and Function, 224(1)*, 337–350. https://doi.org/10.1007/s00429-018-1770-6

Prado, J., Lu, J., Liu, L., Dong, Q., Zhou, X. & Booth, J. R. (2013). The neural bases of the multiplication problem-size effect across countries. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00189

Prado, J., Mutreja, R. & Booth, J. R. (2014). Developmental dissociation in the neural responses to simple multiplication and subtraction problems. *Developmental Science, 17(4)*, 537–552. https://doi.org/10.1111/desc.12140

Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M. & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology, 17(24)*, R1042–R1043. https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.10.013

Price, G. R., Palmer, D., Battista, C. & Ansari, D. (2012). Nonsymbolic numerical magnitude comparison: Reliability and validity of different task variants and outcome measures, and their relationship to arithmetic achievement in adults. *Acta Psychologica, 140(1)*, 50–57. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.02.008

Reid, K. (2009). The National Behaviour and Attendance Review in Wales. *Research in Education, 81(1)*, 20–42. https://doi.org/10.7227/RIE.81.3

Reynvoet, B. & Sasanguie, D. (2016). The Symbol Grounding Problem Revisited: A Thorough Evaluation of the ANS Mapping Account and the Proposal of an Alternative Account Based on Symbol–Symbol Associations. *Frontiers in Psychology, 7*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01581

Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A. & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex, 15(11)*, 1779–1790. https://doi.org/10.1093/cercor/bhi055

Rousselle, L. & Noël, M. P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: A comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing, *Cognition, 102(3)*, 361-395. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.01.005

Saga, M., Rkhaila, A., Ounine, K. & Oubaha, D. (2021). Developmental dyscalculia: the progress of cognitive modeling in the field of numerical cognition deficits for children. *Applied Neuropsychology: Child*, 1–11. https://doi.org/10.1080/21622965.2021.1955679

Santens, S., Roggeman, C., Fias, W. & Verguts, T. (2010). Number Processing Pathways in Human Parietal Cortex. *Cerebral Cortex, 20(1)*, 77–88. https://doi.org/10.1093/cercor/bhp080

Sarnecka, B. W. & Carey, S. (2008). How counting represents number: What children must learn and when they learn it. *Cognition, 108(3)*, 662–674. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.05.007

Sasanguie, D., Lyons, I. M., De Smedt, B. & Reynvoet, B. (2017). Unpacking symbolic number comparison and its relation with arithmetic in adults. *Cognition, 165*, 26–38. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.04.007

Schillinger, F. L., Vogel, S. E., Diedrich, J. & Grabner, R. H. (2018). Math anxiety, intelligence, and performance in mathematics: Insights from the German adaptation of the Abbreviated Math Anxiety Scale (AMAS-G). *Learning and Individual Differences, 61*, 109–119. https://doi.org/10.1016/j.lindif.2017.11.014

Shum, J., Hermes, D., Foster, B. L., Dastjerdi, M., Rangarajan, V., Winawer, J., Miller, K. J. & Parvizi, J. (2013). A Brain Area for Visual Numerals. *Journal of Neuroscience, 33(16)*, 6709–6715. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4558-12.2013

Siegler, R. S. (1996). *Emerging minds: The process of change in children's thinking.* New York: Oxford University Press.

Sokolowski, H. M., Fias, W., Mousa, A. & Ansari, D. (2017). Common and distinct brain regions in both parietal and frontal cortex support symbolic and nonsymbolic number processing in humans: A functional neuroimaging meta-analysis. *NeuroImage, 146*, 376–394. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.10.028

Sommerauer, G., Graß, K.-H., Grabner, R. H. & Vogel, S. E. (2020). The semantic control network mediates the relationship between symbolic numerical order processing and arithmetic performance in children. *Neuropsychologia, 141*, 107405. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107405

Stanescu-Cosson, R., Pinel, P., van de Moortele, P.-F., Le Bihan, D., Cohen, L. & Dehaene, S. (2000). Understanding dissociations in dyscalculia. *Brain, 123(11)*, 2240–2255. https://doi.org/10.1093/brain/123.11.2240

Stazyk, E. H., Ashcraft, M. H. & Hamann, M. S. (1982). A network approach to mental multiplication. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 8(4)*, 320–335. https://doi.org/10.1037/0278-7393.8.4.320

Suanda, S. H., Tompson, W. & Brannon, E. M. (2008). Changes in the Ability to Detect Ordinal Numerical Relationships Between 9 and 11 Months of Age. *Infancy, 13(4)*, 308–337. https://doi.org/10.1080/15250000802188800

Susperreguy, M. I., Di Lonardo Burr, S., Xu, C., Douglas, H. & LeFevre, J. (2020). Children's Home Numeracy Environment Predicts Growth of their Early Mathematical Skills in Kindergarten. *Child Development, 91(5)*, 1663–1680. https://doi.org/10.1111/cdev.13353

Tschentscher, N. & Hauk, O. (2014). How are things adding up? Neural differences between arithmetic operations are due to general problem solving strategies. *NeuroImage, 92*, 369–380. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.01.061

