

## Zahlen, Rechnen und das Gehirn:

### Können neurokognitive Befunde zu einem besseren Verständnis des Rechnens und der Rechenstörung beitragen?

Stephanie Roesch<sup>1</sup>, Elise Klein<sup>1</sup>, Liane Kaufmann<sup>2</sup> & Korbinian Moeller<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Leibniz-Institut für Wissensmedien, Tübingen

<sup>2</sup>Abteilung für Psychiatrie und Psychotherapie A, Landeskrankenhaus Hall, Hall in Tirol

<sup>3</sup>Fachbereich Psychologie, Eberhardt-Karls Universität, Tübingen

<sup>4</sup>LEAD Graduiertenschule, Eberhardt-Karls Universität, Tübingen

**Kontakt:** Dr. Stephanie Roesch, Leibniz-Institut für Wissensmedien, Schleichstr. 6, 72076 Tübingen, email: s.roesch@iwm-tuebingen.de

---

#### 1 Von Zahlen und ihrer Bedeutung für unser Alltagsleben

Ein gutes Verständnis für Zahlen sowie grundlegende Rechenfähigkeiten sind von entscheidender Bedeutung, um in unserer Gesellschaft den Alltag erfolgreich meistern zu können. Denn Zahlen begegnen uns täglich in den unterschiedlichsten Situationen – sei es beim Benutzen von öffentlichen Verkehrsmitteln (z.B. beim Lesen der Fahrpläne und beim Abschätzen der Fahrzeit), im Haushalt (z.B. beim Backen eines Kuchens) oder bei der Einnahme von Medikamenten (z.B. 3-mal täglich 5 Tropfen eines Medikamentes mit 200 ml Wasser gemischt trinken). Daher ist es wenig verwunderlich, dass Menschen mit einer Rechenstörung<sup>1</sup> in ihrem schulischen und beruflichen Werdegang maßgeblich beeinträchtigt sind (Duncan et al., 2007). Nach einer aktuellen Studie von Fischbach und Kollegen (2013) sind von einer solchen Rechenstörung bis zu 5% der deutschen Zweit- bis Drittklässler betroffen. Diese Kinder haben schon beim Lösen relativ einfacher Additions- und Subtraktionsaufgaben Probleme (z.B.  $6 + 9 = ?$ ). Entscheidend ist dabei jedoch, dass es sich nicht lediglich um Startschwierigkeiten im Rechnen handelt, die sich im Laufe der Zeit „auswachsen“. Denn in der Regel bleiben die Probleme bis ins Erwachsenenalter bestehen

---

<sup>1</sup> In der Literatur wird häufig zwischen den Begriffen „Rechenstörung“ und „Rechenschwäche“ unterschieden (siehe hierzu u.a. Kaufmann & von Aster, 2012), denen jeweils unterschiedliche Diagnosekriterien zugrunde liegen. Wenngleich in den nachfolgend beschriebenen Studien die Diagnosekriterien und damit auch die untersuchten Stichproben deutlich variieren, wird meist dennoch keine begriffliche Unterscheidung vorgenommen. Daher werden wir im Folgenden lediglich den Begriff „Rechenstörung“ verwenden.

und haben negative Auswirkungen auf das Berufs- und Privatleben der Betroffenen (Gross, Hudson, & Price, 2009; Parsons & Bynner, 2005).

Seit mittlerweile etlichen Jahren interessieren sich nicht mehr nur die klassischen Fachdisziplinen wie Psychologie und Pädagogik für das Lernen im Allgemeinen und spezifische Lernschwierigkeiten wie die Rechenstörung im Besonderen. Auch die Hirnforschung rückte diesbezüglich mit ihren Ergebnissen immer stärker in den Fokus des öffentlichen Interesses. Dieser Beitrag soll einen kurzen Überblick darüber geben, inwiefern aktuelle Ergebnisse der Hirnforschung zu einem besseren Verständnis des Rechnens und der Rechenstörung beitragen können (für eine umfangreichere Darstellung siehe Moeller, Klein, & Kaufmann, in press). Was passiert im Gehirn, wenn wir zählen oder rechnen? Unterscheiden sich die Aktivierungsmuster im Gehirn von Kindern mit und ohne Rechenstörung? Und wirkt sich eine Förderung bei Rechenschwierigkeiten auch auf neuronaler Ebene aus? Diesen Fragen werden wir im Folgenden auf Basis des aktuellen Forschungsstandes nachgehen.

