

Die Entwicklung des Rechnens und dessen Störungen: Genese, Modelle, Diagnostik und Intervention

Liane Kaufmann

Medizinische Universität Innsbruck, Klinische Abteilung für Allgemeine Pädiatrie, Österreich

Hans-Christoph Nuerk

Universität Salzburg, Fachbereich Psychologie, Abteilung für Psychologische Diagnostik und Neuropsychologie, Österreich und RWTH Aachen, Abteilung Neurologie, LFG Neuropsychologie, Deutschland

Abstract

Dyskalkulie (umschriebene Rechenstörung) wurde bis vor wenigen Jahren noch kaum als Teilleistungsstörung beschrieben. In den letzten 5 Jahren scheint Dyskalkulie als Störung in Mode zu kommen und Dyskalkulie-Therapie wird verstärkt nachgefragt und angeboten. Im Gegensatz zur Legasthenie ist die Forschung zur Dyskalkulie aber noch sehr jung und der Stand des Wissens verändert sich rasant. In diesem Artikel wird zunächst beschrieben, was wir 2006 über das Syndrom und seine neurokognitiven Grundlagen wissen, wie wir es modelltheoretisch beschreiben können, wie man es diagnostizieren kann und worauf man bei Interventionen achten muss.

Schlüsselwörter: Dyskalkulie, Rechnen, Zahlen, Diagnostik, Intervention, Modelle, Größenrepräsentation, Prozeduren

Rechenstörungen (Dyskalkulie) sind etwa so häufig wie Lese-Rechtschreib-Störungen (Legasthenie). In internationalen (Prävalenz-) Studien haben drei bis sieben Prozent der Grundschüler klinisch relevante Schwierigkeiten im Umgang mit Zahlen (Shalev et al., 2001). Längsschnittstudien zeigten, dass bei vielen Kindern die Rechenprobleme über längere Zeit persistieren und häufig mit emotionalen Problemen und Verhaltensstörungen einhergehen (Geary, 1993; Shalev et al., 2001, 2005).

Sowohl das wissenschaftliche als auch das öffentliche Interesse an Dyskalkulie ist jedoch noch relativ jung und erst in den letzten 5 Jahren angewachsen. Demgemäß sind die Forschungserkenntnisse in Bezug auf Dyskalkulie sehr viel spärlicher als jene zur Legasthenie. So ergibt eine aktuelle Suche im Februar 2006 in der internationalen Datenbank PsycInfo mehr als 20 Mal so viele Artikel zu Legasthenie (Englisch „dyslexia“: 5047 Artikel) als zu Dyskalkulie (Englisch. „dyscalculia“: 229 Artikel).

Dyskalkulie (Rechenstörung):

Definition, Komorbiditäten und Ätiologien

Gemäß internationaler Diagnosestandards wie beispielsweise dem ICD-10 (International Classification of Diseases) ist die **Diagnose** einer umschriebenen Rechenstörung dann gerechtfertigt, wenn ein Kind bei standardisierten Rechentests, guten allgemeinen intellektuellen Leistungen und entsprechender Schulausbildung unter seiner/ihrer jeweiligen Klassenstufennorm abschneidet. Man spricht hier von einer so genannten *Diskrepanzdiagnose*.

Bei diesen per Definition „umschriebenen“ Rechenstörungen handelt es sich um isolierte neurokognitive Defizite. In der klinischen/pädagogischen/psychologischen Praxis wird man Rechenstörungen jedoch meist als Begleitsymptom von neuropädiatrischen und neuropsychiatrischen Erkrankungen antreffen. So sind Rechenstörungen sehr häufig mit speziellen genetischen Syndromen (fragiles X Syndrom, Turner Syndrom, Williams Syndrom, Velokardiofaziales Syndrom) und

neuropädiatrischen Erkrankungen (Epilepsie, Frühgeburtlichkeit, Stoffwechselstörungen, Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung [ADHD] etc.) assoziiert. Auch frühe Störungen der allgemeinen Entwicklung von Sprache, Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis, und visuell-räumlichen Fähigkeiten können zu Rechenstörungen führen.

