

Aus dem Bereich Funktionelle Kernspintomographie  
der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie  
der Medizinischen Fakultät der Universität des Saarlandes,  
Homburg/Saar

# **Das Mathemonster: fMRI-Trainingsstudie zur räumlichen Zahlenverarbeitung bei Kindern**

*Dissertation zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Medizin (Dr. med.)  
der Medizinischen Fakultät  
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES  
2015*

vorgelegt von: Cordula Maria Klewin  
geboren am: 18.01.1990  
in Bochum

# 1 Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Inhaltsverzeichnis</i></b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b><i>Abstract / Zusammenfassung</i></b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b><i>Einleitung</i></b> .....	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>Zahlenverarbeitung</b> .....	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Mentale Rotation</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Training arithmetischer Aufgaben</b> .....	<b>20</b>
<b>3.4</b>	<b>Motivation und Lernen</b> .....	<b>22</b>
<b>3.5</b>	<b>Hypothese</b> .....	<b>23</b>
<b>4</b>	<b><i>Material und Methoden</i></b> .....	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Teilnehmer der Trainingsstudie</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2</b>	<b>Studiendesign</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3</b>	<b>Überblick über Tests und Übungen:</b> .....	<b>25</b>
<b>4.4</b>	<b>Trainingsspiel „Das Mathemonster“</b> .....	<b>25</b>
<b>4.5</b>	<b>Paradigma</b> .....	<b>27</b>
4.5.1	Zahlenvergleich (Zielaufgabe).....	28
4.5.2	Mentale Rotation (Kontrollaufgabe).....	29
<b>4.6</b>	<b>Fragebogen: Erfassung von Zahlen, räumlichem Denken und Schwierigkeiten im Fach Mathematik</b> .....	<b>30</b>
4.6.1	Zahnradtest.....	30
4.6.2	Zahlenstrahltest.....	31
4.6.3	Kopfrechentest:.....	33
4.6.4	Kognitiver Fähigkeitstest (KFT 5-12, Hogrefe Verlag):.....	33
4.6.5	Skalen zur Erfassung der Lern- und Leistungsmotivation, Schülerversion (SELLMO-S):.....	33
4.6.6	Fragebogen zur Erfassung emotionaler und sozialer Schulerfahrungen von Grundschulkindern dritter und vierter Klassen (FEES 3-4):.....	34
<b>4.7</b>	<b>Auswertung der Verhaltensdaten</b> .....	<b>35</b>
<b>4.8</b>	<b>MRT-Messungen</b> .....	<b>35</b>
<b>4.9</b>	<b>Statistische Aufbereitung der fMRI-Daten</b> .....	<b>36</b>
4.9.1	Prä-Messung.....	36
4.9.2	Trainingseffekt.....	37
<b>5</b>	<b><i>Ergebnisse</i></b> .....	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Verhaltensdaten</b> .....	<b>38</b>
5.1.1	Ausgangsperformanz.....	38
5.1.1.1	Zahlenvergleich.....	38
5.1.1.2	Mentale Rotation.....	40
5.1.2	Trainingseffekt.....	44
<b>5.2</b>	<b>fMRI-Daten</b> .....	<b>52</b>
5.2.1	Prä-Messungen.....	52
5.2.2	Trainingseffekt.....	53

## Inhaltsverzeichnis

<b>6</b>	<b><i>Diskussion</i></b> .....	<b>58</b>
6.1	<b>Motivation für die Trainingsstudie</b> .....	<b>58</b>
6.2	<b>Aufbau der Trainingsstudie</b> .....	<b>58</b>
6.3	<b>Verhaltensdaten</b> .....	<b>60</b>
6.3.1	Ausgangsperformanz .....	61
6.3.2	Trainingseffekt .....	63
6.3.3	Zusammenfassung Verhaltensdaten .....	69
6.4	<b>fMRI-Ergebnisse</b> .....	<b>69</b>
6.5	<b>Ausblick Schule</b> .....	<b>74</b>
6.6	<b>Einschränkungen dieser Trainingsstudie</b> .....	<b>74</b>
6.7	<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>75</b>
<b>7</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b> .....	<b>76</b>
<b>8</b>	<b><i>Anhang</i></b> .....	<b>82</b>
<b>9</b>	<b><i>Danksagung</i></b> .....	<b>87</b>

## 2 **Abstract / Zusammenfassung**

This study examines in which way spatial number processing can be trained with the help of a computer-based training game, called „Das Mathemonster“ (the monster of maths). For this purpose, 10- to 13-year-old participants trained their spatial numerical competence with the monster of maths for a week. Initial performance and training effect have been measured for both behavioural and fMRI data. Participants passed several tests and questionnaires and underwent fMRI sessions before and after one week of training. Based on previous training studies, I expected performance improvement, namely reduced error rates and reaction times. In terms of fMRI data I turned special attention to parietal and frontal premotor areas, both of which are involved in number processing as part of a neuronal network.

My results demonstrate substantial behavioural as well as functional anatomic training effects after only a short period of training. FMRI data provide training effects mainly in frontal premotor areas, which indicates better handling of numbers and improved mental number manipulation.

Diese Trainingsstudie untersucht, inwieweit sich die räumliche Zahlenverarbeitung mithilfe eines computergestützten Lernspiels, dem „Mathemonster“ trainieren lässt. Zu diesem Zweck trainierten 10-13-jährige Probanden über einen Zeitraum von einer Woche mit dem Mathemonster ihre räumliche Zahlenkompetenz. Ausgangsperformanz und Trainingseffekt wurden sowohl auf Verhaltensebene in Form verschiedener Fragebögen und Tests als auch funktionell-anatomisch mittels fMRI-Messungen, jeweils vor und nach dem Training gemessen. Basierend auf bisherigen Trainingsstudien erwartete ich auf Verhaltensebene eine Performanz-Steigerung in Form reduzierter Fehlerraten und Reaktionszeiten. Auf fMRI-Ebene waren insbesondere parietale und frontale prämotorische Areale, die als Teil eines neuronalen Netzwerks an der Zahlenverarbeitung beteiligt sind, von Interesse.

Als Ergebnis lässt sich sowohl auf Verhaltensebene als auch funktionell-anatomisch ein Trainingseffekt bereits nach sehr kurzer Trainingszeit nachweisen. Die fMRI-Ergebnisse zeigen vorrangig einen Trainingseffekt in frontalen prämotorischen Arealen, was auf den verbesserten Umgang mit Zahlen und auf eine verbesserte Manipulation derselben hindeutet.

### 3 Einleitung

Der Erwerb arithmetischer Kompetenz ist grundlegend wichtig für die Teilnahme an schulischem, sozialem und Berufsleben (Ischebeck et al. 2007, Delazer et al. 2003). Vielen Schülerinnen und Schülern bereitet das Fach Mathematik die größten Schwierigkeiten und die wenigsten geben Mathematik als ihr Lieblingsfach an. Häufig wird schon die Mathematiknote in der Grundschule zur Entscheidung, welche weiterführende Schulform gewählt werden soll, herangezogen. Die arithmetische Kompetenz eines Grundschülers hat somit allergrößte Bedeutung für seine weitere Schullaufbahn.

Doch wie erlernt ein Kind überhaupt die Bedeutung der Zahlen und wie erwirbt es die Fähigkeit, mit ihnen umzugehen, sie zu manipulieren, mit ihnen Rechenschritte zu vollziehen? Die funktionellen neuronalen Prozesse, die beim Lernen insbesondere arithmetischer Fähigkeiten und Aufgaben eine Rolle spielen, sind noch nicht ausreichend erforscht. Diese Trainingsstudie soll einen Beitrag dazu leisten, dass wir die Lernprozesse im Kindergehirn besser verstehen lernen.

Zu diesem Zwecke ließ ich zehn- bis 13-jährige Probanden mit einem

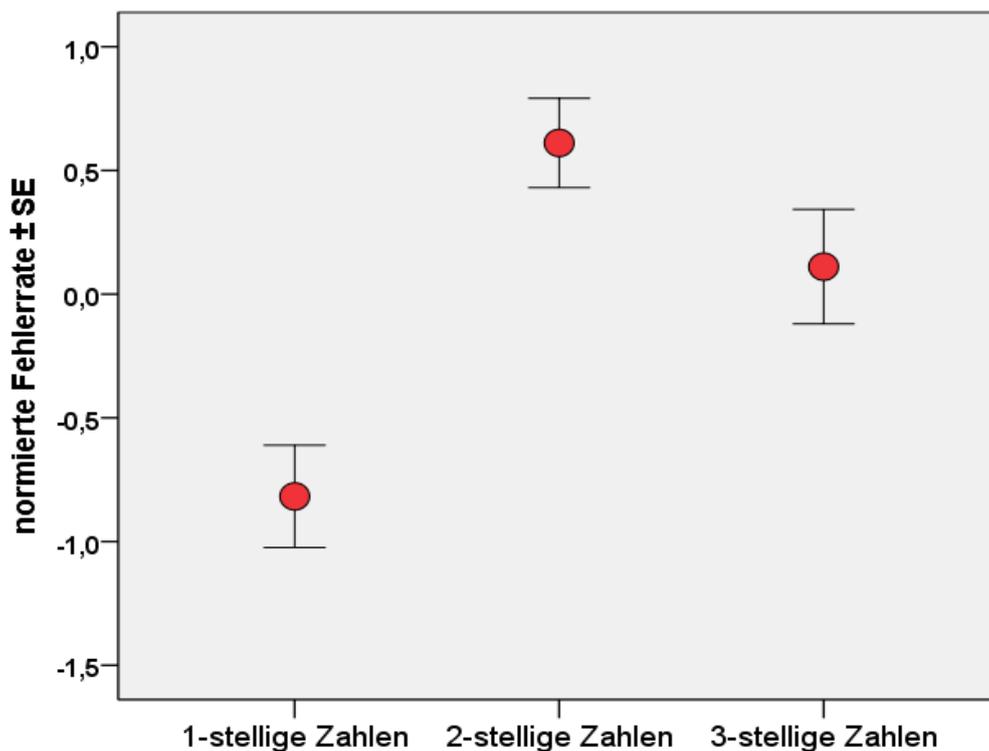


Abbildung 1: normierte Fehlerrate ein-, zwei- und dreistelliger Zahlen; Daten von Kreis (2015)

## Einleitung

computergestützten Lernspiel, dem „Mathemonster“, den Umgang mit Zahlen sowie deren Verarbeitung und räumliche Einordnung trainieren, Prozesse also, die eine mentale Manipulation erfordern. Eine fMRI-Vorstudie unserer Arbeitsgruppe, durchgeführt durch Sonja Kreis (2015), konnte zeigen, dass Kinder im Alterssegment von zehn bis 13 Jahren die größten Schwierigkeiten bei der Verarbeitung zweistelliger Zahlen haben. Die Aufgabe der Probanden war es, zu entscheiden, ob eine Zahl der Größe nach zwischen zwei anderen Zahlen einzusortieren ist (z.B. Ist die Zahl 5 der Größe nach zwischen 3 und 6 einzuordnen?). Die Fehlerrate war bei Aufgaben mit zweistelligen Zahlen größer als bei solchen mit ein- oder dreistelligen Zahlen (siehe Abbildung 1).

Daher konzipierten wir das Mathemonster so, dass insbesondere der Zahlenraum von eins bis 100 trainiert wurde. Zur Überprüfung des Trainingseffektes führten wir fMRI-Messungen vor und nach dem Training durch. Während dieser Messungen lösten die Probanden zum einen Zahlenaufgaben, die gezielt durch das Mathemonster trainiert werden sollten, zum anderen mentale Rotationsaufgaben, die als Kontrollaufgaben dienten. Die Details werde ich im späteren Verlauf dieser Arbeit genauer beleuchten.

Im Folgenden möchte ich zunächst auf die Grundlagen der Zahlenverarbeitung und der mentalen Rotation eingehen, anschließend die Rolle prämotorischer Areale in diesem Zusammenhang darstellen, um schließlich die Grundlagen von Trainingsstudien und speziell meine Trainingsstudie vorzustellen.

### **3.1 Zahlenverarbeitung**

Die mentale Verarbeitung von Zahlen ist ein komplexer Vorgang. Nach dem Triple-Code-Modell von Dehaene und Kollegen (Dehaene et al. 1992) werden Zahlen in drei verschiedenen Systemen („Codes“) mental repräsentiert und manipuliert.

Erstens wird eine Zahl analog als Größe („Magnitude“) repräsentiert. Diese analoge Größenrepräsentation entsteht bilateral im horizontalen Anteil des Intraparietalsulcus (hIPS) und ermöglicht den Vergleich von Größen und das Abschätzen von Größen oder

## Einleitung

Objektmengen (Dehaene et al. 1999). Sowohl symbolische, zum Beispiel arabische Ziffern, als auch nicht-symbolische Numerositäten, zum Beispiel eine bestimmte Anzahl von Punkten, aktivieren dieses Verarbeitungssystem (Schneider, Fink 2013). In diesem analogen Größencode werden Zahlen entlang eines mentalen Zahlenstrahls, der in der westlichen Kultur von links nach rechts angeordnet ist, räumlich repräsentiert. Dehaene et al. (1993) zeigten, dass Probanden, die entscheiden sollten, ob eine Zahl gerade ist, auf relativ größere Zahlen innerhalb eines Zahlenintervalls (Zahlen 4 und 5 im Intervall 0-5) schneller mit Knopfdruck der rechten Hand antworteten, während sie auf relativ kleinere Zahlen (Zahlen 4-5 im Intervall 4-9) schneller mit der linken Hand antworteten. Dieser Effekt wurde SNARC-Effekt (Spatial-numerical association of response codes) genannt (Dehaene et al. 1993). Weitere Experimente von Dehaene et al. (1993) zeigten, dass sowohl bei Links- als auch bei Rechtshändern die Links-Rechts-Assoziation gleich war, ebenso nach Überkreuzen der Hände der Probanden. Iranische Probanden zeigten eine umgekehrte Assoziation: Sie antworteten schneller mit der linken Hand auf große, mit der rechten Hand auf kleinere Zahlen, was auf die Schreibrichtung von rechts nach links zurückgeführt wurde. Diese Experimente zeigen, dass Zahlen nach ihrer relativen, nicht ihrer absoluten Größe auf dem mentalen Zahlenstrahl repräsentiert und eingeordnet werden, dass die Links-Rechts-Assoziation von der Schreibrichtung abhängt und unabhängig von der Händigkeit ist.

Die Fähigkeit, das Ergebnis einer Aufgabe oder die Anzahl von Objekten abzuschätzen, wird ebenfalls im IPS im sogenannten Approximate Number System (ANS) repräsentiert. Knops und Willmes (2014) konnten eine positive Korrelation zwischen der Genauigkeit bzw. der Trennschärfe des ANS eines Probanden und seiner arithmetischen Performance nachweisen. Sie schlossen daraus, dass die Zahlenrepräsentation und -manipulation im ANS als Ursprungssystem verwurzelt sind.

Zweitens wird eine Zahl in einem verbalen Code verarbeitet. In diesem verbalen Code werden Zahlensymbole als Wörter repräsentiert (z.B. „1“ als „Eins“) und zusätzlich arithmetisches, insbesondere multiplikatives Faktenwissen wie das Kleine Einmaleins gespeichert und abgerufen. Diese Vorgänge finden vor allem im linken Gyrus angularis und in perisylvischen Spracharealen statt (Schneider, Fink 2013).

## Einleitung

Verschiedene Experimente zeigen Unterschiede in der Verarbeitung von Zahlen und Magnituden über das Größen- und das verbale System. So zeigten Dehaene et al. (1999) den Unterschied in der Verarbeitung von Aufgaben, die das exakte Berechnen eines Rechenergebnisses erforderten, im Gegensatz zu Schätzaufgaben. Zu diesem Zwecke trainierten Russisch-englisch-bilinguale Probanden in jeweils einer Sprache (Übungssprache) Additions- und Schätzaufgaben. Trainierte Additionsaufgaben wurden in der Übungssprache, unabhängig davon, ob diese Englisch oder Russisch war, schneller als in der Nicht-Übungssprache beantwortet, während Schätzaufgaben keinen Performance-Unterschied zeigten. Dieses Experiment zeigt, dass exaktes Rechnen vor allem in einem verbalen, Schätzen hingegen in einem nonverbalen visuospatialen Netzwerk verarbeitet, gespeichert und von dort abgerufen wird (Dehaene et al. 1999). Sohn et al. (2004) zeigten, dass es keinen Performance-Unterschied, allerdings einen Unterschied im Aktivierungsmuster bei der Verarbeitung derselben Aufgabe (gemischte Additions-Multiplikationsaufgabe) entweder als mathematische Gleichung oder als Textaufgabe gibt. Die Textaufgaben-Kondition rief stärkere Aktivierung im linken anterioren dorsolateralen Präfrontalcortex (DLPFC) hervor, die Gleichungskondition hingegen stärkere bilaterale posterior parietale Aktivierung.

Drittens sorgt ein visueller Zahlencode für die das Erkennen arabischer Zahlensymbole. Diese Verarbeitung findet vorwiegend im okzipitotemporalen Übergang, insbesondere in den Brodmann-Arealen 19 (sekundäre und tertiäre Sehrinde) und 37 (Gyrus fusiformis) und in angrenzenden Arealen, statt (Schneider, Fink 2013).

Es wird angenommen, dass die Fähigkeit, numerische Symbole zu repräsentieren und zu verarbeiten, einen Prozess miteinbezieht, bei dem symbolische Repräsentationen numerischer Größen auf vorbestehende, nicht-symbolische Repräsentationen kartiert („gemapped“) werden (Ansari 2008).

Hinsichtlich des Schwierigkeitsgrads einer numerischen Aufgabe lassen sich zwei wichtige Effekte feststellen. Der Vergleich zweier Zahlen, Zahlwörter oder Objektmengen fällt leichter, je größer ihre Differenz, ihre sogenannte numerische Distanz ist (Moyer, Landauer 1967). Dies äußert sich in kürzeren Reaktionszeiten und geringeren Fehlerraten (Ansari 2008, Holloway und Ansari 2009, Pinel et al. 2004, Liu et al. 2006).

Dieser numerische Distanzeffekt (NDE) kann bereits bei Kindern im Kindergartenalter

## Einleitung

gefunden werden und nimmt im Laufe der Entwicklung ab (Duncan, McFarland 1980). Daraus lässt sich schließen, dass erstens die dem NDE zugrunde liegenden Mechanismen schon in früher Kindheit etabliert werden und zweitens, dass das Codieren von Zahlen und der Zahlenvergleich mit zunehmendem Alter besser funktionieren.

Holloway und Ansari (2009) untersuchten Zusammenhänge zwischen dem Ausmaß des NDE und Ergebnissen in standardisierten Mathematiktests. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass größere symbolische numerische Distanzeffekte mit schlechteren Ergebnissen in Mathematiktests korreliert sind. Dieser Zusammenhang ließ sich allerdings nicht für nicht-symbolische Distanzeffekte nachweisen. Offenbar spielt also der Zugriff auf die semantische Repräsentation arabischer Zahlen eine wichtige Rolle in der Beziehung zwischen Erfolg in mathematischen Tests und NDE. Die Autoren folgerten weiterhin, dass durch die Verknüpfung eines Symbols mit einer Zahlengröße, sogenanntes symbolisches Mapping, die Trennschärfe in der Zahlenrepräsentation gesteigert werde, was den Vergleich symbolischer Zahlen vereinfache. Der NDE werde also kleiner durch eine größere Trennschärfe und dadurch weniger starke relative Überlappung zweier Zahlenrepräsentationen bei kleinen Distanzen. Probanden mit guten Ergebnissen in mathematischen Tests verfügten bereits über diese Fähigkeiten und zeigten einen kleineren NDE als mathematisch weniger kompetente Probanden. Neben einer präziseren Repräsentation entwickelten Kinder im Laufe der Zeit zudem einen schnelleren und zunehmend automatisierten Zugriff auf die Bedeutung eines Zahlensymbols, was zu erleichterter Manipulation von Zahlen führe und bessere Ergebnisse in mathematischen Tests und kleinere NDEs erkläre (Holloway, Ansari 2009).

Der NDE lässt sich auch in der funktionellen Bildgebung nachweisen. Pinel et al. (2004) konnten in einer fMRI-Studie zeigen, dass die numerische Distanz die Gehirnaktivierung bilateral im anterioren IPS und im linken Präzentralcortex moduliert. Mit einer Aufgabe, bei der die Zahl mit der größeren Schriftgröße aus einem Zahlenpaar ausgesucht werden sollte, untersuchten sie zudem den Größendistanzeffekt. Dieser moduliert die Aktivierung im posterioren IPS, bilateral in präzentralen, inferior temporalen und cerebellaren Regionen. Liu et al. 2006 konnten nur einen schwach ausgeprägten NDE im rechten IPS nachweisen, daneben im rechten mittleren und inferioren Frontalgirus, im anterioren Cingulum und in der linken Insula. Die nur schwach ausgeprägte Aktivitätsmodulierung im IPS erklärten die Autoren

## Einleitung

damit, dass sie lediglich zwei verschiedene numerische Distanzen verwendet hätten.

Ein weiterer Effekt, der sogenannte Größeneffekt, besagt, dass bei gleichbleibender numerischer Distanz aber absoluter Größenzunahme zweier Zahlen oder Mengen Reaktionszeiten und Fehlerraten zunehmen (Ansari 2008). Untersuchungen an Parietal- und Präfrontalcortices von Affen von Nieder, Freedman und Miller (2002) konnten diese Effekte auf Einzelzellniveau elektrophysiologisch nachweisen. Es resultierten stärker überlappende Ansprechkurven (Tuning curves) von Neuronen, die auf Zahlen mit geringer numerischer Distanz reagierten, während Ansprechkurven solcher Neuronen, deren numerische Präferenz weiter auseinander lag, weniger überlappten. Zudem zeigten Neuronen mit Präferenz für große Zahlen breitere Ansprechkurven als solche mit Präferenz für kleine Zahlen (Nieder, Freedman, Miller 2002).

Wie bereits einleitend erwähnt, konnte Kreis (2015) zeigen, dass Kinder im Alterssegment von zehn- bis 13 Jahren die größten Schwierigkeiten bei der Verarbeitung zweistelliger Zahlen haben. Die Mechanismen, die der Verarbeitung zweistelliger Zahlen unterliegen, sind jedoch noch nicht vollständig geklärt.

Ausgehend von einer holistischen Zahlenverarbeitung, würde man erwarten, dass mit zunehmender Anzahl an Stellen, also mit zunehmender numerischer Größe, die Reaktionszeiten länger werden und die Fehlerraten größer, entsprechend dem Größeneffekt (s.o.). Die Ergebnisse von Kreis lassen sich mit diesem Verarbeitungsmodell nicht vereinbaren, was darauf schließen lässt, dass es noch andere Mechanismen zur Verarbeitung zweistelliger Zahlen geben muss.

Nuerk et al. (2001) prägten den Begriff des Einer-Zehner-Kompatibilitätseffekts (unit-decade compatibility effect): In einer Zahlenvergleich-Aufgabe mit zweistelligen Zahlen ist die Reaktionszeit signifikant länger, wenn der Proband aus dem Zahlenpaar 37 und 52 die größere Zahl auswählen soll, als aus dem Zahlenpaar 42 und 57. Im ersten Beispiel sind die Zehner- und die Einerstelle inkompatibel:  $3 < 5$ , aber  $7 > 2$ . Im zweiten Beispiel ist  $4 < 5$  und  $2 < 7$ , das Zahlenpaar ist also kompatibel. Vergleicht man die Zehnerstellen zweier Zahlen miteinander und die Einerstellen zweier Zahlen, fällt die Entscheidung, welche der beiden größer ist, leichter, wenn beide Einzelentscheidungen zum selben Ergebnis führen ( $4 < 5$  und  $2 < 7$ , also

## Einleitung

42 < 57), als wenn diese zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (3 < 5, aber 7 > 2). Falls zweistellige Zahlen ausschließlich holistisch verarbeitet und repräsentiert würden, dürfte dieser Effekt nicht auftreten, da die absolute numerische Distanz bei beiden Zahlenpaaren 15 beträgt. Dieser Effekt wurde inzwischen vielfach repliziert (Wood et al. 2006, Liu et al. 2006, Moeller et al. 2009, Macizo und Herrera 2011) und legt nahe, dass zweistellige Zahlen getrennt nach Zehner- und Einerstelle verarbeitet werden, was auch als dekomponierte Verarbeitung bezeichnet wird.

Moeller et al. (2009) untersuchten mittels Eye-tracking Methode, ob zweistellige Zahlen eher holistisch oder eher dekomponiert, genauer gesagt parallel-dekomponiert oder sequentiell-dekomponiert, verarbeitet werden. Ihre Ergebnisse legen eine parallel-dekomponierte Verarbeitung nahe, Zehner- und Einerstellen werden also getrennt, aber zeitgleich miteinander verglichen. Das Modell der sequentiell-dekomponierten Verarbeitung nach Poltrock und Schwartz (1984) könne also verworfen werden. Die Ergebnisse von Moeller und Kollegen sind vereinbar mit dem Hybridmodell der gemeinsamen parallel-dekomponierten und holistischen Verarbeitung von Nuerk und Willmes (2005). Dieses Modell geht von einem Zusammenspiel von dekomponiert-paralleler und holistischer Verarbeitung mit unterschiedlichen Anteilen je nach Aufgabencharakteristika aus.

Die Studie von Zhou et al. 2008 konnte dieses Modell unterstützen: Bei simultaner Präsentation zweier Zahlen konnten signifikante Distanz- und Größeneffekt für Einerstellen gezeigt werden, bei sequentieller Präsentation jedoch keiner von beiden. Sie schlossen daraus, dass die Art der mentalen Repräsentation vom Stadium des Verarbeitungsprozesses abhängt: Initial werden zweistellige Zahlen also dekomponiert verarbeitet, sobald diese allerdings im Kurzzeitgedächtnis gespeichert sind, holistisch.

Sie untersuchten außerdem den SNARC-Effekt für ganze Zahlen, sowie einzeln für Zehner- und Einerstellen. Sowohl bei simultaner als auch sequentieller Zahlenpräsentation konnte der SNARC-Effekt lediglich für ganze Zahlen und Zehnerstellen nachgewiesen werden, was darauf hindeutet, dass zweistellige Zahlen auf einem einzigen mentalen Zahlenstrahl repräsentiert werden, nicht auf multiplen Zahlenstrahlen, für jede Ziffer getrennt.

Ganor-Stern et al. (2009) kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Während bei gleichzeitigem Einblenden eines zweistelligen Zahlenpaares ein Kompatibilitätseffekt nachgewiesen wurde,

## Einleitung

was für eine getrennte Verarbeitung spricht, trat dieser bei sequentiellem Einblenden der beiden Zahlen nicht auf. Die Autoren folgerten daraus, dass die Art der Zahlenverarbeitung abhängig von der Aufgabenpräsentation ist. Bei gleichzeitig gezeigten Zahlen werden diese getrennt verarbeitet, wohingegen bei sequentiell gezeigten Zahlen diese eher holistisch verarbeitet werden, was womöglich mit der höheren Anforderung an das Arbeitsgedächtnis zusammenhängt.

Moeller et al. (2013) vermuteten unbewusste perzeptuelle Hinweise, die die Aufgabe erleichterten und den Einfluss der geringen Cue-Validität der Einerstellen als Grund für die Ergebnisse von Ganor-Stern und Kollegen und veränderten den Versuchsaufbau dahingehend, dass diese Einflüsse vermieden wurden. Daraufhin konnten sie auch bei sequentieller Zahlenpräsentation einen Kompatibilitätseffekt nachweisen und verwarfen das Modell der holistischen Präsentation zweistelliger Zahlen.

Liu et al. (2006) argumentierten hingegen, dass die holistische Repräsentation zweistelliger Zahlen eine Rolle spielen muss, da sonst kein NDE zu erwarten wäre.

Im Folgenden möchte auf die an der Zahlenverarbeitung beteiligten Gehirnareale, genauer gesagt das frontoparietale Netzwerk, eingehen.

Die dabei vor allem beteiligten parietalen Regionen sind der Intraparietalsulcus (IPS), der posteriore superiore Parietallappen (PSPL) sowie der Gyrus angularis (GA).