## **2 Was passiert im Gehirn, wenn wir zählen oder rechnen?**

Das populärste Modell, das sich mit den Vorgängen im Gehirn beim Zählen und Rechnen bei Erwachsenen beschäftigt, ist das sogenannte Triple-Code Modell von Stanislas Dehaene und Kollegen (Dehaene & Cohen, 1995, 1997). Das Triple-Code Modell ist so bedeutend, da es als einziges Modell funktionale Zahlenrepräsentationen mit spezifischen neuronalen Arealen in unserem Gehirn in Beziehung setzt. Das Modell postuliert, dass Funktionen der Zahlenverarbeitung von zum Teil weit auseinander liegenden Hirnregionen unterstützt werden und deshalb auch unabhängig voneinander beeinträchtigt sein können. Im Modell werden drei mentale Repräsentationen von Zahlen und Mengen unterschieden, auf die sich Prozesse der Zahlenverarbeitung und des Rechnens stützen:

(1) Eine Repräsentation der *visuellen Zahlenform* (z.B. 9), die bilateral im okzipitotemporalen Übergangsbereich lokalisiert ist und das Erkennen arabischer Zahlensymbole oder Zahlwörter ermöglicht. (2) Eine Repräsentation der *verbalen Form* von Zahlen (z.B. „neun“), die linksseitig in perisylvischen Spracharealen verortet ist, an die auch arithmetisches Faktenwissen (wie z.B. das „Kleine Einmaleins“) gebunden ist. Ist diese Repräsentation beeinträchtigt, können Zahlen u.U. nicht mehr richtig benannt werden und insbesondere der Abruf von Faktenwissen wie das kleine Einmaleins ist häufig beeinträchtigt. (3) Die *numerische Größenrepräsentation*, die bilateral primär vom intraparietalen Sulcus moduliert wird und unter anderem für Größenvergleiche (z.B. „Ist 9 größer als 3?“) oder für Abschätzungen (z.B. „150 Personen in einem Bus, ist das viel oder wenig?“) zuständig ist. Diese Repräsentation der Zahlengröße wird sowohl bei symbolischen (arabische Ziffern) als auch bei nicht-symbolischen Numerositäten (Punktmengen wie ●●●) aktiviert. Sie ist

unmittelbar verfügbar und hilft, beim Rechnen Ergebnisse abzuschätzen oder die Plausibilität eines Ergebnisses einzuordnen („ $2+3 = 9?$ “).

Diese drei numerischen Repräsentationen interagieren miteinander, wann immer wir Zahlen begegnen. Jede dieser Komponenten kann allerdings auch spezifisch beeinträchtigt sein. Dies kann zur Folge haben, dass eine Person beispielsweise nicht mehr in der Lage ist zu beurteilen, ob zehn Milchflaschen im Kühlschrank viel oder wenig sind (d.h. numerische Größenrepräsentation beeinträchtigt), während sie jedoch die Ziffer 10 auf Anweisung korrekt aufschreiben kann (d.h. visuelle und verbale Zahlrepräsentation intakt). Wie das Beispiel bereits erkennen lässt, erfordert der Umgang mit Zahlen und demzufolge auch das Rechnen meistens ein Zusammenspiel der drei Repräsentationen, die bei kompetenten Rechnern gut miteinander vernetzt sind. Mit diesen Arealen in Verbindung stehen weitere frontale Hirnregionen, die domänen-übergreifenden Funktionen wie dem Arbeitsgedächtnis oder der exekutiven Kontrolle zugeordnet werden und daher nicht als eigenständige Zahlenrepräsentationen betrachtet werden. Neben den domänen-spezifischen numerischen Repräsentationen ist also auch das Zusammenspiel von parietalen und frontalen Hirnarealen für das Rechnen von entscheidender Bedeutung.

