

**Räumliche Orientierung auf dem mentalen Zahlenstrahl:
Eine kombinierte Reaktionszeit- und fMRT-Studie**

Von der Medizinischen Fakultät der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Martin Moritz Mahr

aus Bergisch Gladbach

Berichter: Herr Universitätsprofessor
Dr. rer. nat. Klaus Willmes-von Hinckeldey

Herr Universitätsprofessor
Dr. phil. Dipl.-Psych. Siegfried Gauggel

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juni 2010

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Theoretische Grundlagen	8
2.1	Modelle der Zahlenverarbeitung	8
2.2	Numerische Effekte	11
2.2.1	Der Distanzeffekt	11
2.2.2	Der SNARC-Effekt	16
2.3	Reiz-Antwort-Kompatibilität	19
2.4	Die Interaktion von Zahlengröße und Räumlichkeit	22
3	Ziele und Hypothesen	25
3.1	Fragestellungen bezüglich der Reaktionszeitdaten	25
3.2	Fragestellungen bezüglich der funktionellen Bilddaten	26
4	Material und Methoden	27
4.1	Probanden	27
4.2	Aufgabe und Stimuli	28
4.3	Ablauf und Durchführung	29
4.4	Gewinnung der Bilddaten	30
4.5	Verarbeitung der Bilddaten	30
5	Ergebnisse	32
5.1	Ergebnisse der Analyse der Reaktionszeiten	32
5.1.1	Varianzanalyse der Reaktionszeiten des Reaktionszeitexperiments	32
5.1.2	Varianzanalyse der Reaktionszeiten des fMRT-Experiments	39

5.2	Ergebnisse fMRT	43
5.2.1	Hämodynamische Korrelate der Distanz vom Standard	46
5.2.2	Hämodynamische Korrelate der Zahlengröße	48
5.2.3	Hämodynamische Korrelate des SNARC-Effekts	50
5.2.4	Hämodynamische Korrelate des Simon-Effekts	54
6	Diskussion	57
6.1	Ergebnisse der Reaktionszeitanalyse	57
6.1.1	Der Distanzeffekt und räumliche Interaktionen	58
6.1.2	Der SNARC-Effekt	60
6.1.3	Interaktion Zahlenverarbeitung und Simon-Effekt	62
6.1.4	Interaktion von SNARC- und Simon-Effekt	63
6.2	Diskussion der fMRT-Daten	64
6.2.1	Korrelate der Zahlengrößenverarbeitung	64
6.2.2	Korrelate des SNARC-Effekts	66
6.2.3	Korrelate des Simon-Effekts	67
6.2.4	Parietale Korrelate von Arithmetik und räumlicher Verarbeitung	68
7	Zusammenfassung	71
8	Literaturverzeichnis	73
9	Danksagung	81
10	Erklärung zur Datenaufbewahrung	82

Abkürzungsverzeichnis

ACC	anterior cingulate cortex, anteriores Cingulum
AIP	anterior intraparietal/er area/Kortex
BA	Brodmann Area
BOLD-Effekt	blood oxygenation level dependent-Effekt
dACC	dorsaler Anteil des anterioren Cingulums
DLPFC	dorsolateral präfrontaler Kortex
EEG	Elektroenzephalographie
Exp.	Experiment
FEF	frontales Augenfeld
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
(h)IPS	(horizontales Segment des) intraparietaler Sulcus
LIP	lateral intraparietal/er area/Kortex
MZS	mentaler Zahlenstrahl
PSPL	posterior superior parietaler Kortex
RAK	Reiz-Antwort-Kompatibilität
ROI	Region of Interest
rTMS	repetitive transkranielle Magnetstimulation
(pre-) SMA	(prä-) supplementär motorisches Areal
SNARC	spatial numerical association of response codes
VIP	ventral intraparietal/er area/Kortex

1 Einleitung

Der Umgang mit Zahlen ist – ähnlich wie die Fähigkeit zu lesen, zu schreiben oder zu sprechen – ein ständiger Bestandteil unseres täglichen Lebens. Im Alltag gibt es unzählige Gelegenheiten, die ein Verständnis von Zahlengrößen und grundlegende Rechenoperationen voraussetzen, angefangen vom Einkaufen über das Benutzen eines Telefons bis hin zum Lesen der Uhr.

Viele Patienten leiden infolge von zerebro-vaskulären Ereignissen oder Tumoren an Einschränkungen bis hin zum Verlust ihrer Fähigkeit im Umgang mit Zahlen. Auch bei neurodegenerativen Erkrankungen wie Morbus Alzheimer ist die Rechenfähigkeit der Patienten schon relativ früh im Krankheitsverlauf betroffen (Carlomagno, Iavarone, Nolfi, Bourene, Martin & Deloche, 1999; Martin, Annis, Darling, Wadley, Harrell & Marson, 2003).

Die Fähigkeit des menschlichen Gehirns, Zahlen zu verarbeiten, ist eine herausragende und äußerst interessante Eigenschaft für die funktionelle neurologische und neuropsychologische Forschung. Die Erforschung dieser Fähigkeit hilft auch, Fragen bezüglich der grundlegenden Funktionsweise des Gehirns besser zu verstehen; sie ist Teil der Anstrengung, Aufbau und Funktion des menschlichen Gehirns zu begreifen.

In dieser Arbeit sollen vor allem die räumlichen Aspekte und deren Einflüsse auf die Verarbeitung von Zahlen untersucht werden, auch mit Hilfe der bildgebenden funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT). Um diese Fragestellung zu erläutern, werden zunächst die wichtigsten theoretischen Grundlagen vorgestellt. Dazu gehören das Triple-Code-Modell der Zahlenverarbeitung nach Dehaene (1992), neuropsychologische Effekte der Zahlenverarbeitung und auch die Vorstellung der bisherigen Ergebnisse bildgebender Studien zu diesem Thema.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Modelle zur Zahlenverarbeitung

Es gibt eine Reihe verschiedener Modelle, die kognitive Zahlenverarbeitung und mentale Arithmetik zu erklären versuchen. Als bekanntestes gilt das Triple-Code-Modell von Dehaene (1992), das die meisten Aspekte und Effekte der Zahlenverarbeitung erklären kann und auch durch funktionelle Bildgebung (Dehaene, Piazza, Pinel & Cohen, 2003; Schmithorst & Brown, 2004) und klinische Läsions- und Fallberichte (z.B. Dehaene & Cohen, 1997; Cohen & Dehaene, 1994, 2000) untermauert wird.

2.1.1 Das Triple-Code-Modell von Dehaene (1992)

Das Triple-Code-Modell geht von drei verschiedenen Zahlenrepräsentationen im Gehirn aus, die jeweils ineinander überführbar sind. Erstens ein auditiv-verbaler Code („verbal number form“), von dem aus Zahlwörter gesprochen werden und in den gelesene oder gehörte Zahlwörter transformiert werden. Dieser Code ist von zentraler Bedeutung für das arithmetische Faktenwissen (zum Beispiel das Ein-mal-eins) und für das fortlaufende Zählen. Zweitens ein visuell-arabischer Code („visual number form“), der für das Lesen und Schreiben arabischer Zahlen verantwortlich ist und beim Umgang mit mehrstelligen Zahlen aktiv ist. Auch auf Eigenschaften wie die Parität einer Zahl (gerade oder ungerade) wird von diesem Code aus zugegriffen. Eine Gemeinsamkeit dieser ersten beiden Repräsentationen ist, dass sie keine numerische Bedeutung, also keine Information über die Zahlengröße, enthalten. Diese semantische Funktion nimmt als dritte mentale Repräsentation der analoge Größencode („magnitude representation“) wahr. In diesem Format wird für jede numerische Größe ein Abschnitt auf einem mentalen Zahlenstrahl repräsentiert, welcher von links nach rechts orientiert und logarithmisch skaliert ist (Dehaene, Bossini & Giraux, 1993). Alle Vorgänge, die ein Erfassen, Vergleichen oder Abschätzen von numerischen Größen erfordern, aktivieren diesen Größencode, der deshalb auch eine zentrale Rolle in der Erforschung der Zahlenverarbeitung spielt.

Die drei Repräsentationsformate sind funktionell verbunden und können je nach Aufgabe oder Rechenoperation ineinander umgewandelt werden, also z.B. beim Lesen vom visuellen arabischen Format in die semantische Zahlengrößenrepräsentation oder von dort aus in ein

gesprochenes Zahlwort. Die Größenrepräsentation ist unabhängig von der Notation (z.B. als arabische Zahl, geschriebenes Zahlwort oder Punktmenge) und beinhaltet als einzige der drei Repräsentationen die semantische Information. Dabei scheint die semantische Größenrepräsentation zumindest beim Umgang mit arabischen Zahlen weitgehend automatisch aktiviert zu werden. Darauf weisen Studien hin, in denen die Zahlengröße arabischer Zahlen eine völlig irrelevante Stimuluseigenschaft war und doch Einfluss auf die Reaktionszeiten der Probanden hatte (z.B. Dehaene & Akhavein, 1995; Fias, Brysbaert, Geypens & d'Ydewalle, 1996). So mussten die Probanden zwei numerische Stimuli hinsichtlich physischer Eigenschaften (Darstellung als arabische Zahl oder Zahlwort) als gleich oder verschieden beurteilen. Dabei zeigte sich trotz irrelevanter Größeneigenschaft ein Distanzeffekt (Dehaene & Akhavein, 1995). Im Falle von Fias und Mitarbeitern (1996) zeigte sich bei der Entscheidung, ob im Namen einer arabischen Zahl der Buchstabe „e“ vorkommt, ein SNARC-Effekt als Zeichen der Aktivierung der Größenrepräsentation.

