

Entwicklung und Ursachen von Rechenstörungen, neueste Forschungsergebnisse

PD Dr. Michael von Aster

Zentrum für Kinder- und Jugendpsychiatrie, Universität Zürich

Dr. sc. nat. ETH Karin Kucian

MR-Zentrum, Universitäts Kinderklinik Zürich

ZUSAMMENFASSUNG

Rechenschwäche ist eine häufige Lernstörung (**6%**) und tritt oft in Kombination mit **Lese-Rechtschreibstörungen** auf (über 50% der Fälle). Hinsichtlich der Art der numerischen Fertigungsdefizite unterscheiden sich Kinder mit einer isolierten und kombinierten Störung nur geringfügig, bei Kindern mit einer kombinierten Störung finden sich stärkere Merkmalsausprägungen für ADHD.

Durch gezielte Abklärung, lassen sich bereits im **Kindergarten 90%** der Kinder, welche später eine Rechenstörung entwickeln, erkennen. Am Besten können sie anhand von Minderleistungen beim **Einschätzen der Grösse einer Menge** und bei einfachen **Zählfertigkeiten** erkannt werden. Diese Fähigkeiten bilden eine Voraussetzung für die Entwicklung abstrakter Zahlenraumvorstellungen.

Aktuelle Ergebnisse aus der **Hirnforschung** weisen darauf hin, dass Kinder in der 3. Klasse die selben neuronalen Netzwerke benutzen um zu Rechnen wie Erwachsene. Es kommt jedoch zu einer **entwicklungsbedingten Stärkung** und einem ‚fine-tuning‘ dieser neuronalen Systeme für Zahlenverarbeitung mit zunehmendem Alter und Expertise. Es gibt Hinweise darauf, dass diese Entwicklungsprozesse bei Kindern mit einer Rechenschwäche gestört sind. Insbesondere zeigen rechenschwache Kinder **geringere Gehirnaktivität**, wenn die Aufgabe eher auf einer **räumlichen Verarbeitung** von Zahlen basiert.

Die Ergebnisse bieten eine wichtige Grundlage zur Gestaltung und Bewertung von therapeutischen Massnahmen. Sie sprechen insbesondere für eine Förderung des **Zahlenraumverständnisses** (mentaler Zahlenstrahl) innerhalb von **frühen** Stützmassnahmen.

DEFINITION UND HÄUFIGKEITEN

Im Gegensatz zu den Lese- und Rechtschreibstörungen sind die Entwicklungsstörungen der Zahlenverarbeitung und des Rechnens bislang, was die Mechanismen ihrer Entstehung betrifft, weniger gut erforscht. Dies, obgleich sie, wie man heute weiss, in etwa ebenso häufig sind wie Legasthenien.

Rechenstörungen werden gemäss der Internationalen Klassifikation für psychische Störungen der WHO (ICD-10) als Störungen zentralnervöser Reifungsvorgänge verstanden, die auf verschiedene Weise die Entwicklungsprozesse der kognitiven Informationsverarbeitung behindern. Die Kriterien, die für eine Diagnosestellung gemäss ICD-10 erfüllt sein müssen, oder eine Diagnose ausschliessen, gelten analog denen der Lese- und Rechtschreibstörungen. Sie verlangen in erster Linie eine signifikante Diskrepanz zwischen der gemessenen und der aufgrund des Alters und der allgemeinen Intelligenz erwarteten Schulleistung in Mathematik, wobei die Anwendung anerkannter standardisierter Intelligenz- und Schulleistungstests gefordert wird.

Untersuchungen in verschiedenen Ländern kommen zu Häufigkeitsangaben zwischen 2 und 6% [1]. Diesbezügliche Ergebnisse für den deutschsprachigen Raum schwanken zwischen 4,4 und 6,7% [2-4]. Im Unterschied zu den Lese- und Rechtschreibstörungen scheinen allerdings Mädchen häufiger betroffen zu sein als Knaben [1,3].