Tudusciuc, O. & Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(36)*, 14513–14518. https://doi.org/10.1073/pnas.0705495104

Üstün, S., Ayyıldız, N., Kale, E. H., Mançe Çalışır, Ö., Uran, P., Öner, Ö., Olkun, S. & Çiçek, M. (2021). Children With Dyscalculia Show Hippocampal Hyperactivity During Symbolic Number Perception. *Frontiers in Human Neuroscience, 15*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.687476

Vatansever, G., Üstün, S., Ayyıldız, N. & Çiçek, M. (2020). Developmental alterations of the numerical processing networks in the brain. *Brain and Cognition, 141*, 105551. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2020.105551

Vogel, S. E. & De Smedt, B. (2021). Developmental brain dynamics of numerical and arithmetic abilities. *Npj Science of Learning, 6(1)*, 1–11. https://doi.org/10.1038/s41539-021-00099-3

Vogel, S. E., Faulkenberry, T. J. & Grabner, R. H. (2021). Quantitative and Qualitative Differences in the Canonical and the Reverse Distance Effect and Their Selective Association With Arithmetic and Mathematical Competencies. *Frontiers in Education, 6*. https://doi.org/10.3389/feduc.2021.655747

Vogel, S. E., Goffin, C. & Ansari, D. (2015). Developmental specialization of the left parietal cortex for the semantic representation of Arabic numerals: An fMR-adaptation study. *Developmental Cognitive Neuroscience, 12*, 61–73. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.12.001

Vogel, S. E., Goffin, C., Bohnenberger, J., Koschutnig, K., Reishofer, G., Grabner, R. H. & Ansari, D. (2017). The left intraparietal sulcus adapts to symbolic number in both the visual and auditory modalities: Evidence from fMRI. *NeuroImage, 153*, 16–27. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.03.048

Vogel, S. E. & Grabner, R. H. (2015). Facets of the Mathematical Brain – From Number Processing to Mathematical Problem Solving. *Mind, Brain, and Education, 9(4)*, 187–189. https://doi.org/10.1111/mbe.12092

Vogel, S. E., Haigh, T., Sommerauer, G., Spindler, M., Brunner, C., Lyons, I. M. & Grabner, R. H. (2017). Processing the order of symbolic numbers: A reliable and unique predictor of arithmetic fluency. *Journal of Numerical Cognition, 3(2)*, 288–308. https://doi.org/10.5964/jnc.v3i2.55

Vogel, S. E., Koren, N., Falb, S., Haselwander, M., Spradley, A., Schadenbauer, P., Tanzmeister, S. & Grabner, R. H. (2019). Automatic and intentional processing of numerical order and its relationship to arithmetic performance. *Acta Psychologica, 193*, 30–41. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.12.001

Vuokko, E., Niemivirta, M. & Helenius, P. (2013). Cortical activation patterns during subitizing and counting. *Brain Research, 1497*, 40–52. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.12.019

WHO. (2019). *International classification of diseases related health problems* (11th ed.). https://icd.who.int/

Wilkey, E. D. & Ansari, D. (2020). Challenging the neurobiological link between number sense and symbolic numerical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1464(1)*, 76–98. https://doi.org/10.1111/nyas.14225

Wilkey, E. D., Barone, J. C., Mazzocco, M. M. M., Vogel, S. E. & Price, G. R. (2017). The effect of visual parameters on neural activation during nonsymbolic number comparison and its relation to math competency. *NeuroImage, 159*, 430–442. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.08.023

Wu, S. S., Barth, M., Amin, H., Malcarne, V. & Menon, V. (2012). Math anxiety in second and third graders and its relation to mathematics achievement. *Frontiers in Psychology, 3*, 1–11. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00162

Wynn, K. (1990). Children's understanding of counting. *Cognition, 36(2)*, 155–193. https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90003-3

Xu, F. & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition, 74(1)*, B1–B11. https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9

Yeo, D. J, Wilkey, E. D. & Price, G. R. (2017). The search for the number form area: A functional neuroimaging meta-analysis, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 78,* 145-160. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.027

Zacharopoulos, G., Sella, F. & Cohen Kadosh, R. (2021). The impact of a lack of mathematical education on brain development and future attainment. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(24)*. https://doi.org/10.1073/pnas.2013155118

Zhou, X., Chen, C., Zang, Y., Dong, Q., Chen, C., Qiao, S. & Gong, Q. (2007). Dissociated brain organization for single-digit addition and multiplication. *NeuroImage, 35(2)*, 871–880. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.12.017

Abbildungsverzeichnis:

Judith Scheucher,

M.Sc., Arbeitsbereich Begabungsforschung, Institut für Psychologie, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz, Österreich

Nikolaus Koren,

M.Sc., Arbeitsbereich Begabungsforschung, Institut für Psychologie, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz, Österreich

Stephan E. Vogel

Mag.rer.nat, PhD., Assoz.-Prof., Arbeitsbereich Begabungsforschung, Institut für Psychologie, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz, Österreich