Das rein funktionale Modell erweiterten Dehaene und Cohen (1995, 1997) um die neuroanatomische Einbettung. Besonders hilfreich sind dabei neben der funktionellen Bildgebung auch Studien, die Patienten mit umschriebenen Läsionen z.B. nach zerebralen Insulten untersuchen.

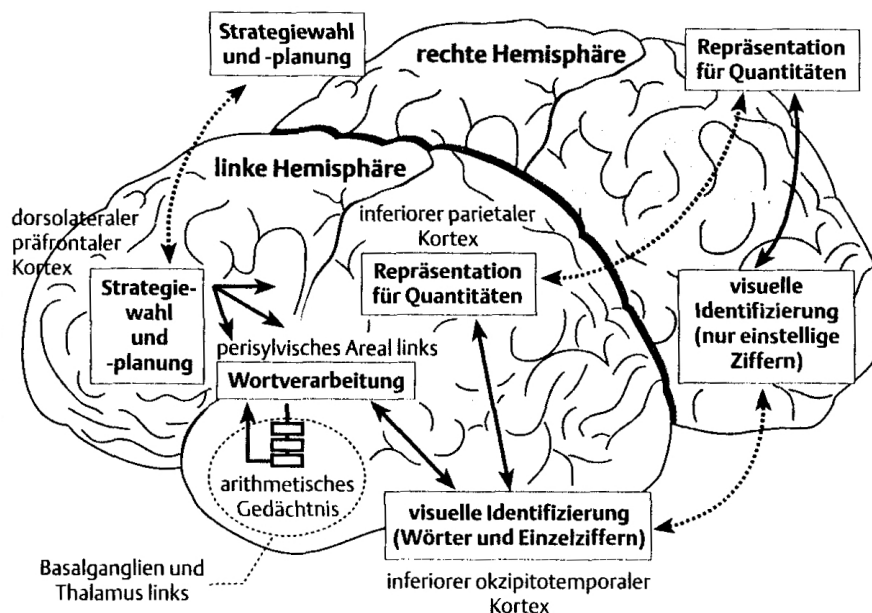


Abb. 1: Das anatomisch-funktionale Triple-Code-Modell der Zahlenverarbeitung von Dehaene (1992) und Dehaene und Cohen (1995, 1997) mit Beschriftung in Deutsch.

Nach diesem funktionalen Modell ist die neuronale Verarbeitung visueller arabischer Zahlen (visual number form) bihemisphärisch im occipito-temporalen Übergang (BA 19/37) lokalisiert. Dabei hat diese Region nur in der linken Hemisphäre direkten Kontakt zur verbalen Zahlenrepräsentation (Cohen & Dehaene, 1996). Bei Patienten mit Balkenläsionen kommt es so für Zahlen, die ausschließlich der rechten Hemisphäre präsentiert werden, zum Verlust der Fähigkeit des Benennens und der Durchführung exakter arithmetischer Operationen, während das Einschätzen und Vergleichen der Zahlengröße weiterhin möglich ist. Bei linkshemisphärischer Präsentation ergeben sich keine Einschränkungen.

Die verbale Zahlenrepräsentation aktiviert ein komplexes Netz von kortikalen Regionen in der normalerweise sprachdominanten linken Hemisphäre, vor allem im Temporallappen und in subkortikalen Regionen wie den Basalganglien und Thalamuskernen. Die Aktivierung der verbalen Zahlenrepräsentation scheint aber nicht automatisch eine Aktivierung der Größenrepräsentation nach sich zu ziehen, wie es bei der visuell-arabischen Repräsentation der Fall ist. Ob es zu einer solchen automatischen Mitaktivierung kommt, scheint davon abzuhängen, in wieweit die semantische Information für die Lösung der Aufgabe relevant ist. Beim reinen Lesen von Zahlwörtern zum Beispiel stellten Fias, Reynvoet und Brysbaert (2001) keinen Einfluss der Zahlengrößenverarbeitung fest.

Die analoge, amodale Zahlengrößenrepräsentation schließlich scheint bihemisphärisch im inferioren parietalen Kortex und zwar um den intraparietalen Sulcus (IPS) angesiedelt zu sein. So fanden Eger, Sterzer, Russ, Gira und Kleis (2003) im fMRT Aktivierungen im Bereich des horizontalen intraparietalen Sulcus (hIPS) bei Präsentation von Zahlen im Gegensatz zu Buchstaben oder Farben. Die Aufgabe verlangte dabei keinen Größenvergleich, was die automatische Aktivierung der semantischen Zahlengrößenverarbeitung beim Umgang mit arabischen Zahlen unterstreicht. Als Ausdruck der räumlichen Aspekte der Größenrepräsentation gehen Dehaene, Piazza, Pinel und Cohen (2003) zusätzlich von einer engen funktionellen Assoziation zu Regionen im posterioren superior parietalen Kortex aus, die üblicherweise mit Räumlichkeits- und Aufmerksamkeitsprozessen in Verbindung gebracht werden. Diese sind laut Dehaene und Kollegen für die Größenrepräsentation und Orientierung auf dem räumlich orientierten mentalen Zahlenstrahl wichtig.

Um dieses Modell anschaulicher zu machen, kann man sich verschiedene Rechenoperationen vor Augen führen, die unterschiedliche Repräsentationen aus dem Triple-Code-Modell einbeziehen. Bei einer Größenvergleichsaufgabe wäre, nachdem die Zahlen erkannt sind, die biparietale Größenrepräsentation erforderlich. Die zu vergleichenden Zahlen würden erst in

unterschiedliche Regionen auf dem mentalen Zahlenstrahl übersetzt und dann nach ihrer Größe verglichen. Bei der Paritätsentscheidung sind die Prozesse weniger klar, für arabische Zahlen aber scheint diese Operation von der visual number form verarbeitet zu werden. Verbale Aufgaben wie das Zahlenbenennen stehen in Zusammenhang mit der verbalen Repräsentation, die auch für das Speichern arithmetischer Fakten wie dem kleinen Ein-mal-eins wichtig ist.

In dieser Arbeit wird vor allem die Zahlengrößenrepräsentation von Interesse sein.

2.2 Numerische Effekte

Für die Existenz einer solchen semantischen Zahlengrößenrepräsentation sprechen verschiedene Effekte, die in einer Vielzahl von Studien beschrieben wurden (z.B. Moyer und Landauer, 1967; Dehaene, Bossini & Giraux, 1993). Die beiden wichtigsten sind der Distanzeffekt und der SNARC-Effekt, die im Folgenden erläutert werden.

2.2.1 Der Distanzeffekt

Der Distanzeffekt wurde von Moyer und Landauer (1967) erstmals beschrieben und besagt, dass beim numerischen Größenvergleich zweier Zahlen die Antwortzeiten mit steigendem Abstand der beiden Zahlen kürzer werden. Zu entscheiden, ob 6 größer als 5 ist, dauert also länger als die Entscheidung 9 größer 5. Als Erklärung wird angegeben, dass Zahlen wie physikalische Größen auf ein kontinuierliches quantitatives Repräsentationsmedium (den sog. mentalen Zahlenstrahl) übertragen werden, wo nah beieinander liegende Größen schwieriger zu diskriminieren sind, so dass eine aufwendigere kognitive Leistung erbracht werden muss, die mehr Zeit in Anspruch nimmt.

Dieser Effekt tritt sehr zuverlässig auf und ist inzwischen in einer Vielzahl von Experimenten nachgewiesen worden. Er zeigt sich unter anderem bei zweistelligen Zahlen (Dehaene, Dupoux & Mehler, 1990; Nuerk, Weger & Willmes, 2001), wobei sowohl die Repräsentation der Gesamtgröße der zweistelligen Zahl als auch die Repräsentationen der Größen von Einer- und Zehnerstelle Einfluss auf die Entstehung des Distanzeffekts haben. Beleg für letzteren Einfluss ist der von Nuerk und Mitarbeitern (2001) beschriebene Kompatibilitätseffekt. Es zeigten sich beim Größenvergleich zweier zweistelliger Zahlen langsamere Reaktionszeiten,

wenn die kleinere zweistellige Zahl die größere Einerstelle enthielt. Dies lässt sich mit einer reinen Repräsentation der Gesamtgröße mehrstelliger Zahlen nicht vereinbaren.

Außerdem zeigte sich ein Distanzeffekt auch schon bei 6-jährigen Kindern (Dehaene, 1992), in Tierversuchen bei Primaten (z.B. Nieder, Freedman & Miller, 2002; Nieder & Miller 2003) und in Priming-Untersuchungen (z.B. Naccache & Dehaene, 2001; Koechlin, Naccache, Block & Dehaene, 1999). Als Priming bezeichnet man eine neuropsychologische Methode, bei der kurz vor dem eigentlichen Zielstimulus ein sog. Prime-Stimulus präsentiert wird, der bestimmte Eigenschaften des Zielstimulus teilt und je nach Übereinstimmung seiner Attribute mit dem Zielstimulus Geschwindigkeit und Genauigkeit behavioraler Antworten verbessern oder verschlechtern kann. Beim unbewussten Priming wird der Prime-Stimulus nicht bewusst wahrgenommen, da er nur sehr kurz präsentiert wird und zusätzlich maskiert ist, also zum Beispiel auf einem Bildschirm von bedeutungslosen Reizen umgeben ist. Koechlin und Kollegen (1999) konnten sowohl bei bewusstem als auch bei unbewusstem Priming in einer Größenvergleichsaufgabe einstelliger Zahlen mit dem Standard 5 zwei Arten von Priming zeigen. Es kam zu schnelleren Antworten, wenn Ziel- und Primestimulus beide übereinstimmend entweder größer oder kleiner als 5 waren, und die Reaktionszeiten nahmen mit geringerer Distanz von Ziel- und Primestimulus ab. Der Distanzeffekt lässt sich also auch auf der unbewussten Ebene des Primings zeigen, er scheint also automatisiert aufzutreten. Auch Naccache und Dehaene (2001a) konnten bei einem Zahlengrößenvergleich unbewusstes semantisches Priming nachweisen. Das heißt, dass die Probanden bei kongruenten Trials (Stimulus und Prime sind beide größer oder beide kleiner als der Standard) schneller reagierten als bei inkongruenten. Da als Primes nur Zahlen verwendet wurden, die nicht als Zielstimulus präsentiert wurden, kann man von einer semantischen Ebene des Priming-Effekts ausgehen und ausschließen, dass es sich um gelernte Stimulus-Antwort-Ketten handelt. Auch letztere Autoren stellten fest, dass die Antworten schneller erfolgten, wenn Prime und Zielstimulus numerisch nah beieinander lagen.