In einer kürzlich an einer repräsentativen deutschschweizer Stichprobe durchgeführten Studie, bei der die Kinder zunächst im Kindergarten und dann am Ende der 2. Klasse untersucht wurden, fanden wir bei insgesamt 6% der Schüler Leistungen in der Zahlenverarbeitung und im Rechnen (ZAREKI, [5]), die um 1,5 Standardabweichungen (SD) unterhalb der Norm lagen. Etwa ein Drittel dieser Kinder (1,8%) zeigte im Lesen und Schreiben (KNUSPEL, [6]; SLRT, [7]) durchschnittliche Leistungen ($> -0,5$ SD), bei über der Hälfte dagegen (4,7%) lagen auch die Leistungen in diesem Bereich unterhalb von 1,5 SD (kombinierte Rechen- und Lese-Rechtschreibstörung). Jedoch zeigten sich nur geringfügige Unterschiede in den numerischen Fertigkeiten zwischen Kindern mit isolierten und kombinierten Störungen.

FRÜHERKENNUNG

Die rechenschwachen Kinder waren überwiegend bereits im Kindergartenalter hinter ihren Altersgenossen zurück. Insbesondere haben sich zwei Fertigkeiten der Zahlenverarbeitung im Kindergarten als gute Prädiktoren für eine spätere Rechenschwäche herausgestellt:

- Mengenschätzen
- Zählfertigkeiten

Mengenschätzen

Aufgaben, die ein schnelles Abschätzen von visuell präsentierten Mengen benötigen, werden oft falsch gelöst, insbesondere wenn grössere Mengen geschätzt werden sollen. So antworten Kinder mit späteren Rechenstörungen auf die Frage, wie viele Becher siehst du auf folgendem Bild, z.B. mit 8, 1000 oder viele.



Abbildung 1. Schätze wie viele Becher das sind?

Zählfertigkeiten

Zählfertigkeiten gelingen oft ungenügend. Zum Beispiel zeigen Kinder mit späteren Rechenstörungen Schwierigkeiten beim Vorwärtszählen über 10 oder beim Rückwärtszählen von 10 retour. Zudem gelingt das Benennen eines Vorläufers oder Nachfolgers einer Zahl, die grösser als 10 ist, oft nicht, das heisst, dass die ordinale Zahlsequenz nicht ausreichend gut entwickelt ist.

Anhand dieser Fertigkeiten konnten 90% der Kinder mit einer Dyskalkulie in der 2. Klasse bereits im Kindergarten richtig erkannt werden.

DER MENTALE ZAHLENSTRAHL

Aller Wahrscheinlichkeit nach kommen Menschen mit einigen numerischen Kernkompetenzen auf die Welt. Dabei handelt es sich zum einen um die schon bei Säuglingen nachweisbare Fähigkeit, die Grösse kleiner Mengen unmittelbar zu erfassen

und von der Grösse anderer kleiner Mengen zu unterscheiden. Diese Kernkompetenz verleiht den zu erlernenden sprachlichen und arabischen Zahlensymbolen ihre kardinale Sinnbedeutung.

Mit dem Erwerb und der Automatisierung der ordinalen Zahlwortreihe und des Arabischen Notationssystems entsteht nun eine neue, nicht-sprachliche Zahlenrepräsentation höherer Ordnung, die nicht mehr unmittelbar die Grösse konkreter Mengen abbildet, sondern das abstrakte, ordinale und räumlich konfigurierte Zahlenkontinuum zum Inhalt hat (zur Übersicht siehe [8]).