Allerdings basiert das Modell von Dehaene und Kollegen auf Befunden erwachsener Probanden bzw. hirngeschädigter Patienten. Doch was passiert im Gehirn von Kindern, wenn diese zählen und rechnen? Grundsätzlich scheinen bei Kindern dieselben Hirnareale wie bei Erwachsenen aktiv zu sein; allerdings mit anderer Gewichtung, wie eine Meta-Analyse von Kaufmann und Kollegen zeigte (2011; siehe auch Houdé, Rossi, Lubin, & Joliot, 2010). Denn bei Kindern sind frontale Areale, die mit domänen-übergreifenden Prozessen assoziiert werden, noch deutlich stärker aktiviert, während die zahlsspezifischen, mit der Größenverarbeitung assoziierten parietalen Areale, noch eine vergleichsweise geringere Aktivierung zeigen. Dies deutet darauf hin, dass sich die neuronale Aktivität beim Rechnen im Laufe der Entwicklung von domänen-übergreifenden frontalen Arealen hin zu zahlsspezifischen parietalen Arealen verschiebt. Diese Verschiebung erklären Kaufmann und Kollegen (2011) mit einer zunehmenden Automatisierung und Spezialisierung der Zahlverarbeitung im Laufe der Entwicklung. So sind Kinder im Umgang mit Zahlen und beim Rechnen zunächst noch ungeübt und demzufolge stärker auf unterstützende Prozesse angewiesen (z.B. Arbeitsgedächtnis oder exekutive Kontrolle). Bei kompetenten (erwachsenen) Rechnern sind die Zahlenverarbeitung bzw. das Rechnen hingegen bereits soweit automatisiert und mit Aktivität in parietalen Arealen assoziiert, dass frontale Areale bei Aufgaben mit vergleichbarer Schwierigkeit deutlich weniger stark als Unterstützung hinzugezogen werden müssen. Nun stellt sich die Frage, ob sich neben diesen Aktivierungsunterschieden, die mit dem Alter (und mit zunehmender Beschulung)

einhergehen, auch neuronale Aktivierungsunterschiede zwischen Kindern mit und ohne Rechenstörung zeigen?

### **3 Unterscheiden sich die Aktivierungsmuster im Gehirn von Kindern mit und ohne Rechenstörung?**

In mehreren Studien konnten für Kinder mit einer Rechenstörung im Vergleich zu nicht rechenschwachen Kindern atypische Aktivierungsmuster in den zahlsspezifischen intraparietalen Hirnarealen, die mit der Verarbeitung numerischer Größeninformation assoziiert sind, beobachtet werden (für einen Überblick siehe Ashkenazi, Black, Abrams, Hoefft, & Menon, 2013; Kaufmann et al., 2011). Dies könnte darauf hinweisen, dass die Repräsentation numerischer Größe (d.h. die mengenmäßige Bedeutung einer Zahl) bei Kindern mit einer Rechenstörung weniger stark ausgeprägt bzw. etabliert ist. Allerdings sind die bisherigen Befunde dazu uneinheitlich. Denn während sich in einigen Studien vergleichsweise schwächere intraparietale Aktivierungen beim Vergleichen von Zahlen oder beim überschlagenden Rechnen zeigten (z.B. Kucian et al., 2006), ließ sich in anderen Studien eine vergleichsweise stärkere Aktivierung bei diesen Aufgabenarten beobachten (z.B. Kaufmann et al., 2009).

Ebenso uneinheitlich ist die Befundlage im Hinblick auf Aktivierungsmuster außerhalb der parietalen Areale. Auf der einen Seite zeigten einige Studien bei Kindern mit einer Rechenstörung eine schwächere Aktivierung in frontalen und okzipitalen Arealen. Dies könnte für eine Beeinträchtigung aufmerksamkeitsbezogener und perzeptuell-visueller Prozesse sprechen. In anderen Studien ließ sich bei rechenschwachen Kindern jedoch keine schwächere, sondern eine verstärkte Aktivierung frontaler und parietaler Regionen erkennen. Dies könnte wiederum darauf hindeuten, dass domänen-unspezifische Prozesse (z.B. das Arbeitsgedächtnis) von diesen Kindern verstärkt zur Unterstützung von weniger gut etablierten domänen-spezifischen Kompetenzen (z.B. dem Abruf von arithmetischem Faktenwissen) herangezogen werden müssen (siehe Kaufmann et al., 2011 für eine Meta-Analyse).

Darüber hinaus beobachteten Kucian und Kollegen (2006), dass die Heterogenität der Aktivierungsmuster innerhalb der Gruppe der Kinder mit Rechenstörung deutlich größer war als bei Kindern ohne Rechenstörung. Das bedeutet, dass sich die rechenschwachen Kinder hinsichtlich der Aktivierungsmuster bei der Bearbeitung numerischer Aufgaben weit mehr voneinander unterscheiden als die nicht rechenschwachen Kinder. Bei diesen ließ sich eine vergleichsweise einheitlichere neuronale Aktivierung beobachten. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus Verhaltensstudien, die ebenfalls zeigen, dass die Leistungsprofile von Kindern mit einer Rechenstörung meist sehr unterschiedlich ausfallen, und zwar sowohl im Hinblick auf die Rechenleistung als auch hinsichtlich der Ausprägung domänen-

übergreifender Fähigkeiten wie z.B. Aufmerksamkeit oder Arbeitsgedächtnis (Kaufmann & von Aster, 2012).