Auf beiden Großhirnhemisphären vermittelt der IPS hierbei, wie schon im Triple-Code-Modell (s.o.) erwähnt, als Teil eines größeren Netzwerks von Gehirnregionen, die numerische Größenverarbeitung (Budgen et al. 2012). Insbesondere der horizontale Anteil der IPS (hIPS) spielt eine zentrale Rolle bei der semantischen Zahlen- und Größenrepräsentation und -manipulation (Dehaene et al. 1992, 1999, 2004, Pinel et al. 2001). Er wird unabhängig vom Darbietungsmodus, ob durch gesprochene oder geschriebene Zahlen, ob durch arabische Zahlensymbole oder Zahlwörter, und von der Sprache, aktiviert (Dehaene et al. 2004), wobei hier eine gewisse Lateralität vorliegt: Während der rechtsseitige IPS eher die nicht-symbolische Verarbeitung numerischer (z.B. eine Anzahl von Objekten) und nicht-numerischer Größen (z.B. die Länge einer Linie) verarbeitet, scheint der linksseitige IPS eine größere Präzision in der Repräsentation symbolischer numerischer Größen (z.B. arabische Zahlen) aufzuweisen

## Einleitung

(Budgen et al. 2012). Neben seiner Rolle bei der Verarbeitung von Zahlenvergleichen und Schätzaufgaben, zeigten Budgen et al. (2012) die Bedeutung des linken IPS in der Beziehung zwischen Zahlenverarbeitung und arithmetischen Fähigkeiten auf: Das Ausmaß der Aktivierung im linken IPS von Kindern korrelierte positiv mit individuellen Unterschieden in verschiedenen standardisierten Mathematik- und Rechentests. Sie folgerten daraus, dass eine stärkere IPS-Aktivierung die Aktivierung verschiedener auf bestimmte Zahlengrößen, Zahlenabstände oder Zahlenverhältnisse spezialisierter Areale widerspiegelt und dies zu besserer arithmetischer Performanz führt. Die numerische Repräsentation dieser Probanden ist präziser und weniger stark überlappend. Kinder aber, die nicht über stark spezialisierte Areale verfügen, aktivieren bei verschiedenen Zahlen, Zahlenabständen und Zahlenverhältnissen dieselben Areale, was in einer insgesamt schwächeren IPS-Aktivierung durch weniger präzise, dafür aber stärker überlappende Zahlenrepräsentationen und schlechterer arithmetischer Performance resultiert. Zusätzlich korrelierte die IPS-Aktivierung negativ mit der Reaktionszeit in einem numerischen Zahlenvergleichstest, der im MRT-Scanner durchgeführt wurde.

Im PSPL werden vor allem Zählen (Delazer 2003 nach Piazza et al. 2002), Schätzen (Dehaene et al. 1999, Delazer 2003), Zahlenvergleich (Pesenti et al. 2000, Delazer 2003) und die räumliche Einordnung von Zahlen (Gruber et al. 2001) verarbeitet.

Während der IPS und PSPL sprachunabhängig Zahlen und Größen verarbeiten, verkörpert der Gyrus angularis (GA) das verbale System. Zur verbalen Zahlenverarbeitung zählt die Verarbeitung von Zahlwörtern, aber auch von Zahlensymbolen, da diesen während des Verarbeitungsprozesses im GA automatisch ein Zahlwort zugeordnet wird (Schneider, Fink 2013). Davon abgesehen, spielt der GA eine große Rolle beim Abspeichern und Wiederaufrufen von Zahlen, Größen und Rechenergebnissen im verbalen Kurzzeitgedächtnis (Dehaene et al. 2003). Diese Aktivierung zeigt sich insbesondere, wenn man Probanden im Rahmen einer fMRI-Messung vorher geübte Multiplikationsaufgaben lösen lässt (Gruber et al. 2001, Dehaene et al. 2003). Vergleicht man zwei Lösungsansätze für eine Rechenaufgabe, Auswendiglernen im Gegensatz zum Erlernen einer Strategie, wird beim Auswendiglernen ebenfalls der GA stärker aktiviert (Delazer et al. 2005).

Ähnlich wie für den IPS bereits erwähnt, korreliert auch eine Aktivierung des linken GA

## Einleitung

positiv mit besseren Ergebnissen in standardisierten arithmetischen Tests (Grabner et al. 2007). Grabner et al. (2007) schlossen daraus, dass die Regulierung der GA-Aktivierung während der Durchführung arithmetischer Operationen neben Unterschieden in der Performance auch funktionelle Unterschiede reflektiert, nämlich dass mathematisch kompetentere Personen stärker auf automatisierte Sprachen-vermittelte Prozesse zurückgreifen.

Neben der Verarbeitung von Größeninformationen haben die genannten Anteile des Parietallappens und angrenzende Areale auch andere Funktionen, die ein Zusammenspiel zwischen der Erfassung visueller Informationen und der Ausführung motorischer Bewegungen ermöglichen. So spielt der IPS eine große Rolle beim Erfassen visuell-räumlicher Objektinformationen wie der Orientierung im Raum und der Oberflächen- und Musterausrichtung (Shikata et al. 2001), der Objektmanipulation und der Koordination dieser Informationen mit Fingerbewegungen, was dem ursprünglichen Zweck des Greifens und Entdeckens dient (Binkofski et al. 1998, Grefkes und Fink 2005). Offenbar findet hier ein Informationstransfer zwischen dem visuellen und dem sensorimotorischen System statt (Grefkes et al. 2002). Allerdings beschränkt sich die Objekterkennung durch den IPS keineswegs auf rein visuelle Stimuli. Grefkes et al. (2002) und Bremmer et al. (2001) konnten bei Aufgaben, die das Erkennen von Objekten bzw. von Bewegungsreizen erforderten, zeigen, dass der IPS bilateral sowohl bei unimodaler (visuell, taktil oder auditorisch) als auch bei multimodaler Stimuluspräsentation (visuell, taktil und auditorisch) aktiviert wird. Diese cross-modale Informationsverarbeitung ist essentiell für die Verarbeitung von multimodalen Bewegungsreizen (Bremmer et al. 2001), Planung und Ausführung von Greif- und Zeigebewegungen und Sakkaden, Aufgaben, die ebenfalls parietale Areale wie den IPS, SPL und den Precuneus aktivieren (Rushworth 2001, Simon et al. 2002, Grefkes et al. 2002, Thiel et al. 2004, Grefkes, und Fink 2005). Dieselben Areale verarbeiten außerdem auch durch Aufgaben, die allgemeine und visuomotorische Aufmerksamkeit erfordern (Rushworth 2001, Simon et al. 2002, Grefkes et al. 2002, Thiel et al. 2004).

Um die Verarbeitung und Manipulation von Zahlen-, Größen- und Objektinformationen zu verstehen, ist es unerlässlich, den Parietallappen als wichtigen Teil eines größeren Netzwerks aufzufassen. Als weiteren Teil dieses Netzwerks möchte ich im Folgenden auf

## Einleitung

frontale und präfrontale Areale eingehen.

Diverse Studien (Rickard et al. 2000, Kucian et al. 2011, Ischebeck et al. 2006, 2007) belegen, dass frontale und präfrontale Areale in die Verarbeitung arithmetischer Aufgaben involviert sind. Rickard et al. (2000) zeigten präfrontale Aktivierung bei Probanden, denen Multiplikationsaufgaben aus dem Kleinen Einmaleins gezeigt wurden und die entscheiden sollten, ob das gezeigte Ergebnis zutreffend ist. Sie erklärten die präfrontale Aktivität mit den Aufgaben des Präfrontalcortex im Rahmen der allgemeinen Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses. Um richtig zu antworten, muss zunächst das Ergebnis der Aufgabe berechnet werden, dieses im Arbeitsgedächtnis gespeichert, mit dem angebotenen Ergebnis verglichen, und entschieden werden, ob beide übereinstimmen. Die Ergebnisse einiger fMRI-Studien zeigen, dass frontale Areale, insbesondere der Superiore (SFG) und Inferiore Frontalgyrus (IFG) und der Präfrontalcortex (PFC) nicht spezifisch für numerische Aufgaben zuständig sind, sondern vielmehr die Verarbeitung dieser Aufgaben durch ihre Funktion als Teil des numerischen, visuospatialen und verbalen Arbeitsgedächtnisses unterstützen (Delazer et al. 2003, Dehaene et al. 2003, Gruber et al. 2001).

Andererseits konnten Budgen et al. (2012) neben dem Zusammenhang zwischen der IPS-Aktivierung und Resultaten in standardisierten arithmetischen Tests (s.o.) einen ähnlichen Zusammenhang für die Aktivierung im SFG und IFG zeigen.

Mit zunehmender Komplexität einer Rechenaufgabe nimmt auch die Aktivierung präfrontaler Areale, unabhängig vom Verarbeitungsformat (Textaufgabe bzw. mathematische Gleichung), zu (Gruber et al. 2001, Sohn et al. 2004).

Für die oben genannten Verarbeitungsprozesse, die eine Koordination von visuellen und sensorimotorischen Informationen erfordern, wie die Planung und Durchführung von Greif- und Zeigebewegungen, Sakkaden, aber auch allgemeine Aufmerksamkeit und Rechenverarbeitungsschritte, werden neben den bereits genannten Anteilen des Parietallappens auch die superioren und mittleren Frontalgyri, die superioren Frontalsulci, der Postzentralgyrus, der Präzentralgyrus, und prämotorische Areale wie das supplementär-motorische Areal (SMA), der dorsolaterale Präfrontalcortex (DLPFC) und Areale wie das dorsolaterale prämotorische Areal und das frontale Augenfeld (Frontal eye field, FEF), die dem Brodmann Areal 6 zuzuordnen sind, aktiviert (Simon et al. 2002, Thiel et al. 2004, Jordan et al.

2001, Lamm et al. 2007).

Auf den funktionellen Nachweis des NDE bin ich bereits eingegangen (s.o.). Auch Wood et al. (2006) wiesen eine Modulation der Aktivierungsmuster bilateral im IPS, zudem im SPL, im posterioren Cingulum, sowie bilateral im prämotorischen Cortex und im rechten ventrolateralen Präfrontalcortex nach. Sie erklärten die Aktivierungsmuster in prämotorischen, motorischen und präfrontalen Arealen mit dem zunehmenden Schwierigkeitsgrad der Aufgabe, die durch die geringere numerische Distanz verursacht wird. Genauer wird allerdings nur auf den IPS eingegangen.

Das Aktivierungsmuster durch Zahlen- und Größenverarbeitungsaufgaben ist allerdings keineswegs statisch, sondern zeigt altersabhängige Unterschiede. Während bei Erwachsenen vorwiegend der IPS aktiviert wird, ist bei Kindern vorrangig frontale Aktivierung, insbesondere im IFG und Präzentralgyrus, festzustellen, während der IPS eine eher untergeordnete Rollen zu spielen scheint (Dehaene et al. 2003, 2004, Ansari et al. 2005, Ansari 2008, für eine Metaanalyse siehe Houdé et al. 2010). Mit zunehmendem Alter findet offenbar ein frontoparietaler Shift mit Aktivitätsabnahme in frontalen Arealen, insbesondere in SFG, MFG und IFG sowie im Cingulum und Aktivitätszunahme insbesondere im linken lateralen okzipitotemporalen Cortex, Supramarginalgyrus (SMG) und anterioren IPS, statt (Rivera et al. 2005, Ansari 2008). Rushworth et al. (2001) wiesen dem linken SMA und angrenzenden Arealen des anterioren IPS Aufgaben im Zusammenhang mit motorischer Aufmerksamkeit zu.

Während sich der Großteil der fMRI-Studien auf die Funktion des Parietallappens in der Verarbeitung von Zahlen konzentriert und Aktivierungen in prämotorischen, motorischen oder präfrontalen Arealen auf allgemeine Funktionen wie Aufmerksamkeit zurückgeführt werden, möchte ich besonderes Augenmerk auf ebendiese Regionen im Rahmen der Zahlenverarbeitung legen. Der Zahlenvergleich, das Einordnen von Zahlen auf einem Zahlenstrahl und zum Teil auch die Durchführung arithmetischer Operationen sind Verarbeitungsprozesse, die es erforderlich machen, einen Stimulus zu erfassen, ihn im Arbeitsgedächtnis zu behalten, ihn mental zu manipulieren und das Ergebnis dieses Prozesses schließlich mit einem Zielstimulus zu vergleichen.

Bei der mentalen Rotation eines Stimulus findet ein sehr ähnlicher Prozess statt. Da die

genannten Anteile des Frontallappens aber im Rahmen von Studien zur mentalen Rotation besser untersucht sind, möchte ich darauf im Folgenden genauer eingehen.

### **3.2 Mentale Rotation**

Zeigt man Probanden Bilder von zwei- oder dreidimensionalen Objekten, die entweder kongruent und rotiert oder aber gespiegelt und rotiert sind, und gibt ihnen die Aufgabe, zu entscheiden, ob die beiden Objekte kongruent, also durch Rotation zur Deckung zu bringen sind, müssen sie eine mentale Operation durchführen, für die Shepard und Metzler (1971) den Begriff der „Mentalen Rotation“ prägten. Für die Verarbeitung dieser komplexen Aufgabe muss ein Stimulus, also das zu rotierende Objekt, zunächst codiert und ein mentales Abbild von diesem erstellt werden. Die mentale Rotation dieses mentalen Abbildes muss als nächstes geplant und ausgeführt werden. Das im Arbeitsgedächtnis gehaltene rotierte Bild muss nun immer wieder mit dem Ziel-Stimulus verglichen, weiter rotiert und wieder verglichen werden, bis entschieden werden kann, ob beide zur Deckung zu bringen sind oder nicht. Misst man die Zeit zwischen der Präsentation der Aufgabe und der Antwortgabe des Probanden, ergibt sich ein fast linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Zeit und dem notwendigen mentalen Rotationsgrad bis zur Deckungsgleichheit zweier Objekte. Die gemessene Reaktionszeit entspricht der für die mentale Rotation benötigten Verarbeitungszeit (Shepard, Metzler 1971, für eine Metaanalyse und Review siehe Zacks 2008). Zu ihrer Strategie befragt, berichten Probanden häufig, dass sie mental versucht hätten, ein Objekt in die Richtung des anderen Objekts zu rotieren, bis beide Objekte kongruent waren, bzw. bis sie festgestellt hätten, dass Anteile des rotierten Objekts inkongruent blieben (Shepard, Metzler 1971).

Diverse fMRI-Studien, die mentale Rotation untersuchten, fanden Aktivierungen im IPS, SPL, Präzentralcortex, im SMA und anderen prämotorischen Regionen und im Präfrontalcortex (Liesefeld 2011, Jordan et al. 2001, Ecker et al. 2006, Lamm et al. 2007, Vingerhoets et al. 2002, für ein Review siehe Zacks 2008). Hierbei korreliert das Ausmaß der parietalen Aktivierung mit dem für das Lösen einer Aufgabe notwendigen mentalen Rotationsgrad (Zacks 2008).

Während die Aktivierungen im Parietallappen, der, wie schon erwähnt, eine bedeutende Rolle in der räumlichen Objekterkennung spielt, nicht weiter überraschen

## Einleitung

dürften, suggerieren motorische und prämotorische Areale dass die Probanden die Rotation des Objekts genauso planen, als würden sie sie nicht nur mental, sondern tatsächlich mit ihrer Hand durchführen. Tatsächlich konnten Wexler et al. (1998) und Wohlschläger und Wohlschläger (1998) eine direkte Interaktion zwischen mentaler und motorischer Rotation nachweisen. Probanden sollten während einer mentalen Rotationsaufgabe mit der Hand einen Joystick-Griff rotieren. Bei mentaler und motorischer Rotation in dieselbe Richtung wurde die Verarbeitung der mentalen Rotationsaufgabe erleichtert, was sich in einer Abnahme der Reaktionszeit und Fehlerrate äußerte. Gegensätzliche Rotationsrichtungen hingegen führten zu einer Inhibition der Verarbeitung, sichtbar an zunehmenden Reaktionszeiten und Fehlerraten. Bei gleichgerichteter Rotationsrichtung, aber Variation der motorischen Rotationsgeschwindigkeit konnte außerdem eine gleichgerichtete Änderung der Verarbeitungszeit der mentalen Rotationsaufgabe festgestellt werden. Die Autoren der Studie schlossen daraus, dass die mentale Rotation Verarbeitungsprozesse miteinbezieht, die für die motorische Planung und Antizipation zuständig sind, nicht aber kortikale und subkortikale Mechanismen, die die Bewegungsausführung steuern. Zudem scheinen motorische und visuospatiale Verarbeitungsprozesse miteinander zu interagieren (Liesefeld 2011).

Im Allgemeinen sind der Präzentralcortex als primär-motorisches Areal und das supplementär-motorische Areal, deren Aktivierung im Rahmen mentaler Rotationsstudien gezeigt wurde, für die Planung und Durchführung motorischer Aktivitäten zuständig. Daher wurden Aktivierungen insbesondere im primär-motorischen Areal, auch als M1 bezeichnet, und im lateralen prämotorischen Cortex (PM) häufig als Ausdruck prämotorischer bzw. motorischer Aktivität, die beim manuellen Antworten mittels Knopfdruck stattfindet, gedeutet (Zacks 2008). Windischberger et al. (2003) aber, untersuchten den Zeitverlauf der Gehirnaktivierung durch mentale Rotation von Würfelfiguren genauer mittels Fuzzy Cluster Analysis (FCA). Sie stellten fest, dass während der mentalen Rotation vor allem parietale und prämotorische Areale, außerdem Teile des Okzipitallappens sowie das anteriore SMA angesprochen wurden. Die motorische Antwortgabe mittels Knopfdruck aktivierte hingegen das primär-motorische Areal kontralateral zur antwortgebenden Hand und posteriore Anteile der SMA-Region. Sie kamen zu dem Schluss, dass zumindest durch mentale Rotation von Würfeln eine M1-Aktivierung lediglich die motorische Antwortgabe anzeigt, wohingegen

## Einleitung

prämotorische und parietale Areale an der eigentlich mentalen Verarbeitung der mentalen Rotation beteiligt waren.

Während man in früheren Arbeiten die Bedeutung prämotorischer und motorischer Areale für den Verarbeitungsprozess an sich eher vernachlässigt hat, weil man Artefakte durch die motorische Antwortgabe als Ursache vermutet hatte, beschäftigen sich aktuellere Studien genauer mit diesen Arealen. Lamm et al. (2007) zeigten, dass der IPS und dorsolaterale prämotorische Areale während der drei Verarbeitungsschritte Codieren, Rotieren und Vergleich mit dem Zielobjekt („Matching“) aktiviert werden. Ecker et al. (2006) und Liesefeld (2011) bezeichneten die aktivierten Areale genauer als IPS, SPL, Inferioren Parietalcortex (IPC) und Brodmann Areal 6. Das Brodmann Areal 6 (BA 6) lässt sich noch genauer in einem medialen und einen lateralen Bereich aufteilen, welche die SMA-Region bzw. den prämotorischen Cortex beinhalten (für ein Review siehe Picard und Strick 2001). Die SMA-Region untergliedert sich wiederum in einen rostralen Anteil, das prä-supplementärmotorische Areal (Prä-SMA) und einen caudalen Anteil, das eigentliche SMA, auch SMA-Propor genannt. Während das Prä-SMA durch seine Bedeutung in der Verarbeitung kognitiver, sensorischer und motivationaler Informationen für motorische Prozesse funktionell eher dem Präfrontalcortex zuzuordnen ist, lassen sich Aktivierungen im SMA eindeutig konkreten Aspekten der Motorik wie z.B. der Verarbeitung von Muskelbewegungsmustern zuordnen. Nur das Prä-SMA ist über Faserverbindungen direkt mit dem Präfrontalcortex verbunden, das SMA hingegen mit M1 und dem Rückenmark (Picard und Strick 2001). In ähnlicher Weise ist auch der PMd, der besonders von Liesefeld (2011) in seiner Funktion in der Verarbeitung mentaler Rotationsaufgaben hervorgehoben wurde, in einen rostralen (PMdr) und einen caudalen (PMdc) Abschnitt zu untergliedern. Der PMdr weist ähnliche Eigenschaften wie das Prä-SMA auf: Beide haben Verbindungen zum Präfrontalcortex und zur Formatio reticularis, nicht aber zu M1 und ins Rückenmark und auch nicht zu SMA und PMdc. Der PMdr ist auch wie das Prä-SMA eher in kognitive als in motorische Prozesse involviert. Hingegen ähnelt der PMdc in seiner Funktion und seinen Faserverbindungen sehr dem SMA. Beide sind direkt in motorische Prozesse involviert.

Einige fMRI-Studien zeigen PMdr-Aktivierungen durch Aufgaben, die numerische und räumliche mentale Operationen erfordern (Hanakawa et al. 2002, Lamm et al. 2007). Die

## Einleitung

Autoren schlossen aus ihren Ergebnisse, dass der PMdr bedeutend für Prozesse ist, die die mentale Manipulation von Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis, spatiale Aufmerksamkeit und die Transformation sensorischer zu motorischen Informationen erfordern.

Gruber et al. (2001) fanden Aktivierungen von BA 6, insbesondere von Prä-SMA, während der Durchführung von Multiplikations- und Divisionsaufgaben. Offenbar wird hier, basierend auf Informationen, die im Arbeitsgedächtnis („on-line“) gehalten werden, die Auswahl einer Antwort vorbereitet (Petit et al. 1998).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für numerische wie mentale Rotationsaufgaben parietale Areale, insbesondere der IPS und angrenzende Regionen sowie der SPL, und frontale Areale, insbesondere SFG, MFG, IFG und BA 6, eine zentrale Rolle spielen. Numerischen und mentalen Rotationsaufgaben ist gemeinsam, dass sie die mentale, zum Teil räumliche, Manipulation von Zahlen bzw. Objekten erfordern, was wiederum erforderlich macht, einen Stimulus im Arbeitsgedächtnis zu halten, zu verändern und mit einem Zielstimulus zu vergleichen, um schließlich zu einer Antwort zu gelangen.

Im Folgenden möchte ich genauer beleuchten, ob und inwieweit sich die angesprochenen Prozesse üben oder trainieren lassen. Bereits zu Beginn der Einleitung erwähnte ich die Bedeutung arithmetischer Kompetenz für die Teilhabe an schulischem wie auch sozialem Leben. Nicht weniger bedeutungsvoll erscheinen die zuletzt beschriebenen Fähigkeiten wie Arbeitsgedächtnis, Aufmerksamkeit und mentale Manipulation visueller, sensorischer und motorischer Informationen. Umso interessanter ist es, Erkenntnisse über funktionelle neuronale Prozesse beim Erlernen genau dieser Fähigkeiten zu gewinnen.

### **3.3 Training arithmetischer Aufgaben**

Es wird angenommen, dass beim Training arithmetischer Aufgaben die Verarbeitung der jeweiligen Aufgabe zunehmend von spezialisierten Gehirnarealen übernommen wird. Areale, die für eher unterstützende Funktionen wie allgemeine Aufmerksamkeit, das Arbeitsgedächtnis und andere zuständig sind, werden weniger stark beansprucht, die Aufgabe

## Einleitung

wird „einfacher“. Daraus resultiert eine Aktivitätsabnahme in frontalen Arealen (Kucian et al. 2011, Ischebeck et al. 2006, 2007, Delazer et al. 2003, Mussolin et al. 2013). Auch für den Parietallappen wird angenommen, dass sich ein Trainingseffekt in einer allgemeinen Aktivitätsabnahme äußert. Andererseits konnten Kucian et al. (2011) durch Training eine Aktivitätszunahme in Arealen feststellen, in denen vorher eingeschränkte Aktivität gemessen worden war, wie dies z.B. für Kinder mit entwicklungsbedingter Dyskalkulie (developmental dyscalculia, DD) bekannt ist. Grabner et al. (2007) fanden mit zunehmendem Training einerseits einen frontoparietalen Shift, zum anderen einen intraparietalen Shift vom IPS zum Gyrus angularis. Die verstärkte GA-Aktivierung wird im Allgemeinen als Zeichen verstärkter automatisierter Prozesse und verbalen Faktenabrufs gedeutet (Grabner et al. 2007, Delazer et al. 2005, Ischebeck et al. 2006, 2007). Es zeigte sich außerdem ein linearer Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der GA-Aktivierung bei einfachen und komplexen Multiplikationsaufgaben und der individuellen mathematischen Kompetenz, welche ebenfalls als individueller Trainingszustand angesehen werden kann, bei männlichen Probanden (Grabner et al. 2007).

Delazer et al. (2003) zeigten eine geringere Aktivierung bei der Verarbeitung trainierter im Gegensatz zu untrainierten Multiplikationsaufgaben im linken IPS, IPC (inferioren Parietalcortex) und IFG, während der Gyrus angularis hier verstärkt aktiviert wurde. Reaktionszeit und Fehlerrate waren für die trainierten Aufgaben geringer als für untrainierte.

Ischebeck et al. (2006) ließen gesunde junge Erwachsene Subtraktions- und Multiplikationsaufgaben trainieren und verglichen ebenfalls die Performanz bei der Beantwortung trainierter im Gegensatz zu untrainierten Aufgaben. Der Kontrast untrainiert-trainiert zeigte Mehraktivierung bilateral im IPS und IFG, sowie im linken SMA und Präzentralgyrus. Der Gyrus Angularis wurde im gegensätzlichen Kontrast trainiert-untrainiert für Multiplikationsaufgaben vermehrt aktiviert. Auf der Verhaltensebene zeigten sich eine reduzierte Reaktionszeit und Fehlerrate für trainierte Aufgaben.

Ein Trainingseffekt lässt sich bereits innerhalb kürzester Zeit feststellen. Eine Studie zeigte erste Aktivitätsveränderungen im Präzentralgyrus, IFG, Gyrus angularis und Supramarginalgyrus bereits nach 15 Minuten Training (Ischebeck et al. 2007).

Kucian et al. (2011) ließen in einer Trainingsstudie gesunde Kinder und Kinder mit DD

mit einem computergestützten Lernspiel („Rescue Calcularis“) die Orientierung auf einem Zahlenstrahl üben. Vor und nach dem Training lösten die Kinder im MRT-Scanner Aufgaben, bei denen sie entscheiden sollten, ob drei gezeigte Zahlen in aufsteigender Reihenfolge abgebildet sind. Es zeigten sich Aktivierungsreduktionen nach dem Training bilateral im SFG und MFG, außerdem im linken Postzentralgyrus, linken IPS und in der linken Insula. Eine Änderung der Reaktionszeit konnte nicht festgestellt werden, wohl aber eine geringere Fehlerrate bei zusätzlich bearbeiteten Additions- und Subtraktionsaufgaben, obwohl diese nicht gezielt trainiert worden waren. Offenbar scheint also eine bessere Orientierung auf dem Zahlenstrahl einen Transfereffekt zu haben, der auf verschiedene numerische Aufgaben übertragbar ist.

### **3.4 Motivation und Lernen**

Für die Durchführung einer Kinder-Trainingsstudie ist die Motivation der Teilnehmer von größter Wichtigkeit. Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation (self-determination theory) von Deci und Ryan (1993) besagt, dass neben physiologischen Grundbedürfnissen das Bedürfnis nach Kompetenz oder Wirksamkeit, das Bedürfnis nach Autonomie oder Selbstbestimmung und das Bedürfnis nach sozialer Eingebundenheit oder Zugehörigkeit Handlungen motivieren. Aus diesen Erkenntnissen leiten Herold und Herold (2011) die Formel  $Motivation = E^3$  (Eingebundensein x Erfolg x Eigenständigkeit) ab.

Die drei Komponenten Eingebundensein, Erfolg und Eigenständigkeit sind im Unterrichtskonzept „Selbstorganisiertes Lernen“ (SOL) verwirklicht. Es wurde von Martin Herold, einem ehemaligen Mathematik- und Physiklehrer, seiner Tochter Cindy Herold, einer Diplompädagogin und der Erziehungswissenschaftlerin Dr. Birgit Landherr entwickelt. SOL soll Schüler zum selbstständigen und selbstorganisierten Lernen befähigen. Während im herkömmlichen Unterrichtsmodell die Lehreraktivität im Unterricht den Hauptanteil ausmacht, sollen durch SOL sukzessive die Lehreraktivität ab- und die Schüleraktivität zunehmen. Mit zunehmender Schüleraktivität nimmt zudem die Lernkompetenz jedes einzelnen Schülers zu.

## Einleitung

Die Komponenten der Formel Motivation = Eingebundensein x Erfolg x Eigenständigkeit lassen sich wie folgt im SOL-Unterricht wiederfinden:

**Eingebundensein:** Das Lernen findet zu einem großen Anteil in der Gruppe statt. Dadurch kann jedes Gruppenmitglied etwas beitragen, hat eine eigene wichtige Aufgabe und etwaige Schwächen können durch eigene Stärken oder Stärken der anderen Gruppenmitglieder ausgeglichen werden. Indem Ziele gemeinsam erreicht werden sollen, kommt es weniger häufig zu Überforderung, dafür aber umso häufiger zu Freude über eine erfolgreich absolvierte Aufgabe.