Diese Zahlenraumvorstellung erzeugt jeder Mensch selbst in seinem Kopf. Trotz der individuellen Vielgestaltigkeit scheint es doch einige Gesetzmässigkeiten zu geben, die solchen Zahlenraumvorstellungen gemeinsam sind. So scheint der innere Zahlenstrahl in unserem Kulturkreis zum Beispiel in Schreibrichtung ausgerichtet zu sein, also von links nach rechts. Diese räumliche Ausrichtung ist gut belegt durch den sogenannten SNARC-Effekt (Spatial Numerical Association of Response Codes) [9]. Er besagt, dass wir schneller mit der linken Hand auf kleinere Zahlen, und schneller mit der rechten Hand auf grössere Zahlen reagieren, was daran liegt, dass sich die linke Hand ‚näher‘ an den (virtuellen) kleinen Zahlen und die rechte Hand ‚näher‘ bei den grossen Zahlen befindet. Es hat sich gezeigt, dass sich dieser SNARC-Effekt bei Kindern erst zu Ende der 2. Klasse beginnt auszuprägen [10]. Vorher scheint eine solche abstrakte Zahlenraumvorstellung neuronal noch nicht repräsentiert und damit noch nicht automatisiert verfügbar zu sein.

DEM GEHIRN BEIM RECHNEN ZUSCHAUEN

Geistige Leistungen, wie dem Rechnen, liegen neuronale Strukturen und Prozesse zu Grunde die sich heute mittels moderner bildgebender Verfahren messen, lokalisieren und sichtbar machen lassen. Dass diese neuronalen Strukturen erst durch Lernen entstehen und sich verändern, beruht auf dem Prinzip der erfahrungsabhängigen Neuroplastizität. Hinter diesem Begriff verbirgt sich die Erkenntnis, dass der Erwerb von Fähigkeiten und Wissen mit Veränderungen in der Struktur und in der Funktionsweise kortikaler Nervenzellen und ihrer Verbindungen einhergeht.

Bildgebende Studien mit Erwachsenen haben gezeigt, dass unser Gehirn Zahlen und Mengen auf zwei Arten verarbeitet:

I) Einerseits können auswendig gelernte Lösungen einfach aus dem Gedächtnis abgerufen werden, so zum Beispiel beim Addieren von einstelligen Zahlen oder beim einfachen Ein-mal-Eins. Dieses Wissen wird **sprachlich** gespeichert. Im Gehirn werden deshalb auch die sprachverarbeitenden Regionen aktiviert, wenn eine Aufgabe auf diese Weise gelöst wird.

II) Andererseits benötigt man beim Schätzen einer Lösung oder beim Vergleichen zweier Zahlen eine abstrakt-**räumliche** Vorstellung von numerischer Grösse. Mit anderen Worten, man verarbeitet solche Aufgaben über einen direkten Zugriff zu seinem mentalen Zahlenstrahl. Im Gehirn werden dafür vor allem Gebiete im Parietallappen aktiviert (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2. Gehirnlappen.

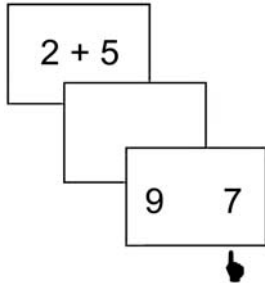
Wie bereits erwähnt kommen wir mit einem einfachen Grundverständnis für Mengen zur Welt. Dieses verfeinert sich aber im Laufe der Entwicklung und der Beschulung immer weiter, bis zur Fähigkeit hochkomplexe Rechenaufgaben lösen zu können. Uns interessierte nun,

- i) ob Kinder in der 2. Klasse bereits diese kortikale Spezialisierung zeigen, wie man sie von Erwachsenen kennt,
- ii) ob sich die Entwicklungsprozesse in neuro-plastischen Veränderungen der Hirnaktivität nachvollziehen lassen und
- iii) ob Kinder mit einer Rechenschwäche Unterschiede in der Gehirnaktivierung zeigen.

Dazu verwenden wir ein computerisiertes Schichtbildverfahren, die sogenannte **funktionelle Magnetresonanztomographie** (fMRT). Diese Methode ermöglicht eine genaue Lokalisierung von Gehirnregionen, die während der Durchführung bestimmter Aufgaben aktiv sind, und zwar ohne Röntgenstrahlen. Während der fMRT-Messung wurden den Kindern mit Hilfe einer Videobrille verschiedene Aufgaben zur Zahlenverarbeitung gezeigt. Die Lösung konnten sie dann über einen Tastendruck mitteilen.