In Bezug auf die **Komorbiditäten** ist jene mit Aufmerksamkeitsstörungen von besonderem Interesse. In einer israelitischen Kohortenstudie von 10 bis 11-jährigen Kinder erhielten 6,5 % von insgesamt 3029 Kindern die Diagnose Dyskalkulie (Shalev & Gross-Tsur, 2001). Von diesen wiederum manifestierte sich bei 26 % zusätzlich eine ADHD und bei 17 % eine Lese-Rechtschreib-Störung. Die Berücksichtigung möglicher Komorbiditäten ist nicht nur in Hinblick auf die (Differential) Diagnostik und Interventionsplanung, sondern auch hinsichtlich der Persistenz von Rechenstörungen (Shalev et al., 2005) essentiell.

In Bezug auf die **Ätiologien** (Ursachen) von Rechenstörungen sei eines vorweg festgestellt: „das Rechnen“ gibt es nicht. Die Fähigkeiten, die wir zum Umgang mit Zahlen brauchen, sind vielschichtig und in verschiedenen Teilen unseres Gehirns lokalisiert. Die numerisch/rechnerischen Fertigkeiten und ihre Vorläuferfertigkeiten entwickeln sich lange vor Schuleintritt. Bereits wenige Monate alte Babys können Mengen nach ihrer kardinalen Größe diskriminieren und zeigen sogar additive und subtraktive Erwartungshaltungen (Wynn, 1992). Im Alter von neun Monaten zeigen Babys ein Verständnis für Ordinalität (Brannon, 2002). Letztere Erkenntnisse und die Ergebnisse von Tierversuchen werden von einigen Forschern als Hinweis dafür angesehen, dass es eine angeborene numerisch/quantitative Kompetenz gibt (für einen Überblick, siehe Kaufmann & Nuerk, 2005). Diese Annahme einer generellen genetischen Prädisposition für numerisch/rechnerische Kompetenzen wird jedoch kontrovers diskutiert.

Übereinstimmung herrscht jedoch darüber, dass die Entwicklung guter Rechenfertigkeiten auf dem Zusammenspiel von intakten biologischen Voraussetzungen und einer för-

dernden sozialen Umwelt beruhen (Reusser, 2000; Schoenfeld, 1991; Stern, 2005). Auch unzureichende und/oder qualitativ schlechte Lehr- und Lernumwelten haben einen wesentlichen Beitrag an den häufig beobachtbaren Lernschwierigkeiten in Mathematik (Reusser, 2000).

Lernschwierigkeiten und/oder schlechte Performanz scheinen sich wiederum negativ auf die Motivation und Einstellung bezüglich des Rechnens und/oder des Mathematikunterrichts sowie auf das Selbstkonzept bezüglich der eigenen Leistungsfähigkeit in Mathematik auszuwirken (z.B. Reusser, 2000). Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass sich Angst vor Mathematik – und dem Umgang mit Zahlen – negativ auf die Rechenleistungen auswirkt (Ashcraft & Kirk, 2001). Auch die Ergebnisse unserer eigenen Arbeitsgruppe bestätigen diesen Zusammenhang zwischen Rechenleistung und Rechenangst (Krinzinger et al., in Vorbereitung). So weisen unsere Daten von über 800 vier- bis achtjährigen Kindern ohne Dyskalkulie darauf hin, dass mit zunehmendem Alter und zunehmender Beschulungsdauer der Zusammenhang zwischen Mathematikangst und der Leistung in einem Rechentest zunimmt. Kinder, die in der dritten Klasse schlecht im Rechnen sind, haben auch größere Angst vor Mathematik bzw. Kinder mit größerer Mathematikangst schneiden in einem Rechentest auch schlechter ab.