2.2.1.1 Neuronale Korrelate des Distanzeffekts

Die funktionellen, neuroanatomischen Untersuchungen zum Distanzeffekt stützen sich vor allem auf die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) und auf EEG-Experimente.

Als Korrelat des Distanzeffekts fand Dehaene (1996) in einem EEG-Experiment mit der Aufgabe „Größenvergleich einstelliger Zahlen“ rechts-lateralisiert parieto-occipito-temporal stärkere Aktivität für Zahlen, die nah am Standard lagen, im Vergleich zu Zahlen mit

größerem semantischen Abstand. Dies war bei arabischer und verbaler Notation der Stimuli gleichmäßig ausgeprägt. Nach Dehaenes Triple-Code-Modell (1992) würde man vom neuronalen Substrat der amodalen Zahlengrößenrepräsentation eine solche notationsunabhängige Aktivierung auch erwarten.

Pinel, Le Clec'H, van de Moortele, Naccache, Bihan und Dehaene (1999) ließen Probanden im fMRT einstellige Zahlen in arabischer und in verbaler Form mit dem Standard 5 vergleichen. Dabei fanden sie für den Distanzeffekt (also für Zahlen nah am Standard stärker als für Zahlen weit davon) Aktivierung im inferioren Parietallappen beiderseits, links stärker als rechts. In diesen beiden Regionen machte die Notation der Stimuli keinen signifikanten Unterschied in der Aktivierung aus, was im Einklang mit einer zentralen, abstrakten semantischen Zahlengrößenrepräsentation steht.

In einer späteren Studie (Pinel, Dehaene, Rivière & LeBihan, 2001), in der zweistellige Zahlen verglichen werden sollten, wurden zusätzlich zur Aufzeichnung von fMRT-Daten auch EEG-Messungen gemacht. Auch hier zeigte sich als Korrelat der Distanz bihemisphärische Aktivierung im Parietallappen, genauer im Kortex um den intraparietalen Sulcus (IPS), zusätzlich noch im Precuneus. Auch diese Aktivierung war notationsunabhängig. Die Input-Notation hatte nur einen Effekt auf andere Regionen. Für die arabische Notation fanden sich stärkere Aktivierungen inferior parietaler und frontaler Gebiete beiderseits sowie des Gyrus fusiformis rechts, während sich für verbale Stimuli eine stärkere Aktivierung in präzentralen Regionen links zeigte. Zahlen scheinen also unabhängig von ihrer Notation ein spezifisches Gebiet um den IPS zu aktivieren, das in Zusammenhang mit der abstrakten Größenrepräsentation steht.

Aktivierung des rechten IPS wurde außerdem von Le Clec'H und Kollegen (2000) im Kontrast einer Größenvergleichsaufgabe von Zahlen gegen Körperteile gefunden. Darüber hinaus wurden auch inferior parietale Regionen rechts, der rechte und linke Gyrus supramarginalis, der rechte Precuneus und die linke Insula aktiviert.

Weitere rechtsseitige IPS-Aktivierung wurden von Cochon, Cohen, van der Moortele und Dehaene (1999) berichtet, und zwar bei einem Zahlengrößenvergleich kontrastiert mit dem reinen Benennen von Zahlen. Auch dies ist ein Hinweis, der für eine Region der Größenrepräsentation spricht.

Für Aktivierungen in der Umgebung des IPS bei Aufgaben mit Zahlengrößenrepräsentation gibt es weitere Beispiele: Piazza, Mechelli, Butterworth und Price (2002) fanden eine Aktivierung des rechten IPS bei einer Aufgabe, die eine Abschätzung der Anzahl von Punkten

verlangte; Lee (2000) fand beidseitige IPS-Aktivierung bei einer Subtraktionsaufgabe einstelliger Zahlen; Simon, Mangin, Cohen, LeBihan und Dehaene (2002) fanden Aktivierung des IPS bihemisphärisch bei einer Subtraktionsaufgabe, auch der Precuneus und superior parietale Areale wurden aktiviert. Auch in einem Priming-Experiment, in dem auch fMRT- und EEG-Daten erhoben wurden, fanden Naccache und Dehaene (2001b) weitere funktionell-anatomische Anhaltspunkte für parietale Aktivierung. Wie nach dem neurophysiologischen Phänomen der repetition suppression erwartet, war in Trials, in denen Prime und Zielstimulus denselben numerischen Wert hatten, die Aktivierung im Parietallappen geringer. Repetition suppression beschreibt die Eigenschaft, dass bei erneuter Präsentation eines in gewissen Eigenschaften identischen Stimulus die Aktivierung des entsprechenden kortikalen Areals supprimiert wird.

Allerdings scheinen diese Regionen nicht ausschließlich die Zahlengröße zu repräsentieren. Fias, Lamertyn, Reynvoet, Dupont und Orban (2003) fanden, dass auch der Vergleich von Linienlängen und geometrischen Winkeln ganz ähnliche parietale Netzwerke aktiviert. Im Bereich des linken IPS fanden Simon und Mitarbeiter (2002) zum Beispiel auch Überschneidungen von Zahlenverarbeitung und Phonem-Erkennung.

Auch mit Hilfe von Einzelzellaufzeichnungen lassen sich in Tierversuchen die neuronalen Korrelate der Zahlenverarbeitung untersuchen. Bei dieser Methode werden elektrische Potentialschwankungen einzelner Nervenzellen aufgezeichnet, was direkt auf die Aktivität des betreffenden Neurons schließen lässt. Dies geschieht mit sehr feinen Elektroden, die in den zu untersuchenden Bereich des Kortex vorgeschoben werden, wo sie entweder am äußeren Rand der Zellmembran oder innerhalb einer Nervenzelle zu liegen kommen.

Nieder, Freedman und Miller (2002) untersuchten mit dieser Methode Primaten, denen sie beibrachten zu entscheiden, ob die Anzahl von Punkten in zwei nacheinander präsentierten Mustern gleich oder ungleich war. Durch Aufzeichnung von Einzelzellaufzeichnungen des Affengehirns fanden sie im lateralen präfrontalen Kortex ein Gebiet, dessen Neurone auf die gleiche numerische Größe immer ähnlich reagierte und keine Veränderung auch bei starker Variation des Aussehens der präsentierten Punktbilder zeigte. Außerdem nahm die Aktivität in diesem Gebiet mit zunehmender Distanz der zu vergleichenden Größen kontinuierlich ab. In einem weiteren Experiment (Nieder & Miller, 2003) mit ähnlicher Aufgabe wurden zusätzlich die Verhaltensdaten der Rhesus-Affen ausgewertet, die einen numerischen Distanzeffekt aufwiesen. Die neurophysiologischen Daten ergaben auch hier präfrontale Aktivität, die mit der numerischen Größe und dem Distanzeffekt auftrat. Hierbei ließen sich die Daten am

besten durch eine nichtlineare, logarithmische Skalierung beschreiben, so dass Nieder und Miller von einer logarithmisch komprimierten Repräsentation visueller, numerischer Größeninformation ausgehen.

Nieder und Miller (2004) beschrieben neben einer präfrontalen Aktivierung wie in den vorigen Versuchen auch eine Aktivierung im intraparietalen Sulcus von Rhesusaffen. Dabei fanden Sie, dass die Neurone des intraparietalen Sulcus genauso spezifisch und sogar noch früher auf Zahlengrößen reagierten. Sie vermuteten daher einen numerischen Informationsfluss vom IPS zum lateralen präfrontalen Kortex.

Diese Experimente lassen darauf schließen, dass Aspekte der Repräsentation von Zahlengrößen in ähnlicher Form auch bei Primaten bestehen, mit Aktivierung ähnlicher kortikaler Areale, dem Auftreten numerischer Effekte und eventuell einer logarithmisch komprimierten Repräsentation von Zahlengrößen. In jedem Falle handelt es sich um entwicklungsgeschichtlich alte und vermutlich sehr automatisiert ablaufende Vorgänge.

In einem Überblicksaufsatz fasste Dehaene (2003) die neuronalen Grundlagen der Zahlenverarbeitung zusammen, wobei er vor allem die parietalen Funktionen differenzierte und drei parietale Netze der Zahlenverarbeitung beschrieb: Den horizontalen Teil des IPS (hIPS) als wichtigstes und zahlenspezifisches Areal der Größenrepräsentation, daneben ein System der Zahlenmanipulation in verbaler Form im linken Gyrus angularis sowie posterior superior parietale Areale der Aufmerksamkeit, die die Orientierung auf dem mentalen Zahlenstrahl steuern.