Insgesamt weisen die dargestellten Befunde darauf hin, dass es neurofunktionale Unterschiede in den Aktivierungsmustern zwischen Kindern mit und ohne Rechenstörung zu geben scheint. Allerdings ist die Befundlage bislang keineswegs einheitlich. Zudem lässt sie keine direkten Rückschlüsse auf die individuellen Ursachen einer Rechenstörung zu. Denn anhand von Aktivierungsmustern im Gehirn lässt sich nicht entscheiden, ob es sich um atypische Funktionslokalisationen, Funktionsweisen oder Verbindungen zwischen den Prozessen handelt. Zudem könnten die atypischen Aktivierungsmuster ebenso gut Kompensationsstrategien abbilden bzw. eine Kombination dieser beiden Aspekte darstellen. Zur Diagnose einer Rechenstörung anhand von Aktivierungsmustern im Gehirn eignen sich neurokognitive Methoden daher nur sehr eingeschränkt.

#### **4 Wirkt sich eine Förderung von Kindern mit Rechenstörung auch auf neuronaler Ebene aus?**

Hinweise auf derartige Ursache-Wirkungs-Beziehungen können nur anhand von Interventionsstudien gewonnen werden, bei denen die Effektivität einer Förderung nicht nur auf Verhaltensebene, sondern auch auf neuronaler Ebene überprüft wird. Derartige Studien sind allerdings bislang noch selten. Pionierarbeit leistete hier die Arbeitsgruppe um Karin Kucian und Michael von Aster (Kucian et al., 2011), die ein computer-basiertes Trainingsprogramm zur Förderung von Kindern mit einer Rechenstörung entwickelten und evaluierten. Das Training war so konzipiert, dass die teilnehmenden Kinder (d.h. eine Gruppe mit Rechenstörung und eine Kontrollgruppe ohne Rechenstörung) über fünf Wochen hinweg täglich 15 Minuten mit Hilfe eines von der Arbeitsgruppe speziell für diese Studie entwickelten Computerspiels trainierten. Ziel dieses Spiels war es, die numerische Größenrepräsentation sowie die Verknüpfung zwischen symbolischen Zahlen und ihrer Position auf dem sogenannten mentalen Zahlenstrahl zu trainieren. Nach Abschluss der Förderung zeigten die Ergebnisse, dass sich die teilnehmenden Kinder (d.h. sowohl jene mit als auch jene ohne Rechenstörung) in ihrer räumlichen Zahlvorstellung verbesserten. Darüber hinaus ließen sich für beide Gruppen von Kindern auch auf neuronaler Ebene Unterschiede im Vergleich zu den Aktivierungsmustern vor dem Training feststellen. Denn sowohl die rechenschwachen Kinder als auch jene ohne Rechenstörung wiesen nach Trainingsende schwächere Aktivierungen in den frontalen und zahlsspezifischen parietalen Hirnarealen auf. Dies spricht nach Ansicht der Autoren dafür, dass die zum Rechnen benötigten Prozesse durch das Training stärker automatisiert wurden und demzufolge weniger kognitive Ressourcen in Anspruch nahmen. Darüber hinaus ließ sich beobachten, dass die Aktivierungsunterschiede, die noch vor dem Training zwischen den beiden Gruppen

bestanden hatten, nach dem Training zumindest teilweise reduziert waren. Die Aktivierungsmuster von Kindern mit und ohne Rechenstörung ähnelten sich also nach dem Training deutlich stärker als zuvor.

Zusammengenommen sprechen diese Ergebnisse dafür, dass effektive Förderprogramme für Kinder mit Rechenstörung nicht nur zu einer Leistungsverbesserung, sondern auch zu einer Veränderung der Hirnaktivität während des Rechnens führen können. Allerdings existieren hierzu bislang nur sehr wenige Studien.