**Erfolg:** Durch die klare Strukturierung des Lernablaufs mithilfe des Advance Organizers und das gegenseitige Helfen in der Gruppe ist der Lernerfolg besonders groß. Dabei besteht der Erfolg nicht nur darin, ein Thema gut verstanden zu haben, sondern auch darin, es einem anderen Gruppenmitglied so gut erklärt zu haben, dass auch dieses es nun verstanden hat.

**Eigenständigkeit:** Der relativ freie Gestaltungsspielraum spielt für die Motivation eine große Rolle. Ein Lernfahrplan gibt zwar vor, welche Themen bearbeitet werden sollen und wie diese untereinander verknüpft sind, doch jeder Schüler kann selbst entscheiden, welches Thema er bearbeiten möchte und in gewissem Maße auch wann und mit wem.

Um eine möglichst hohe Motivation bei den Probanden zu erzielen, soll diese Trainingsstudie in Anlehnung an das SOL-Konzept organisiert und durchgeführt werden. Insbesondere die drei Komponenten Eingebundensein, Erfolg und Eigenständigkeit sollen sich im Ablauf der Trainingsstudie wiederfinden.

### **3.5 Hypothese**

Basierend auf bisherigen Trainingsstudien nehme ich an, dass es bei meinen Probanden durch das Mathemonster-Training zu einer Performance-Steigerung kommt, die durch eine Modifikation der Aktivierungsmuster im IPS und/oder in prämotorischen Arealen erklärt werden kann. Ein Trainingseffekt im IPS würde für ein schnelleres und leichteres Erkennen und Einordnen der Zahlen sprechen, in prämotorischen Arealen eher für ein schnelleres und leichteres „Handling“ der Zahlen.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Teilnehmer der Trainingsstudie

Zur Teilnahme an der Studie wurden Schülerinnen und Schüler der fünften und sechsten Klassen von verschiedenen Gesamtschulen und Gymnasien eingeladen. Zu diesem Zweck wurden Elterninformationsabende veranstaltet und die Kinder im Rahmen des Mathematikunterrichts von uns über die Trainingsstudie informiert.

Letztlich gaben 83 Schülerinnen und Schüler sowie deren Eltern ihr schriftliches Einverständnis zur Studienteilnahme.

Von diesen potentiellen Studienteilnehmern konnte einer aufgrund einer nicht durch unsere MRT-tauglichen Brillen korrigierbare Visusminderung, eine aufgrund eines nicht MRT-tauglichen Cochleaimplantats, sowie zwei aufgrund ihrer Angst vor dem MRT-Scanner nicht an den Messungen teilnehmen. Von den 79 verbliebenen Studienteilnehmern sind vier nicht zur Post-Messung erschienen, bei 12 Teilnehmern waren die MRT-Datensätze aufgrund von Zahnsparungen- oder Bewegungsartefakten nicht auswertbar.

Alle Teilnehmer, die im MRT-Scanner gemessen wurden, erhielten für ihre Teilnahme ein T-Shirt mit einem MRT-Bild ihres Kopfes sowie einen USB-Stick mit ihrem MRT-Datensatz und dem Programm MRicro.

Von den 63 endgültig in die Studie eingeschlossenen Teilnehmern waren 39 weiblich und 24 männlich. Sie waren zwischen 10 und 13 Jahren alt (Mittelwert 11,5 Jahre) und gesundheitlich unauffällig.

### 4.2 Studiendesign

Die Studie wurde als Trainingsstudie konzipiert. Zu diesem Zweck wurden eine MRT-Messung zur Ermittlung der Ausgangsperformanz (Prä-Messung) und eine MRT-Messung nach einer Woche Training mit dem Mathemonster-Computerspiel durchgeführt (Post-Messung). Für beide Messungen wurde dasselbe Paradigma verwendet.

### **4.3 Überblick über Tests und Übungen:**

- Mathe-Monster-Spiel: Trainingsspiel zur räumlichen Zuordnung numerischer Größen und Operationen
- Zahlen-Raum-Test: Zahlenvergleich und Mentale Rotation als Tests im fMRI-Versuch
- Fragebogen: Erfassung von Zahlen, räumlichem Denken und Schwierigkeiten mit dem Fach Mathematik
- Kognitiver Fähigkeitstest (KFT 5-12, Hogrefe-Verlag): Verbale, numerische und non-verbale Fähigkeiten
- Skalen zur Erfassung der Lern- und Leistungsmotivation für Schüler (SELLMO-S, Hogrefe-Verlag)
- Fragebogen zur Erfassung emotionaler und sozialer Schulerfahrungen FEES 3-4 (Hogrefe-Verlag)

### **4.4 Trainingsspiel „Das Mathemonster“**

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, sollte die Trainingsstudie in Anlehnung an das SOL-Konzept organisiert und durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden, wenn möglich, jeweils zwei bis drei Schüler gemeinsam zu den Messungen und Tests im hiesigen Institut für diagnostische und interventionelle Neuroradiologie eingeladen. Nach der ersten MRT-Messung wurden ihnen das Programm und die Installation erklärt und gezeigt und ihnen auf einem USB-Stick zusammen mit einer Installationsanleitung mit nach Hause gegeben.

In der Woche zwischen den beiden MRT-Messungen trainierten die Kinder in denselben Kleingruppen zuhause das Mathemonster-Computerspiel. So sollte die für die Motivation erste wichtige Komponente des Eingebundenseins erfüllt werden.

Um den Kindern größtmögliche Eigenständigkeit, einer weiteren Komponente der Motivation, zu ermöglichen, betonten wir, dass die Kinder ohne Vorgabe eines Mathemonster-Übungszeitplans nach eigener Lust und Laune mit dem Mathemonster trainieren sollten. Die Motivationskomponente Erfolg sollte durch das vor allem zu Beginn schnelle und einfache Erreichen des nächsthöheren Levels implementiert werden. Zur Visualisierung des Erfolgs

wurden stets Punktestand und erreichter Level angezeigt.

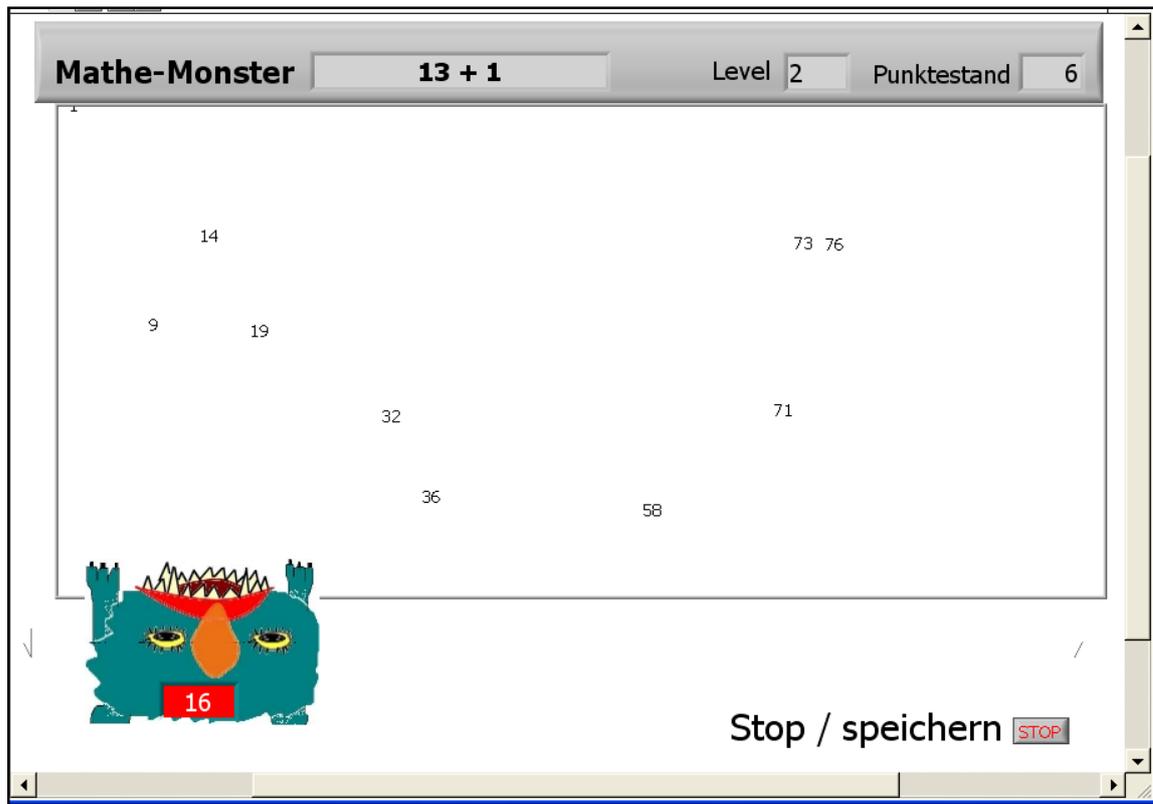


Abbildung 2: Trainingsspiel "Das Mathemonster"

Der Ablauf des Spiels war wie folgt: Zahlen aus dem ein- und zweistelligen Zahlenbereich „regneten“ unterschiedlich schnell herunter. Innerhalb der „Zahlenwolke“ waren die Zahlen ihrer Größe nach von links nach rechts aufsteigend sortiert. Eine der Zahlen war das Ergebnis der oben angezeigten mathematischen Aufgabe, die mit jedem Level schwieriger wurde. Im ersten Level musste lediglich eine oben angezeigte Zahl aus der Zahlenwolke herausgesucht werden. Optische Distraktoren entstanden durch die schnellen und differenten Bewegungen, sodass ein Absuchen nach der richtigen Zahl erschwert wurde. Mit der Computermaus musste das Mathemonster auf dem Zahlenstrahl an die Stelle geschoben werden, an der die gesuchte Zahl herunterregnen würde, um sie mit dem Maul aufzufangen und zu fressen (siehe Abbildung 2). In den Anfangslevels wie auch in der gezeigten Abbildung, wurde in einem roten Kasten angezeigt, an welcher Stelle auf dem Zahlenstrahl sich das Mathemonster gerade befand. Diese Hilfe verschwand in den höheren Levels. Nach fünf richtigen Treffern hintereinander wurde der nächsthöhere Level erreicht. Bei fünf Fehlversuchen hintereinander fiel der Spieler ein Level zurück. Beim Erreichen eines höheren

Levels erschien das Mathemonster auf einem Besen quer durch das Bild reitend. Insgesamt gab es 22 Levels.

Wegen der bereits erläuterten Problematik der Zahlenverarbeitung zweistelliger Zahlen, welche durch einen Konflikt zwischen formal-sprachlichen und räumlichen Verarbeitungsprozessen bedingt sein könnte, zielten wir mit dem Mathemonster darauf ab, möglichst nur den räumlichen Verarbeitungsprozess insbesondere im Zahlenraum von eins bis 100 zu fördern.

Beim Beenden des Spiels wurden automatisch Spielstand, Level, Spielzeit und Lernverlauf auf dem USB-Stick gespeichert. Bei der nächsten Trainingssitzung konnte so nahtlos an die letzte Sitzung angeknüpft werden.

Dieser USB-Stick wurde von den Probanden zur zweiten MRT-Messung mitgebracht, sodass wir mit einem weiteren Programm die dort gespeicherten Spielstände, Levels, Spielzeit und den Lernverlauf erfassen konnten.

Die Programme wurden von Dr. Christoph Krick (Institut für diagnostische und interventionelle Neuroradiologie des Universitätsklinikums des Saarlandes) mit LabView programmiert.

### **4.5 Paradigma**

Die Prä- und Postmessung im fMRI-Versuch wurde über einen „**Zahlen-Raum-Test**“ realisiert. Über einen Spiegel, der auf der Kopfspule befestigt war, konnten die Probanden auf eine Leinwand sehen, auf die die Aufgaben projiziert wurden. Das Paradigma bestand aus zwei verschiedenen Aufgaben, die beide zum einen Informationsextraktion, zum anderen mentale Manipulation erfordern. Es sollte entschieden werden, ob eine Zahl ihrer Größe nach zwischen zwei andere Zahlen einzusortieren ist (Aufgabe Zahlenvergleich) bzw. ob durch Drehen einer polygonalen Figur diese mit einer zweiten Figur zur Deckung zu bringen ist (Aufgabe Mentale Rotation). Während das Lösen der Zahlenaufgaben gezielt durch das Mathemonster trainiert und somit die Performanzsteigerung beim Lösen dieser Aufgaben den Trainingseffekt widerspiegeln sollte, diente die Aufgabe Mentale Rotation als Kontrollaufgabe.

Das Programm wurde von Dr. Christoph Krick (Institut für diagnostische und

interventionelle Neuroradiologie des Universitätsklinikums des Saarlandes) mit LabView geschrieben.

Um Verständnisfehler zu vermeiden und die Probanden langsam an die Aufgaben heranzuführen, wurde jedem genug Zeit eingeräumt, diese an einem Laptop vorher zu üben. Sobald sich der Proband sicher genug fühlte, begannen wir mit der MRT-Session. Im MRT-Scanner hielt der Proband in jeder Hand einen Taster, über den die Antwort mittels Druck auf die Daumentaste abzugeben war. Diese Taster waren über ein Lichtleiterkabel mit dem Steuerrechner verbunden und ermöglichten so die Erfassung der Antworten und der Reaktionszeiten. Die Händigkeit der Antwortgabe wurde zwischen den Probanden ausbalanciert und sowohl für das Üben am Laptop vor der eigentlichen MRT-Messung, als auch für die beiden MRT-Sessions beibehalten. Beantwortete eine Versuchsperson also am Laptop eine Aufgabe mit „Ja“ durch Drücken der F1-Taste und eine Aufgabe mit „Nein“ durch Drücken der F12-Taste, so war im MRT-Scanner eine Ja-Antwort mit der Daumentaste auf dem linken Taster, eine Nein-Antwort mit der Daumentaste auf dem rechten Taster zu geben.

#### 4.5.1 Zahlenvergleich (Zielaufgabe)

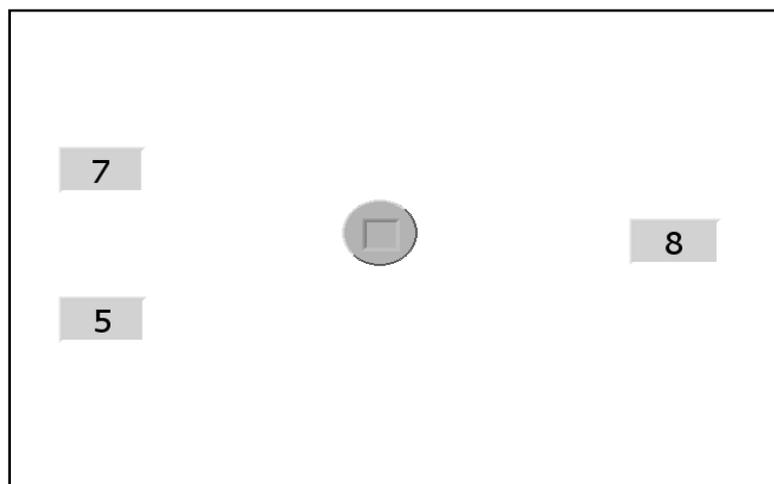


Abbildung 3: Zahlenvergleich-Aufgabe

Den Probanden wurden gleichzeitig drei Zahlen gezeigt (siehe Abbildung 3). Die beiden Zahlen links waren ihrer Größe nach von unten nach oben ansteigend angeordnet. Es war nun zu

entscheiden, ob die Zahl rechts im Bild ihrer Größe nach zwischen die beiden Zahlen links im Bild einzusortieren ist. Die Zahlen waren einstellig, zweistellig oder dreistellig, stellten also drei selbstähnliche Konditionen mit ansteigendem Schwierigkeitsgrad dar. Auch hier mussten die Probanden mit einer Taste für die Antwort „Ja“ (die Zahl rechts im Bild passt zwischen die beiden Zahlen links im Bild, d.h. sie ist größer als die untere aber kleiner als die obere Zahl) und einer Taste für die Antwort „Nein“ (die Zahl rechts im Bild passt nicht zwischen die beiden Zahlen links im Bild, d.h. sie ist entweder kleiner als die untere oder größer als die obere Zahl). Auch hier gab ein grünes bzw. rotes Quadrat in der Mitte des grauen Feldes eine Rückmeldung, ob die Antwort richtig (grün) oder falsch (rot) war.

Ganz bewusst ordneten wir die Zahlen der Größe nach von unten nach oben und nicht von links nach rechts an, um einen SNARC-Effekt (s.o.) zu vermeiden.

#### 4.5.2 Mentale Rotation (Kontrollaufgabe)

Den Probanden wurden gleichzeitig zwei Polygone gezeigt (siehe Abbildung 4). Zu entscheiden war, ob diese durch Rotation zur Deckung zu bringen waren. Den Probanden war vorher ausdrücklich erklärt worden, dass beide Polygone immer formgleich sind, sie also nicht nach Unterschieden suchen mussten. So sollte verhindert werden, dass die gemessene Reaktionszeit andere Verarbeitungsvorgänge als die der mentalen Rotation und des Vergleichs der beiden Objekte widerspiegelte. Die Polygone konnten  $0^\circ$ , als nicht rotiert,  $60^\circ$  oder  $120^\circ$

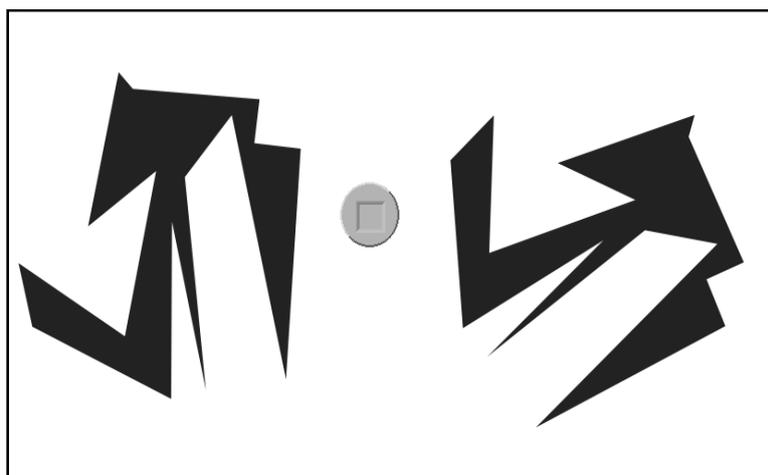


Abbildung 4: Polygon-Aufgabe (mentale Rotation)

rotiert sein oder  $0^\circ$ , also nicht rotiert,  $60^\circ$  und  $120^\circ$  rotiert und zusätzlich spiegelverkehrt sein, wobei die Aufgabe mit zunehmendem Rotationsgrad schwieriger wurde. Mit einer Taste für

die Antwort „Ja“ (durch Rotation sind beide Objekte zur Deckung zu bringen) und einer Taste für die Antwort „Nein“ (durch Rotation sind beide Objekte nicht zur Deckung zu bringen, d.h. sie sind spiegelverkehrt), gaben die Probanden ihre Antwort. In dem grauen Feld in der Mitte bekamen die Probanden mittels eines grünen bzw. roten Quadrats eine Rückmeldung ob ihre Antwort richtig (grün) oder falsch (rot) war.

Das Programm erfasste die Reaktionszeiten und Fehler jeweils für ein-, zwei- und dreistellige Zahlen, sowie für  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $120^\circ$  gedrehte Polygone.

#### ***4.6 Fragebogen: Erfassung von Zahlen, räumlichem Denken und Schwierigkeiten im Fach Mathematik***

##### **4.6.1 Zahnradtest**

Den Probanden wurden insgesamt sechs Abbildungen (siehe Abbildungen 5-8) mit jeweils mehreren Zahnrädern gezeigt, die ineinander verzahnt waren. Ein Pfeil gab an, in welche Richtung sich das erste dieser Zahnräder dreht. Nun sollten die Probanden entscheiden und mit einem Pfeil markieren, in welche Richtung sich das jeweils letzte Zahnrad (auf den Abbildungen grau markiert) dreht.

Mit diesem Test sollte das räumliche Vorstellungsvermögen der Probanden überprüft werden.

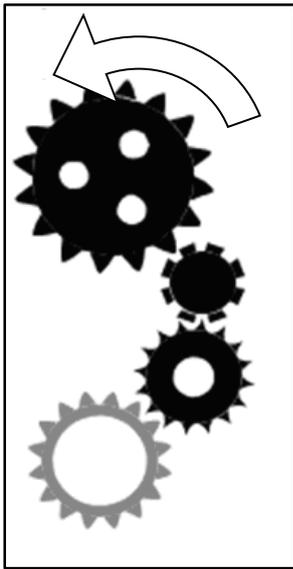


Abbildung 5: Zahnradtest Aufgabe 1

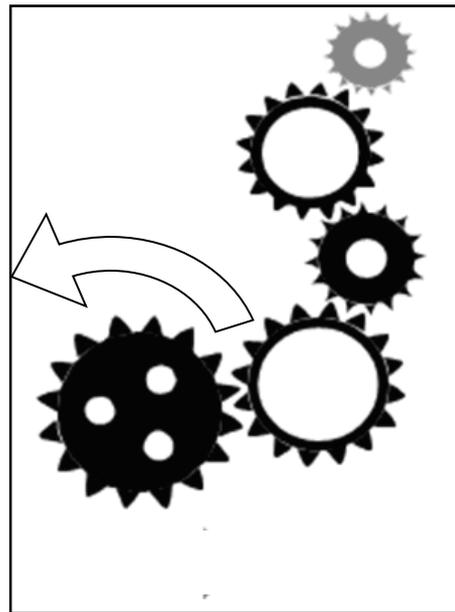


Abbildung 6: Zahnradtest Aufgabe 2

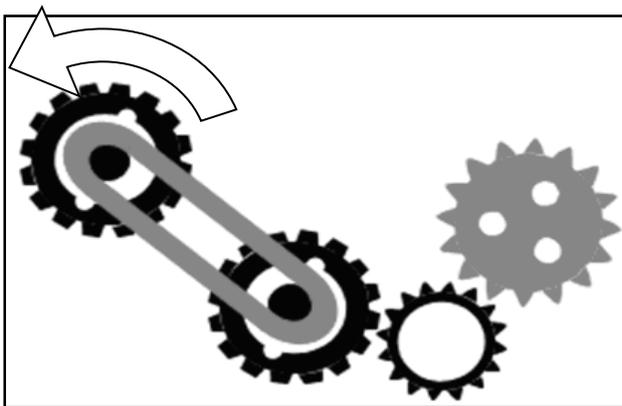


Abbildung 7: Zahnradtest Aufgabe 3

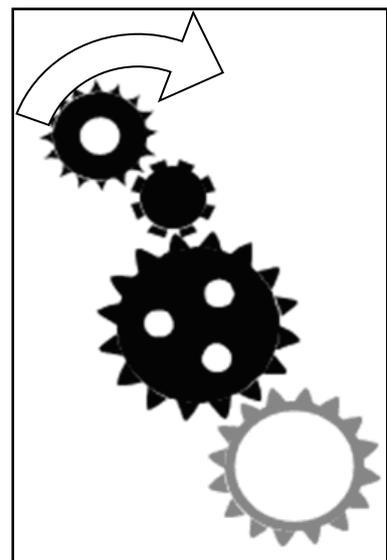


Abbildung 8: Zahnradtest Aufgabe 4

#### 4.6.2 Zahlenstrahltest

Den Probanden wurden zehn Zahlenstrahlen mit jeweils unterschiedlicher Skalierung gezeigt, auf denen jeweils nur die kleinste und größte Zahl eingezeichnet war (siehe Abbildung 9). Auf jedem Zahlenstrahl war nun eine bestimmte Zahl einzuzeichnen. So zum Beispiel auf einem Zahlenstrahl von 0-100 die Zahl 33 oder auf einem Zahlenstrahl von 0 bis 10 die Zahl 7. Zur

## Material und Methoden

Auswertung wurde der Abstand dieser Markierung zur richtigen Markierung der jeweiligen Zahl auf dem Zahlenstrahl in mm gemessen. Mit dem Zahlenstrahltest sollten die Erfassung einer Zahl und ihre Zuordnung auf dem mentalen Zahlenstrahl sowie die räumliche Einordnung auf dem Zahlenstrahl auf Papier überprüft werden.

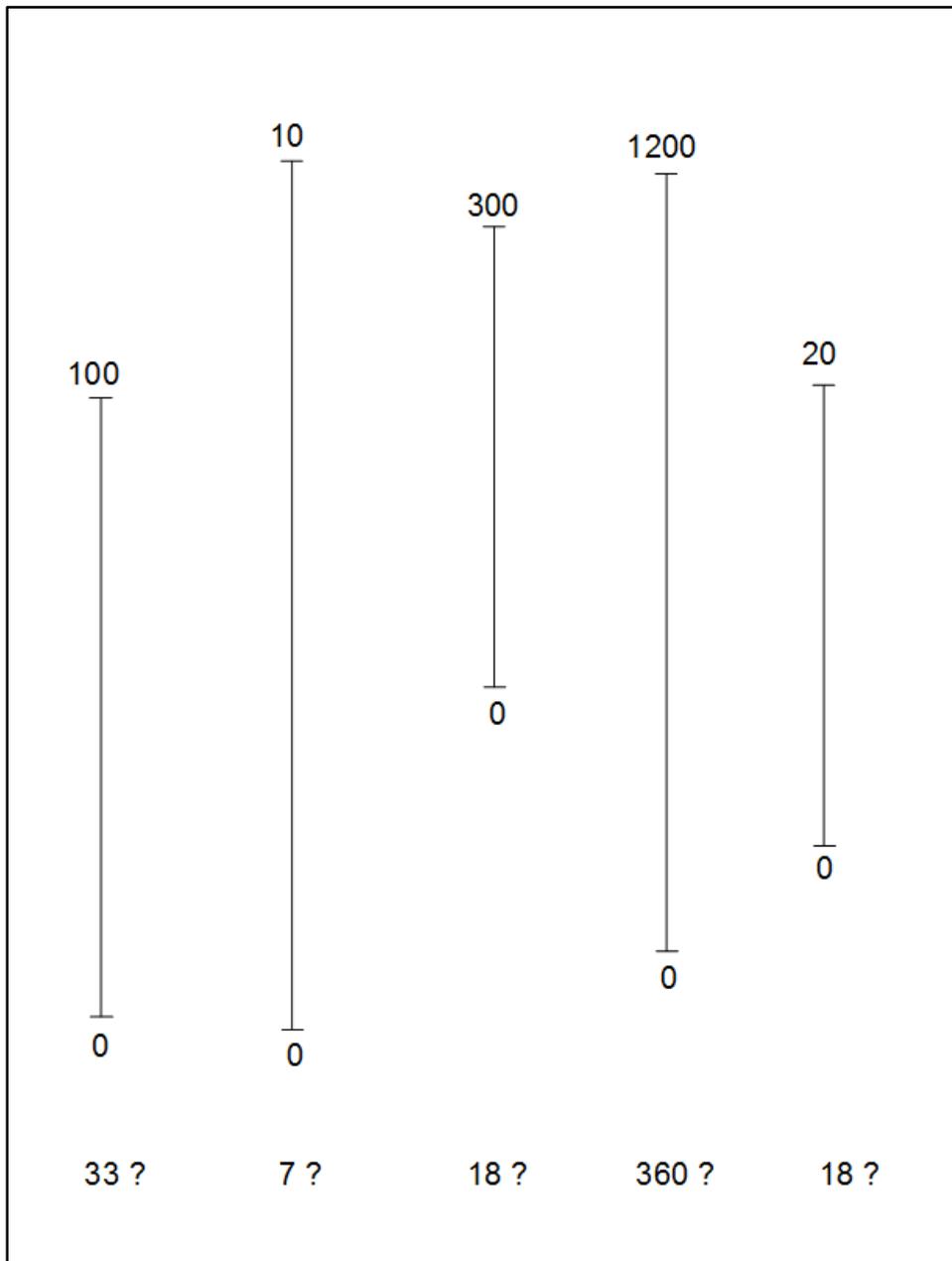


Abbildung 9: Zahlenstrahl-Test

#### **4.6.3 Kopfrechentest:**

Des Weiteren absolvierten die Probanden vor beiden MRT-Messungen einen Kopfrechentest. Dieser enthielt Additions- und Multiplikationsaufgaben, die auf dem Leistungsniveau der vierten Klasse lagen. In zwei Minuten sollten so viele Aufgaben wie möglich richtig beantwortet werden. Dabei durften Aufgaben, die zu schwierig erschienen, übersprungen werden. Um keinen zu großen zeitlichen Vorteil zu erzielen, musste bei den übersprungenen Aufgaben als Ergebnis ein „X“ eingetragen werden. Der Test wurde einmal in Version A und einmal in Version B durchgeführt, die sich in den Aufgaben, nicht aber in der Schwierigkeit der Aufgaben unterschieden. Etwa gleich viele Probanden lösten Version A vor und Version B nach dem Training wie umgekehrt.