Subtypisierung von Dyskalkulie (Modularitätsannahme)

In der neuropsychologischen Literatur kann man in Hinblick auf die Dyskalkulie-Definition prinzipiell zwischen zwei konzeptuellen Richtungen unterscheiden. Während einige Autoren postulieren, dass die Diagnose einer Dyskalkulie dann gerechtfertigt ist, wenn die basis-numerischen Fähigkeiten – sprich Numerosität – defizitär sind (z.B. Butterworth, 2005), argumentieren andere, dass es verschiedene Dyskalkulie-Subtypen gibt und eine Rechenstörung auch bei intakten basis-numerischen Fähigkeiten vorliegen kann (Dowker, 2005; Geary, 1993, 2000; Kaufmann, 2002; von Aster, 2000). Dyskalkulien sind demnach kein einheitliches Syndrom,

sondern können im Gegenteil mit sehr unterschiedlichen numerisch/rechnerischen Leistungsprofilen einhergehen (Geary, 1993; Kosci, 1974; von Aster, 2000). Insbesondere (entwicklungs-)neuropsychologische Theorien der Dyskalkulie postulieren die funktionelle Unabhängigkeit der am Rechenprozess beteiligten kognitiven Systeme (siehe Einleitung). Temple (1991) zeigte erstmals, dass auch bei Kindern – also während der Erwerbsphase – eine doppelte Dissoziation zwischen arithmetischem Faktenwissen (wie $6+2$, $6-2$, 6×2) und prozeduralem Wissen (Wissen um das Ausführen von Lösungsalgorithmen) vorliegen kann.

Viele Diagnostikinstrumente sind nicht für die Identifikation von Dyskalkulie-Subtypen oder für die Früherkennung von Rechenschwächen im Kindergartenalter geeignet. Diese Lücke soll der 2006 erscheinende Rechentest TEDI-MATH (Nuerk et al.) füllen, welcher für 4- bis 8-jährige Kinder konzipiert wurde und auf einer modularen neuropsychologischen Theorie der Zahlenverarbeitung und des Rechnens basiert. Allerdings gibt es schon multikomponentielle Rechentests wie den ZAREKI (Von Aster, 2001) oder den RZD 2-6 (Jacobs & Petermann, 2005) für Kinder im Grundschulalter. Multikomponentielle Rechentests sind aber in der Diagnostik zu unterscheiden von eher curricular orientierten Tests wie der DEMAT-Serie (z. B. DEMAT 1+, Krajewski, Küspert, & Schneider, 2002), deren Ziel es ist, zu überprüfen, inwieweit Kinder das durchschnittliche curriculare Niveau in Deutschland erreichen. Letztere Tests sind wichtig, deren Ziel unterscheidet sich jedoch vom Ziel multikomponentieller Rechentests, die Aufschluss darüber geben möchten, welche (basis-)numerischen Fertigkeiten und neurokognitiven Komponenten bei einem Kind mit Rechenstörung möglicherweise gestört sind.

Welche numerisch-rechnerische Fertigkeiten sind eher genetisch prädisponiert und welche eher kulturspezifisch beeinflusst?

Geary (2000) differenziert die numerisch/rechnerischen Komponenten in biologisch

determinierte (universelle) quantitative Fähigkeiten einerseits und in biologisch sekundäre (schulisch erworbene) numerisch/rechnerische Fertigkeiten andererseits. Zu den ersteren („biologically primary quantitative abilities“) werden gemäß letzterem Autor Numerosität, Ordinalität, Zählen und einfache Arithmetik subsumiert, zu den letzteren („biologically secondary number, counting, and arithmetic competencies“) das Zählsystem/Transkodieren, die komplexe Arithmetik, sowie arithmetische Textaufgaben. Diese Differenzierung impliziert, dass es eine genetisch determinierte Komponente der Zahlenverarbeitung gibt (siehe auch Butterworth, 2005; Dehaene, 1992).