Eine umfassende Darstellung von Zahlenverarbeitung und Räumlichkeit geben auch Hubbard, Piazza, Pinel und Dehaene (2005). Besonders wird das komplexe Zusammenspiel der parietalen Areale beschrieben, die am Affengehirn anhand von Einzelzellaufzeichnungen bereits ausführlicher untersucht sind. Wie bereits beschrieben konnte sowohl beim Affen als auch beim Menschen vielfach gezeigt werden, dass Zahlengröße ein Gebiet im horizontalen Anteil des intraparietalen Sulcus (hIPS) aktiviert. Daran nach anterior angrenzend liegt das beim Affen als VIP (ventraler intraparietaler Kortex) bezeichnete Areal, das für multimodale räumliche Bewegungen zuständig ist. Dieses ist funktionell eng mit dem posterior des hIPS gelegenen Areal LIP (lateralen intraparietalen Kortex) verbunden, das eine Rolle bei Augenbewegungen und der Aufmerksamkeitskontrolle spielt. Anterior des hIPS liegt schließlich das dem AIP (anterior intraparietalen Kortex) des Affen entsprechende Areal, das bei Greifbewegungen aktiv ist (Hubbard et al., 2005). Aktuelle bildgebende Studien haben

inzwischen versucht, die entsprechenden Areale des menschlichen Gehirns zu identifizieren. Dabei ist eine genaue Übertragung aufgrund der deutlich unterschiedlichen Anatomie bisher nur eingeschränkt möglich.

2.2.2 Der SNARC-Effekt

Ein weiterer Effekt der semantischen Zahlenverarbeitung, der ihre räumlichen Bezüge in den Mittelpunkt stellt, ist der SNARC-Effekt. Die Abkürzung SNARC steht für „Spatial Numerical Association of Response Codes“ und beschreibt einen Zusammenhang zwischen Zahlengröße und der Räumlichkeit der Antwort im extrakorporalen Raum. Dieser Effekt wurde erstmals von Dehaene, Bossini und Giraux (1993) beschrieben, deren Probanden über die Parität (gerade oder ungerade) der Zahlen 0 – 9 entscheiden sollten. Dabei stellte sich heraus, dass auf kleinere Zahlen schneller mit der linken Hand und auf größere schneller mit der rechten reagiert wurde, und das, obwohl die Zahlengröße für eine Paritätsentscheidung eigentlich irrelevant ist. Da sie aber trotzdem Einfluss hat, scheint die numerische Größenrepräsentation automatisiert aktiviert zu werden.

Diese räumliche Repräsentation im Gehirn wurde als Hinweis für die Existenz eines mentalen Zahlenstrahls und zwar mit Orientierung von links nach rechts gesehen. Die unterschiedlichen Reaktionszeiten ergaben sich also je nach räumlicher (In)Kongruenz von Antwort und Position auf dem mentalen Zahlenstrahl.

In einem folgenden Experiment fanden Dehaene und Mitarbeiter (1993, Exp.3), dass dabei die relative Zahlengröße ausschlaggebend ist. Wurden nämlich die Intervalle 0-5 und 4-9 einzeln getestet ergaben die Stimuli 4 und 5 im ersten Fall schnellere Antworten der rechten Hand, im zweiten Fall schnellere Antworten der linken Hand. Nachfolgend nahmen sie an, dass nicht die antwortende Hand sondern der extrakorporale Raum entscheidend ist, da der SNARC-Effekt bei gekreuzten Händen der Position der Antworttaste folgte und nicht mit rechter oder linker Hand konstant blieb (Exp. 6). Für nicht-numerische Stimuli (als „ungerade“ Stimuli die Buchstaben A, C, E und als „gerade“ B, D, F) fanden Dehaene und Mitarbeiter (1993, Exp. 5) keinen SNARC-Effekt, was für einen rein numerischen Ursprung des Effekts spricht.

Gevers, Reynvoet und Fias (2003, 2004) beschreiben allerdings, dass auch bei nicht-numerischen Stimuli (Buchstaben, Monate, Wochentage) durchaus ein SNARC-Effekt zu finden sein kann. Dies allerdings nur in einer expliziten Vergleichsaufgabe von Positionen mit einem Standard, also zum Beispiel beim zeitlichen Vergleich zweier Wochentage.

Fischer (2001) stellte mit Hilfe einer Linienhalbierungsaufgabe den Einfluss von Zahlenverarbeitung auf andere räumliche Leistungen dar und unterstützte damit die automatische Assoziation von Zahlengröße und räumlichen Antwortcodes im Sinne des SNARC-Effekts. Er ließ seine Probanden aus einstelligen Zahlen bestehende Linien (Exp. 1) bzw. Linien, die durch Zahlen flankiert wurden (Exp. 2) mit einem Stift halbieren. Dabei stellte er fest, dass die Mitte beim Vorkommen relativ kleiner Zahlen systematisch zu weit links angesiedelt wurde und bei größeren Zahlen zu weit rechts.

Eine interessante Entdeckung zum SNARC-Effekt machten Bächtold, Baumüller und Brugger (1998), mit der sie die Relevanz unterschiedlicher mentaler Modelle für die Größenverarbeitung belegten. Sie ließen Probanden einen Größenvergleich der Zahlen 1-11 mit dem Standard 6 durchführen, wobei die Stimuli im zentralen Gesichtsfeld präsentiert wurden. In einem vorgeschalteten Übungsdurchgang wurde zusätzlich ein schematisches Lineal (im Falle der ersten Gruppe von Probanden) oder ein Ziffernblatt (Gruppe zwei) präsentiert. In der ersten Gruppe zeigte sich ein normaler, in der „Uhr“-Gruppe jedoch ein umgekehrter SNARC-Effekt. Die Probanden der zweiten Gruppe assoziierten also anscheinend größere Zahlen mit der linken Seite und kleinere mit der rechten. Damit zeigten Bächtold und Mitarbeiter, dass der SNARC-Effekt durch die Aktivierung eines mentalen Schemas zustande kommt, das die Assoziation von Zahlengröße und der rechts-links Dimension bestimmt. So könnte der SNARC-Effekt also auch leicht durch verschiedene dieser Schemata verändert werden.

Allerdings beschränkt sich der SNARC-Effekt nicht nur auf die Dimension links-rechts. Schwarz und Keus (2004) untersuchten den SNARC-Effekt, wobei sie als Antwortmodus/organ Augenbewegungen auf verschiedene Positionen im Raum registrierten, anstatt z.B. Antworttasten zu benutzen. Dabei zeigte sich, dass neben dem bekannten horizontalen SNARC-Effekt auf größere Zahlen mit der oberen Antwort (also einer Augenbewegung nach oben) schneller reagiert wurde und auf kleinere schneller mit einer Augenbewegung nach unten. Sie schlossen daraus, dass es sich bei der Zahlengrößenrepräsentation eher um eine mehrdimensionale „Zahlen-Karte“ als um einen Zahlenstrahl handelt.

Auch Ito und Hatta (2004) fanden einen solchen vertikalen SNARC-Effekt und zwar bei Verwendung von Antworttasten und nicht von Augenbewegungen als Antwortmodus. Dabei installierten sie die beiden Antworttasten voreinander in der Körpermittellinie und ließen so mit einer oberen und einer unteren Taste eine Paritätsaufgabe durchführen. Sie fanden für

beide möglichen Handpositionen (also rechte Hand obere Taste/linke Hand untere Taste und die umgekehrte Anordnung) eine vertikale Assoziation von größeren Zahlen/obere Position und kleineren Zahlen/untere Position. In einer Größenvergleichsaufgabe stellten sie allerdings gar keinen SNARC-Effekt fest, was in einer auf Zahlengrößen basierenden Aufgabe erstaunlich ist.

2.2.2.1 Das dual-route-Modell des SNARC-Effekts

Einen neueren Ansatz, den SNARC-Effekt anhand eines mathematischen Modells zu beschreiben, machen Gevers, Verguts, Reynvoet, Caessens und Fias (2006) mit ihrem dual-route-Modell. Dabei gehen sie davon aus, dass der SNARC-Effekt auf eine zwei-Routen-Architektur zurückzuführen ist.

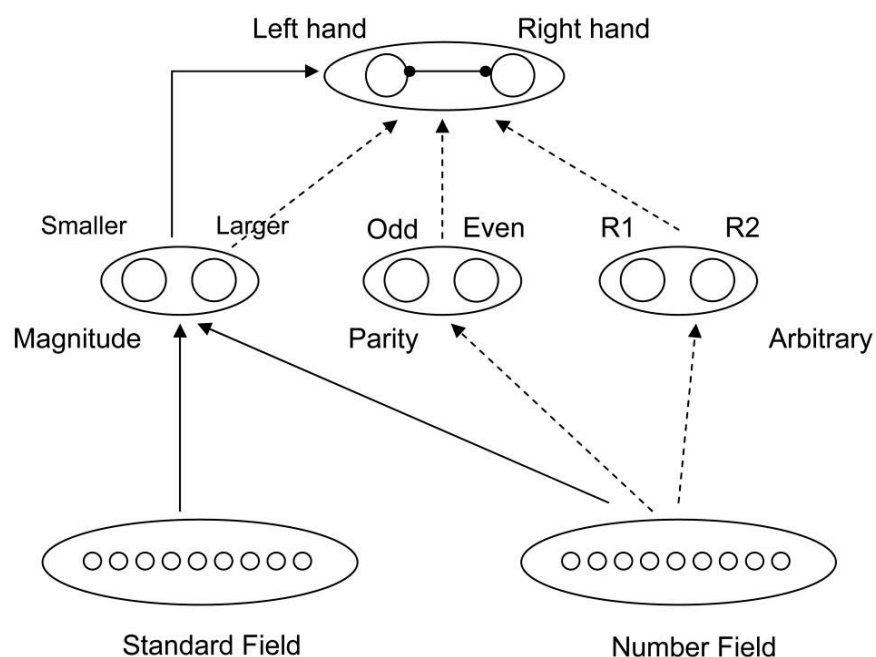


Abb. 2: Eine schematische Darstellung des dual-route-Modells des SNARC-Effekts nach Gevers und Mitarbeitern (2006) für eine Größenvergleichsaufgabe, eine Paritätsentscheidung und eine weitere, abweichende Zuordnung von präsentierten Zahlen zu Antwort 1 und 2 (R1 und R2). Dabei steht die unterste Schicht für den MZS (Number Field = Repräsentation des Stimulus auf dem MZS; Standard Field = Repräsentation des Standards auf dem MZS). Die unconditional route ist durch durchgezogene Pfeile, die conditional route durch gestrichelte Pfeile gekennzeichnet.