Mit diesem Test sollte die Ausgangsperformanz im Kopfrechnen und eine eventuelle Verbesserung durch das Mathemonster-Training gemessen werden.

#### **4.6.4 Kognitiver Fähigkeitstest (KFT 5-12, Hogrefe Verlag):**

Der Kognitive Fähigkeitstest enthält Untertests zur Überprüfung verbaler, non-verbaler und numerischer Fähigkeiten. Es wird vor allem die Verarbeitungskapazität erfasst. Davon abgesehen kann anhand der Ergebnisse im KFT das intellektuelle Gesamtleistungsniveau von Schülerinnen und Schülern bestimmt werden (Heller, Perleth 2002).

Mithilfe dieses Tests sollten Einflussfaktoren auf Ausgangsperformanz und Trainingseffekt eruiert werden.

#### **4.6.5 Skalen zur Erfassung der Lern- und Leistungsmotivation, Schülerversion (SELLMO-S):**

Die SELLMO fragen vier verschiedene Arten von Zielen ab, die im Lern- und Leistungszusammenhang wichtige Bedingungen des Erlebens und Verhaltens darstellen. Dies sind Lernziele, Annäherungs-Leistungsziele, Vermeidungs-Leistungsziele und die Tendenz zur Arbeitsvermeidung. Es bestehen wesentliche Zusammenhänge zwischen den SELLMO-Ergebnissen und Schulnoten (Spinath et al. 2002).

Die Dimension *Lernziele* erfasst das Bestreben einer Person, etwas zu lernen.

*Annäherungs-Leistungsziele* beschreiben den Wunsch, anderen eigenes Wissen, eigene Fähigkeiten und Kompetenzen zu zeigen, wie zum Beispiel sich im Unterricht zu melden, um die eigenen Hausaufgaben vorzulesen. *Vermeidungs-Leistungsziele* hingegen zielen darauf ab, als ungenügend eingeschätzte eigene Kompetenzen zu verbergen, wie zum Beispiel sich im Unterricht nicht zu melden, um die eigenen Hausaufgaben vorzulesen, weil diese falsch oder unzureichend sein könnten. Die Dimension Arbeitsvermeidung beschreibt schließlich, wie sehr sich eine Person bemüht, möglichst wenig Arbeit in die Bearbeitung einer Aufgabe zu investieren.

Der Zusammenhang dieser unterschiedlichen Ziele mit kognitiven, emotionalen und verhaltensbezogenen Bedingungen für Engagement und Leistungen lässt sich wie folgt zusammenfassen: Eine hohe Ausprägung in der Dimension Lernziele sichert auf lange Sicht Engagement und gute Leistungen. Annäherungs-Leistungsziele gehen zwar mit kurzfristig guten Leistungen einher, sichern jedoch kein langfristiges Engagement, welches für dauerhafte Erfolge notwendig ist. Vermeidungs-Leistungsziele hängen mit kurz- und langfristig schlechten Leistungen zusammen und auch eine starke Tendenz zur Arbeitsvermeidung führt zu kurz- und langfristig geringem Engagement und schlechten Leistungen.

### **4.6.6 Fragebogen zur Erfassung emotionaler und sozialer Schulerfahrungen von Grundschulkindern dritter und vierter Klassen (FEES 3-4):**

Zusätzlich füllten alle Fünftklässler den Fragebogen zur Erfassung emotionaler und sozialer Schulerfahrung (FEES) aus, der von uns in die Vergangenheitsform umgeschrieben wurde. Da die Fünftklässler den bisher größten Teil ihrer Schullaufbahn in der Grundschule verbracht hatten, erschien es sinnvoll, ihre emotionalen und sozialen Schulerfahrungen rückblickend auf die Grundschulzeit zu erfassen. Mit diesem Fragebogen wurden neben dem Selbstkonzept der eigenen Fähigkeiten, der sozialen Integration und dem Klassenklima auch verschiedene Aspekte des Schul- und Lernklimas wie Schuleinstellung, Lernfreude, Anstrengungsbereitschaft und das Gefühl des Angenommenseins untersucht (Rauer, Schuck, 2003).

Mit diesen Tests sollte der Einfluss von Motivation und emotionalen und sozialen

Schulerfahrungen auf den Trainingseffekt unserer Probanden untersucht werden.

#### **4.7 Auswertung der Verhaltensdaten**

Fehleranzahl und Reaktionszeit wurden mit einem von Dr. Christoph Krick programmierten Auswerteprogramm für 0°, 60° und 120° rotierte Polygone und für ein-, zwei- und dreistellige Zahlen jeweils einzeln erfasst.

Die statistische Aufbereitung aller Verhaltensdaten erfolgte mit IBM SPSS Statistics 20. Da eine Normalverteilung nicht für alle Variablen gegeben war, verwendete ich nicht-parametrische Tests. Der Übersicht halber stelle ich in allen Diagrammen trotzdem den Mittelwert  $\pm$  Standardfehler dar.

Um den Trainingseffekt genauer zu untersuchen, teilte ich die Teilnehmer in zwei verschiedene Gruppen ein. Gruppe 1 setzte sich aus Teilnehmern, die 0-30 Minuten mit dem Mathemonster-Computerspiel trainierten, zusammen, Gruppe 2 aus Teilnehmern, die 30-60 Minuten trainierten.

Ich definierte den Trainingseffekt als Produkt aus der Differenz der Fehleranzahl und der Reduktion der Reaktionszeit im Post-Prä-Vergleich bei der Aufgabe Zahlenvergleich, da mit den Parametern Fehleranzahl und Reaktionszeit bei der Zahlenaufgabe gut eine Änderung der Performanz gemessen werden kann und genau diese Aufgabe durch das Trainingsspiel trainiert werden sollte.

#### **4.8 MRT-Messungen**

Die MRT-Bilder wurden im Institut für diagnostische und interventionelle Neuroradiologie des Universitätsklinikums des Saarlandes in Homburg erstellt. Wir verwendeten einen MRT-Scanner des Modells Magnetom Skyra der Firma Siemens, Erlangen, Deutschland, mit einer Feldstärke von 3 Tesla und eine Standard-Kopfspule.

Zur Erfassung der fMRI-Daten nutzten wir eine echoplanar imaging (epi) Sequenz mit

folgenden Einstellungen: Schichtdicke: 3 mm, TR: 2,2 s, TE: 30 ms, Spacing between slices: 3,75 mm, Pixelgröße: 3 mm, Flip angle: 90°. Wir erhielten 30 Schichten mit 94 Punkten pro Dimension. Während dieser Sequenz, die ca. 15 Minuten dauerte, entstanden 434 Bilder, wobei die ersten vier Bilder, die während der Äquilibration des Magnetfeldes erstellt worden waren, verworfen wurden.

Dieselbe Sequenz wurde sowohl bei der Prä- als auch bei der Post-Messung verwendet.

### **4.9 Statistische Aufbereitung der fMRI-Daten**

Verarbeitung und statistische Analyse der MRT-Bilder wurden mit Statistical Parametric Mapping 8 (SPM8; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK), einer MATLAB-basierten Anwendung, durchgeführt. Die funktionellen Daten wurden phasenkorrigiert (slice-timing), realigned, die anatomische Aufnahme auf die mittlere funktionelle Aufnahme koregistriert, anhand eines Standard-Templates normalisiert und mit einem 8-mm Gauss-Filter in allen drei Ebenen geglättet (smooth).

Für die anatomische Zuordnung der aktivierten Gehirnareale verwendete ich die SPM Anatomy Toolbox der Forschungszentrum Jülich GmbH (Eickhoff et al. 2005, 2006, 2007).

#### **4.9.1 Prä-Messung**

Wie eingangs bereits erläutert, sollte mit dem Mathemonster gezielt die Zahlenverarbeitung zweistelliger Zahlen trainiert werden. Aus diesem Grund konzentrierte ich mich in der Auswertung der fMRI-Daten ebenfalls auf zweistellige Zahlen.

Um die Ausgangsperformanz der Studienteilnehmer funktionell zu analysieren, erstellte ich den folgenden Kontrast auf Einzelkopfebene der Prä-Messung: *zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen)*. Dieser Kontrast untersucht, welche Gehirnareale mehr durch zweistellige Zahlen aktiviert werden als durch den Durchschnittswert von ein- und dreistelligen Zahlen  $(\text{einstellige} + \text{dreistellige Zahlen})/2$ . So wird also der Effekt zweistelliger Zahlen, bestehend aus zwei Ziffern, mit dem nicht-zweistelliger Zahlen, durchschnittlich ebenfalls aus zwei Ziffern bestehend, miteinander verglichen. Dadurch sollte sichergestellt

werden, dass eine Mehraktivierung nicht durch eine größere Anzahl an Ziffern hervorgerufen wird, sondern durch die Komplexität zweistelliger Zahlen an sich, wie sie bereits in der Einleitung erläutert wurde.

#### 4.9.2 Trainingseffekt

Zur Auswertung rechnete ich eine Regressionsanalyse mit multiplen Kovariaten. Ich wählte den Kontrast *zweistellige > (einstellige + dreistellige Zahlen)* im *Prä > Post*-Vergleich. Auch hier wurde die Aktivierung durch zweistellige Zahlen mit der durchschnittlichen Aktivierung durch ein- und dreistellige Zahlen,  $(\text{einstellige} + \text{dreistellige Zahlen})/2$ , verglichen (s.o.).

Zusätzlich wurde mit diesem Kontrast untersucht, welche Gehirnareale vor dem Mathemonster-Training, also in der Prä-Messung, stärker aktiviert werden als nach dem Training, also in der Post-Messung (Prä > Post-Vergleich).

Diesen Kontrast korrelierte ich mit dem Produkt aus dem maximal erreichten Level und dem Quotienten aus der Fehleranzahl in der Zahlenvergleich-Aufgabe während der Prä-MRT-Session und der Anzahl richtiger Antworten im Prä-Kopfrechentest. Dieses Produkt entspricht der Trainingsleistung und wird an die Ausgangsperformanz jedes einzelnen Probanden angeglichen. Ein Proband, der beispielsweise Level 22 erreichte, in der Zahlenvergleich-Aufgabe während der ersten MRT-Session einen Fehler machte und im Prä-Kopfrechentest 22 Aufgaben richtig löste, erzielte eine Trainingsleistung von  $22 * 1/22 = 1$ . Ein Proband, der Level 11 erreichte, in der Zahlenvergleich-Aufgabe während der Prä-Session 29 falsche Antworten gab und im Prä-Kopfrechentest 12 Aufgaben richtig beantwortete, erhielt eine Trainingsleistung von  $11 * 29/12 = 26,6$ . So konnte berücksichtigt werden, dass das Erreichen eines höheren Levels durch einen Probanden mit schlechterer Ausgangsperformanz als stärkere Leistung zu werten ist als durch einen Probanden mit bereits sehr guter Ausgangsperformanz. Jeder erreichte Level wurde also je nach Ausgangsperformanz unterschiedlich gewertet.

Als Kovariaten wurden das Ergebnis des Prä-Kopfrechentests, das Alter, die Jahrgangsstufe und das Geschlecht mitberücksichtigt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Verhaltensdaten

#### 5.1.1 Ausgangsperformanz

##### 5.1.1.1 Zahlenvergleich

In der Zahlenvergleich-Aufgabe konnten die bereits von Kreis (2015) in einer Vorstudie gezeigten Ergebnisse im Rahmen der Prä-Messung repliziert werden.

Die Fehlerrate ist am geringsten bei einstelligen Zahlen (Mittelwert 3,9 Fehler), am höchsten bei zweistelligen Zahlen (Mittelwert 4,61 Fehler) und fast genauso hoch bei dreistelligen Zahlen (Mittelwert 4,51).

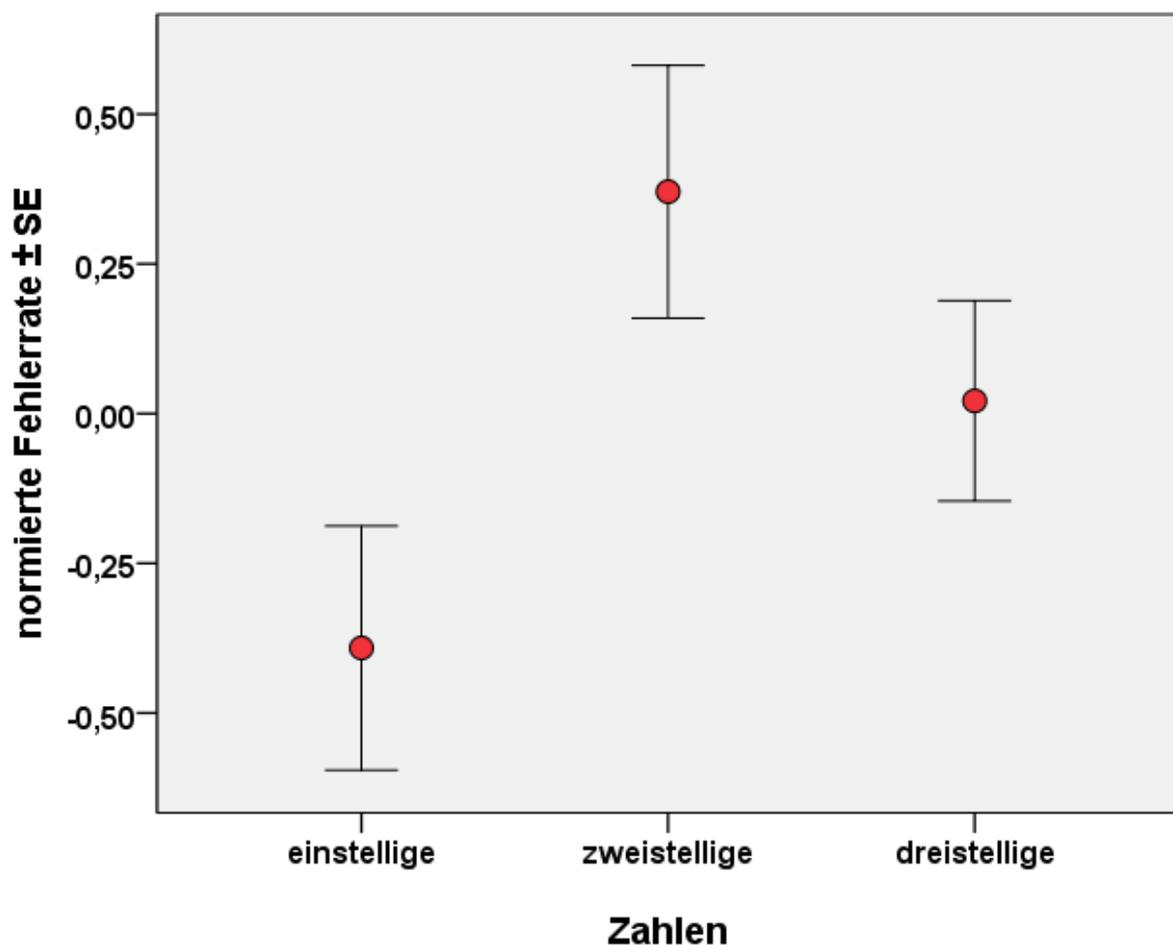


Abbildung 10: Fehlerrate Zahlen

Abbildung 10 zeigt die normierte Fehlerrate gegen ein-, zwei- und dreistellige Zahlen aufgetragen. Die normierte Fehlerrate ergibt sich aus der Differenz von jeweiliger Fehleranzahl

## Ergebnisse

und dem Mittelwert aller Fehler. Man sieht, dass die Fehlerrate bei einstelligen Zahlen deutlich unter der mittleren Fehlerrate liegt, während die Fehlerrate bei zweistelligen Zahlen deutlich darüber liegt. Die dreistelligen Zahlen liegen im Bereich der mittleren Fehlerrate.

Auch die Reaktionszeiten zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen einstelligen (Mittelwert 1,935 s) und zweistelligen Zahlen (Mittelwert 2,249 s), allerdings nur einen geringen zwischen zwei- (Mittelwert 2,249 s) und dreistelligen Zahlen (Mittelwert 2,288 s). Abbildung 11 zeigt die mittlere Reaktionszeit in Sekunden gegen ein-, zwei- und dreistellige Zahlen aufgetragen.

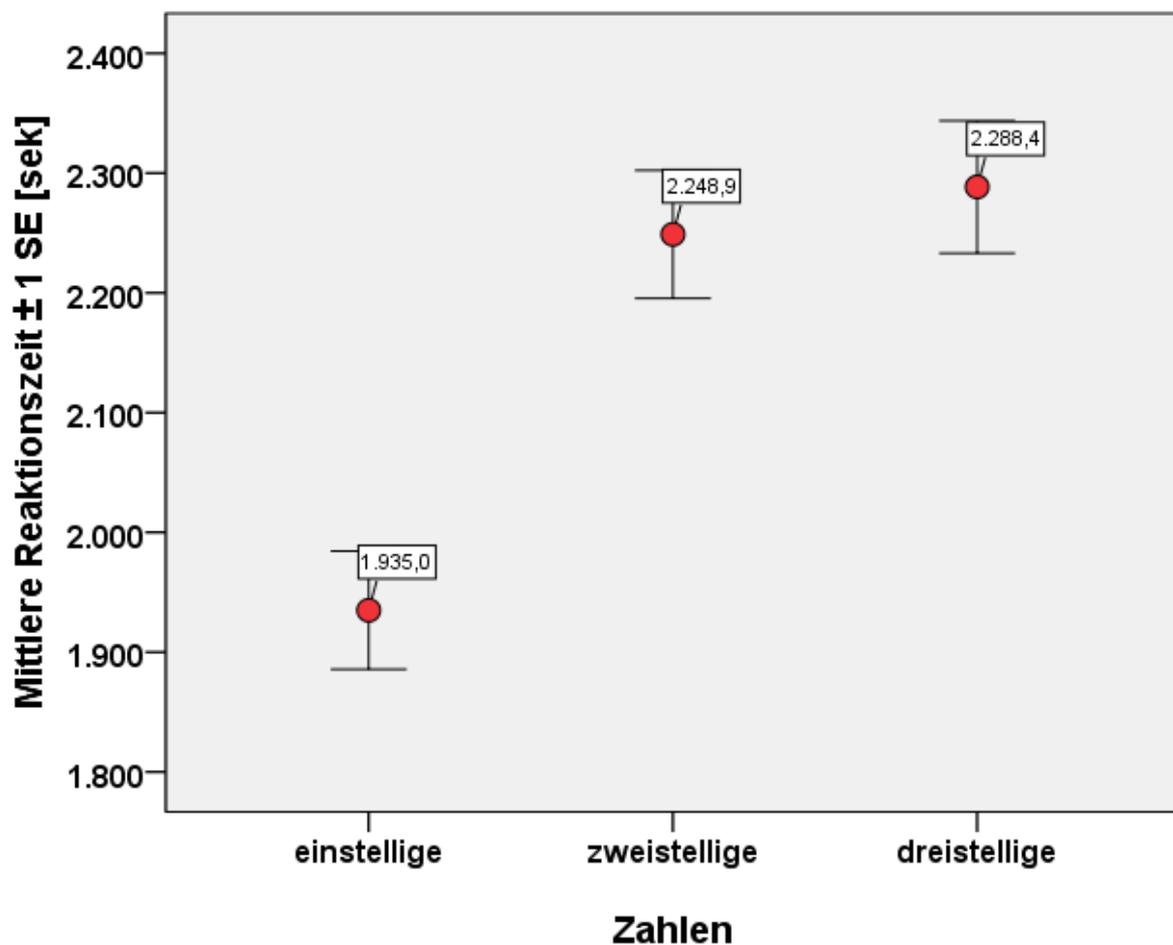


Abbildung 11: Reaktionszeit Zahlen

Aus weiteren Daten unserer Arbeitsgruppe, die auch für diese Arbeit relevant sind, ergab sich ein hoch signifikanter Unterschied in der Fehleranzahl zwischen der Gruppe der Real- und

## Ergebnisse

Gesamtschüler (Mittelwert 12,365) und der Gruppe der Gymnasiasten (Mittelwert 6,36; siehe Abbildung 12; u-Test:  $Z = -2,96$ ,  $p < 0,01$ ).

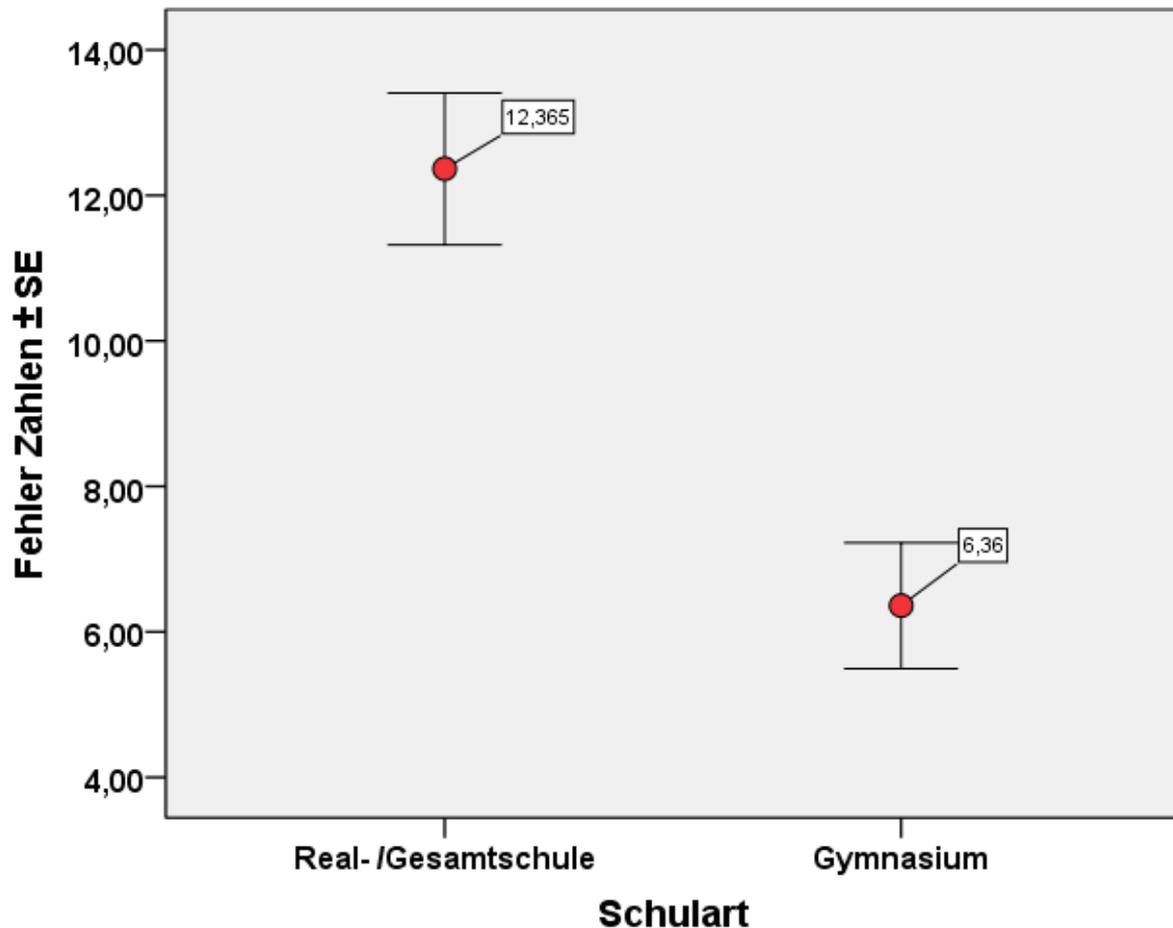


Abbildung 12: Fehleranzahl Zahlen nach Schulart; Daten unserer Arbeitsgruppe

### 5.1.1.2 Mentale Rotation

Auch in der Aufgabe Mentale Rotation erzielte ich im Rahmen der Prä-Messung die gleichen Ergebnisse wie Sonja Kreis. Die Fehlerrate ist deutlich höher bei einem rotierten im Vergleich zu einem nicht rotierten Polygon. Mit zunehmender Rotation nimmt auch die Fehlerrate zu. Der Mittelwert der Fehlerrate für nicht rotierte Polygone beträgt 4,55, für 60° rotierte Polygone 6,88 und für 120° rotierte Polygone 7,36. Abbildung 13 zeigt die normierte Fehlerrate für nicht rotierte, 60° und 120° rotierte Polygone, wobei unter normiert die Differenz der Fehlerrate vom Mittelwert zu verstehen ist. Die Fehlerrate nicht rotierter Polygone liegt

## Ergebnisse

deutlich unter dem Mittelwert, während die Fehlerraten aller rotierten Polygone darüber liegen.

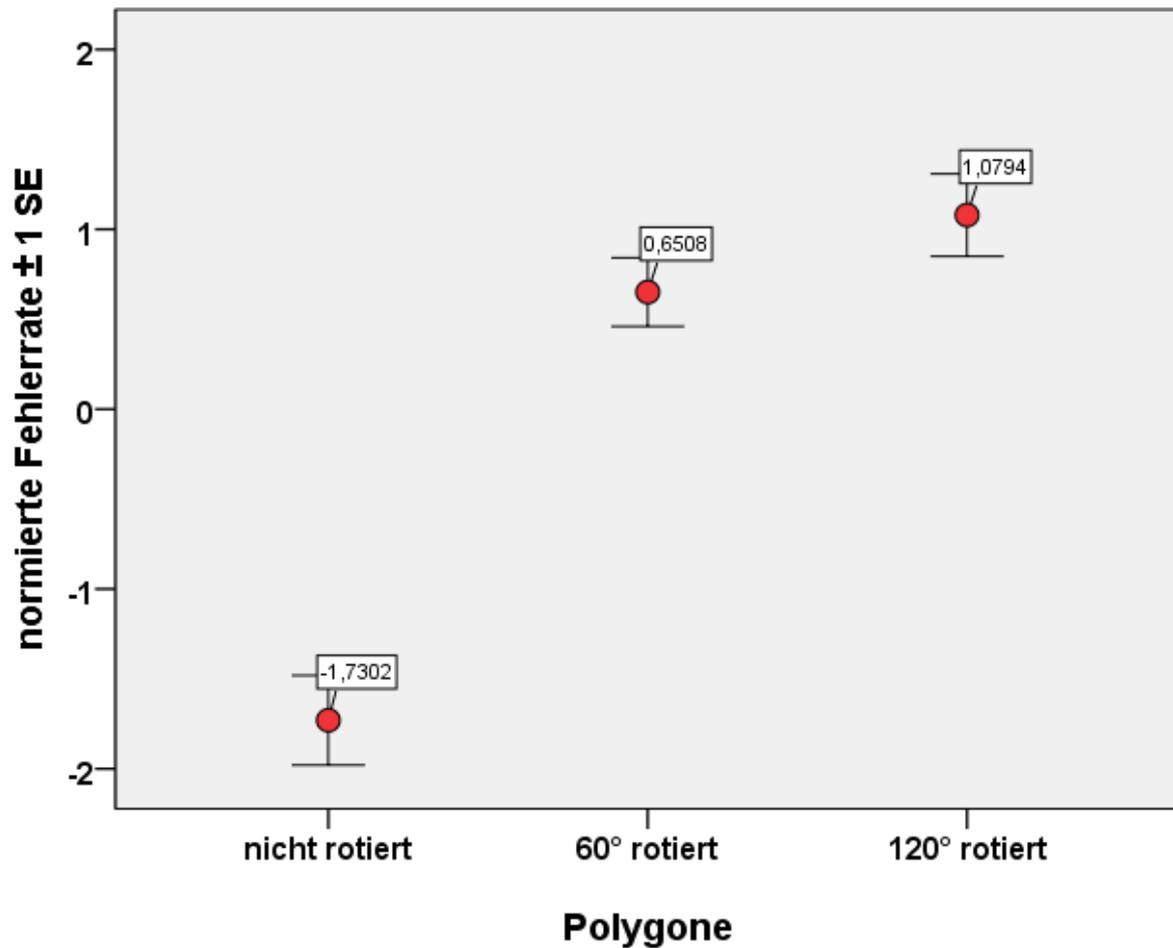


Abbildung 13: Fehlerrate Polygone

Die Reaktionszeit steigt von nicht rotierten (Mittelwert 1,691 s) zu 60° rotierten Polygonen (Mittelwert 2,064 s) sprunghaft, von 60° (Mittelwert 2,064 s) zu 120° rotierten Polygonen (Mittelwert 2,123 s) leicht an (siehe Abbildung 14).