Die Aufgaben waren so gewählt, dass sie die beiden Verarbeitungswege im Gehirn spezifisch aktivieren:

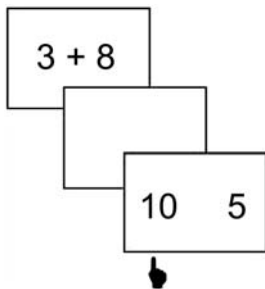
Exaktes Rechnen



Beim exakten Rechnen wurde eine einstellige Additionsaufgabe präsentiert. Anschliessend mussten die Kinder das richtige Resultat aus zwei Lösungsvorschlägen wählen.

Dieser Aufgabentyp basiert stärker auf der sprachlichen Verarbeitung von Zahlen, d.h. die Lösung wird automatisch aus dem Gedächtnis abgerufen.

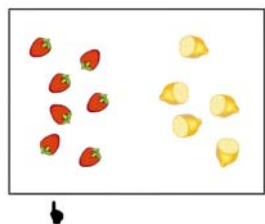
Schätzrechnen



Beim Schätzrechnen wurde ebenfalls eine einstellige Additionsaufgabe präsentiert. Jetzt mussten die Kinder aber entscheiden, welche der beiden Antwortalternativen näher bei der korrekten Lösung liegt.

Diese Aufgaben verlangen einen Zugriff zum ordinalen mentalen Zahlenstrahl.

Mengenvergleich



Beim Mengenvergleich musste lediglich entschieden werden, auf welcher Seite mehr Objekte zu sehen sind.

Da die Präsentationszeit nur kurz war, konnten die Kinder die Objekte nicht abzählen, sondern waren zum Schätzen gezwungen. Hier werden die Kernkompetenzen zum Grössenvergleich kardinaler Mengen gefordert.

Unsere Ergebnisse haben gezeigt, dass Kinder ohne Rechenschwäche ähnliche Gehirngebiete aktivieren um diese Aufgaben zu lösen wie Erwachsene. Das heisst, bereits bei Kindern in der 2. Klasse findet man die beiden Verarbeitungswege im Gehirn für das Abrufen von numerischen Fakten und für eine räumliche Verarbeitung von Zahlen. Jedoch scheinen diese neuronalen Netzwerke noch nicht ausgereift zu sein. Dies widerspiegelt sich in einer Zunahme der Gehirnaktivität in den Regionen, die spezialisiert sind für Zahlenverarbeitung und einer Abnahme der Gehirnaktivität in unterstützenden Regionen

für Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis mit zunehmendem Alter. Das heisst, die neuronalen Netzwerke werden durch Lernen und plastische Veränderungen optimiert.

Wie sieht das ganze nun aus bei Kindern mit einer Rechenschwäche?

Die Ergebnisse zeigten, dass rechenschwache Kinder zwar die gleichen Hirnareale aktivierten wie ihre Altersgenossen ohne Rechenschwäche, jedoch zeigten sie signifikant schwächere Aktivität beim Schätzrechnen (siehe Abbildung 3).