Ähnliche Modelle wurden bereits für andere Konfliktaufgaben wie den Simon-Effekt vorgeschlagen (z.B. de Jong, Liang & Lauber, 1994). Die erste Route kodiert für den automatisch aktivierten räumlichen Code (sog. unconditional route), während die zweite Route für aufgabenspezifische Aspekte kodiert (sog. conditional route). Dabei steht die erste schnelle (unconditional) der langsameren zweiten (conditional) Route gegenüber. Dieses Modell berücksichtigt die wichtigsten Charakteristika des SNARC-Effekts: 1) die automatische Aktivierung der Zahlengröße und des zugehörigen räumlichen Codes, 2) die Antwort-assozierte Entstehung, 3) den relativen Status der Zahlengröße und 4) die Zunahme des Effekts bei Zunahme der Reaktionszeit. Anhand dieses rechnerischen Modells konnten Gevers und Mitarbeiter einen SNARC-Effekt produzieren, der sich in seinen Eigenschaften sehr genau mit dem in Verhaltensdaten beobachteten SNARC-Effekt deckte. Damit schlossen sie auf deutliche Parallelen zwischen der Architektur des SNARC-Effekts einerseits und der räumlicher Kompatibilitätseffekte andererseits.

Neben dieser großen Anzahl von Studien, die den SNARC-Effekt auf der Ebene von Verhaltensdaten untersuchen, ist es von Interesse, mit Hilfe funktioneller Bildgebung nach neuroanatomischen Korrelaten zu suchen und diese z.B. mit bekannten kortikalen Gebieten der Zahlenverarbeitung zu vergleichen oder räumliche Aspekte dieses Effekts zu untersuchen.

Der SNARC-Effekt stellt also einen Bezug zwischen Zahlenverarbeitung und räumlicher Verarbeitung im menschlichen Gehirn her. Für das in dieser Dissertation verwendete Design sind aber auch andere neuropsychologische Phänomene von Bedeutung, die - unabhängig vom Gebiet der Zahlenverarbeitung - visuelle und räumliche Prozesse beschreiben und erklären, wie die im nächsten Abschnitt beschriebenen Effekte aus dem Bereich der Reiz-Antwort-Kompatibilität.

2.3 Reiz-Antwort-Kompatibilität

Ein für dieses Experiment sehr wichtiger Effekt leitet sich aus der Interaktion von Reiz und Antwort ab. Systematisch wurde die Reiz-Antwort-Kompatibilität (RAK) erstmals von Fitts und Seeger (1953) beschrieben. Sie fanden, dass Antworten schneller gegeben werden, wenn die relative Position eines Stimulus im Gesichtsfeld und die Position der zugehörigen Antwort, also zum Beispiel der Antworttaste, übereinstimmen. Eines der wichtigsten Beispiele für RAK ist der Simon-Effekt, der zunächst beschrieben wird.

2.3.1 Simon-Effekt

Simon und Rudell (1967) beschrieben erstmals, dass eine RAK zwischen Stimulusposition und Position der Antwort sogar dann auftritt, wenn die Aufgabe nicht räumlicher Natur ist und die Stimulusposition irrelevant ist. Diese spezielle Form bezeichnet man heute als Simon-Effekt. In einer typischen Simon-Aufgabe mussten Probanden zum Beispiel mit der rechten Hand auf einen grünen Kreis und mit der linken auf einen roten Kreis reagieren. Obwohl die Position des Stimulus irrelevant ist, sind Antworten der rechten Hand schneller, wenn der grüne Kreis auf der rechten Seite erscheint als auf der linken und umgekehrt für die linke Hand. Simon (1969) spricht von „der natürlichen Tendenz, in der Richtung der Stimulierung zu reagieren“.

Es gibt verschiedene Erklärungen für die Entstehung des Simon-Effekts. Eine Theorie (z.B. Hasbroucq, 1991; Hedge, 1975; Wallace, 1971) geht davon aus, dass für die irrelevante Stimulusposition ein räumlicher Code generiert wird, meist mit Bezug auf die anderen Stimuluspositionen. Wenn nun während der Phase der Antwortwahl (response selection) eine Überschneidung zwischen der irrelevanten Dimension der Stimulusposition und der relevanten räumlichen Antwortdimension besteht, führt ein Stimulus anscheinend automatisch zur Aktivierung seiner räumlich zugehörigen Antwort. Stimmen dabei die automatisch aktivierte und die durch die relevante Stimuluseigenschaft bestimmte Antwort überein, kommt es zu keinem Wettbewerb auf der Ebene der Antwortwahl. Zu längeren Reaktionszeiten kommt es bei Nicht-Übereinstimmung und einem dadurch erhöhten Konflikt, der verarbeitet werden muss, bevor es zur korrekten Antwort kommt.

Der räumliche Code der Stimulusposition wird dabei - z. B. nach de Jong und Mitarbeitern (1994) - automatisch und sehr schnell generiert. Außerdem hält er nur kurz an (Simon, Acosta, Mewaldt & Speidel, 1976; Mapelli, Rusconi & Umiltá, 2003), da die Aktivierung des räumlichen Codes mit der Zeit abnimmt, entweder durch aktive inhibitorische Prozesse oder durch passive Abschwächung (Hommel, 1993, 1994; Zorzi & Umiltá, 1995). Diese Frage des zeitlichen Verlaufs ist im Weiteren wichtig, um Interaktionen mit verschiedenen anderen neuropsychologischen Effekten beurteilen zu können, um entscheiden zu können, ob z.B. gleiche neuronale Netzwerke involviert sind.

Wie bereits erwähnt, zeigte sich somit eine gewisse Ähnlichkeit der Entstehungsmodelle des Simon-Effekts und des dual-route-Modells des SNARC-Effekts.

2.3.1.1 Die neuronalen Korrelate des Simon-Effekts

Die neuronale Basis und die neuroanatomischen Korrelate des Simon-Effekts sind noch nicht ausführlich geklärt. Zusammenfassend zeigen sich in Studien bisher Aktivierungen im dorsolateralen präfrontalen Kortex (DLPFC), im anterioren Cingulum, dorsal prämotorisch und in posterioren superior parietalen Regionen:

Bush, Shin, Holmes, Rosen und Vogt (2003) untersuchten in einer fMRT-Studie speziell den dorsalen Anteil des anterioren Cingulums (dACC), um eine Aufgabe zu etablieren, die diese für kognitive Prozesse sehr wichtige Region zuverlässig aktiviert. In dieser Aufgabe kombinierten sie verschiedene bekannte Effekte kognitiver Prozesse, die üblicherweise das ACC aktivieren, u.a. auch den Simon-Effekt. Es wurden den Probanden auf drei nebeneinander liegenden Positionen gleichzeitig drei Zahlen präsentiert (1, 2 und 3 in verschiedenen Kombinationen), von denen sie jeweils eine mit dem zugehörigen Finger der rechten Hand (Zeigefinger für 1, Mittelfinger für 2 und Ringfinger für 3) identifizieren mussten. Dabei fanden Bush und Mitarbeiter in Interferenzbedingungen neben dem dorsalen ACC auch andere aktivierte Regionen, den DLPFC, prämotorische Areale und beiderseitig parietale Areale (intraparietaler Sulcus). Allerdings gibt es keine Angaben zu den Regionen, die spezifisch nur für den Simon-Effekt aktiviert wurden.

Liu, Banich, Jacobson und Tanabe (2004) untersuchten mit Hilfe der funktionellen MRT Simon- und Stroop-Effekt in einer kombinierten Aufgabe. Beim Stroop-Effekt (erstmal Stroop, 1935) konkurrieren ein relevantes und ein irrelevantes Attribut eines Stimulus miteinander. In der klassischen Aufgabe dienen Farbwörter („rot“, „grün“), die in verschiedenen Farben geschrieben sind, als Stimuli, wobei auf eines dieser beiden Attribute reagiert werden soll. Es zeigen sich bei inkongruenten Bedingungen (z.B. das Wort „grün“ als relevante Stimuluseigenschaft in blauer Farbe gedruckt) langsamere Antwortzeiten. Da bei diesen beiden Effekten die Aufmerksamkeitskontrolle von entscheidender Bedeutung ist, wollten Liu und Mitarbeiter eventuelle gemeinsame neuronale Grundlagen untersuchen. Sie fanden dabei als Korrelat des Simon-Effekts (d.h. Aktivierung in Simon inkongruenten Bedingungen mehr als in Simon kongruenten Bedingungen) folgende aktivierte Regionen: anteriores Cingulum (ACC), supplementär motorische Areale (SMA) und prä-SMA, Precuneus und posteriore visuelle Areale (z.B. inferiorer und mittlerer Temporallappen). Sowohl in Stroop als auch Simon-Bedingungen wurden DLPFC und posteriore visuelle Regionen aktiviert, während das ACC nur in den Simon Bedingungen aktiviert wurde. Liu und Kollegen nahmen deshalb an, dass die neuronalen Mechanismen der

Aufmerksamkeitskontrolle (DLPFC) die selben sind, jedoch werden beim Simon-Effekt verstärkt Regionen aktiviert, die für Antwort-Konflikte (ACC), Antwortplanung und -auswahl (SMA bzw. prä-SMA) und visuospatial-motorische Assoziation verantwortlich sind.