Ein alternativer Ansatz postuliert, dass numerisch/rechnerische Fertigkeiten kulturspezifisch sind. Demnach zeigen die Ergebnisse der bisherigen neurofunktionellen und behavioralen Human- und Tierexperimente nicht notwendigerweise, dass die Vorläuferfertigkeiten von Arithmetik ausschließlich biologischer domänenspezifischer Natur sind (Ansari & Karmiloff-Smith, 2002; Bryant & Squire, 2001; Mix et al., 2002). Bei den meisten dieser Studien ist die numerische (diskrete) Menge mit Masse (kontinuierlicher Menge) konfundiert. So argumentieren beispielsweise Clearfield & Mix (1999), dass Stimuluseigenschaften wie Länge, Densität, Luminosität etc. im Alltag immer mit numerischer Menge korrelieren (siehe auch Mix et al., 2002; Tan & Bryant, 2002). Letztere Autoren konnten auch zeigen, dass sich nach Kontrolle dieser potentiell konfundierenden Stimuluseigenschaften das Mengendiskriminationsverhalten von Babys drastisch verschlechterte. Im Laufe ihrer Entwicklung müssen Kinder erst mühevoll lernen, die (kontinuierlich) räumliche von der (diskret) numerischen Information zu trennen (Bryant & Squire, 2001): 5 und 2 Smarties unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer numerischen Menge, sondern auch – und vordergründig – hinsichtlich der kontinuierlichen (Raum) Menge. Potenzielle nicht-domänenspezifische (nicht-numerische) Vorläuferfertigkeiten sind sprachliche Fähigkeiten (Gelman & Butterworth, 2005), visuell-räumliche Fähigkeiten (Bryant & Squire, 2001; Rourke

& Strang, 1983) und Exekutivfunktionen (Arbeitsgedächtnis: Ashcraft, 1995; Kaufmann, 2002).

Anatomische Korrelate der Zahlenverarbeitung und des Rechnens: was wir alles noch nicht darüber wissen

Das einflussreichste anatomo-funktionelle Modell der Zahlenverarbeitung und des Rechnens ist das so genannte Triple-Code Modell (Dehaene, 1992; Dehaene & Cohen, 1995), welches folgende drei Module differenziert:

- a) „auditory verbal word frame“ (sprachlich alphabetisches Modul),
- b) „visual arabic number form“ (visuell-arabisches Modul), und
- c) „analog magnitude representation“ (analoge-semantische Größenrepräsentation).

Eine weitere Differenzierung nehmen Dehaene und Kollegen (2003) in einer neueren Meta-Analyse vor, in welcher die Existenz von drei distinkten neurofunktionellen Netzwerken innerhalb der analogen Größenrepräsentation postuliert wird:

- a) das horizontale Segment des intraparietalen Sulcus (IPS) moduliert die Mengen-/Größenverarbeitung per se;
- b) der posteriore superiore parietale Sulcus (PSPL) moduliert die räumliche und aufmerksamkeitsbezogene Aufmerksamkeit am mentalen Zahlenstrahl; und
- c) der Gyrus angularis (sowie angrenzende perisylvische Strukturen) wird bei sprachabhängigen numerisch/rechnerischen Prozessen wie dem verbalen Zählen, dem Faktenabruf etc. aktiviert.

Andererseits ist auch hervorzuheben, dass parietale (und insbesondere IPS) Aktivierungen nicht mengen-/zahlenspezifisch sind, sondern auch bei der Informationsverarbeitung bezüglich Zeit und Aufmerksamkeit und Greifmotorik eine wichtige Rolle spielen (für eine Übersicht, siehe z.B. Kaufmann & Nuerk, 2005). Jüngst haben Dehaene und Kollegen ihr Modell deshalb abermals differenziert, indem sie Befunde von bildgebenden Verfahren bei Humanexperimenten mit Befunden aus Affenexperimenten (z.B. Einzelzelleableitungen) integrierten. Demnach ist vor allem um den ventralen IPS

die generische Größenrepräsentation verortet, während Regionen am anterioren IPS für das Greifen zuständig sind und Regionen am posterioren IPS für die Steuerung von Sakkaden mitverantwortlich sind (Hubbard et al., 2005). Die neuronalen Netzwerke der Zahlenverarbeitung und des Rechnens umfassen zusätzlich aber auch präfrontale (dorsolateraler präfrontaler Kortex) und subkortikale Regionen (Basalganglien).