## Ergebnisse

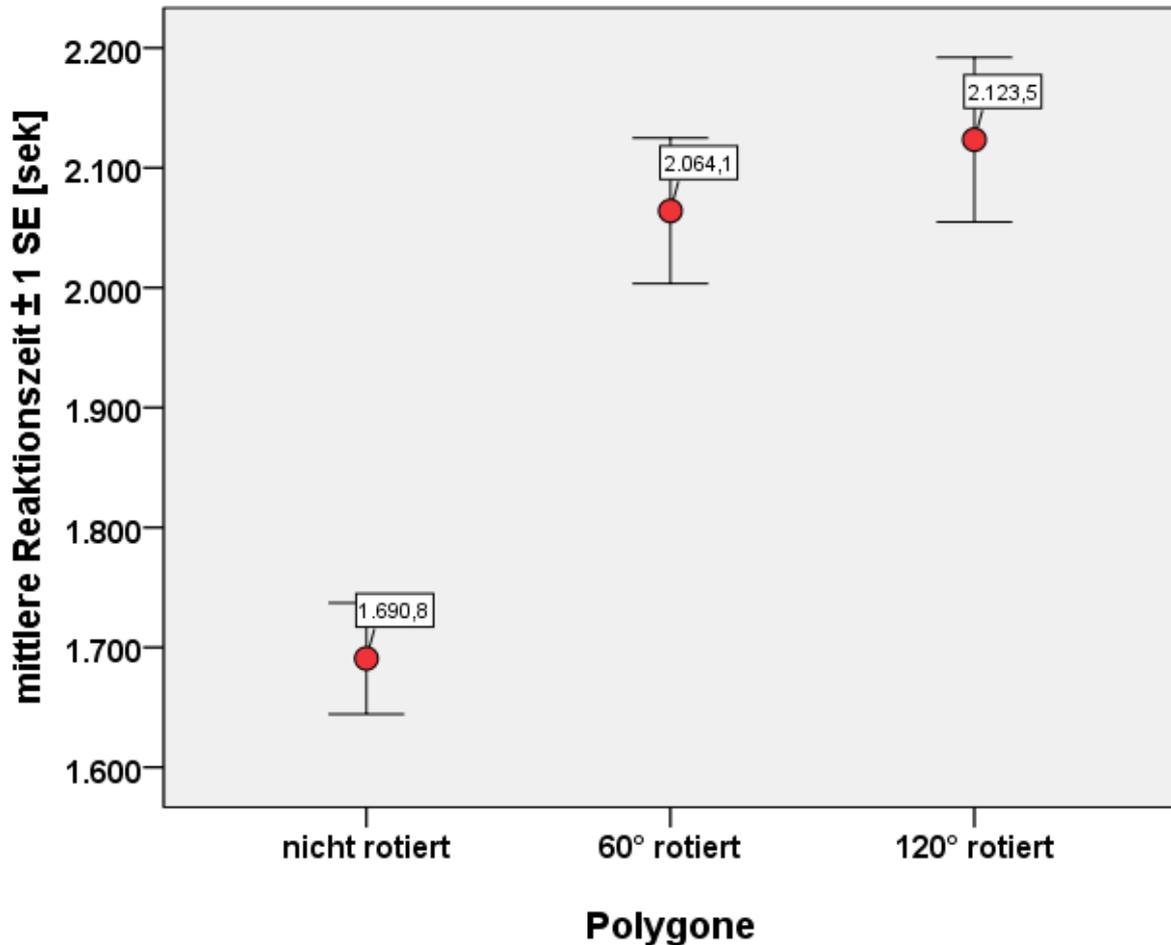


Abbildung 14: Reaktionszeit Polygone

Im Vergleich wurden bei der Polygon-Aufgabe im Mittel mehr Fehler gemacht als bei der Zahlen-Aufgabe (Mittelwert Fehlerrate Polygone: 18,5; Mittelwert Fehlerrate Zahlen: 12,5).

Mittels nichtparametrischer Korrelationsanalyse wurden die Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen in folgenden Tests und Aufgaben genauer untersucht: Verbaler, Nonverbaler und Numerischer KFT, Zahlenstrahl-Test, Prä-Kopfrechentest (*Rechnen1*), Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe im MRT (*ErrZahlen1*), Fehleranzahl in der Prä-Polygon-Aufgabe im MRT (*ErrPolyg1*), Deutschnote und Mathematiknote.

Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe (*ErrZahlen1*) höchst signifikant mit den Ergebnissen im nonverbalen KFT, im Zahlenstrahl-Test, im Prä-Kopfrechentest, sowie mit der Fehleranzahl in der Prä-Polygon-Aufgabe, und signifikant

## Ergebnisse

mit dem numerischen KFT zusammenhing.

Die Fehleranzahl in der Prä-Polygon-Aufgabe korrelierte neben der Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe höchst signifikant mit dem nonverbalen und numerischen KFT, der Zahlenstrahl-Aufgabe und hoch signifikant mit dem Ergebnis im Prä-Kopfrechentest.

Das Ergebnis im Zahlenstrahl-Test wiederum hing mit dem verbalen und numerischen KFT hoch signifikant, mit dem nonverbalen KFT marginal-signifikant zusammen.

Tabelle 1: Nichtparametrische Korrelationen: Verbaler KFT, nonverbaler KFT, numerischer KFT, Zahlenstrahl-Test, Prä-Kopfrechentest (Rechnen1), Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe (ErrZahlen1), Fehleranzahl in der Prä-Polygon-Aufgabe (ErrPolyg1)

			Verbal	Nonverbal	Numerisch	Zahlenstrahl	Rechnen1	ErrZahlen1	ErrPolyg1
Spearman-Rho	Verbal	Korrelationskoeffizient	1,000	,205	,349**	-,304*	,084	-,110	-,197
		Sig. (2-seitig)		,092	,003	,011	,491	,377	,111
		N	69	69	69	69	69	67	67
	Nonverbal	Korrelationskoeffizient	,205	1,000	,128	-,236	,076	-,386**	-,335**
		Sig. (2-seitig)	,092		,294	,051	,534	,001	,006
		N	69	69	69	69	69	67	67
	Numerisch	Korrelationskoeffizient	,349**	,128	1,000	-,279*	,076	-,229*	-,324**
		Sig. (2-seitig)	,003	,294		,013	,508	,046	,004
		N	69	69	79	78	79	76	76
	Zahlenstrahl	Korrelationskoeffizient	-,304*	-,236	-,279*	1,000	-,192	,363**	,326**
		Sig. (2-seitig)	,011	,051	,013		,086	,001	,004
		N	69	69	78	81	81	77	77
	Rechnen1	Korrelationskoeffizient	,084	,076	,076	-,192	1,000	-,424**	-,277*
		Sig. (2-seitig)	,491	,534	,508	,086		,000	,013
		N	69	69	79	81	83	79	79
	ErrZahlen1	Korrelationskoeffizient	-,110	-,386**	-,229*	,363**	-,424**	1,000	,520**
		Sig. (2-seitig)	,377	,001	,046	,001	,000		,000
		N	67	67	76	77	79	79	79
	ErrPolyg1	Korrelationskoeffizient	-,197	-,335**	-,324**	,326**	-,277*	,520**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,111	,006	,004	,004	,013	,000	
		N	67	67	76	77	79	79	79

\*\* . Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

\* . Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

Der Prä-Kopfrechentest zeigte keinerlei Korrelation mit den drei Untertests des KFT, nicht einmal mit dem numerischen. Allerdings zeigte sich neben hoch signifikanten Korrelation mit der Fehleranzahl in der Zahlenvergleich- und Polygonaufgabe ein marginal-signifikanter Zusammenhang mit dem Zahlenstrahl-Test.

Tabelle 2 zeigt Korrelationen zwischen den Variablen verbaler, nonverbaler und numerischer

## Ergebnisse

Subtest des KFT, Mathematiknote und Deutschnote. Der verbale KFT war höchst signifikant mit der Deutschnote korreliert. Außerdem hingen verbaler und numerischer KFT höchst signifikant zusammen. Der numerische KFT korrelierte höchst signifikant mit der Mathematik- und Deutschnote.

Die Deutschnote und die Mathematiknote zeigten ebenfalls höchst signifikante Korrelation.

Der nonverbale KFT war hingegen mit keiner der Variablen signifikant korreliert.

Tabelle 2: Nichtparametrische Korrelationen: Verbaler KFT, nonverbaler KFT, numerischer KFT, Mathematiknote (NoteMathe), Deutschnote (NoteDeutsch)

			Verbal	Nonverbal	Numerisch	NoteMathe	NoteDeutsch
Spearman- Rho	Verbal	Korrelationskoeffizient	1,000	,205	,349**	-,248	-,432**
		Sig. (2-seitig)		,092	,003	,068	,001
		N	69	69	69	55	55
	Nonverbal	Korrelationskoeffizient	,205	1,000	,128	-,126	-,091
		Sig. (2-seitig)	,092		,294	,358	,510
		N	69	69	69	55	55
	Numerisch	Korrelationskoeffizient	,349**	,128	1,000	-,390**	-,370**
		Sig. (2-seitig)	,003	,294		,001	,002
		N	69	69	79	65	65
	NoteMathe	Korrelationskoeffizient	-,248	-,126	-,390**	1,000	,658**
		Sig. (2-seitig)	,068	,358	,001		,000
		N	55	55	65	68	68
	NoteDeutsch	Korrelationskoeffizient	-,432**	-,091	-,370**	,658**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,001	,510	,002	,000	
		N	55	55	65	68	68

\*\* . Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

### 5.1.2 Trainingseffekt

Der Trainingseffekt, definiert als Produkt aus der Differenz der Fehlerrate und der Differenz der Reaktionszeit bei der Aufgabe Zahlenvergleich im Post-Prä-Vergleich ist bei Probanden der Gruppe 2 (30-60 Minuten trainiert) statistisch signifikant höher als bei Probanden der Gruppe 1 (0-30 Minuten trainiert; u-Test:  $Z = -2,12$ ,  $p < 0,05$ , siehe Abbildung 15).

## Ergebnisse

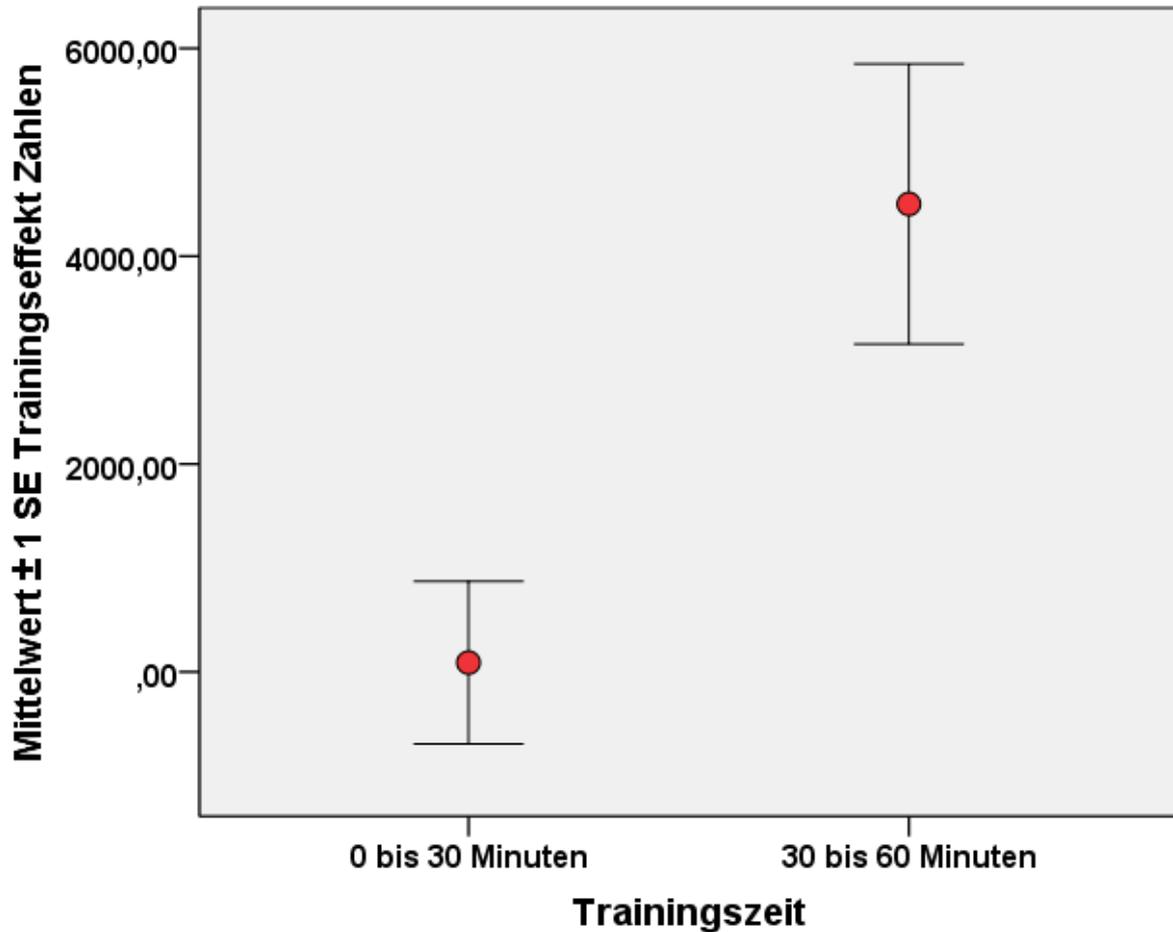


Abbildung 15: Trainingseffekt auf die Zahlenvergleich-Aufgabe

Dieser Trainingseffekt kann allerdings bei der Aufgabe Mentale Rotation nicht beobachtet werden.

Im Vergleich meiner Stichprobe mit der Gesamtstichprobe unserer Arbeitsgruppe fällt folgendes auf: Erstens ist die Fehleranzahl vor dem Training in meiner Stichprobe, die vor allem aus Gesamtschülern besteht, etwa gleich groß wie in der Gesamtstichprobe. So lag in meiner Studie der Mittelwert bei 11,718, in der Gesamtstichprobe in der Gruppe der Real- und Gesamtschüler bei 12,365 (siehe oben). Zweitens nähert sich die Fehleranzahl der Probanden meiner Studie nach dem Training (Mittelwert 8,4225) derjenigen der Gymnasiasten der Gesamtstichprobe an (Mittelwert 6,36; siehe Abbildung 16 im Vergleich zu Abbildung 12).

## Ergebnisse

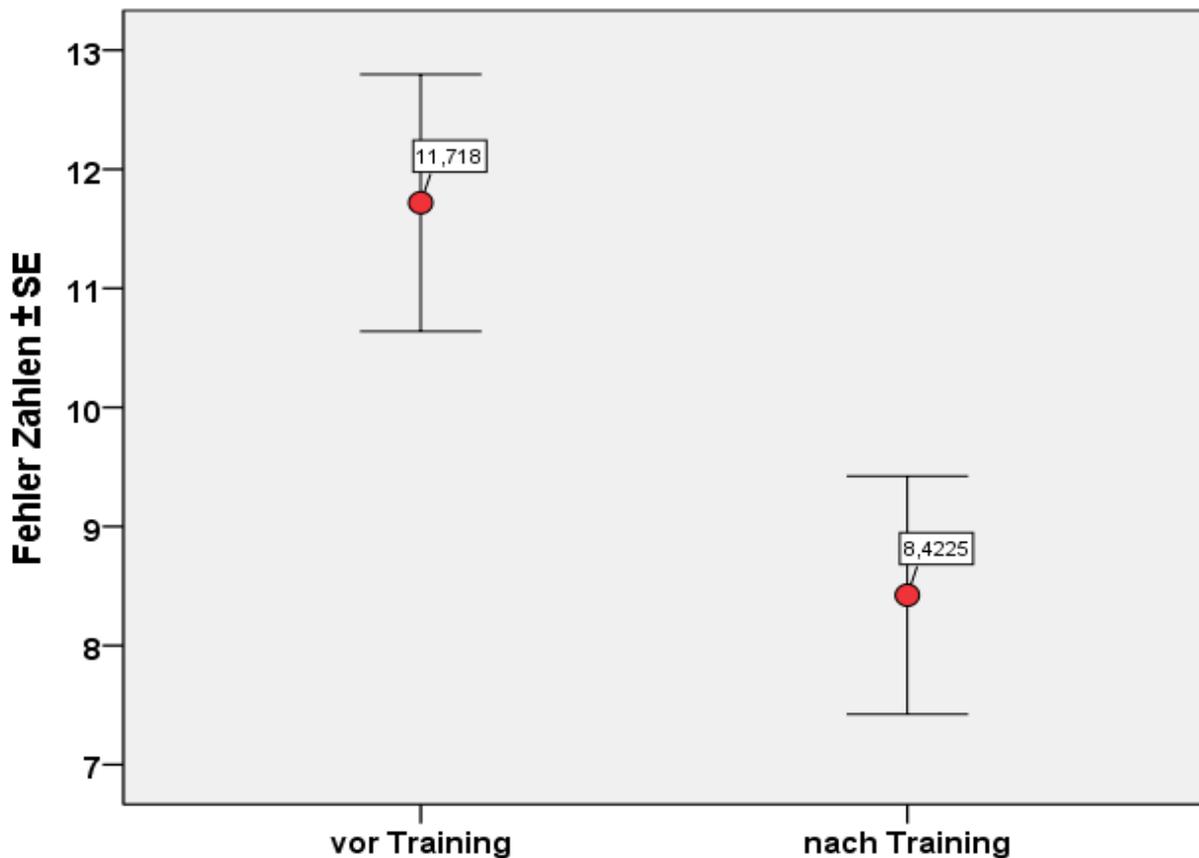


Abbildung 16: Fehleranzahl Zahlen

### *Hierarchische lineare Regressionsanalyse der Einflussfaktoren auf den Trainingseffekt*

Die Regressionsanalyse wurde mehrstufig durchgeführt (siehe Tabellen 13 und 14 im Anhang). Modell 1 berücksichtigte die Anzahl der Übungen, erreichter Level und Übungszeit, Modell 2 zusätzlich Geschlecht, Alter und Stufe und Modell 3 zusätzlich zu den Variablen der ersten beiden Modelle die Fehlerzahl in der Zahlenvergleich-Aufgabe im MRT, den Zahnrad-Test, das Ergebnis im Prä-Kopfrechentest, die Fehleranzahl in der Polygon-Aufgabe im MRT, die Mathematiknote sowie den Zahlenstrahl-Test.

Die Modellzusammenfassung (siehe Tabelle 3, siehe auch Tabelle 14 im Anhang) zeigt, dass Modell 2 33,4 % der Varianz erklären kann. Durch Hinzunahme der Ergebnisse aus den verschiedenen Tests, die zur Erhebung der Kompetenz der Probanden im Umgang mit Zahlen und Raum dienen, wird ein fast doppelt so großer Anteil an Varianz erklärt (62,1%).

## Ergebnisse

Tabelle 3: Regressionsanalyse Trainingseffekt; Modellzusammenfassung, Varianzerklärung

Modell	R	R-Quadrat
1	,266 <sup>a</sup>	,071
2	,578 <sup>b</sup>	,334
3	,788 <sup>c</sup>	,621

a. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit

b. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit, Geschlecht, Alter, Stufe

c. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit, Geschlecht, Alter, Stufe, ErrZahlen1, Zahnräder, Rechnen1, ErrPolyg1, NoteMathe, Zahlenstrahl

Tabelle 4 zeigt, dass von Modell 1 zu Modell 3 die Signifikanz zunimmt (siehe auch Tabelle 15 im Anhang). Während Modell 1 nicht signifikant ist, wird Modell 3 höchst signifikant (df = 12, F = 3,146, p < 0,01).

Tabelle 4: ANOVA Trainingseffekt; Signifikanzen der Modelle

Modell	df	F	Sig.
1 Regression	3	,810	n.s.
Gesamt	35		
2 Regression	6	2,420	< 0,1
Gesamt	35		
3 Regression	12	3,146	< 0,01
Gesamt	35		

Tabelle 5 (siehe auch Tabelle 16 im Anhang) zeigt den Einfluss der einzelnen Koeffizienten.

Tabelle 5: ANOVA Trainingseffekt; Einflussgröße der Koeffizienten

Modell	RegressionskoeffizientB	T	Sig.
1 (Konstante)	1869,565	,576	n.s.
Ü-Zeit	18,019	,219	n.s.
Erreichter Level	242,914	,807	n.s.
Anzahl Übungen	-241,700	-1,379	n.s.
2 (Konstante)	-54293,360	-2,546	< 0,05
Ü-Zeit	64,023	,760	n.s.
Erreichter Level	247,577	,919	n.s.

## Ergebnisse

Anzahl Übungen	-270,815	-1,633	n.s.
Alter	5948,363	3,109	< 0,01
Geschlecht	-1710,404	-1,345	n.s.
Stufe	-2911,372	-,833	n.s.
3 (Konstante)	-65517,528	-3,044	< 0,01
Ü-Zeit	51,316	,567	n.s.
Erreichter Level	355,222	1,248	n.s.
Anzahl Übungen	-354,106	-2,235	< 0,05
Alter	5455,357	3,109	< 0,01
Geschlecht	-1619,481	-1,434	n.s.
Stufe	-847,560	-,273	n.s.
NoteMathe	1007,149	,825	n.s.
Zahnräder	128,416	,415	n.s.
Zahlenstrahl	-24,324	-1,169	n.s.
Rechnen1	65,458	,440	n.s.
ErrZahlen1	537,345	3,728	< 0,01
ErrPolyg1	-128,442	-1,145	n.s.

In Modell 1 wird keine der Variablen signifikant. In Modell 2 wird das Alter höchst signifikant ( $\beta = 5455,357$ ,  $T = 3,109$ ,  $p < 0,01$ ).

In Modell 3 sind die Anzahl der Übungen signifikant ( $p < 0,05$ ) und das Alter ( $p < 0,01$ ) und die Anzahl der Fehler in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe („ErrZahlen1“) höchst signifikant ( $p < 0,01$ ).

Dabei korrelierte die Anzahl der Übungen negativ mit dem Trainingseffekt. Je mehr Übungen also ein Proband absolvierte, umso schlechter war der Trainingseffekt bzw. je weniger Übungen ein Proband absolvierte, umso besser der Trainingseffekt. Das Alter und die Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe korrelierten positiv mit dem Trainingseffekt. Mit anderen Worten ist der Trainingseffekt umso größer, je älter ein Proband ist und je mehr Fehler ihm in der Zahlenvergleich-Aufgabe unterliefen bzw. ist der Trainingseffekt umso kleiner, je jünger ein Proband ist und je weniger Fehler er in der Zahlenvergleich-Aufgabe machte.

Für den Kognitiven Fähigkeitstest (KFT) und motivationale Faktoren (FEES und SELLMO) konnten keine signifikanten Einflüsse auf den Trainingseffekt nachgewiesen werden.

## Ergebnisse

### *Analyse der Einflussfaktoren auf die Anzahl der Übungen mit dem Mathe-Monster-Computerspiel*

Da die Anzahl der Übungen signifikanten Einfluss auf den Trainingseffekt hatte, und ich vermutete, dass hier motivationale Faktoren eine große Rolle spielen, untersuchte ich diese Variable noch einmal genauer. In einer univariaten Varianzanalyse mit der Anzahl der Übungen als abhängiger und den Ergebnissen aus den SELLMO, der Mathematiknote und der Schulart als unabhängigen Variablen ergaben sich *Lernziele* und *Vermeidungs-Lernziele* als signifikante Faktoren ( $df = 1, F = 5,232, p < 0,05$  für Lernziele,  $df = 1, F = 6,857, p < 0,05$  für Vermeidungs-Lernziele, siehe Tabelle 17 im Anhang).

Daraufhin erfolgten eine zweistufige Regressionsanalyse mit den SELLMO und der Mathematiknote als Variablen sowie eine ANOVA (siehe auch Tabellen 18-21 im Anhang). Die Mathematiknote erschien mir als Ausdruck schulischen Engagements, also gewissermaßen als Erweiterung der SELLMO-Dimension *Lernziele*, als wichtige weitere Variable. Dabei ergaben zwei signifikante Modelle: Modell 1 enthielt die vier Dimensionen der SELLMO, Modell 2 zusätzlich die Mathematiknote. Die Modellzusammenfassung in Tabelle 6 zeigt, dass mit Modell 1 24,6% der Varianz erklärt werden können. Die zusätzliche Variable Mathematiknote erbringt lediglich 1% mehr, nämlich 25,6%. Durch Hinzunahme der Mathematiknote in Modell 2 wird dieses weniger signifikant als Modell 1 (siehe Tabelle 7).

Tabelle 6: Regressionsanalyse Anzahl der Übungen mit dem Mathemonster; Modellzusammenfassung, Varianzerklärung

Modell	R	R-Quadrat
1	,496 <sup>a</sup>	,246
2	,506 <sup>b</sup>	,256

a. Einflußvariablen : (Konstante), Arbeitsvermeidung, Orientierung an Lernzielen, Engagement, Fehlervermeidung  
a. Einflußvariablen : (Konstante), Arbeitsvermeidung, Orientierung an Lernzielen, Engagement, Fehlervermeidung

## Ergebnisse

Tabelle 7: ANOVA Anzahl der Übungen mit dem Mathemonster; Signifikanzen der Modelle

Modell	df	F	Sig.
1 Regression	4	3,176	,024 <sup>b</sup>
Gesamt	43		
2 Regression	5	2,616	,040 <sup>c</sup>
Gesamt	43		

Tabelle 8 stellt die Koeffizienten im Einzelnen dar. Die Variablen *Lernziele* und *Vermeidungs-Lernziele* („Fehlervermeidung“) werden in beiden Modellen signifikant. Dabei korrelieren *Lernziele* positiv, *Vermeidungs-Lernziele* („Fehlervermeidung“) hingegen negativ mit der Anzahl der Übungen. Je mehr an Proband sich also an Lernzielen orientierte, umso mehr Übungen absolviert er. Je mehr ein Proband aber versuchte, Fehler zu vermeiden (hohe Ausprägung der Dimension *Vermeidungs-Lernziele*), desto weniger Übungen absolvierte er.

Die Mathematiknote hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der Übungen. Ihre Berücksichtigung in Modell 2 führte lediglich zu marginalen Änderungen der Signifikanz der einzelnen Koeffizienten im Vergleich zu Modell 1.

Tabelle 8: ANOVA Anzahl der Übungen mit dem Mathemonster; Einflussgröße der Koeffizienten

Modell	Regressionskoeffizient <sup>a</sup>	T	Sig.
1 (Konstante)	-4,303	-,660	n.s.
Orientierung an Lernzielen	,206	2,219	< 0,05
Engagement	,154	1,378	n.s.
Fehlervermeidung	-,317	-2,592	< 0,05
Arbeitsvermeidung	,164	1,277	n.s.
2 (Konstante)	-5,670	-,831	n.s.
Orientierung an Lernzielen	,216	2,287	< 0,05
Engagement	,153	1,360	n.s.
Fehlervermeidung	-,323	-2,619	<0,05
Arbeitsvermeidung	,148	1,127	n.s.
NoteMathe	,822	,728	n.s.

a. Abhängige Variable: Anzahl Übungen

## Ergebnisse

### *Univariate Varianzanalyse der Einflussfaktoren auf den Zahlenstrahltest*

Da der Zahlenstrahltest genau die Fähigkeiten überprüft, die beim Mathemonster-Spiel trainiert werden, erschien es von besonderer Wichtigkeit, verschiedene, insbesondere motivationale Einflussfaktoren auf die Performanz in diesem Test zu untersuchen. Das Ergebnis zeigt Tabelle 9 (siehe auch Tabelle 22 im Anhang).

Tabelle 9: Univariate Varianzanalyse Zahlenstrahl-Test; Signifikanzen der Variablen

Abhängige Variable: Zahlenstrahl

Quelle	df	F	Sig.
Korrigiertes Modell	7	4,079	< 0,01
Konstanter Term	0		
Stufe	0		
SELLMO_LZ	1	,079	n.s.
SELLMO_AN	1	3,102	< 0,1
SELLMO_VL	1	,212	n.s.
SELLMO_AV	1	2,872	n.s.
ErrZahlen1	1	15,360	< 0,01
ErrPolyg1	1	,057	n.s.
Rechnen1	1	2,307	n.s.

Das gesamte Modell ist hoch signifikant ( $p < 0,01$ ). Insbesondere die Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe hat einen höchst signifikanten ( $p > 0,01$ ) Einfluss auf das Ergebnis im Zahlenstrahltest. Hingegen hat das Ergebnis in der Polygon-Aufgabe in diesem Modell keinen Einfluss.

Auf motivationaler Ebene hat die Dimension *Annäherungs-Lernziele* („SELLMO\_AN“) einen marginal-signifikanten Einfluss ( $p < 0,1$ ) auf das Ergebnis im Zahlenstrahltest.