MacLin, Gratton und Fabiani (2001) fanden in ihrer Simon Studie mittels fMRT zwar auch Aktivierungen von präfrontalen Arealen und des Precuneus, eine Aktivierung des ACC konnten sie jedoch nicht zeigen, was möglicherweise aber durch die verwendete Aufgabe zu erklären ist. Sie vermuteten, dass eine Aktivierung des Cingulums erst als Zeichen der Konfliktlösung zwischen mehreren funktionellen Modalitäten auftritt, sich die dort verwendete Aufgabe jedoch weitgehend auf eine Modalität beschränkt.

Der Simon-Effekt und sein Ursprung wurden auch mit Hilfe der transkraniellen Magnetstimulation untersucht, z. B. von Praamstra, Kleine und Schnitzler (1999). Diese Autoren befassten sich dabei mit dem dorsalen prämotorischen Kortex, von dem sie annahmen, er spiele eine Rolle bei der Kontrolle und Inhibition automatischer Antwortaktivierung im Kontext räumlicher Stimulus-Antwort-Ketten. Auf dieses Areal applizierten sie repetitive transkranielle Magnetstimulation, was zu einer Modulation des Simon-Effekts in Versuchsdurchgängen führte, die inkompatiblen Trials folgten. Daraus schlossen sie, dass der dorsale prämotorische Kortex eine Funktion bei der Suppression automatischer, räumlich geleiteter Bewegung und Antwortaktivierung hat.

2.4 Die Interaktion von Zahlengröße und Räumlichkeit

Anscheinend sind Zahlengrößenrepräsentation und Räumlichkeit also eng und recht komplex miteinander verbunden (siehe auch Hubbard et al., 2005). Um diese räumlichen Aspekte der Größenrepräsentation - und damit die des SNARC-Effekts - besser zu verstehen, ist es wichtig zu untersuchen, welchen Einfluss andere räumliche Repräsentationen auf sie haben. Dabei ist zum Beispiel interessant, ob Effekte der Zahlengrößenrepräsentation, also SNARC- oder Distanzeffekt, mit Reiz-Antwort-Effekten wie dem Simon-Effekt interagieren.

2.4.1 Interaktion von Simon- und SNARC-Effekt

Tlauka (2002) untersuchte mit lateralisierten Stimuli die Interaktion von SNARC- und Simon-Effekt. Er fand dabei sowohl einen SNARC-Effekt als auch einen normalen Simon-Effekt. Eine Interaktion zwischen beiden Effekten konnte aber nicht gezeigt werden. Dies könnte

aber auch an dem gewählten Design liegen, in dem die Probanden nur die Zahlen 1 und 100 (bzw. 100 und 900 im zweiten Experiment) identifizieren mussten. Eine Paritätsentscheidung wäre vermutlich sinnvoller gewesen. In seinem zweiten Experiment (mit den beiden Stimuli 100 und 900) fand er dabei auch eine Interaktion zwischen Zahlengröße und Stimulusposition. Die Reaktionszeiten waren dabei am schnellsten, wenn der Stimulus 100 auf der linken Seite präsentiert wurde. Andersherum wurde schneller geantwortet, wenn der Stimulus 900 auf der rechten Seite präsentiert wurde.

Auch Mapelli, Rusconi und Umiltá (2003) fanden in einer Studie, in der sie SNARC- und Simon-Effekt untersuchten, in diesem Falle bei einer Paritätsentscheidung, keine Interaktion zwischen diesen beiden Effekten. Hierbei könnte aber die Methode der Auswertung eine Interaktion verschleiert haben. Jeder Proband antwortete nämlich den ganzen Versuch über nur mit einer Hand auf gerade und mit der anderen auf ungerade Zahlen. Der SNARC-Effekt wurde dann über alle Probanden errechnet und nicht wie üblich innerhalb derselben Probanden, was i.A. zu einer Unterbewertung des SNARC-Effekts führt.

Wood (2005) konnte in seiner Studie 2 (Experiment 1), in der die Stimuli einer Paritätsaufgabe auf zwölf Positionen (entsprechend den Ziffern einer Uhr) auf dem Bildschirm präsentiert wurden, eine Abhängigkeit der SNARC-Steigung von der räumlichen Position des Stimulus beobachten. Als SNARC-Steigung bezeichnet man in diesem Zusammenhang die Steigung der Geraden, die sich in einem Diagramm mit präsentierten Zahlen auf der x-Achse und Differenz der Reaktionsgeschwindigkeiten der Antworthände auf der y-Achse ergibt. Die SNARC-Steigung gibt damit ein Vorhandensein bzw. die Ausprägung eines SNARC-Effekts an. In dem genannten Experiment waren die SNARC-Steigungen auf den linken Positionen deutlich geringer, was allerdings möglicherweise auf die große Anzahl von Positionen und die dadurch hohe räumliche Unsicherheit der Position der Stimuli zurückzuführen ist. Es wäre nämlich möglich, dass diese ausgeprägten Verschiebungen der räumlichen Aufmerksamkeit die Orientierung auf dem mentalen Zahlenstrahl und damit den SNARC-Effekt beeinflussen. In demselben Experiment war auch eine $\text{SNARC} \times \text{Simon}$ Interaktion festzustellen, wobei ein signifikanter SNARC-Effekt nur in Simon-inkongruenten Bedingungen (Hand antwortet auf kontralaterale Stimuli) zu finden war, in Simon-kongruenten aber nicht. In den beiden weiteren Teilerperimenten, die mit einer reduzierten Anzahl von Stimuluspositionen durchgeführt wurden (vier Positionen in Exp. 2 und 2 Positionen in Exp. 3), war keine $\text{SNARC} \times \text{Simon}$ Interaktion mehr zu finden und der SNARC-Effekt zeigte auch keine unterschiedliche Ausprägung auf den verschiedenen Positionen. Wood führt dies auf die unterschiedliche Höhe der aufgewendeten räumlichen

Aufmerksamkeit zurück, die durch die unterschiedliche Zahl an möglichen Stimuluspositionen entsteht. Die räumliche Aufmerksamkeit könnte nämlich Einfluss auf die Orientierung auf dem mentalen Zahlenstrahl und auf die SNARC $\times$ Simon Interaktion haben, ähnlich wie andererseits die Zahlengröße die räumliche Aufmerksamkeit beeinflussen kann (Fischer, Warlop, Hill & Fias, 2004).

Keus und Schwarz (2005) untersuchten den SNARC-Effekt mit lateralisierten Stimuli und verbalen und bimanuellen Antworten. Dabei fanden sie keine SNARC-ähnliche Assoziation von Zahlengröße und Position der Stimuli. Ein normaler SNARC-Effekt war jedoch nachzuweisen. In zwei ihrer Experimente (Exp. 2 manuell und Exp. 3) konnten sie einen SNARC-Effekt aber nur in Bedingungen nachweisen, in denen Stimulus- und Antwortposition nicht kompatibel waren. Darüber hinaus untersuchten sie auch den Simon-Effekt und fanden einen normalen Simon-Effekt in der Paritätsentscheidung, aber einen umgekehrten Effekt in der Farbentscheidungsaufgabe (relevante Stimuluseigenschaft Farbe bei lateralisierten arabischen Zahlen in grün und rot). Sie erklärten dies mit unterschiedlich starker zeitlicher Überlappung der Verarbeitung von relevanten und irrelevanten Stimuluseigenschaften. Da der Simon-Effekt relativ früh in der Verarbeitung einen Einfluss hat, könnte es mit einem anderen, in einer relativ späten Phase entstehenden Effekt nicht mehr zu einer Interaktion kommen.

Eine stärkere zeitliche Überlappung (Farbe-Aufgabe) würde demnach zu einem Simon-Effekt führen, eine geringe Überlappung (Paritätsentscheidung) zu einem umgekehrten Effekt (Hommel, 1993; Mapelli et al., 2003). Aus ihren Experimenten schlossen Keus und Schwarz, dass der SNARC-Effekt seinen Ursprung in einer relativ späten Phase der Antwortwahl hat.

3 Ziele und Hypothesen

In dieser Dissertation soll die mentale Zahlenverarbeitung besonders im Hinblick auf ihre Zusammenhänge und Überlappungen mit der visuell-räumlichen Verarbeitung untersucht werden. Dabei werden neben Verhaltensdaten auch funktionelle Daten im MRT gewonnen, von denen sich auf die Aktivierung einzelner Kortexabschnitte schließen lässt. Es handelt sich um die erste Studie, die in dieser Form mit Hilfe des fMRT den SNARC-Effekt und seine Interaktion mit dem Simon-Effekt untersucht. Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion, inwieweit Überschneidungen der zugrundeliegenden neuronalen Netze für beide Effekte vorliegen, ist eine Untersuchung mit den Mitteln der funktionellen Bildgebung besonders relevant. Die einzelnen Fragestellungen und Ziele werden im Folgenden beschrieben:

3.1 Fragestellungen bezüglich Reaktionszeitdaten

Wir erwarten das Auftreten der bekannten und bereits beschriebenen neuropsychologischen Effekte der Zahlenverarbeitung und der räumlichen Verarbeitung. Das sind vor allem:

- der numerische Distanzeffekt, da es sich um eine Größenvergleichsaufgabe handelt,
- das Auftreten eines SNARC-Effekts als Zeichen der Interaktion von Antwortcode und Zahlengrößenrepräsentation,
- der Simon-Effekt bei lateraler Präsentation der Stimuli, als Effekt der Reizantwortkompatibilität.

Vor allem ist es hierbei interessant, die Räumlichkeit der mentalen Zahlenrepräsentation zu untersuchen.