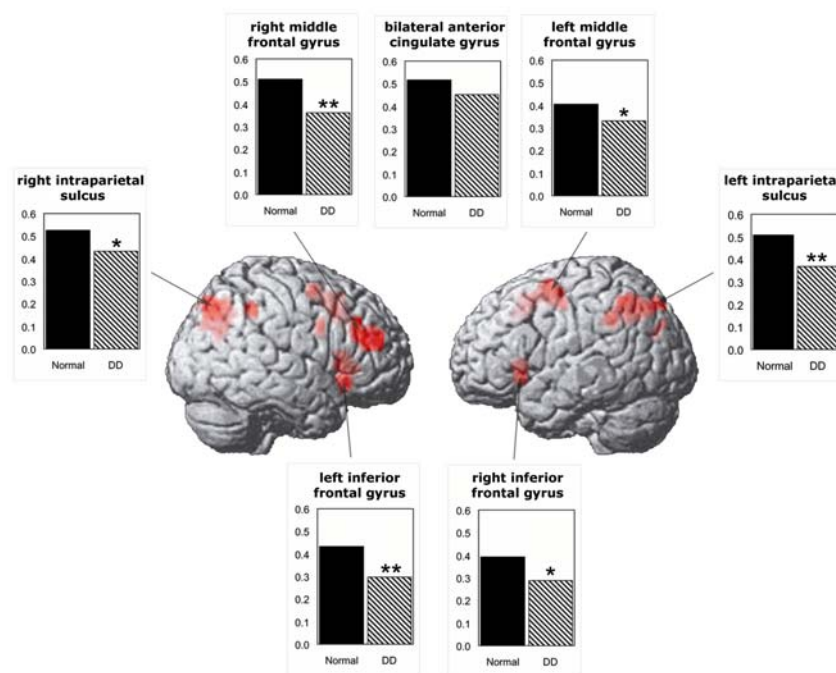


Abbildung 3. Die Stärke der Gehirnaktivität für jede aktive Region ist in einem Balkendiagramm dargestellt. Dabei entsprechen die schwarzen Balken der durchschnittlichen Gehirnaktivität der 'normal' rechnenden Kindern und die gestreiften Balken derjenigen der rechenschwachen Kinder. Signifikante Gruppenunterschiede sind mit zwei Sternen (** $p < 0.05$) gekennzeichnet und Trends mit einem Stern (* $p < 0.1$).

Für das exakte Rechnen und den einfachen Mengenvergleich konnten keine Unterschiede gefunden werden.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass Kinder mit einer Dyskalkulie Schwächen bei der räumlichen Verarbeitung von Zahlen zeigen.

Wahrscheinlich basiert die Entwicklung des Verständnisses von Zahlen, Mengen und schlussendlich von mathematischen Zusammenhängen auf der Ausbildung neuronaler Netzwerke für die automatisierte abstrakt-räumliche Zahlenverarbeitung (mentaler Zahlenstrahl). Diese Entwicklung scheint bei rechenschwachen Kindern gestört.

Diese Studien konnten dank der finanziellen Unterstützung des Zentrums für Neurowissenschaften Zürich (ZNZ), der Hartmann-Müller Stiftung für medizinische Forschung, des MR-Zentrums des Kinderspitals Zürich und des Zentrums für Kinder- und Jugendpsychiatrie der Universität Zürich realisiert werden.

LITERATUR

1. Shalev RS, Auerbach J, Manor O und Gross-Tsur V. *European Child and Adolescent Psychiatry* **9 Suppl 2**, 1158-64 (2000).
2. Hein J, Bzufka N und Neumarker K. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie* **9**, 87-101 (2000).
3. Klauer K. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie* **24**, 48-65 (1992).
4. von Aster MG, Deloche G, Dellatolas G und Meier M. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie* **29**, 151-166 (1997).
5. von Aster MG. ZAREKI (Neuropsychologische Testbatterie für Zahlenverarbeitung und Rechnen bei Kindern). Lisse, Frankfurt am Main: Swets & Zeitlinger, 2001.
6. Marx H. Knuspels Leseaufgaben. Gruppenlesetest für Kinder Ende des ersten bis vierten Schuljahres. Göttingen: Hogrefe, 1998.
7. Landerl K, Wimmer H and Moser E. Salzburger Lese- und Rechtschreibtest. Verfahren zur Differentialdiagnose von Störungen des Lesens und Schreibens für die 1. bis 4. Schulstufe. Bern: Huber, 1997.
8. von Aster M und Lorenz J. *Rechenstörungen bei Kindern. Neurowissenschaft, Psychologie, Pädagogik* Vandenhoeck & Ruprecht: Göttingen, 2005.
9. Dehaene S, Bossini S und Giraux P. *Journal of Experimental Psychology* **122**, 371-396 (1993).
10. Schweiter M, Weinhold Zulauf M und von Aster MG. *Zeitschrift für Neuropsychologie* **16**, 105-113 (2005).