Für die Ergebnisse von KFT und FEES konnten keinerlei signifikante Einflüsse nachgewiesen werden.

## 5.2 FMRI-Daten

### 5.2.1 Prä-Messungen

Die Abbildungen 17 und 18 zeigen den Kontrast *zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen)* in Rot. Es zeigen sich Aktivierungen in folgenden Arealen: Beidseits MOG und IOG, beidseits SPL, linker somatosensorischer Cortex, rechter SFG, rechtes BA 6 und rechtes primär-motorisches Areal (Koordinaten siehe Tabelle 10).

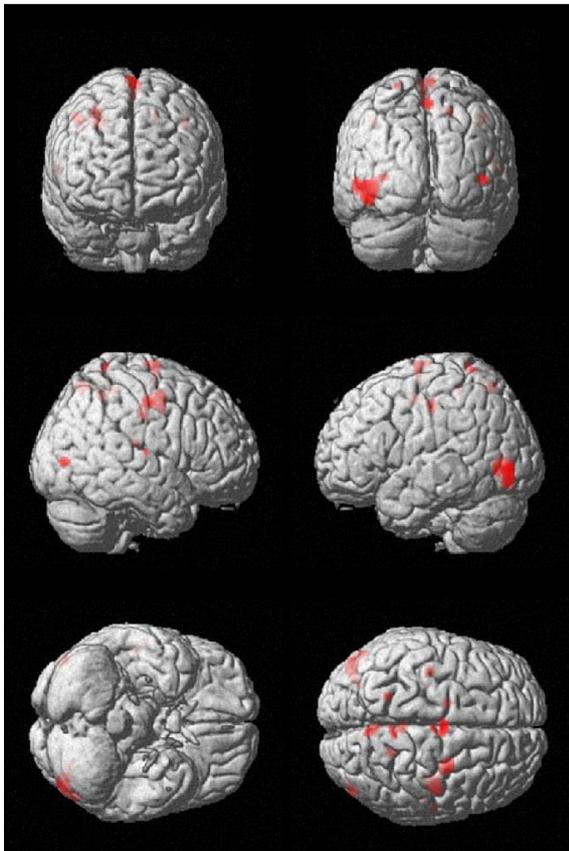


Abbildung 17: Kontrast *zweistellige > (einstellige + dreistellige Zahlen)*,  $p < 0,005$ , uncorr., extent threshold 10

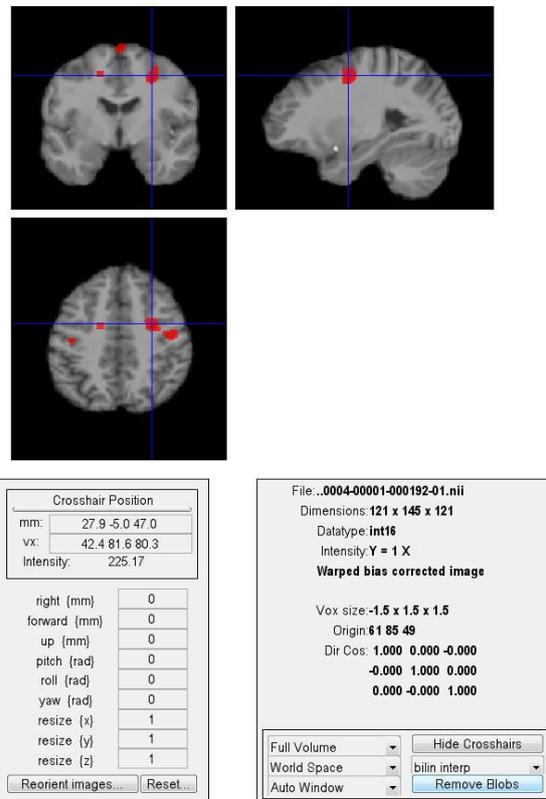


Abbildung 18: Kontrast *zweistellige > (einstellige + dreistellige Zahlen)*,  $p < 0,005$ , uncorr., extent threshold 10

## Ergebnisse

Tabelle 10: Kontrast zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen),  $p < 0,005$ , uncorr., extent threshold 10

Cluster	Maximum	X	Y	Z	Z-Wert	Zuordnung
1	1	-44	-80	-12	3,93	Linker Inferiorer Okzipitalgyrus
	2	-40	-80	-2	3,9	Linker Mittlerer Okzipitalgyrus
	3	-52	-72	0	3,48	Linker Mittlerer Okzipitalgyrus
2	1	28	-6	44	4,38	Rechter Superiorer Frontalgyrus
3	1	2	-8	72	3,91	Rechtes SMA → rechtes BA 6
	2	2	-10	60	3,14	Rechtes SMA → rechtes BA 6
4	1	46	-16	46	3,65	Rechter Präzentralgyrus → rechtes BA 3b
	2	38	-18	36	3,55	Rechtes BA 3a
5	1	4	-68	58	3,55	Rechter SPL
6	1	-38	-20	44	3,52	Linker Postzentralgyrus → linkes BA 4p
7	1	0	-48	72	3,39	SPL
	2	6	-48	72	3,27	Rechter SPL
8	1	44	-80	4	3,67	Rechter Mittlerer Okzipitalgyrus
9	1	2	-40	56	3,36	Rechter SPL
10	1	-22	-52	70	3,33	Linker SPL
11	1	60	-16	10	3,45	Rechter Superiorer Temporalgyrus

### 5.2.2 Trainingseffekt

Um den Trainingseffekt anhand der fMRI-Daten zu bestimmen, wählte ich den Kontrast *zweistellige > (einstellige + dreistellige Zahlen) im Prä > Post-Vergleich*. Dieser wurde mit dem Trainingseffekt, definiert durch das Produkt aus dem maximal erreichten Level und dem Quotienten aus der Fehleranzahl in der Zahlenvergleich-Aufgabe während der Prä-Messung und der Punktzahl im Prä-Kopfrechentest, korreliert (Trainingskontrast). Als Kovariaten wurden das Ergebnis des Prä-Kopfrechentests, das Alter, die Jahrgangsstufe und das Geschlecht mitberücksichtigt. Betrachtet man das Aktivierungsmuster in den Abbildungen 19 und 20, so

## Ergebnisse

zeigt sich eine linkshemisphärische Dominanz. Die aktivierten Areale sind vor allem linksseitige primär-motorische und prämotorische Areale wie der Präzentralgyrus und BA 6, insbesondere das SMA und der SFG, aber auch rechtsseitige Areale wie das primär-motorische Areal, BA 6 und der somatosensorische Cortex (Koordinaten siehe Tabelle 11).

Im gegensätzlichen Kontrast *zweistellige > (einstellige + dreistellige Zahlen) im Post > Prä-Vergleich* wurden keine Mehraktivierungen gemessen.

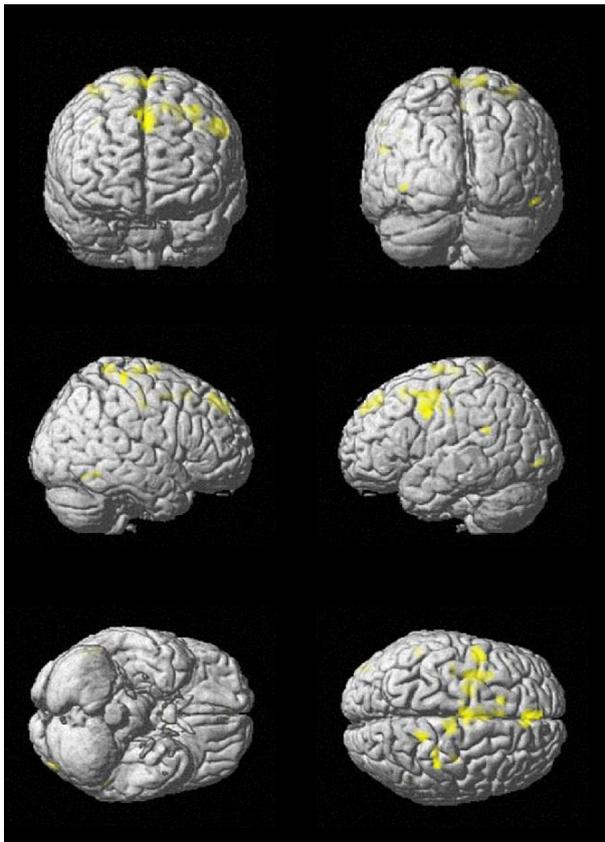


Abbildung 20: Trainingskontrast: zweistellige > (einstellige + dreistellige Zahlen) post > prä, korreliert mit max. Level,  $p < 0,005$ , uncorr., extent threshold 10

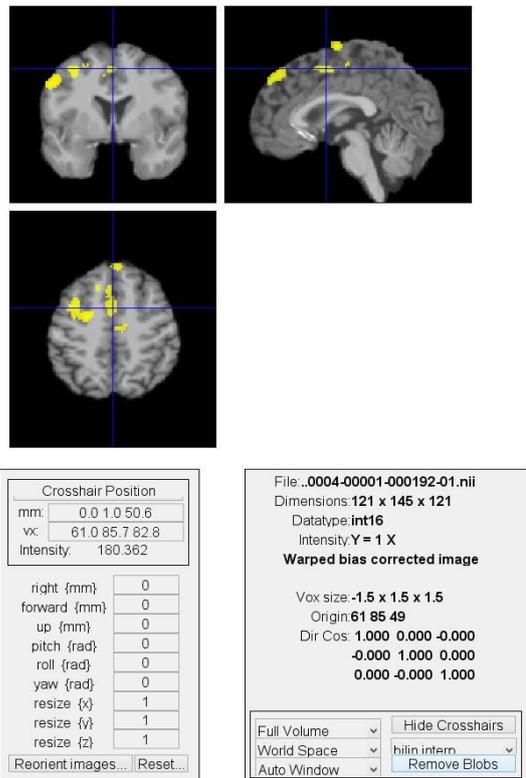


Abbildung 19: Trainingskontrast: zweistellige > (einstellige + dreistellige Zahlen) post > prä, korreliert mit max. Level,  $p < 0,005$ , uncorr., extent threshold 10

## Ergebnisse

Tabelle 11: MNI Koordinaten Trainings-Kontrast: *zweistellige Zahlen* > (*einstellige + dreistellige Zahlen*) prä > post, korreliert mit max. Level,  $p < 0,005$ , uncorr., extent threshold 10

Cluster	Voxels	Maximum	X	Y	Z	Z-Wert	Zuordnung
1	317	1	-22	-6	48	3,35	rechter SFG
		2	-34	2	48	3,18	Linker Präzentralgyrus
		3	-36	-6	42	3,03	Linker Präzentralgyrus
2	162	1	-2	44	44	3,14	Linker Superiorer Medialgyrus
		2	2	40	48	3,05	Linker Superiorer Medialgyrus
		3	-2	50	40	3,02	Linker Superiorer Medialgyrus
3	153	1	-50	2	40	3,38	Linker Präzentralgyrus
4	143	1	-2	4	50	2,94	Linkes SMA → linkes BA 6
		2	-4	18	48	2,79	Linkes SMA
		3	-8	4	44	2,79	Linkes mittleres Cingulum
		4	-4	20	52	2,78	Linkes SMA → linkes BA 6
5	85	1	-4	-8	74	3,44	Linkes SMA
		2	-14	-10	74	2,75	Linker Superiorer Frontalgyrus → linkes BA 6
6	63	1	14	-42	72	3,29	Rechter Postzentralgyrus → rechtes BA 1
7	61	1	10	-20	70	2,99	Rechtes SMA → rechtes BA 6
		2	2	-26	68	2,64	Rechter parazentraler Lobulus → rechtes BA 4a
8	61	1	36	-32	64	2,94	Rechter Postzentralgyrus → rechtes BA 1
		2	26	-32	64	2,74	Rechter Postzentralgyrus → rechtes BA 4a
9	47	1	4	-18	54	2,9	Rechtes SMA → rechtes BA 6
10	36	1	-14	20	54	3,1	Linker Superiorer Frontalgyrus
11	24	1	-54	-46	22	2,9	Linker Superiorer Temporalgyrus
12	17	1	50	-62	-16	2,95	Rechter Inferiorer Temporalgyrus
		2	56	-50	-14	2,72	Rechter Inferiorer Temporalgyrus
13	10	1	-40	-88	-4	3,23	Linker Mittlerer Okzipitalgyrus

## Ergebnisse

Abbildung 21 zeigt den Prä-Kontrast *zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen)* in Rot, den Trainingskontrast *zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen) prä > post*, korreliert mit *Max. Level* in Gelb und ihre Überlappungsbereiche in Orange.

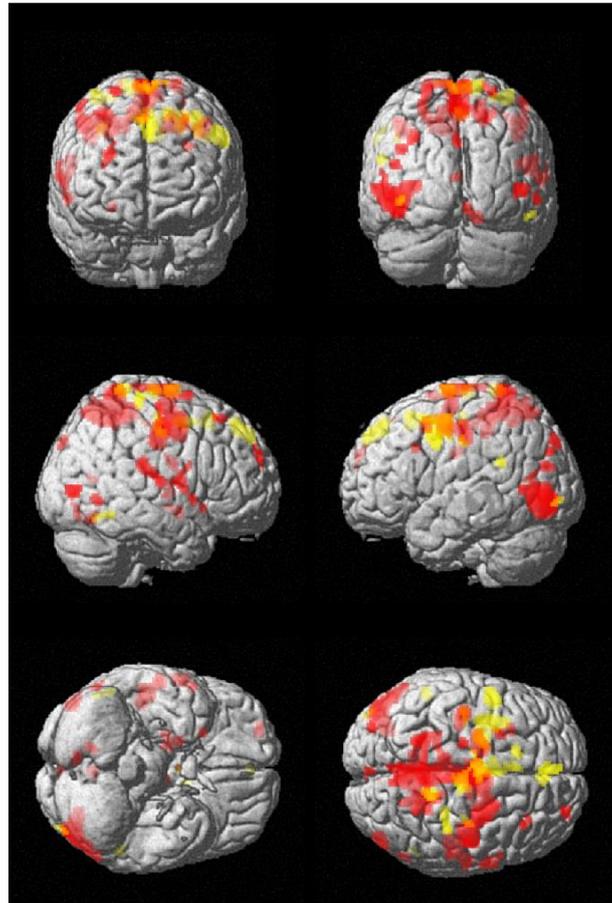


Abbildung 21: *zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen)* in rot, Trainingskontrast (*zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen) prä > post*, korrel. mit *Max. Level* in gelb, Überlappungsbereiche sind orange dargestellt;  $p < 0,005$ , uncorr., extent threshold 10

Um die Koordinaten dieser Überlappungsbereiche zu erhalten, wählte ich eine Maske, die den Prä-Kontrast beinhaltet, und legte diese über den Trainingskontrast. Die durch beide Kontraste aktivierten Areale, sozusagen ihre Schnittmenge, sind beidseitig prämotorische Areale (bilateral SMA und rechtsseitiger SFG) und der somatosensorische Cortex (Koordinaten siehe Tabelle 12).

## Ergebnisse

Tabelle 12: Trainingskontrast (*zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen) prä > post, korrel. mit Max. Level*, mit einer Maske, die den Prä-Kontrast *zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen)* beinhaltet,  $p < 0,005$ , uncorr. Extent threshold 10

Cluster	Voxels	Maximum	X	Y	Z	Z-Wert	Zuordnung
1	62	1	-4	-8	74		Linkes SMA
2	55	1	-22	-6	48		rechter SFG
3	10	1	6	-20	72		Rechtes SMA → rechtes BA 6
4	7	1	36	-14	42		Rechtes BA 4p
5	6	1	-40	-18	38		Linker Postzentralgyrus → linkes BA 4p

## 6 Diskussion

### **6.1 Motivation für die Trainingsstudie**

Die Teilnahme an einer Studie, bei der es ausgerechnet um Mathematik geht, für die man seine Freizeit opfern und dann auch noch in ein großes unbekanntes Gerät klettern soll, das außerdem noch laute und angsteinflößende Geräusche macht, klingt für einen Schüler der fünften oder sechsten Klasse zunächst einmal nicht besonders attraktiv. Um also Schüler dafür zu gewinnen, als Probanden an einer Mathematik-Trainingsstudie teilzunehmen, sollte man sich zunächst einmal überlegen, wie man Schüler der fünften bis sechsten Klasse dazu motivieren kann.

Nach der Formel von Herold und Herold ist Motivation =  $E^3$ , wobei  $E^3$  für Eingebundensein x Erfolg x Eigenständigkeit steht. Diese Komponenten sind im SOL-Konzept (selbstorganisiertes Lernen, siehe Einleitung) verwirklicht und so führten wir auch unsere Studie in Anlehnung an SOL durch. In welcher Weise die Komponenten der Motivation in unserer Studie verwirklicht wurden und wo Parallelen zum SOL-Unterrichtskonzept zu finden sind, möchte ich im Folgenden erläutern.

### **6.2 Aufbau der Trainingsstudie**

Um Probanden für meine Trainingsstudie zu rekrutieren, besuchte ich gemeinsam mit meiner Arbeitsgruppe verschiedene Schulen, um sowohl Schülern als auch deren Eltern von dem Projekt zu berichten und sie zur Teilnahme einzuladen. Dabei legten wir besonderen Wert darauf, dass die Kinder sich vollkommen freiwillig zur Teilnahme entschieden. Bei der Terminvereinbarung sprach ich, wenn möglich, immer auch mit den jungen Probanden selbst und nicht nur mit ihren Eltern, um mich zu vergewissern, dass sie aus eigener Motivation heraus teilnahmen. Die Kinder konnten also eigenständig über ihre Teilnahme entscheiden. Alle Teilnehmer konnten sich außerdem ihre Trainingszeiten mit dem Mathemonster vollkommen frei einteilen. Es gab weder Vorgaben über Trainingszeiten noch über bestimmte Level, die zu einem festgelegten Zeitpunkt erreicht werden mussten. So implementierten wir die Komponente Eigenständigkeit. Auch im SOL-Unterricht können die Schüler im gewissen Grenzen frei entscheiden, was sie als nächstes bearbeiten möchten und mit wem.

## Diskussion

Durch die Einteilung in Kleingruppen, die gemeinsam zu den Messungen und Tests im hiesigen Institut für diagnostische und interventionelle Neuroradiologie eingeladen wurden, und die ebenfalls gemeinsam zuhause mit dem Mathemonster trainierten, wurde die Komponente des Eingebundenseins verwirklicht. Vor den Messungen machten sich die Kinder gegenseitig Mut, lobten sich gegenseitig, wenn sie eine Aufgabe mit Erfolg beendet hatten und waren gleichzeitig angespornt, genauso gut oder sogar besser als der Vorgänger bei einer Aufgabe oder einem Test zu sein. Auch für das Training zuhause war die Einteilung in Kleingruppen von Vorteil. Während ein Kind trainierte, sahen die anderen zu, sodass zum einen das gerade trainierende Kind sich vor den anderen profilieren konnte und zum anderen die anderen Kinder durch das Zuschauen lernten und bei Unklarheiten helfen konnten. Bereits kurze Zeit nachdem ich den Kleingruppen das Computerspiel gezeigt und erklärt hatte, konnte ich dies beobachten. Ähnlich funktioniert im Schulunterricht die Gruppenarbeit: Es wird in Kleingruppen gearbeitet, man hilft sich gegenseitig und jedes Gruppenmitglied profitiert von dieser gemeinsamen Arbeit.

Da die ersten Levels für die meisten Probanden relativ einfach waren, waren hier sehr schnell Erfolge in Form des Erreichens eines höheren Levels zu erzielen. Dies wurde mit einer kurzen Videosequenz belohnt, bei dem das Mathemonster auf einem Besen quer über den Bildschirm flog. Der Spielstand, das heißt die Spieldauer, der erreichte Level und die Punktzahl, wurden automatisch unter dem Namen des jeweiligen Spielers auf dem mitgegebenen USB-Stick gespeichert, sodass die Kinder auch einen „Beweis“ über ihre tolle Leistung im Trainingsspiel vorweisen konnten.

Davon abgesehen, erhielten die Probanden immer direkt Rückmeldung, ob sie eine Aufgabe richtig oder falsch gelöst hatten: Während das Mathemonster nur die richtigen Zahlen fressen konnte und falsche einfach hinunterfielen, wurden bei den Aufgaben im MRT-Scanner nach einer richtigen Antwort ein grünes Quadrat in der Mitte des Bildschirms eingeblendet, nach einer falschen ein rotes. Mir war wichtig, dass die Probanden als Erfolgskontrolle direktes Feedback über ihre Leistung bekamen.

Somit konnte ich alle drei Motivationskomponenten Eigenständigkeit, Eingebundensein und Erfolg einbringen und die Voraussetzungen für eine möglichst hohe Motivation bei den Probanden schaffen.

Groß (2014) konnte in ihrer Bachelorarbeit „Die subjektive Wahrnehmung des Schul- und Klassenklimas im Verlauf der Adoleszenz, neurobiologische Korrelate und Maßnahmen im Rahmen eines SOL-Unterrichtskonzepts für ein verbessertes Schul- und Klassenklima in der Sekundarstufe I“ zeigen, dass im SOL-Modell insbesondere drei Faktoren auf die Lernmotivation wirken: Erstens die soziale Klassengemeinschaft, zweitens das individuelle Leistungsfeedback und drittens das Ausmaß an Eigenständigkeit, die den Schülerinnen und Schülern beim Lernen eingeräumt wird. All diese Faktoren sind auch in unserer Studie in Form von Gruppenarbeit, eigenständigem Training und direktem Feedback über falsche oder richtige Antworten, Punktestand und den erreichten Level verwirklicht. Damit wird bestätigt, dass wir die besten Voraussetzungen für eine hohe Motivation der Probanden bei der Teilnahme an dieser Trainingsstudie geschaffen haben.

### **6.3 Verhaltensdaten**

Die Zahlenvergleich-Aufgabe war bei der Prä- und Post-Messung identisch. Um diese Aufgabe richtig zu lösen, mussten zunächst einmal die Zahlen links im Bild visuell erfasst und ihre Bedeutung erkannt werden (Informationsextraktion). Anschließend musste die Zahl rechts im Bild erfasst (Informationsextraktion), im Arbeitsgedächtnis gespeichert und zwischen die beiden anderen Zahlen auf dem mentalen Zahlenstrahl einsortiert werden (mentale Manipulation). Schließlich musste entschieden werden, ob diese Einordnung zwischen die beiden anderen Zahlen möglich ist und eine Antwort gegeben werden.

In ähnlicher Weise brachte man das Mathemonster dazu, die richtige Zahl zu fressen: Zunächst musste, je nach Level, die oben gezeigte Zahl erfasst, bzw. das Ergebnis der Aufgabe ermittelt werden, und diese anschließend, im Arbeitsgedächtnis gespeichert, auf dem Zahlenstrahl einsortiert werden. Mit der Computermaus musste nun das Mathemonster an die richtige Stelle auf dem Zahlenstrahl geführt werden, damit dieses die Zahl fressen kann, ähnlich der motorischen Antwortgabe bei der Zahlenvergleich-Aufgabe im MRT.

Da die notwendigen mentalen Verarbeitungsschritte für beide Aufgaben sehr ähnlich waren, eignete sich der Performanz-Unterschied in der Zahlenvergleich-Aufgabe zwischen Prä- und Post-Messung gut, um den Trainingseffekt durch das Mathemonster zu erheben.

Um sicherzustellen, dass der gemessene Performanz-Unterschied ein spezieller

Trainingseffekt durch das Mathemonster war und nicht einem allgemeinen Trainingseffekt durch Wiederholung derselben Aufgabe nach einer Woche zuzuschreiben war, führten wir die Polygon-Aufgabe, die mentale Rotation erfordert, als Kontrollaufgabe ein. Um diese Aufgabe richtig zu lösen, mussten zunächst einmal die Figuren visuell erfasst werden. Als nächstes musste eine der Figuren mental schrittweise rotiert und dabei das im Arbeitsgedächtnis gespeicherte Bild der gedrehten Figur immer wieder mit der zweiten Figur verglichen werden. Schließlich musste entschieden werden, ob es zu einer Deckung kommt oder ob dies nicht möglich ist, um anschließend eine Antwort zu geben. Auch diese Aufgabe erforderte also Informationsextraktion, mentale Manipulation und das Halten und Abrufen von Informationen im bzw. aus dem Arbeitsgedächtnis, jedoch keinerlei Zahlenverarbeitung, und erschien daher als geeignete Kontrollaufgabe.

### **6.3.1 Ausgangsperformanz**

Bei der Messung der Ausgangsperformanz in Form von Reaktionszeit und Fehlerrate konnte ich die Ergebnisse von Sonja Kreis replizieren. Die Fehlerrate bei der Zahlenaufgabe war für zweistellige Zahlen am höchsten, darauf folgten drei- und dann einstellige Zahlen. Die Reaktionszeit nahm von einstelligen zu zweistelligen Zahlen stark, von zwei- zu dreistelligen Zahlen kaum zu. Diese insbesondere im zweistelligen Zahlenbereich offensichtlich erschwerte Verarbeitung ist möglicherweise einer Art Konflikt zwischen zwei verschiedenen Zahlenverarbeitungsprozessen geschuldet: Der formal-sprachlichen und der räumlichen Verarbeitung. Um diesen Konflikt zu umgehen, konzipierten wir das Mathemonster so, dass möglichst ausschließlich die räumliche Verarbeitung trainiert wurde. So verzichteten wir beispielsweise auf Zahlwörter und akustische Zahleninformationen. Um Erkenntnisse über einen so komplexen Prozess wie den der Zahlenverarbeitung zu gewinnen, erschien es sinnvoll, zunächst einzelne Teilprozesse zu untersuchen, in diesem Fall also nur die räumliche Zahlenverarbeitung.

Auch bei der Polygon-Aufgabe, die als Kontrollaufgabe eingesetzt wurde, konnte ich die Ergebnisse von Kreis replizieren: Die Fehlerrate für 60° rotierte Polygone war deutlich höher als für nicht rotierte und nahm mit weiterer Rotation (120°) nur noch wenig zu. Sehr ähnlich

## Diskussion

verhielt es sich mit der Reaktionszeit.

Bevor ich auf den Trainingseffekt und seine Einflussfaktoren eingehe, möchte ich die Zusammenhänge der Ergebnisse der einzelnen von uns durchgeführten Tests untereinander genauer beleuchten.

Sowohl die Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe als auch in der Prä-Polygon-Aufgabe korrelierten mit dem non-verbalen und numerischen KFT, den Ergebnissen im Zahlenstrahl-Test, im Prä-Kopfrechentest und miteinander.

Das Ergebnis im Zahlenstrahl-Test hing mit den drei Untertests des KFT zusammen. Der Prä-Kopfrechentest korrelierte interessanterweise mit keinem der KFT-Untertests, nicht einmal dem numerischen, allerdings mit der Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich- und Prä-Polygon-Aufgabe.

Diese Korrelationen spiegeln den starken Zusammenhang räumlicher und mathematischer Fähigkeiten wider. Das räumliche Einordnen von Zahlen auf einem mentalen Zahlenstrahl, wie durch die Zahlenvergleich-Aufgabe gefordert, und die räumliche mentale Manipulation von Objekten, wie es die Polygon-Aufgabe verlangt, hing stärker mit dem Ergebnis im Kopfrechentest zusammen als das Ergebnis im numerischen KFT. Offenbar war also der Umgang mit Zahlen und das räumliche Einordnen derselben entscheidender für die Rechenfähigkeiten eines Probanden als sein Ergebnis in einem numerischen Test, von dem man doch eigentlich erwarten würde, dass er genau diese Fähigkeiten misst.

Verdine et al. (2014) untersuchten in einer Studie den Einfluss von exekutiven und räumlichen Fähigkeiten auf Mathematikfähigkeiten bei Drei- bis Vierjährigen. Sie konnten zeigen, dass räumliche Fähigkeiten einen großen Anteil der Variabilität in mathematischen Fähigkeiten erklären. Die Autoren weisen auf die besondere Bedeutung der Schulung räumlicher Fähigkeiten bereits bei Kindern im Vorschulalter hin, um ihnen später das Erlernen mathematischer Fähigkeiten zu erleichtern.

Während es nicht weiter verwundert, dass der verbale KFT mit der Deutschnote und der numerische KFT mit der Mathematiknote korrelierten (Heller und Perleth, 2000), ist es durchaus bemerkenswert, dass der nonverbale KFT weder mit dem numerischen KFT, noch mit

den Schulnoten in Deutsch und Mathematik korrelierte und nur marginal-signifikant mit dem verbalen KFT. Mit anderen Worten konnte man von den Deutsch- und Mathematiknoten unserer Probanden keine Rückschlüsse auf deren Intelligenz ziehen.