- Kommt es zu Interferenz der Stimulusposition mit der Enkodierung der Zahlensemantik oder der Orientierung auf dem mentalen Zahlenstrahl (MZS), wie z.B. von Wood (2005, Studie 1) beschrieben?
- Wie verhält sich der SNARC-Effekt auf verschiedenen Positionen im Gesichtsfeld? Kommt es zur Beeinflussung der Zahlengrößenverarbeitung und damit des SNARC-Effekts durch die Position der Stimuli? Wood (2005, Studie 2) hatte einen solchen Fazilitierungseffekt für den SNARC-Effekt in einer Paritätsaufgabe gefunden.

- Falls eine solche Interaktion zwischen Verarbeitung der Zahlensemantik und Stimulusposition auftritt, ist sie dann auch anhand des Distanzeffekts zu zeigen? Wenn das der Fall ist, scheint tatsächlich die numerische Verarbeitung an sich Gegenstand der Fazilitierung zu sein und nicht etwa ein anderer Aspekt des SNARC-Effekts.
- Inwieweit kann das dual-route-Modell des SNARC-Effekts von Gevers und Mitarbeitern (2006) bestätigt werden? Ein Einfluss der Stimulusposition auf den SNARC-Effekt wie oben beschrieben würde einer zentralen Annahme, dem Ursprung in der Phase der Antwortwahl, widersprechen.

In diesem Zusammenhang soll auch untersucht werden, inwieweit sich die räumlichen Repräsentationen von Zahlenverarbeitung und expliziter räumlicher Information überschneiden, oder ob sie weitgehend unabhängig voneinander sind. Für letzteres würde z.B. eine fehlende Interaktion von SNARC- und Simon-Effekt sprechen (Mapelli und Mitarbeiter, 2003). In Richtung gemeinsamer räumlicher Repräsentationen deuten die Ergebnisse von Keus und Schwarz (2005) oder Notebaert und Mitarbeitern (2006).

3.2 Fragestellungen bezüglich der funktionellen Bilddaten

Neben den bereits ausführlicher untersuchten neuroanatomischen Korrelaten des Distanzeffekts sind die hämodynamischen Korrelate der semantischen Zahlenverarbeitung speziell in Verbindung mit räumlich-visueller Verarbeitung von Interesse:

- Lassen sich neuroanatomische Korrelate des SNARC-Effekts finden? Gibt es spezifische SNARC-Areale oder decken sie sich mit Aktivierungsmustern, die z.B. beim Distanzeffekt auftreten? Eine IPS-Aktivierung wäre wegen der im Mittelpunkt stehenden Größenverarbeitung für den SNARC-Effekt zu erwarten. Wie macht sich in den Aktivierungsmustern die Räumlichkeit des SNARC-Effekts bemerkbar?

Wie für die Verhaltensdaten beschrieben, ist auch hier die Beziehung von SNARC- und Simon-Effekt von großem Interesse:

- Wie stellt sich die Hämodynamik des Simon-Effekts im fMRT dar?
- Wie stellen sich SNARC- und Simon-Effekt im Vergleich im fMRT dar? Lässt sich eine anhand der Verhaltensdaten gefundene Interaktion oder deren Abwesenheit bildgebend darstellen? Sind eventuelle gemeinsame Ressourcen erkennbar?

4 Material und Methoden

Das Design dieses kombinierten fMRT- und Reaktionszeitexperiments besteht aus einem reinen Reaktionszeitexperiment und einer fMRT-Messung, während der funktionelle Bilddaten und zusätzlich Reaktionszeiten aufgezeichnet werden. Die 16 männlichen Probanden der fMRT-Messung absolvierten kurz zuvor das Reaktionszeitexperiment als Übungsaufgabe, während weitere 16 weibliche Probandinnen nur am Reaktionszeitexperiment alleine teilnahmen.

4.1 Probanden

Am fMRT-Experiment nahmen insgesamt 16 männliche Studenten der RWTH Aachen verschiedener Fakultäten teil. Alle verfügten über normalen oder mit Brille bzw. Kontaktlinsen korrigierten Visus und waren nach eigenen Angaben ausschließlich Rechtshänder, alle waren deutsche Muttersprachler. Das Alter der Probanden lag zwischen 21-26 Jahren mit einem Durchschnitt von 25.1 Jahren.

Am reinen Reaktionszeitexperiment nahmen neben den 16 männlichen Probanden auch 16 weibliche Probandinnen teil, die ebenfalls über normalen oder korrigierten Visus verfügten und im Durchschnitt 24.4 Jahre alt waren (20 - 30 Jahre). Auch hier waren alle Rechtshänderinnen mit deutscher Muttersprache.

Bei keinem der Probanden war eine neurologische oder psychiatrische Vorgeschichte bekannt. Alle wurden über die Untersuchung aufgeklärt und unterschrieben eine schriftliche Einverständniserklärung. Über die Ziele des Experiments wurden sie nicht informiert. Für die Versuchsdauer von 20 Minuten (nur Reaktionszeitexperiment) bzw. 1.5 Stunden (Reaktionszeit- und fMRT-Experiment) erhielten die Probanden eine Aufwandsentschädigung.

Die Reaktionszeitdaten der fMRT Messung eines Probanden mussten wegen technischer Probleme von der statistischen Analyse ausgeschlossen werden.

Im Folgenden bezeichnet der Ausdruck „Proband/en“ sowohl Probandinnen als auch Probanden.

4.2 Aufgabe und Stimuli

Die Aufgabe bestand in einem Größenvergleich einer visuell präsentierten arabischen Zahl mit dem vorgegebenen Standard 5, indem die Probanden Antworttasten mit der rechten oder der linken Hand drückten. Als Stimuli dienten die Zahlen 1, 4, 6 und 9. Sie wurden als weiße arabische Zahlen auf schwarzem Hintergrund präsentiert, und zwar auf vier verschiedenen Positionen des Gesichtsfelds (oben, rechts, unten und links vom zentralen Fixationspunkt), also entsprechend den Positionen 12, 3, 6 und 9 der Uhr. Zentral befand sich ein Fixationskreuz, das ständig eingeblendet blieb aber bei Erscheinen und Erlöschen eines Stimulus die Intensität wechselte, um eine ständige Fixation auf die Bildschirmmitte zu erreichen.

Zur Stimuluspräsentation und Reaktionszeitakquisition wurde ein IBM-kompatibler PC mit der Versuchssteuerungs-Software Presentation v 0.6 (<http://www.neurobs.com>) verwendet.

Im Reaktionszeitexperiment wurde ein Standard Computer Monitor zur Stimuluspräsentation verwendet, die Stimuli hatten eine Größe von 38mm (4.3°) in der Höhe und 29mm (3.3°) in der Breite bei einer Entfernung der Probanden zum Bildschirm von 50cm. Die vier Positionen hatten einen Abstand von 55mm (6.3°) zum zentral eingeblendeten Fixationskreuz.

Als Antworttasten dienten rechte und linke „Strg“ Taste der Computer-Tastatur mit einer Entfernung der Tasten von 26cm.

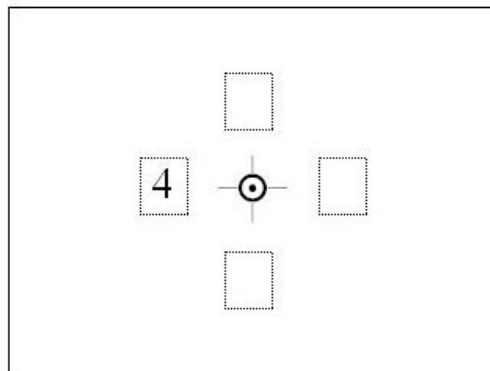


Abb. 3: Präsentation der Stimuli auf 4 Positionen (gepunktete Kästchen im Experiment nicht sichtbar), Fixationskreuz ständig sichtbar, bei Erscheinen eines Stimulus aus dünnen Balken bestehend, bei Verschwinden eines Stimulus massiver werdend.

Während der fMRT Messung wurden die Stimuli über eine MRT-kompatible Videobrille (Visua Stim XGA) präsentiert, die mit einer Auflösung von 800×600 ein virtuelles Bild von 76,2cm in einem Abstand von 1,20m entstehen lässt. Die Stimuli hatten hierbei eine virtuelle Größe von 88mm (4.2°) in der Höhe und 65mm (3.1°) in der Breite, die Positionen lagen 102mm (4.8°) vom Fixationskreuz entfernt. Als Antworttasten dienten zwei im MRT verwendbare Tasten mit Lichtleiterkabeln.

4.3 Ablauf und Durchführung

4.3.1 Reaktionszeitexperiment

Im ersten von zwei Versuchsblöcken, antwortete die Hälfte der Probanden mit der rechten Hand auf Zahlen größer als 5 und mit der linken Hand auf Zahlen kleiner als 5, im zweiten Block dann umgekehrt. Die andere Hälfte der Probanden absolvierte die beiden Blöcke in umgekehrter Reihenfolge.

In jedem Block wurde jede der 16 Bedingungen (vier Stimuli auf vier Positionen) 15-mal dargeboten, so dass jeder Proband insgesamt 480 trials absolvierte. Die Stimuli wurden bis zur Antwortgabe präsentiert, maximal jedoch 1500ms. Zwischen den beiden Blöcken von je ca. 6min 20sec Dauer hatten die Probanden eine kurze Pause von wenigen Minuten.

4.3.2 fMRT Messung

Die fMRT-Studie bestand je Proband aus vier Blöcken in einem rapid event-related Design. Dabei absolvierte die Hälfte der Probanden die Abfolge der Blöcke R-L-L-R (R = „mit rechts auf >5“ und L = „mit links auf >5“) und die andere Hälfte die Abfolge L-R-R-L.

Jeder Block bestand aus 160 trials (also 10 mal 16 Bedingungen), so dass insgesamt 640 trials aufgezeichnet wurden. Hinzu kamen 32 null events pro Block (also 5% aller trials). Die Stimuli wurden für 1500ms präsentiert mit einem ISI von 3000ms. Ein Block dauerte 9min 36sec.