Im Entwicklungsbereich scheint der Zusammenhang zwischen Mengen-/Zahlenverarbeitung und Parietallappen (IPS) jedoch weniger eindeutig zu sein. So reflektieren die Resultate einer funktionellen Magnet-Resonanz-Tomographie (fMRT)-Studie von Rivera et al. (2005) einen altersabhängigen Zusammenhang zwischen parietalen Aktivierungen und Rechenfertigkeiten: über die Altersspanne von 8 bis 19 Jahren nahmen die parietalen Aktivierungen beim Lösen von Additionen und Subtraktionen signifikant zu, die Aktivierungen in präfrontalen Arealen und hippocampalen Strukturen sowie Basalganglien jedoch ab. Letztere Aktivierungen, welche bei den jüngeren Probanden, nicht jedoch den älteren, das Signifikanzniveau erreichten, interpretierten die Autoren als aufmerksamkeitsbezogene sowie gedächtnisabhängige Prozesse. D.h. mit zunehmendem Alter scheint eine zunehmende Spezialisierung der (parietalen) Regionen für das Rechnen stattzufinden. Ist diese Spezialisierung zum Beispiel bei jüngeren Kindern nur in geringerem Ausmaß vorhanden, brauchen diese mehr unspezifische kognitive Prozesse (Aufmerksamkeit, Gedächtnis, exekutive Funktionen), um die Aufgaben erfolgreich zu lösen. Geht man von der Hypothese aus, dass bei bestimmten dyskalkulischen Kindern diese Spezialisierung auch ungenügend ausgebildet ist, würde dieser Befund erklären, warum diese Kinder speziell bei komplexeren Aufgaben kaum zu richtigen Lösungen kommen. Die fehlende parietale Spezialisierung ist bei einfacheren Aufgaben noch durch erhöhten kognitiven Aufwand und Anstrengung kompensierbar. Bei komplexeren Aufgaben, die auch bei guten Rechnern schon erhöhten kognitiven Aufwand verlangen, reichen dann

jedoch die kognitiven Ressourcen nicht mehr aus und die Kompensationsstrategien brechen zusammen. Von besonderem Interesse ist noch, dass die Zunahme der funktionellen Aktivierung in parietalen Regionen nicht durch strukturell-morphologische Veränderungen erklärbar ist (Densität der grauen Substanz).

Auch eine neuere fMRT-Studie mit dem so genannten numerischen Stroop-Paradigma (welche Zahl ist numerisch größer? 2 oder 9) deutet darauf hin, dass sich die Art und Weise, wie jüngere Kinder Aufgaben lösen, von der von Erwachsenen unterscheiden kann, da die zugrunde liegenden zerebralen Aktivierungsmuster bei Erwachsenen und Kindern nicht vergleichbar sind (Kaufmann et al., in press): Relativ zu Erwachsenen wurden IPS-Aktivierungen als Korrelat des Distanzeffekts (neutrale Stimuluspaare ohne Interferenz der irrelevanten Stimuluseigenschaft: 2 9) bei Kindern weniger konsistent gefunden als bei Erwachsenen; bei Kindern wurden vor allem präfrontale – und cerebelläre – Aktivierungen beobachtet. Wichtig ist, dass die Verhaltensdaten (Bearbeitungsgenauigkeit und -geschwindigkeit) sowohl bei Kindern als auch Erwachsenen einen robusten Distanzeffekt reflektierten, die Hirnaktivierungsmuster der beiden Altersgruppen jedoch sehr unterschiedlich waren. Die gleiche Aufgabe kann also vom Gehirn auf sehr unterschiedliche Weise gelöst werden, ohne dass das in den Verhaltensdaten erkennbar ist.