### 6.3.2 Trainingseffekt

Um den Trainingseffekt, definiert als Produkt aus der Differenz der Fehlerrate und der Differenz der Reaktionszeit bei der Aufgabe Zahlenvergleich im Post-Prä-Vergleich, zu messen, teilte ich die Probanden in zwei Gruppen ein: Diejenigen, die 0 bis 30 Minuten (Gruppe 1), und diejenigen, die 30 bis 60 Minuten mit dem Mathemonster geübt hatten (Gruppe 2).

Es war zu erwarten, dass ein Proband mit schlechter Ausgangsperformanz zum einen auch beim Computerspiel vor allem zu Beginn eher viele Fehler macht und daher länger braucht, um einen höheren Level zu erreichen, zum anderen aber stärker von diesem Training profitiert als ein Proband mit guter oder sogar sehr guter Ausgangsperformanz.

Tatsächlich ließ sich in einer Regressionsanalyse der Einflussfaktoren auf den Trainingseffekt ein hoch signifikanter Einfluss der Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe im MRT nachweisen. Dabei war die Fehleranzahl positiv mit dem Trainingseffekt korreliert ( $\beta = 537,345$ ,  $T = 3,728$ ,  $p < 0,01$ ). Mit anderen Worten war der Trainingseffekt eines Probanden umso größer, je mehr Fehler ihm in der Zahlenvergleich-Aufgabe vor dem Mathemonster-Training unterliefen. Umgekehrt hatten Probanden mit wenigen Fehlern in der Zahlenvergleich-Aufgabe einen geringeren Trainingseffekt. Probanden mit schlechter Ausgangsperformanz profitierten also mehr vom Mathemonster-Training als solche mit guter Ausgangsperformanz.

Auch Kucian et al. (2011) wiesen einen erheblich größeren Trainingseffekt für Kinder mit Dyskalkulie als für Kontrollkinder nach. Tzuril und Egozi (2010) untersuchten in einer Trainingsstudie Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen im räumlichen Vorstellungsvermögen. Während vor Beginn des Trainings männliche Probanden ein deutlich besseres räumliches Vorstellungsvermögen aufwiesen, glichen sich nach dem Training die Leistungen von Mädchen und Jungen an. In Teilbereichen waren nach dem Training die Mädchen sogar besser als die Jungen. Auch hier ließ sich also ein stärkerer Trainingseffekt bei Probanden mit schlechterer Ausgangsperformanz nachweisen.

## Diskussion

Hellmich und Hartmann (2002) kamen zu anderen Ergebnissen: Sie ließen 11-jährige Probanden mithilfe eines Computerprogramm ihre räumlichen Fähigkeiten trainieren und verglichen anschließend ihre Leistungen in Aufgaben, die räumliche Kompetenzen erforderten, mit denen einer Kontrollgruppe. Die Trainingsgruppe wurde nach ihrer Ausgangsperformanz in drei Untergruppen eingeteilt. Lediglich bei der stärksten Untergruppe konnte ein Trainingseffekt nachgewiesen werden, nicht jedoch bei der schwächsten. Es wurde argumentiert, dass insbesondere leistungsstarke Schüler von dem Training profitierten. Dies widerspricht jedoch vollkommen den Ergebnissen dieser und vieler anderer Studien (Kucian et al. 2011, Tzuriel und Egozi 2010), die allesamt einen stärkeren Trainingseffekt für Probanden mit schwächeren Ausgangsleistungen nachwiesen. Weiterhin erklärten die Autoren, dass das selbstständige Lernen und Bearbeiten von Aufgaben vorzugsweise für leistungsstarke Schüler als Lernform geeignet sei. Die erfolgreiche Einführung von SOL an vielen Schulen zeigt, dass das Gegenteil der Fall ist.

In dieser Studie zeigte sich für Probanden der Gruppe 2 (Trainingszeit 30-60 Minuten) ein signifikant größerer Trainingseffekt als für Probanden der Gruppe 1 (Trainingszeit 0-30 Minuten; u-Test:  $Z = -2,12$ ,  $p < 0,05$ ).

Es erscheint bemerkenswert, dass sich bereits nach einer so kurzen Trainingszeit Trainingseffekte nachweisen lassen konnten. In den meisten anderen Studien konnte eine Performanz-Steigerung erst nach einer erheblich längeren Trainingszeit (Delazer et al. 2003, Ischebeck et al. 2006, Ischebeck et al. 2007, Kucian et al. 2011, Walker et al. 2014, Kuhn und Holling 2014, Tzuriel und Egozi 2010, Käser et al. 2013) oder nicht einmal dann (Hellmich und Hartmann 2002) gezeigt werden.

Kucian et al. (2011) konnten mit einer Trainingsstudie, die auf einem dem Mathemonster sehr ähnlichen Computerspiel basiert, verbesserte Leistungen in einer Zahlenstrahl-Aufgabe, eine verringerte Varianz bei Schätzaufgaben und bessere Ergebnisse in Additions- und Subtraktionsaufgaben sowohl für Kinder mit Dyskalkulie als auch für Kontrollkinder nachweisen. Den Trainingseffekt auf die mathematischen Aufgaben, die mit dem Trainingsspiel nicht direkt trainiert wurden, erklärten die Autoren mit einer Kombination

## Diskussion

aus einem Transfereffekt durch das Zahlenstrahl-Training, Übung durch Bearbeitung der Additions- und Subtraktionsaufgaben an sich und vor allem verbessertem Umgang mit Zahlen im Sinne einer genaueren Einordnung eines Ergebnisses in Größenordnungen anhand eines mentalen Zahlenstrahls.

Interessanterweise glichen sich nach dem Training die Leistungen von Dyskalkulie-Kindern und Kontroll-Kindern an. Eine ähnliche Annäherung ließ sich auch für die Probanden dieser Studie nachweisen: Nach dem Training näherte sich die Fehleranzahl in der Zahlenvergleich-Aufgabe meiner Probanden, die zum größten Teil Gesamtschüler waren, derjenigen von Gymnasiasten an, die im Rahmen weiterer Studien von unserer Arbeitsgruppe erhoben wurde. Um dies noch einmal deutlicher hervorzuheben, ließ sich also die Kompetenz im Umgang mit Zahlen durch gezieltes Training über lediglich 30 bis 60 Minuten von dem Niveau eines Gesamtschülers nahezu auf das Niveau eines Gymnasiasten bringen.

Für die Polygon-Aufgabe ließ sich kein Trainingseffekt nachweisen. Auch Kucian et al. (2011) zeigten, dass ihr Lernspiel, welches in ähnlicher Weise wie das Mathemonster das Einordnen von Zahlen auf einem Zahlenstrahl trainierte, keinen Einfluss auf die Performanz in einer Aufgabe, die die räumliche Arbeitsgedächtnisleistungen erforderte, hatte.

Kuhn und Holling (2014) untersuchten in einer computergestützten Trainingsstudie Unterschiede zwischen einer Gruppe, die den Umgang mit dem Zahlenstrahl trainierte hatte und einer anderen, die ihr räumliches Arbeitsgedächtnis trainiert hatte, und einer Kontrollgruppe. Zusammengefasst führte das Zahlenstrahl-Training zu einer verbesserten arithmetischen Performanz, nicht jedoch zu einer Steigerung der Leistungen des räumlichen Arbeitsgedächtnisses, vergleichbar mit dem fehlenden Trainingseffekt in der hier verwendeten Polygon-Aufgabe.

Im Folgenden möchte ich auf die Einflussfaktoren auf den Trainingseffekt eingehen. Bedauerlicherweise kommt die Betrachtung dieser Einflussfaktoren in den meisten Studien zu kurz und es wird lediglich über Reaktionszeitverkürzung und Fehlerverringern berichtet.

Für unsere Stichprobe ließen sich die Anzahl der Übungen, das Alter der Probanden und die Fehleranzahl in der Prä-Zahlenvergleich-Aufgabe im MRT als signifikante Einflussfaktoren auf

## Diskussion

den Trainingseffekt nachweisen. Das gesamte Modell, welches außerdem die Variablen erreichter Level, Übungszeit, Geschlecht, Jahrgangsstufe, Ergebnis im Zahnrad-Test, Ergebnis im Prä-Kopfrechentest, Fehleranzahl in der Polygon-Aufgabe im MRT, Mathematiknote und Ergebnis im Zahlenstrahl-Test enthielt, konnte 62,1% der Varianz des Trainingseffekts erklären ( $R\text{-Quadrat} = 0,621$ ).

Die Fehleranzahl in der Zahlenvergleich-Aufgabe war höchst signifikant positiv mit dem Trainingseffekt korreliert ( $\beta = 537,345$ ,  $T = 3,728$ ,  $p < 0,01$ ). Dieses Ergebnis belegt, dass Probanden mit schlechter Ausgangsperformanz in der Zahlenvergleich-Aufgabe mehr vom Training profitierten als Probanden mit guter Ausgangsperformanz.

Die Fehleranzahl in der Polygon-Aufgabe im MRT hatte im Gegensatz dazu keinen Einfluss auf den Trainingseffekt. Dies unterstützt wiederum die Bedeutung der Polygon-Aufgabe als Kontrollaufgabe (siehe oben).

Des Weiteren war das Alter hoch signifikant positiv mit dem Trainingseffekt korreliert ( $\beta = 5455,357$ ,  $T = 3,109$ ,  $p < 0,01$ ). Je älter also ein Proband war, umso mehr profitierte er vom Mathemonster-Training. Dies mag zunächst paradox erscheinen, da man erwarten würde, dass ein älterer Proband bereits bessere räumlich-mathematische Fähigkeiten hat und daher nicht mehr stark vom Training profitiert. Hier ist allerdings zu bedenken, dass ältere Probanden diejenigen sind, die später eingeschult wurden oder bereits eine Klasse wiederholt haben und aus diesem Grund eher Nachholbedarf haben als die jüngeren Probanden. Dieser Sachverhalt knüpft wiederum an den bereits erläuterten stärkeren Trainingseffekt bei schlechterer Ausgangsperformanz an (siehe oben).

Die Jahrgangsstufe, die Mathematiknote und das Ergebnis im Prä-Kopfrechentest hatten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Trainingseffekt. Offenbar war es also für den Trainingseffekt unerheblich, wie weit die durch den Mathematikunterricht vermittelten mathematischen Fähigkeiten der Probanden reichten.

Auf die einzelnen Faktoren, die positiv zur Motivation beitragen, bin ich bereits ausführlich eingegangen. Ich untersuchte ebenfalls motivationale, soziale und emotionale Einflussfaktoren auf den Trainingseffekt mithilfe von FEES und SELLMO, konnte hier jedoch keine signifikanten Ergebnisse erzielen.

## Diskussion

Ein signifikanter Parameter, der jedoch indirekt mit der Motivation und Konzentration zusammenhängt, ist die Anzahl der Übungen. Diese war signifikant negativ mit dem Trainingseffekt korreliert ( $\beta = -354,106$ ,  $T = -2,235$ ,  $p < 0,05$ ). Je mehr Übungen ein Proband also absolvierte, umso schlechter war der Trainingseffekt, beziehungsweise je weniger Übungen, umso größer der Trainingseffekt. Ich nahm an, dass der Anzahl der Übungen motivationale Einflüsse zugrunde liegen und untersuchte daher in einer weiteren Varianzanalyse mit anschließender Regressionsanalyse die Einflussfaktoren auf diese Variable.

Interessanterweise hingen *Lernziele* positiv, *Vermeidungs-Lernziele* jedoch negativ mit der Anzahl der Übungen zusammen ( $\beta = -0,216$ ,  $T = 2,287$ ,  $p < 0,05$  für Lernziele;  $\beta = -0,323$ ,  $T = -2,619$ ,  $p < 0,05$  für Vermeidungs-Lernziele). Probanden, die sich also stark an Lernzielen orientierten, absolvierten mehr Übungen als solche, die sich eher weniger an Lernzielen orientierten. Offenbar führte also der Wille, das Lernziel zu erreichen, nämlich einen hohen Level beim Mathemonster zu erreichen und dadurch die eigenen Fähigkeiten im Umgang und Einordnen von Zahlen im zweistelligen Bereich zu verbessern, dazu, dass möglichst häufig mit dem Computerspiel trainierte wurde.

Erstaunlicherweise erbrachte die Hinzunahme der Variable Mathematiknote in der hierarchischen Regressionsanalyse lediglich 1% zusätzliche Varianzerklärung. Das gesamte Modell (Modell 2) wurde durch diese zusätzliche Variable weniger signifikant. Die Mathematiknote als solche wurde nicht signifikant. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass man annehmen würde, dass die Mathematiknote die Mathematikfähigkeiten eines Schülers, aber auch seine Motivation, sich zu engagieren und etwas zu lernen und zu zeigen, welche Kompetenzen er bereits beherrscht, widerspiegelt. Während jedoch die Variable *Lernziele* einen signifikanten Einfluss auf die Anzahl Übungen hatte, zeigte die Mathematiknote nicht einmal einen Trend. Durch die Mathematiknote wurde vernachlässigbar wenig Varianz der Anzahl der Übungen erklärt. Es war also für die Motivation, mit dem Mathemonster zu trainieren, unerheblich, wie gut die Leistungen desjenigen Probanden im Mathematikunterricht waren. Wichtig war die Orientierung an Lernzielen, in diesem Fall dem Erreichen einer hohen Punktzahl und eines hohen Levels im Mathemonster-Computerspiel. Probanden, die eine starke Ausprägung der Dimension *Vermeidungs-Lernziele* zeigten, absolvierten weniger Übungen als solche mit einer geringeren Ausprägung in dieser

## Diskussion

Dimension. Wer also eher zu Fehlervermeidung tendierte, trainierte weniger häufig mit dem Mathemonster. Diejenigen Probanden, die nur wenige Übungen absolvierten, wurden womöglich durch Angst vor Fehlern oder der eigenen Unzulänglichkeit daran gehindert, häufiger zu trainieren als Probanden mit geringerer Ausprägung in der Dimension *Vermeidungs-Lernziele*.

Die Anzahl der Übungen wurde also vor allem durch motivationale Faktoren beeinflusst. Sie war allerdings negativ mit dem Trainingseffekt korreliert. Eine geringere Anzahl Übungen, die wiederum durch starke Fehlervermeidung bedingt wurde, führte also zu einem größeren Trainingseffekt als eine größere Anzahl Übungen, die wiederum durch starke Orientierung an Lernzielen bedingt wurde. Probanden, die sonst also stark zu Fehlervermeidung tendieren, hatten womöglich einen Nachholbedarf, was den Umgang mit Zahlen anging, und profitierten so, indirekt anhand der geringeren Anzahl an Übungen nachgewiesen, stärker vom Mathemonster-Training als die stark an Lernzielen orientierten Probanden, die viele Übungen absolvierten. Laut SELLMO-Manual geht eine starke Ausprägung in *Vermeidungs-Lernziele* mit kurz- und langfristig geringem Engagement und schlechten Leistungen einher, eine hohe Ausprägung in *Lernziele* hingegen mit langfristig hohem Engagement und guten Leistungen (siehe Material und Methoden). Auch dies bekräftigt die Feststellung, dass Probanden mit schlechter Ausgangsperformanz stärker vom Training profitierten als solche mit guter Ausgangsperformanz.

Der Zahlenstrahl-Test sollte genau diejenigen Fähigkeiten testen, die beim Mathemonster-Spiel trainiert wurden. Kucian et al. (2011) verwendeten aus diesem Grund zur Erhebung des Trainingseffekts durch ein dem Mathemonster sehr ähnliches Computerspiel unter anderem eine Zahlenstrahl-Aufgabe. Ich untersuchte hierfür ebenfalls motivationale und andere Einflussfaktoren.

Dabei konnte ich *Annäherungs-Lernziele* („SELLMO\_AN“) als marginal-signifikanten Faktor ( $p = 0,91$ ) nachweisen. Probanden, die gerne ihre Fähigkeiten und ihr Wissen anderen gegenüber demonstrierten, wiesen also bessere Ergebnisse im Zahlenstrahl-Test auf, als solche, denen weniger daran gelegen war.

Des Weiteren hatte das Ergebnis in der Zahlenvergleich-Aufgabe im MRT einen höchst signifikanten Einfluss ( $p < 0,01$ ) auf das Ergebnis im Zahlenstrahl-Test. Dieser Zusammenhang erscheint nicht überraschend, da bei beiden Aufgaben Zahlen zwischen andere Zahlen eingeordnet werden mussten.

### **6.3.3 Zusammenfassung Verhaltensdaten**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es mit dem Aufbau dieser Studie offensichtlich gelungen ist, die jungen Probanden für die Teilnahme derart zu motivieren, dass sogar nach einer sehr kurzen Übungszeit von weniger als einer Stunde ein Trainingseffekt nachzuweisen war. Dies erscheint in Anbetracht der vielen bereits genannten anderen Studien, die von deutlich umfangreicheren Trainingsprogrammen berichten, durchaus bemerkenswert.

Unser Trainingsprogramm hat sich als wirksames Mittel erwiesen, den Probanden den Umgang mit Zahlen und deren räumliches Einordnen zu vermitteln. Die Zahlenvergleich-Aufgabe erwies sich als gut geeignet, den Trainingseffekt zu messen. Ebenso zeigte sich die Polygon-Aufgabe als geeignete Kontrollaufgabe.

Der Einfluss motivationaler Faktoren auf den Trainingseffekt wurde herausgestellt, ebenso wie die Bedeutung der Ausgangsperformanz auf das Ausmaß desselben.

### **6.4 fMRI-Ergebnisse**

Für die Auswertung der fMRI-Daten während der Zahlenaufgabe erstellte ich den Kontrast *zweistellige Zahlen > (einstellige + dreistellige Zahlen)*. Bei der Prä-Messung zeigten sich Aktivierungen beidseits im MOG und IOG, beidseits im SPL, im linken somatosensorischen Cortex, im rechten SFG, im rechten BA 6 und im rechten primär-motorischen Areal (MNI-Koordinaten siehe Tabelle 10).

In einer ähnlich aufgebauten Trainingsstudie von Kucian et al. (2011) sollten acht- bis zehnjährige Probanden mit entwicklungsbedingter Dyskalkulie (developmental dyscalculia, DD) und gesunde Probanden während der MRT-Messung entscheiden, ob drei gleichzeitig gezeigte Zahlen in auf- oder absteigender Reihenfolge angeordnet waren oder nicht. Dieselbe

## Diskussion

Messung wurde nach einem fünfwöchigen Training mit „Rescue Calcularis“, einem dem Mathemonster ähnlichen computergestützten Lernspiel, bei dem ebenfalls die Orientierung auf und der Umgang mit dem Zahlenstrahl trainiert wurden, wiederholt. Bei der Prä-Messung der Kontrollkinder wurden Aktivierungen vor allem bilateral im IPS, bilateral im SFG, im rechten IFG, im linken MFG, in der Inselregion sowie im Cingulum gefunden. Kinder mit DD wiesen hingegen keine Aktivierung im IPS, dafür aber umso stärkere Aktivierung bilateral im SFG und im linken MFG auf. Zwar gab keiner unserer Probanden eine diagnostizierte DD an, doch hatten einige von ihnen mäßige bis große Schwierigkeiten in Mathematik, womit gut zu erklären ist, dass wir insgesamt auch keine IPS-Aktivierung, wohl aber starke frontale Aktivierungen messen konnten.

Auch Knops und Willmes (2014) verwendeten ein ähnliches Paradigma: Probanden sollten beurteilen, ob drei gleichzeitig gezeigte Zahlen in aufsteigender Reihenfolge angeordnet sind oder nicht. Auch sie fanden Aktivierungen in frontalen und parietalen Arealen, allerdings kombinierten sie diese Aufgabe mit jeweils einer Additions- bzw. Subtraktionsaufgabe und gaben nur Koordinaten zu den Kontrasten Reihenfolge+Addition bzw. Subtraktion > Kontrollaufgabe an, sodass sich jene Ergebnisse mit meinen leider nicht gut vergleichen lassen. Zudem waren die Probanden im Mittel etwa 25 Jahre alt.

Im Prä-Post-Vergleich konnte ich mit dem Trainingskontrast einen Trainingseffekt in Form einer Aktivitätsabnahme in frontalen Arealen mit linkshemisphärischer Dominanz nachweisen. Die weniger stark aktivierten Areale waren insbesondere linksseitige primär- und prämotorische Areale wie der Präzentralgyrus und BA 6, insbesondere das SMA und der SFG, aber auch rechtsseitige Areale wie das primär-motorische Areal, BA 6 und der somatosensorische Cortex.

Überlappungen zwischen dem Prä-Kontrast und dem Trainingskontrast ließen sich beidseits im SMA, im rechtsseitigen SFG sowie beidseits im somatosensorischen Cortex finden. Dabei handelte es sich also um Aktivierungsmodifizierungen, genauer gesagt Aktivitätsabnahme, in solchen Gehirnarealen, die bereits bei der Prä-Messung aktiviert wurden. Es ist davon auszugehen, dass diese prämotorischen Areale einen spezifischen Trainingseffekt für die Zahlenaufgabe während der MRT-Messung erfuhren und für die Performanz-Steigerung von der Prä- zur Post-Messung verantwortlich sind.

## Diskussion

Insofern konnte meine Ausgangshypothese dahingehend bestätigt werden, dass durch das Mathemonster-Training speziell der Umgang mit und die mentale Manipulation von Zahlen, sozusagen das „Handling“, trainiert werden. Dadurch kommt es zu einer Performanzsteigerung, die sich in einer reduzierten Fehleranzahl und Reaktionszeit bei der Zahlenaufgabe äußert, und auf die Modifikation der Aktivierungsmuster vor allem in prämotorischen Arealen zurückgeführt werden kann. Da ich keine Modifikation von Aktivierungsmustern im IPS oder in angrenzenden parietalen Arealen messen konnte, ist davon auszugehen, dass das Trainingsspiel weniger das Erkennen und Einordnen der Zahlen trainierte, oder aber, dass die Probanden bereits so gute Fähigkeiten im Erkennen und Einordnen von Zahlen hatten, dass diese Areale nicht weiter trainiert werden konnten. Die zum Teil sehr schlechten allgemeinen mathematischen Fähigkeiten der Probanden machen letzteres jedoch eher unwahrscheinlich.

Viele andere Studien konnten ebenfalls eine Aktivitätsabnahme in frontalen Arealen durch das Training arithmetischer Aufgaben nachweisen (Kucian et al. 2011, Ischebeck et al. 2006, 2007, Delazer et al. 2003, Mussolin et al. 2013). Dieser Aktivitätsabnahme wird zugrunde gelegt, dass die Verarbeitung der jeweiligen Aufgabe zunehmend von spezialisierten Gehirnarealen übernommen wird und Areale, die eher unterstützende Funktionen wie allgemeine Aufmerksamkeit oder das Arbeitsgedächtnis haben, weniger stark beansprucht werden.

Da ein mit meiner Studie vergleichbarer Trainingseffekt bei Kindern bisher schlecht untersucht ist, möchte ich zum Vergleich vor allem Bezug auf die bereits vorgestellte Studie von Kucian et al. (2011) nehmen.

Auch sie fanden nach dem Training geringere Aktivität vor allem in frontalen Arealen wie SFG und MFG, mit linkshemisphärischer Dominanz, außerdem im linken IPS, in der linken Inselregion und im rechten somatosensorischen Cortex.

Zusätzlich untersuchten sie die Kinder mit DD fünf Wochen nach Ende des Trainings und fanden nun Aktivitätszunahme bei diesen Kindern im Parietallappen. Sie schlossen daraus, dass es zum einen einer gewissen Zeit bedarf, bis sich Änderungen in der Gehirnaktivität und damit Verarbeitungsprozesse konsolidiert haben. Zum anderen wurde angenommen, dass Kinder mit DD krankheitsbedingt geringere Aktivierung in parietalen Arealen zeigen und durch das Training diese Areale erst auf einem normalen Niveau aktiviert werden. Leider wurden die

gesunden Kinder nicht nachuntersucht.

Eine Nachuntersuchung mit zeitlichem Abstand zum Ende des Mathemonster-Trainings war uns organisatorisch nicht möglich. Sicherlich wäre es interessant gewesen, zu sehen, ob sich ein solcher Konsolidierungseffekt auch bei gesunden Kindern nachweisen lässt.

Andere Trainingsstudien, die mit erwachsenen Probanden durchgeführt wurden, zeigen meistens vor allem Aktivitätsabnahme in parietalen Arealen wie dem IPS, SPL, Precuneus und IPL (Delazer et al. 2003, Ischebeck et al. 2006, 2007), aber auch in frontalen Arealen wie SFG, IFG, SMA und Präzentralgyrus (Delazer et al. 2003, Ischebeck et al. 2006, 2007). Houdé et al. (2010) zeigten eine bei Kindern generell schwächer ausgeprägte IPS-Aktivierung als bei Erwachsenen, dafür aber eine stärkere Aktivierung in frontalen Arealen. Sie folgerten daraus, dass dieselbe Aufgabe an Kinder höhere kognitive Anforderungen stelle und eine größere Aufmerksamkeit verlange, um die Aufgabe richtig zu lösen, als dies für Erwachsene der Fall sei. Mit zunehmendem Alter komme es dann zu einem frontoparietalen Shift. Ebenso wie Delazer et al. (2003) und Ischebeck et al. (2006, 2007) erklärten sie dies mit einer Automatisierung von kognitiven Prozessen, die wichtig für mathematisches Denken seien. Dadurch seien Prozesse wie Größenverarbeitung, Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit weniger gefordert.

Einige Trainingsstudien zeigten eine Aktivitätszunahme im Gyrus Angularis (Delazer et al. 2003, Ischebeck 2006, 2007, Grabner et al. 2007). Diesem Areal wird allerdings zum einen der Abruf von gespeicherten Zahleninformationen zugeordnet, was in unserer Studie nicht trainiert wurde, sodass eine fehlende Aktivitätszunahme nicht überraschend ist. Zum anderen zeigt die fehlende Aktivitätsmodifizierung im Gyrus Angularis, dass wir mit dem Mathemonster unser Ziel erreicht haben, ausschließlich die räumliche Zahlenverarbeitung zu trainieren und die formal-sprachliche in den Hintergrund treten zu lassen, um Interaktionen zwischen diesen beiden Verarbeitungsprozessen, die mitverantwortlich für die Schwierigkeiten bei zweistelligen Zahlen sein könnten, zu vermeiden.

Hanakawa et al. (2002) untersuchten frontale und parietale Areale funktionell und anatomisch genauer. Sie fanden eine Aktivierung des PMdr insbesondere bei numerischen Manipulationen. Im Gegensatz zu den meisten anderen Autoren betonten sie die spezifische

## Diskussion

Rolle des PMdr bei numerischen Manipulationen und führten seine Aktivierung nicht auf allgemeine Aufmerksamkeit oder das Arbeitsgedächtnis zurück. Sehr ähnliche Koordinaten wurden von meiner Anatomy Toolbox dem SFG und dem SMA zugeordnet, sodass ich davon ausgehe, dass es sich um dieselbe Region, jedoch anders oder genauer bezeichnet, handelt.

Wie Hanakawa et al. (2002) nehme auch ich an, dass die Aktivitätsabnahme in frontalen prämotorischen Arealen weniger auf allgemein verbesserte Aufmerksamkeits- und Arbeitsgedächtnisfunktionen, als auf eine speziell verbesserte Verarbeitung und Manipulation von Zahlen zurückzuführen ist. Schließlich wäre sonst auch eine Performance-Steigerung in der Kontrollaufgabe zu erwarten gewesen, da auch diese erhebliche Anforderungen an Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis stellt.

Man sollte jedoch nicht außer Acht lassen, dass die von mir nachgewiesenen frontalen Areale in derart komplexer Art und Weise mit anderen Arealen verknüpft und verschaltet sind und die räumliche Auflösung von fMRI-Messungen doch so begrenzt ist, dass ich eher davon sprechen möchte, dass diesen Arealen neben anderen allgemeineren auch spezifische Funktionen bei der räumlichen Verarbeitung und mentalen Manipulation von Zahlen zugeordnet werden können.

Erkenntnisse über den Erwerb der Fähigkeit, symbolische Zahlen der Größe nach zu sortieren (number-ordering ability), wie durch unsere Zahlenaufgabe gefordert, zu erlangen, sind jedoch keineswegs von rein theoretischem Interesse. Lyons und Beilock (2011) zeigten, dass die number-ordering ability mit der mental-arithmetischen Performance korreliert. Diese number-ordering ability stelle eine Verbindung zwischen dem in der Einleitung bereits erwähnten Approximate Number System (ANS) und mentaler Arithmetik und damit höheren mathematischen Fähigkeiten her. Ordinale Assoziationen zwischen symbolischen Zahlen seien daher ein wichtiger Wegbereiter für komplexere symbolische-symbolische Assoziationen, die mentaler Arithmetik zugrunde lägen. Wie ich eingangs bereits erwähnte, sind arithmetische Fähigkeiten eine wichtige Voraussetzung für die Teilnahme an schulischem, sozialem und Berufsleben.