## **5 Fazit**

Inwiefern können neurokognitive Befunde nun zu einem besseren Verständnis des Rechnens und der Rechenstörung beitragen? Aus den vorangegangenen Ausführungen lassen sich hierzu vier zentrale Erkenntnisse zusammenfassen: (1) Beim Umgang mit Zahlen sowie beim Rechnen sind grundsätzlich neben domänen-übergreifenden Prozessen (z.B. Arbeitsgedächtnis), die mit frontalen Hirnarealen assoziiert sind, vor allem zahlsspezifische und mit der Größenverarbeitung assoziierte parietale Areale involviert (z.B. intraparietaler Sulcus). (2) Bei Kindern sind frontale Areale meist noch deutlich stärker aktiviert, während die zahlsspezifischen parietalen Areale eine vergleichsweise geringere Aktivierung zeigen. Dies deckt sich mit der Tatsache, dass sich Zahlenverarbeitungsprozesse im Laufe der numerischen Entwicklung zunehmend automatisieren. (3) Zwischen Kindern mit und ohne Rechenstörung bestehen Unterschiede in den neurofunktionalen Aktivierungsmustern (siehe auch Rykhlevskaia, Uddin, Kondos, & Menon, 2009 für Hinweise auf neurostrukturelle Unterschiede). Allerdings ist die Befundlage hier bislang keineswegs einheitlich. Zur Diagnose einer Rechenstörung eignen sich neurokognitive Methoden daher nur bedingt. (4) Effektive Förderprogramme für Kinder mit einer Rechenstörung zeigen ihre Wirkung nicht nur auf der Leistungsebene, sondern auch auf neuronaler Ebene.

Zusammengenommen verdeutlichen diese Erkenntnisse, dass neurokognitive Befunde dazu beitragen können, das Rechnen und die Rechenstörung besser zu verstehen. Allerdings stellt sich die Befundlage zu den neuronalen Aktivierungsmustern bei Kindern mit einer Rechenstörung bislang noch recht uneinheitlich dar. Und auch im Hinblick auf die (neuronalen) Wirkung von Interventionen existieren derzeit nur sehr wenige Untersuchungen. Deren Ergebnisse sind allerdings vielversprechend.

## Literatur

- Ashkenazi, S., Black, J. M., Abrams, D. A., Hoefft, F., & Menon, V. (2013). Neurobiological underpinnings of math and reading learning disabilities. *Journal of Learning Disabilities, 46*, 549-569.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition, 1*, 83-120.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex, 33*, 219-250.
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., . . . Brooks-Gunn, J. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology, 43*, 1428.
- Fischbach, A., Schuchardt, K., Brandenburg, J., Kleszczewski, J., Balke-Melcher, C., Schmidt, C., . . . Hasselhorn, M. (2013). Prävalenz von Lernschwächen und Lernstörungen: Zur Bedeutung der Diagnosekriterien. *Lernen und Lernstörungen, 2*, 65-76.
- Gross, J., Hudson, C., & Price, D. (2009). *The Long Term Costs of Numeracy Difficulties*, Every Child a Chance Trust and KPMG.
- Houdé, O., Rossi, S., Lubin, A., & Joliot, M. (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: an fMRI meta-analysis of 52 studies including 842 children. *Developmental Science, 13*, 876-885.
- Kaufmann, L., Vogel, S. E., Starke, M., Kremser, C., Schocke, M., & Wood, G. (2009). Developmental dyscalculia: compensatory mechanisms in left intraparietal regions in response to nonsymbolic magnitudes. *Behavioral and Brain Functions, 5*, 1.
- Kaufmann, L., & von Aster, M. (2012). Diagnostik und Intervention bei Rechenstörung. *Deutsches Ärzteblatt, 109*, 767-777.
- 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*, 763-787.
- Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schonmann, C., Plangger, F., . . . von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *Neuroimage, 57*, 782-795.
- Kucian, K., Loenneker, T., Dietrich, T., Dosch, M., Martin, E., & von Aster, M. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children: a functional MRI study. *Behavioral and Brain Functions, 2:31*, 1-17.
- Moeller, K., Klein, E., & Kaufmann, L. (in press). Bedeutung der neurokognitiven und bildgebenden Befunde für ein besseres Verständnis von Rechenschwierigkeiten. In A. Fritz, S. Schmidt, & G. Ricken (Eds.), *Handbuch Rechenschwäche* (3. völlig überarbeitete Auflage). Weinheim: Beltz.
- Parsons, S., & Bynner, J. (2005). *Does numeracy matter more?* NRDC - National Research and Development Centre for adult literacy and numeracy, Institute of Education - University of London.
- Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., Kondos, L., & Menon, V. (2009). Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: combined evidence from morphometry and tractography. *Frontiers in Human Neuroscience, 3:51*, 1-13.