Für Dyskalkulie bedeutet das: Möglicherweise schaffen es dyskalkulische Kinder nach Training und Übung eine Aufgabe zu lösen, aber sie tun das auf eine Weise, die für ihre zukünftige Rechenentwicklung dysfunktional ist. Beispielsweise mag ein Kind in den ersten Klassen einfach alle einstelligen Additionen und Subtraktionen als Faktenwissen auswendig lernen und in Mathematik unauffällig und gut sein. Hat es aber das notwendige Prozedurenwissen und die notwendige Größenrepräsentation bei diesen einfachen Aufgaben nicht aktiviert, versagt es später im Zahlenraum bis 100 oder 1000, weil es irgendwann einfach zu viele Aufgabenkombinationen zum Auswendiglernen gibt.

Implikationen für edukative und therapeutische Ansätze zur Förderung der numerisch/rechnerischen Fähigkeiten

Bei allen Bemühungen um eine adäquate Definition, Klassifikation und Subtypisierung von Dyskalkulie muss hervorgehoben werden, dass der Entwicklungsverlauf der Zahlenverarbeitung und des Rechnens sehr variabel ist. Individuelle Unterschiede hinsichtlich numerisch/rechnerischer Fertigkeiten manifestieren sich sowohl bei Verhaltensstudien (z.B. Lösen einfacher Additionen: Kinder: Siegler, 1987; Erwachsene: LeFevre & Kulak, 1994) als auch bei Bildgebungsstudien (z.B., Kaufmann et al., in press; Rivera et al., 2005) und zeigten sich hinsichtlich der unterschiedlichsten Komponenten der Zahlenverarbeitung und des Rechnens (Dowker, 2005). Ausgehend von Einzelfall- und Gruppenstudien (im Entwicklungs- und Erwachsenenbereich), erläutert letztere Autorin die Wichtigkeit dieser individuellen Unterschiede sowohl in Hinblick auf die diagnostischen Klassifikationsbemühungen von Dyskalkulie als auch in Hinblick auf die Entwicklung und Evaluation von effektiven Interventionsprogrammen. Eine effiziente Dyskalkulie-Therapie erfordert vorab eine genaue und detaillierte Identifikation der Problembereiche – sprich Diagnostik – und zwar sowohl bezüglich des implizit quantitativen und konzeptuellen Wissens (meist nicht oder in unzureichendem Ausmaße im Lehrplan zu finden) als auch hinsichtlich des expliziten rechnerischen Wissens (Inhalte des Mathematik Lehrplans). Ausgehend von einer solchen „funktionalen Diagnostik“ können dann Fördermaßnahmen geplant werden (siehe auch Griffin et al., 1994; Wright et al., 2002). Numerische Interventionen sind dann erfolgreich, wenn sie „maßgeschneidert“ sind und zusätzlich zu den rechnerischen Fertigkeiten (Fakten und Prozeduren) auch das (implizite) numerische Basiswissen sowie das konzeptuelle Wissen explizit fördern (Dowker, 2001; Griffin et al., 1994; Kaufmann et al., 2003; Wright et al., 2002). Die Effektivität der Interventionsansätze (wie auch der pädagogischen Maßnahmen) wird weiters von Faktoren wie ökologischer Validität (Reusser, 2000; Schoenfeld, 1991), Lehrstil (Baroody,

2003) sowie emotionalen Faktoren (Ashcraft & Kirk, 2001; Hembree, 1990; Dowker, 2005) moduliert. Zusammengefasst erfordert eine effiziente Dyskalkulie-Therapie also

- a) Störungswissen um die Ätiologie und Genese von Dyskalkulie,
- b) Kenntnis möglichst multikomponentieller Diagnoseinstrumente,
- c) die Fähigkeit zur individuellen, adaptierten Intervention, die an den jeweiligen Schwächen oder dysfunktionalen Strategien eines Kindes ansetzt sowie
- d) die Behandlung potentieller sozio-emotionaler Begleitfaktoren (Rechenangst).