### **6.5 Ausblick Schule**

Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, dass bereits in kurzer Zeit mit einem einfachen Übungsspiel für den Computer die Verarbeitung von und der Umgang mit Zahlen trainiert werden kann. Im Gespräch mit den Lehrern einiger unserer Probanden wurde deutlich, dass diejenigen Schüler, die als Probanden an der Studie teilgenommen haben, zum einen sehr viel Spaß dabei hatten, stolz waren, dass sie ihre anfänglichen Zweifel oder Ängste vor dem MRT-Scanner überwunden haben und nach Ende des Mathemonster-Trainings sichtbar motivierter und engagierter im Mathematikunterricht waren. Vor allem die in Mathematik eher schwächeren Schüler hätten unglaublich von der Studienteilnahme profitiert und offenbar einen neuen Zugang zur Mathematik gefunden. Somit hat sich auch die Organisation unserer Studie in Anlehnung an das SOL-Konzept bewährt. An einer Gesamtschule soll das Mathemonster-Training nun sogar fest in den Mathematikunterricht integriert werden.

### **6.6 Einschränkungen dieser Trainingsstudie**

Trotz wohlüberlegter Planung und Durchführung der Trainingsstudie gab es eine relativ große Spannbreite sowohl bei der Motivation als auch der Aufmerksamkeitsspanne der Probanden, was nicht zuletzt ihrem jungen Alter von im Mittel 11,5 Jahren geschuldet ist. Während es einigen sehr leicht fiel, konzentriert und ruhig alle Tests und die MRT-Messung zu absolvieren, mussten andere aufgrund von Bewegungsartefakten bei der MRT-Messung von der Studie ausgeschlossen werden. Ebenso unterliegen die Ergebnisse bei den Zahlen- und mentalen Rotationsaufgaben sowie bei den in Form von Fragebögen durchgeführten Tests dem Einfluss der Aufmerksamkeitsspanne und Konzentration des einzelnen Probanden.

Um die Geduld und Aufmerksamkeit der jungen Probanden nicht überzustrapazieren, verzichteten wir auf zusätzliche Tests wie z.B. einen Intelligenztest und begrenzten die Dauer derjenigen MRT-Sequenz, während derer die Aufgaben zu beantworten waren, auf 15 Minuten. Sicherlich wären weitere Parameter wie Intelligenz interessant für die Auswertung gewesen und hätte eine längere MRT-Sequenz unter Umständen einen stärkeren Trainingseffekt zeigen können. Doch sollte man beachten, dass es sich bei den Probanden um Kinder handelt, denen man zu viele verschiedene Aufgaben und eine zu lange Zeit, während

derer ihnen höchste Konzentration abverlangt wird, nicht zumuten kann. Aus demselben Grund vermieden wir es, einen umfangreichen Zeitplan für das Training mit dem Mathemonster vorzugeben. Die Kinder sollten aus eigener Motivation heraus und mit Spaß trainieren und nicht dazu verpflichtet sein.

Des Weiteren lässt sich keine Aussage darüber treffen, ob die gemessenen Trainingseffekte lediglich temporär oder von Dauer sind. Es wäre wünschenswert, allerdings organisatorisch nicht durchführbar, gewesen nach einer gewissen Zeitspanne Follow-Up-Messungen durchzuführen, wie dies zum Beispiel Kucian et al. (2011) getan haben.

### **6.7 Schlussfolgerungen**

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass der Umgang mit Zahlen und die Verarbeitung derselben mithilfe eines einfachen Computerspiels bereits nach 30 bis 60 Minuten Übungszeit effektiv verbessert werden können. Dieser Trainingseffekt ließ sich auf der Verhaltensebene anhand verringerter Fehlerraten in einer Zahlenvergleich-Aufgabe nachweisen. Funktionell-anatomisch waren Aktivitätsmodifizierungen in frontalen prämotorischen Arealen zu verzeichnen. Für das Ausmaß des Trainingseffektes waren die individuelle Ausgangsperformanz und motivationale Faktoren von erheblicher Bedeutung. Diese Erkenntnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen vorheriger Studien.

Auf dieser Studie aufbauend wäre es wünschenswert, wenn solche Trainingsspiele vermehrt Einzug in die schulische Ausbildung finden würden („educational gaming“). Sicherlich könnten neben mathematischen auch viele weitere Kompetenzen auf diese Weise gefördert und trainiert werden.

**Anmerkung:** Die Daten aus dieser Dissertation werden im Augenblick publiziert.

## 7 Literaturverzeichnis

- 1) Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K. & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *Neuroreport* 16:1769–1773
- 2) Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature reviews. Neuroscience* 9:278–291
- 3) Binkofski, F., Dohle, C., Posse, S., Stephan, K.M., Hefter, H., Seitz, R.J. et al. (1998). Human anterior intraparietal area subserves prehension: A combined lesion and functional MRI activation study. *Neurology* 50:1253–1259
- 4) Bremner, F., Schlack, a, Shah, N.J., Zafiris, O., Kubischik, M., Hoffmann, K. et al. (2001). Polymodal motion processing in posterior parietal and premotor cortex: a human fMRI study strongly implies equivalencies between humans and monkeys. *Neuron* 29:287–296.
- 5) Bugden, S., Price, G.R., McLean, D.A. & Ansari, D. (2012). The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children’s arithmetic competence. *Developmental cognitive neuroscience* 2:448–457
- 6) Deci, E.L. & Ryan, R.M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik* 39:223–239
- 7) Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition* 44:1–42
- 8) Dehaene, S., Bossini, S. & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General* 122:371–396.
- 9) Dehaene, S. (1999). Sources of Mathematical Thinking: Behavioral and Brain-Imaging Evidence. *Science* 284:970–974
- 10) Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P. & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive neuropsychology* 20:487–506
- 11) Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L. & Wilson, A.J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current opinion in neurobiology* 14:218–224
- 12) Delazer, M., Domahs, F., Bartha, L., Brenneis, C., Lochy, a, Trieb, T. et al. (2003). Learning complex arithmetic—an fMRI study. *Cognitive Brain Research* 18:76–88
- 13) Delazer, M., Ischebeck, a, Domahs, F., Zamarian, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C.M. et al. (2005). Learning by strategies and learning by drill—evidence from an fMRI study. *NeuroImage* 25:838–849
- 14) Duncan, E.M. & McFarland, C.E. (1980). Isolating the effects of symbolic distance and semantic congruity in comparative judgments: an additive-factors analysis. *Memory & cognition* 8:612–622
- 15) Ecker, C., Brammer, M.J., David, A.S. & Williams, S.C. (2006). Time-resolved fMRI of mental rotation revisited—dissociating visual perception from mental rotation in female subjects. *NeuroImage* 32:432–444

## Literaturverzeichnis

- 16) Eickhoff, S.B., Stephan, K.E., Mohlberg, H., Grefkes, C., Fink, G.R., Amunts, K. et al. (2005). A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage* 25:1325–1335
- 17) Eickhoff, S.B., Heim, S., Zilles, K. & Amunts, K. (2006). Testing anatomically specified hypotheses in functional imaging using cytoarchitectonic maps. *NeuroImage* 32:570–582
- 18) Eickhoff, S.B., Paus, T., Caspers, S., Grosbras, M.H., Evans, A.C., Zilles, K. et al. (2007). Assignment of functional activations to probabilistic cytoarchitectonic areas revisited. *NeuroImage* 36:511–521
- 19) Ganor-Stern, D., Pinhas, M. & Tzelgov, J. (2009). Comparing two-digit numbers: the importance of being presented together. *Quarterly journal of experimental psychology* (2006) 62:444–452
- 20) Grabner, R.H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F. & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage* 38:346–356
- 21) Grefkes, C., Weiss, P.H., Zilles, K. & Fink, G.R. (2002). Crossmodal processing of object features in human anterior intraparietal cortex: an fMRI study implies equivalencies between humans and monkeys. *Neuron* 35:173–184
- 22) Grefkes, C. & Fink, G.R. (2005). The functional organization of the intraparietal sulcus in humans and monkeys. *Journal of anatomy* 207:3–17
- 23) Groß, A. (2014). Die subjektive Wahrnehmung des Schul- und Klassenklimas im Verlauf der Adoleszenz , neurobiologische Korrelate und Maßnahmen im Rahmen eines SOL-Unterrichtskonzepts für ein verbessertes Schul- und Klassenklima, Bachelorarbeit, Fernuniversität Hagen
- 24) Gruber, O., Indefrey, P., Steinmetz, H. & Kleinschmidt, a. (2001). Dissociating neural correlates of cognitive components in mental calculation. *Cerebral cortex* 11:350–359
- 25) Hanakawa, T., Honda, M., Sawamoto, N., Okada, T., Yonekura, Y., Fukuyama, H. et al. (2002). The role of rostral Brodmann area 6 in mental-operation tasks: an integrative neuroimaging approach. *Cerebral cortex* 12:1157–1170
- 26) Heller, K.A. & Perleth, C. (2002). KFT 4-12 Kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen. Hogrefe-Verlag, Göttingen
- 27) Hellmich, F. & Hartmann, J. (2002). Aspekte einer Förderung räumlicher Kompetenzen im Geometrieunterricht. *ZDM* 34:56–61
- 28) Herold, C. & Herold, M. (2011). Selbstorganisiertes Lernen in Schule und Beruf. Gestaltung wirksamer und nachhaltiger Lernumgebungen. Beltz Verlag, Weinheim und Basel
- 29) Holloway, I.D. & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: the numerical distance effect and individual differences in children’s mathematics achievement. *Journal of experimental child psychology* 103:17–29
- 30) Houdé, O., Rossi, S., Lubin, A. & Joliot, M. (2010). Mapping numerical processing,

## Literaturverzeichnis

- reading, and executive functions in the developing brain: an fMRI meta-analysis of 52 studies including 842 children. *Developmental science* 13:876–885
- 31) Ischebeck, A., Zamarian, L., Siedentopf, C., Koppelstätter, F., Benke, T., Felber, S. et al. (2006). How specifically do we learn? Imaging the learning of multiplication and subtraction. *NeuroImage* 30:1365–1375
- 32) Ischebeck, A., Zamarian, L., Egger, K., Schocke, M. & Delazer, M. (2007). Imaging early practice effects in arithmetic. *NeuroImage* 36:993–1003
- 33) Jordan, K., Heinze, H.J., Lutz, K., Kanowski, M. & Jäncke, L. (2001). Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage* 13:143–152
- 34) Käser, T., Baschera, G.M., Kohn, J., Kucian, K., Richtmann, V., Grond, U. et al. (2013). Design and evaluation of the computer-based training program *Calcularis* for enhancing numerical cognition. *Frontiers in Psychology* 4: 1–13
- 35) Knops, A. & Willmes, K. (2014). Numerical ordering and symbolic arithmetic share frontal and parietal circuits in the right hemisphere. *NeuroImage* 84:786–795
- 36) Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F. et al. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57:782–795
- 37) Kreis, S. (2015). Räumliche Repräsentationen der Zahlenverarbeitung im Kindesalter. Dissertation, Universität des Saarlandes.
- 38) Kuhn, J.T. & Holling, H. (2014). Number sense or working memory? The effect of two computer-based trainings on mathematical skills in elementary school. *Advances in Cognitive Psychology* 10: 59–67
- 39) Lamm, C., Windischberger, C., Moser, E. & Bauer, H. (2007). The functional role of dorso-lateral premotor cortex during mental rotation: an event-related fMRI study separating cognitive processing steps using a novel task paradigm. *NeuroImage* 36:1374–1386
- 40) Liesefeld, H.R. (2011). The Mental Representation in Mental Rotation Its Content, Timing and Neuronal Source. Dissertation, Universität des Saarlandes.
- 41) Liu, X., Wang, H., Corbly, C.R., Zhang, J. & Joseph, J.E. (2006). The involvement of the inferior parietal cortex in the numerical Stroop effect and the distance effect in a two-digit number comparison task. *Journal of cognitive neuroscience* 18:1518–1530
- 42) Lyons, I.M. & Beilock, S.L. (2011). Numerical ordering ability mediates the relation between number-sense and arithmetic competence. *Cognition* 121:256–261
- 43) Macizo, P. & Herrera, A. (2011). Working memory and two-digit number processing. *Memory* (Hove, England) 19:941–955
- 44) Moeller, K., Fischer, M.H., Nuerk, H.-C. & Willmes, K. (2009). Sequential or parallel decomposed processing of two-digit numbers? Evidence from eye-tracking. *Quarterly journal of experimental psychology* (2006) 62:323–334
- 45) Moeller, K., Klein, E., Nuerk, H.-C. & Willmes, K. (2013). Magnitude representation in

## Literaturverzeichnis

- sequential comparison of two-digit numbers is not holistic either. *Cognitive processing* 14:51–62
- 46) Moyer, R. & Landauer, T. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature* 215:1519–1520
- 47) Mussolin, C., Noël, M.-P., Pesenti, M., Grandin, C. & De Volder, A.G. (2013). Neural correlates of the numerical distance effect in children. *Frontiers in psychology* 4:1-9
- 48) Nieder, A., Freedman, D.J. & Miller, E.K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science (New York, N.Y.)*, 297:1708–1711
- 49) Nuerk, H.C., Weger, U. & Willmes, K. (2001). Decade breaks in the mental number line? Putting the tens and units back in different bins. *Cognition* 82:25–33.
- 50) Nuerk, H.-C., Weger, U. & Willmes, K. (2005). Language effects in magnitude comparison: small, but not irrelevant. *Brain and language* 92:262–277
- 51) Pesenti, M., Thioux, M., Seron, X. & De Volder, a. (2000). Neuroanatomical substrates of arabic number processing, numerical comparison, and simple addition: a PET study. *Journal of cognitive neuroscience* 12:461–479
- 52) Petit, L., Courtney, S.M., Ungerleider, L.G. & Haxby, J. V. (1998). Sustained activity in the medial wall during working memory delays. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 18: 9429–9437
- 53) Piazza, M., Mechelli, A., Butterworth, B. & Price, C.J. (2002). Are subitizing and counting implemented as separate or functionally overlapping processes? *NeuroImage* 15:435–446
- 54) Picard, N. & Strick, P.L. (2001). Imaging the premotor areas. *Current opinion in neurobiology* 11:663–672
- 55) Pinel, P., Dehaene, S., Rivière, D. & LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage* 14:1013–1026
- 56) Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D. & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron* 41:983–993
- 57) Poltrock, S.E. & Schwartz, D.R. (1984). Comparative judgments of multidigit numbers. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 10:32-45
- 58) Rauer, W. & Schuck, K.D. (2003). FEES 3-4. Fragebogen zur Erfassung emotionaler und sozialer Schulerfahrungen von Grundschulkindern dritter und vierter Klassen. Hogrefe-Verlag, Göttingen
- 59) Rickard, T.C., Romero, S.G., Basso, G., Wharton, C., Flitman, S. & Grafman, J. (2000). The calculating brain: an fMRI study. *Neuropsychologia* 38:325–335
- 60) 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* 15:1779–1790
- 61) Rushworth, M.F., Paus, T. & Sipila, P.K. (2001). Attention systems and the organization

## Literaturverzeichnis

- of the human parietal cortex. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 21:5262–5271
- 62) Schneider, F. & Fink, G.R. (eds) (2013). *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*. Springer, Berlin Heidelberg
- 63) Shepard, R. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 171:701–703
- 64) Shikata, E., Hamzei, F., Glauche, V., Knab, R., Dettmers, C., Weiller, C. et al. (2001). Surface Orientation Discrimination Activates Caudal and Anterior Intraparietal Sulcus in Humans : An Event-Related fMRI Study Surface Orientation Discrimination Activates Caudal and Anterior Intraparietal Sulcus in Humans : An Event-Related fMRI Study. *Journal of neurophysiology* 85:1309–1314
- 65) Simon, O., Mangin, J.F., Cohen, L., Le Bihan, D. & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron* 33:475–487
- 66) Sohn, M.-H., Goode, A., Koedinger, K.R., Stenger, V.A., Fissell, K., Carter, C.S. et al. (2004). Behavioral equivalence, but not neural equivalence--neural evidence of alternative strategies in mathematical thinking. *Nature neuroscience* 7:1193–1194
- 67) Spinath, B., Pelster-Stiensmeier, J., Schöne, C. & Dickhäuser, O. (2002). *SELLMO. Skalen zur Erfassung der Lern- und Leistungsmotivation*. Hogrefe-Verlag, Göttingen
- 68) Thiel, C.M., Zilles, K. & Fink, G.R. (2004). Cerebral correlates of alerting, orienting and reorienting of visuospatial attention: an event-related fMRI study. *NeuroImage* 21:318–328
- 69) Tzuriel, D. & Egozi, G. (2010). Gender differences in spatial ability of young children: the effects of training and processing strategies. *Child development* 81:1417–1430
- 70) Verdine, B.N., Irwin, C.M., Golinkoff, R.M. & Hirsh-Pasek, K. (2014). Contributions of executive function and spatial skills to preschool mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology* 126:37–51
- 71) Vingerhoets, G., de Lange, F.P., Vandemaele, P., Deblaere, K. & Achten, E. (2002). Motor Imagery in Mental Rotation: An fMRI Study. *NeuroImage* 17:1623–1633
- 72) Walker, D., Bajic, D., Mickes, L., Kwak, J. & Rickard, T.C. (2014). Specificity of children's arithmetic learning. *Journal of Experimental Child Psychology* 122:64–74
- 73) Wexler, M., Kosslyn, S.M. & Berthoz, a. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition* 68:77–94
- 74) Windischberger, C., Lamm, C., Bauer, H. & Moser, E. (2003). Human motor cortex activity during mental rotation. *NeuroImage* 20:225–232
- 75) Wohlschläger, A. & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance* 24:397–412
- 76) Wood, G., Nuerk, H.-C. & Willmes, K. (2006). Neural representations of two-digit numbers: a parametric fMRI study. *NeuroImage* 29:358–367

## Literaturverzeichnis

- 77) Zacks, J.M. (2008). Neuroimaging studies of mental rotation: a meta-analysis and review. *Journal of cognitive neuroscience* 20:1–19
- 78) Zhou, X., Chen, C., Chen, L. & Dong, Q. (2008). Holistic or compositional representation of two-digit numbers? Evidence from the distance, magnitude, and SNARC effects in a number-matching task. *Cognition* 106:1525–1536

## 8 Anhang

### Analyse des Trainingseffektes (Tabellen 13 bis 16)

Tabelle 13: Lineare Regressionsanalyse Trainingseffekt; Modelle und eingeschlossene Variablen

Aufgenommene/Entfernte Variablen <sup>a</sup>			
Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit <sup>b</sup>		Einschluß
2	Geschlecht, Alter, Stufe <sup>b</sup>		Einschluß
3	ErrZahlen1, Zahnräder, Rechnen1, ErrPolyg1, NoteMathe, Zahlenstrahl <sup>b</sup>		Einschluß

a. Abhängige Variable: Trainingseffekt

b. Alle gewünschten Variablen wurden eingegeben.

Tabelle 14: Regressionsanalyse Trainingseffekt; Modellzusammenfassung

Modellzusammenfassung				
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,266 <sup>a</sup>	,071	-,017	7424,85992
2	,578 <sup>b</sup>	,334	,196	6604,23026
3	,788 <sup>c</sup>	,621	,424	5589,92885

a. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit

b. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit, Geschlecht, Alter, Stufe

c. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit, Geschlecht, Alter, Stufe, ErrZahlen1, Zahnräder, Rechnen1, ErrPolyg1, NoteMathe, Zahlenstrahl

Tabelle 15: ANOVA Trainingseffekt; Signifikanzen der Modelle

ANOVA <sup>a</sup>					
Modell	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1 Regression	134037746,212	3	44679248,737	,810	,497 <sup>b</sup>
Nicht standardisierte Residuen	1764113432,975	32	55128544,780		
Gesamt	1898151179,187	35			

## Anhang

2	Regression	633291318,468	6	105548553,078	2,420	,051 <sup>c</sup>
	Nicht standardisierte Residuen	1264859860,719	29	43615857,266		
	Gesamt	1898151179,187	35			
3	Regression	1179463175,141	12	98288597,928	3,146	,009 <sup>d</sup>
	Nicht standardisierte Residuen	718688004,046	23	31247304,524		
	Gesamt	1898151179,187	35			

a. Abhängige Variable: Trainingseffekt

b. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit

c. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit, Geschlecht, Alter, Stufe

d. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Übungen, Erreichter Level, Ü-Zeit, Geschlecht, Alter, Stufe, ErrZahlen1, Zahnräder, Rechnen1, ErrPolyg1, NoteMathe, Zahlenstrahl

Tabelle 16: ANOVA Trainingseffekt; Einflussgröße der Koeffizienten

<b>Koeffizienten<sup>a</sup></b>						
Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	
	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta			
1 (Konstante)	1869,565	3248,368		,576	,569	
	Ü-Zeit	18,019	82,402	,056	,219	,828
	Erreichter Level	242,914	301,134	,199	,807	,426
	Anzahl Übungen	-241,700	175,256	-,273	-1,379	,177
2 (Konstante)	-54293,360	21324,400		-2,546	,016	
	Ü-Zeit	64,023	84,250	,198	,760	,453
	Erreichter Level	247,577	269,375	,203	,919	,366
	Anzahl Übungen	-270,815	165,801	-,305	-1,633	,113
	Alter	5948,363	1913,562	,642	3,109	,004
	Geschlecht	-1710,404	1271,704	-,222	-1,345	,189
	Stufe	-2911,372	3495,846	-,185	-,833	,412
3 (Konstante)	-65517,528	21524,387		-3,044	,006	
	Ü-Zeit	51,316	90,539	,159	,567	,576
	Erreichter Level	355,222	284,603	,291	1,248	,225
	Anzahl Übungen	-354,106	158,456	-,399	-2,235	,035
	Alter	5455,357	1754,931	,588	3,109	,005
	Geschlecht	-1619,481	1129,547	-,210	-1,434	,165
	Stufe	-847,560	3107,334	-,054	-,273	,787
	NoteMathe	1007,149	1220,110	,144	,825	,418
	Zahnräder	128,416	309,206	,062	,415	,682
	Zahlenstrahl	-24,324	20,810	-,221	-1,169	,254

## Anhang

Rechnen1	65,458	148,648	,072	,440	,664
ErrZahlen1	537,345	144,122	,680	3,728	,001
ErrPolyg1	-128,442	112,130	-,192	-1,145	,264

a. Abhängige Variable: Trainingseffekt

### Analyse der Anzahl der Übungen mit dem Mathemonster (Tabellen 17 bis 21)

Tabelle 17: Univariate Varianzanalyse der Anzahl der Übungen mit dem Mathemonster; Test der Zwischensubjekteffekte; SELLMO\_LZ = SELLMO-Dimension *Orientierung an Lernzielen*, SELLMO\_AN = SELLMO-Dimension *Annäherungslernziele*, SELLMO\_VL = SELLMO-Dimension *Vermeidungslernziele*, SELLMO\_AV = SELLMO-Dimension *Arbeitsvermeidung*

#### Tests der Zwischensubjekteffekte

Abhängige Variable: Anzahl Übungen

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	437,442 <sup>a</sup>	5	87,488	2,616	,040
Konstanter Term	23,113	1	23,113	,691	,411
SELLMO_LZ	174,976	1	174,976	5,232	,028
SELLMO_AN	61,808	1	61,808	1,848	,182
SELLMO_VL	229,303	1	229,303	6,857	,013
SELLMO_AV	42,500	1	42,500	1,271	,267
NoteMathe	17,727	1	17,727	,530	,471
Schulart	0,000	0			
Fehler	1270,740	38	33,441		
Gesamt	3106,000	44			
Korrigierte Gesamtvariation	1708,182	43			

a. R-Quadrat = ,256 (korrigiertes R-Quadrat = ,158)

Tabelle 18: Lineare Regressionsanalyse Anzahl Übungen mit dem Mathemonster; Modelle und eingeschlossene Variablen

#### Aufgenommene/Entfernte Variablen<sup>a</sup>

Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	Arbeitsvermeidung, Orientierung an Lernzielen, Engagement, Fehlervermeidung <sup>b</sup>		Einschluß
2	NoteMathe <sup>b</sup>		Einschluß

a. Abhängige Variable: Anzahl Übungen

b. Alle gewünschten Variablen wurden eingegeben.

## Anhang

Tabelle 19: Lineare Regressionsanalyse Anzahl der Übungen mit dem Mathemonster; Modellzusammenfassung

<b>Modellzusammenfassung</b>				
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,496 <sup>a</sup>	,246	,168	5,74784
2	,506 <sup>b</sup>	,256	,158	5,78278

a. Einflußvariablen : (Konstante), Arbeitsvermeidung, Orientierung an Lernzielen, Engagement, Fehlervermeidung

b. Einflußvariablen : (Konstante), Arbeitsvermeidung, Orientierung an Lernzielen, Engagement, Fehlervermeidung, NoteMathe

Tabelle 20: ANOVA Anzahl Übungen; Signifikanzen der Modelle

<b>ANOVA<sup>a</sup></b>					
Modell	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1 Regression	419,715	4	104,929	3,176	,024 <sup>b</sup>
Nicht standardisierte Residuen	1288,467	39	33,038		
Gesamt	1708,182	43			
2 Regression	437,442	5	87,488	2,616	,040 <sup>c</sup>
Nicht standardisierte Residuen	1270,740	38	33,441		
Gesamt	1708,182	43			

a. Abhängige Variable: Anzahl Übungen

b. Einflußvariablen : (Konstante), Arbeitsvermeidung, Orientierung an Lernzielen, Engagement, Fehlervermeidung

c. Einflußvariablen : (Konstante), Arbeitsvermeidung, Orientierung an Lernzielen, Engagement, Fehlervermeidung, NoteMathe

Tabelle 21: ANOVA Anzahl Übungen mit dem Mathemonster; Einflussgröße der Koeffizienten

<b>Koeffizienten<sup>a</sup></b>					
Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.
	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
1 (Konstante)	-4,303	6,517		-,660	,513
Orientierung an Lernzielen	,206	,093	,347	2,219	,032
Engagement	,154	,112	,261	1,378	,176
Fehlervermeidung	-,317	,122	-,573	-2,592	,013
Arbeitsvermeidung	,164	,129	,283	1,277	,209

## Anhang

2 (Konstante)	-5,670	6,820		-,831	,411
Orientierung an Lernzielen	,216	,094	,364	2,287	,028
Engagement	,153	,112	,259	1,360	,182
Fehlervermeidung	-,323	,123	-,584	-2,619	,013
Arbeitsvermeidung	,148	,131	,255	1,127	,267
NoteMathe	,822	1,129	,111	,728	,471

a. Abhängige Variable: Anzahl Übungen

### Analyse des Zahlenstrahl-Tests

Tabelle 22: Univariate Varianzanalyse Zahlenstrahl-Test; Test der Zwischensubjekteffekte; Stufe = Jahrgangstufe, SELLMO\_LZ = SELLMO-Dimension *Orientierung an Lernzielen*, SELLMO\_AN = SELLMO-Dimension *Annäherungslernziele*, SELLMO\_VL = SELLMO-Dimension *Vermeidungslernziele*, SELLMO\_AV = SELLMO-Dimension *Arbeitsvermeidung*

#### Tests der Zwischensubjekteffekte

Abhängige Variable: Zahlenstrahl

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	72056,909 <sup>a</sup>	7	10293,844	4,079	,005
Konstanter Term	0,000	0			
Stufe	0,000	0			
SELLMO_LZ	200,430	1	200,430	,079	,781
SELLMO_AN	7829,691	1	7829,691	3,102	,091
SELLMO_VL	534,579	1	534,579	,212	,650
SELLMO_AV	7248,343	1	7248,343	2,872	,104
ErrZahlen1	38766,811	1	38766,811	15,360	,001
ErrPolyg1	143,584	1	143,584	,057	,814
Rechnen1	5822,083	1	5822,083	2,307	,142
Schulart	0,000	0			
Fehler	58048,768	23	2523,859		
Gesamt	515840,000	31			
Korrigierte Gesamtvariation	130105,677	30			

a. R-Quadrat = ,554 (korrigiertes R-Quadrat = ,418)

Danksagung

## 9 Danksagung

Mein besonderer Dank für seine Betreuung gilt Dr. rer. med. Christoph Krick.

Des Weiteren danke ich Axel Neuhaus und Tobias Woerner für ihre Hilfe bei den MRT-Messungen.