Je nach Schwäche kann das beispielsweise Übung und Drill sein (z.B. Faktenwissen: kleines 1×1) oder auch das Erlernen und Verstehen von Prozeduren oder mathematischen Konzepten (z.B. Übertrag im arabischen Platz x Wert-System bei Additionen wie $16 + 27$).

Korrespondenzadresse

Dr. Liane Kaufmann

liane.kaufmann@uklibk.ac.at

Referenzen

- Ansari, D., & Karmiloff-Smith, A. (2002). Atypical trajectories of number development: a neuroconstructivist perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(12), 511-516.
- Ashcraft, M.H., & Kirk, E.P. (2001). The Relationship among Working Memory, Math Anxiety, and Performance. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 224-237.
- Ashcraft, M.H. (1995). Cognitive psychology and simple arithmetic: A review and summary of new directions. *Mathematical Cognition*, 1, 3-34.
- Baroody, A.J. (2003). The development of adaptive expertise and flexibility: the integration of conceptual and procedural knowledge. In: J. Baroody & A. Dowker (Eds.), *The development of arithmetic concepts and skills: Constructing adaptive expertise* (pp. 1-33). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Brannon, E.M. (2002). The development of ordinal numerical knowledge in infancy. *Cognition*, 83, 223-240.
- Bryant, P., & Squire, S. (2001). Children's mathematics: lost and found in space. In M. Gattis (Ed.), *Spatial schemas and abstract thought* (pp. 175-201). MIT Press.
- Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3-18.
- Clearfield, M.W., & Mix, K.S. (1999). Number versus contour length in infants' discrimination of small visual sets. *Psychological Science*, 10, 408-411.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1(1), 83-120.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487-506.
- Dowker, A.D. (2001). Numeracy recovery: a pilot scheme for early intervention with young children with numeracy difficulties. *Support for Learning*, 16, 6-10.
- Dowker, A. (2005). Individual Differences in Arithmetic: Implications for Psychology, Neuroscience and Education. Hove, Psychology Press.
- Geary, D.C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114, 345-362.
- Geary, D.C. (2000). From infancy to adulthood: the development of numerical abilities. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 9(Suppl II), 11-16.
- Gelman, R., & Butterworth, B. (2005). Number and language: how are they related? *Trends in Cognitive Sciences*, 9(1), 6-10.
- Griffin, S., Case, R., & Siegler, R. (1994). Rightstart: providing the central conceptual prerequisites for first formal learning of arithmetic to students at risk for school failure. In K. McGilly (Ed.), *Classroom Learning: Integrating Cognitive Theory and Classroom Practice* (pp. 25-50). Boston: MIT. Press.
- Jacobs, R., & Petermann, F. (2005). Rechenfertigkeiten und Zahlenverarbeitungs-Diagnostikum für die 2. bis 6. Klasse (RZD 2-6). Göttingen: Hogrefe Verlag.
- Hembree, R. (1990). The nature, effects, and relief of mathematics anxiety. *Journal of Research in Mathematics Education*, 21, 33-46.
- Hubbard, E.M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews*, 6, 435-448.
- Kaufmann, L., (2002). More evidence for the role of the central executive in retrieving arithmetic facts: a case of severe developmental dyscalculia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24(3), 302-310.
- Kaufmann, L., Handl, P., & Thöny, B. (2003). Evaluation of a numeracy intervention program focusing on basic numerical knowledge and conceptual knowledge: a pilot study. *Journal of Learning Disabilities*, 36(6), 564-573.
- Kaufmann, L., & Nuerk, H.C. (2005). Numerical development: current issues and future perspectives. *Psychology Science (Special Issue: Brain and Number)*, 47(1), 142-170.
- Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Haala, I., Haberlandt, E., Zimmerhackl, L.-B., Felber, S., & Ischebeck, A. (in press). Neural correlates of the number-size interference task in children. *NeuroReport*.
- Kosc, L. (1974). Developmental dyscalculia. *Journal of Learning Disabilities*, 7, 165-177.
- Krajewski, K., Küspert, P., & Schneider, W. (2002). Deutscher Mathematiktest für erste Klassen (DEMAT 1+). Göttingen: Beltz Test GmbH.
- Krinzinger, H., Nuerk, H.-C., Graf, M., Willmes, K., & Kaufmann, L. (in Vorbereitung). Rechenangst und Rechenleistung. *Sprache, Stimme und Gehör - Zeitschrift für Kommunikationsstörungen (eingeladener Beitrag)*.
- LeFevre, J., & Kulak, A.G. (1994). Individual differences in the obligatory activation of addition facts. *Memory and Cognition*, 16, 45-53.
- Mix, K.S., Huttenlocher, J., & Levine, S.C. (2002). Quantitative development in infancy and early childhood. Oxford: Oxford University Press.
- Nuerk, H.C., Kaufmann, L., Graf, M., Krinzinger, H., Delazer, M., & Willmes, K. (in Vorbereitung). Test zur Erfassung der Zahlenverarbeitung und des Rechnens bei 4 bis 8-jährigen Kindern (Tedi-Math). Bern: Hans Huber Verlag.
- Reusser, K. (2000). Success and failure in school mathematics: effects of instruction and school environment. *European Child & Adolescent Psychiatry*, Vol 9 (Suppl 2), 17-26.
- 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, Cereb. Cortex*, 24(1), 50-60.
- Rourke, B., & Strang, J. (1983). Subtypes of reading and arithmetic disabilities: A neuropsychological analysis. In M. Rutter (Ed.), *Behavioral Syndromes of Brain Dysfunction in Children*. New York: Guilford.
- Schoenfeld, A.H. (1991). On mathematics as sense-making: an informal attack on the unfortunate divorce of formal and informal mathematics. In J.F. Voss, D.N. Perkins, J.W. Segal (Eds.), *Informal Reasoning and Education* (pp. 311-343). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Shalev, R., & Gross-Tsur, V. (2001). Developmental Dyscalculia. *Pediatric Neurology*, 24(5), 337-342.
- Shalev, R.S., Auerbach, J., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2000). Developmental dyscalculia: prevalence and prognosis. *European Child & Adolescent Psychiatry*, Vol 9 (Suppl 2), 58-64.
- Shalev, R.S., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2005). Developmental dyscalculia: a prospective six-year follow-up. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47, 121-125.
- Siegler, R.S. (1987). The perils of averaging data over strategies: An example from children's addition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 3, 258-275.
- Stern, E. (2005). Kognitive Entwicklungspsychologie des mathematischen Denkens. In von Aster M. & H. Lorenz (Hrsg), *Rechenstörungen bei Kindern. Neurowissenschaften, Psychologie, Pädagogik* (S. 137-149). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co.KG.
- Temple, C.M. (1991). Procedural Dyscalculia and Number Fact Dyscalculia: Double Dissociation in Developmental Dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology*, 8 (2), 155-176.
- Tan, L.S., & Bryant, P. (2000). The Cues That Infants Use to Distinguish Discontinuous Quantities: Evidence Using a Shift-Rate Recovery Paradigm. *Child Development*, 71(5), 1162-1178.
- Von Aster, M. (2000). Developmental cognitive neuropsychology of number processing and calculation: varieties of developmental dyscalculia. *European Child & Adolescent Psychiatry*, Vol 9 (Suppl 2), 41-57.
- Von Aster, M. (2001). Testverfahren zur Dyskalkulie (Zareki). Frankfurt: Swets Test Services GmbH.
- Wright, R.J., Martland, J., Stafford, A.K., & Stanger, G. (2002). *Teaching Number: Advancing children's skills and strategies*. London: Paul Chapman Publishing.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction in infants. *Nature*, 358, 749-750.