Die beiden ersten Probanden wurden, bei ansonsten gleichem Design, mit einer längeren Version von 15 Wiederholungen und damit 240 trials pro Block gemessen. Hier dauerte ein Block insgesamt 14 min 24 sec. Da die dadurch insgesamt sehr lange Messzeit für die

Probanden aber äußerst unangenehm war, wurde dann nur noch das kürzere Design verwendet.

Außerdem wurde bei den letzten 8 Probanden die Stimulusabfolge leicht abgeändert, das Design blieb ansonsten unverändert. In der älteren Version hatte es keine direkt aufeinander folgenden Wiederholungen von Bedingungen gegeben. Das wurde in der neueren Abfolge (balanciert über alle Bedingungen) geändert, um möglicherweise ein stärkeres fMRT Signal zu erreichen.

Zwischen den einzelnen Blöcken wurde jeweils eine kurze Pause eingelegt, in der der Proband auch Anweisungen für den nächsten Block erhielt.

4.4 Gewinnung der Bilddaten

Die fMRT Messungen dieser Studie wurden mit einem 1.5T Siemens Gyroscan NT am Universitätsklinikum Aachen durchgeführt. Es wurde ein rapid event-related design verwendet. Die funktionellen Bilddaten wurden nach dem blood oxygen level-dependent (BOLD) Kontrast, also nach der zerebralen Blutsauerstoffsättigung, mit einer T2 gewichteten echo-planaren imaging (EPI) Sequenz aufgezeichnet [TR(repetition time) = 2.8s, TE(echo time) = 50ms, flip angle = 90°, matrix = 64 × 64, FOV 220mm]. Die einzelnen Volumen wurden in 30 Schichten mit einer Schichtdicke von 4mm gemessen. Pro Block wurden 212 scans aufgezeichnet, im Falle der beiden Probanden mit längerem Design 314 scans. Zu Beginn jeder Datenaufzeichnung wurden 5 dummy scans eingefügt, um eine Stabilisierung der Magnetisierung zu erreichen.

Außerdem wurden hoch auflösende T1 gewichtete anatomische Aufnahmen (TR = 30ms, matrix = 256 × 256mm, 170 slices, voxel size = 0.86 × 0.86 × 2mm, FOV = 220mm, TE = 4.6ms; flip angle = 30°) zur individuellen Koregistrierung funktioneller Daten aufgezeichnet.

4.5 Verarbeitung der Bilddaten

Die fMRT Daten wurden mit dem Programm statistical parameter mapping software SPM2 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>) ausgewertet. Nach Verwerfen der 5 dummy scans wurden die Bilder auf das erste Bild eines jeden Blocks ausgerichtet (realigned). Mit dieser Ausrichtung der Schnittbilder können eventuelle kleine Bewegungen des Probanden im Verlauf eines Blocks neutralisiert werden. Dann wurde eine räumliche Normalisierung mit

einer Voxelgröße von 3x3x3mm durchgeführt. Hierbei werden die Gehirne der Probanden durch Streckung und Stauchung einem Standardgehirn angeglichen, um für die weitere Gruppenauswertung verwendbar zu sein. Zuletzt erfolgte ein sog. Smoothing, das anhand einer Gauß'schen Funktion eine räumliche Glättung der Daten vornimmt, indem einzelne Voxel mit ihren Nachbarvoxeln gemittelt werden. Hier wurde ein Smoothingfaktor von 8mm angewendet.

Für die weitere Auswertung wurde die hämodynamische Antwortfunktion (hemodynamic response function oder hrf) benutzt, um die fMRT BOLD (blood oxygenation level dependent)-Kurve abzutasten. Zuerst wurde eine Einzelauswertung jedes Probanden (sog. first-level-Analyse) vorgenommen, um danach die gesamte Gruppe mit Hilfe eines random-effects-Modell zu untersuchen. Auf diese sog. second-level-Analyse stützt sich auch die Auswertung in den folgenden Kapiteln. Neben einfachen Kontrasten, die alle aufgetretenen Aktivierungen der zugehörigen Bedingung beschreiben, wurden auch komplexe Kontraste berechnet, wobei verschiedene Aktivierungsbedingungen untereinander verglichen werden.

Bei der Berechnung dieser komplexen Kontraste kann es zur Entstehung von Artefakten durch Subtraktion von relativen Deaktivierungen der einfachen Kontraste kommen. So können im komplexen Kontrast scheinbar Aktivierungen entstehen, die in den zugrunde liegenden einfachen Kontrasten nicht bestanden haben. Um dies zu verhindern, erfolgte bei Berechnung der komplexen Kontraste eine sog. „Maskierung“. Dadurch werden z.B. im komplexen Kontrast A - B diejenigen Aktivierungen entfernt, die nicht bereits im einfachen Kontrast A bestanden haben.

Zusätzlich zur kategorialen second-level-Analyse der 16 Probanden wurde auch eine second-level-Analyse mit Hilfe einer parametrischen Modellierung ausgeführt. Diese geht davon aus, dass eine systematische Variation der Signalstärke je nach Grad der kognitiven, sensorischen oder motorischen Anforderungen stattfindet. Ein solches Modell bietet sich z.B. zur Darstellung von Effekten an, die die numerische Zahlengröße beschreiben.

Die Maxima der aktivierten Cluster wurden mit Hilfe des Atlanten von Talairach und Tournoux (1988) und des Talairach Daemon v 2.0 (<http://ric.uthscsa.edu/projects/talairachdaemon.html>) den entsprechenden anatomischen Strukturen zugewiesen.

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Analyse der Reaktionszeiten

5.1.1 Varianzanalyse der Reaktionszeiten des Reaktionszeitexperiments

Für die statistische Auswertung des Reaktionszeitexperiments konnten die Daten aller 32 Probanden verwendet werden. Der Mittelwert der Reaktionszeiten aller Probanden lag bei 502ms (Standardfehler des Mittelwerts 13.9ms). Die mittlere Fehlerrate betrug 5.7% der Antworten bei einer Standardabweichung von 2.3%. Dabei wurden in die statistische Analyse nur diejenigen Reaktionen eingeschlossen, die innerhalb von ± 3 SD um den intraindividuellen Reaktionszeitmittelwert lagen und langsamer als 200ms waren.

Die Reaktionszeiten des Reaktionszeitexperiments wurden in einem varianzanalytischen Modell untersucht. Vier Faktoren (Position, Hand, Zahlengröße und Distanz zur 5) wurden in einem Messwiederholungsdesign verwendet. Der Faktor Position gliederte sich in vier Stufen (oben, rechts, unten, links), der Faktor Hand in zwei (rechte Hand, linke Hand), der Faktor Zahlengröße in zwei (>5 und <5) und der Faktor Distanz in zwei Stufen (nah an 5 und weit von 5).

Der Haupteffekt Position wurde signifikant ($F(3,93)=4.75$; $p=0.004$), wobei die Reaktionszeiten auf Stimuli auf den horizontalen Positionen schneller waren als die auf den vertikalen (rechts = 498ms < links = 500ms < oben = 504ms < unten = 507ms). Anschließend wurden die vier Positionen jeweils mittels des t-Tests für abhängige Stichproben verglichen. Nach Bonferroni-Korrektur (individuelles Signifikanzniveau $\alpha(\text{ind}) = \alpha/m$ mit m = Anzahl der durchgeführten Tests) wäre bei $m = 6$ von einem p-Wert von 0.0083 als Grenze der Signifikanz der einzelnen Tests auszugehen. Damit zeigten sich die Vergleiche der Positionen rechts und unten ($t(31)=4.26$; $p<0.001$), rechts und oben ($t(31)=2.91$; $p=0.007$) und links und unten ($t(31)=3.20$; $p=0.003$) signifikant. Die übrigen drei Paarvergleiche erreichten das adjustierte Signifikanzniveau nicht (der Vergleich der Positionen oben und links mit $p=0.05$, die Vergleiche oben und unten bzw. rechts und links deutlich mit $p=0.14$ bzw. $p=0.27$).

Der Haupteffekt der Antworthand war mit $F(1,31)<1$ nicht signifikant. Die rechte Hand war nur 3ms schneller als die linke. Der Haupteffekt Zahlengröße war signifikant ($F(1,31)=5.70$; $p=0.023$). Auf die kleineren Zahlen (1 und 4) wurde 6 ms schneller geantwortet (499ms) als

auf die größeren Zahlen 6 und 9 (505ms). Als Hinweis auf den Distanzeffekt (Moyer und Landauer, 1967) erreichte der Haupteffekt Distanz zur 5 Signifikanz mit $F(1,31)=107.48$; $p<0.001$. Dabei waren die Antworten auf Zahlen nah am Standard 5 (4 und 6) 25ms langsamer (515ms) als die auf die weit vom Standard liegenden (490ms). Weiterhin erreichte der Interaktionseffekt Position $\times$ Hand mit $F(3,93)=16.17$; $p<0.001$ Signifikanz. Die rechte Hand war schneller als die linke für Stimuli, die auf der oberen, rechten bzw. unteren Position (rechte Hand = 498ms, 491ms, 505ms; linke Hand = 510ms, 504ms, 509ms) präsentiert wurden; umgekehrt war es für die linke Position (rechte Hand = 509ms; linke Hand = 491ms). Dies entspricht einem signifikanten Simon-Effekt. Bei weiterer Untersuchung des Simon-Effekts zeigte sich außerdem, dass er abhängig von Zahlengröße und Position war (s. Abb. 4).

Es kam zu einer Abschwächung und sogar Umkehrung des Simon-Effekts bei Inkompatibilität von Stimulusposition und semantischer Position des Stimulus auf dem MZS. Bei kompatibler Position war der Simon-Effekt in erwarteter Richtung deutlich ausgeprägt.

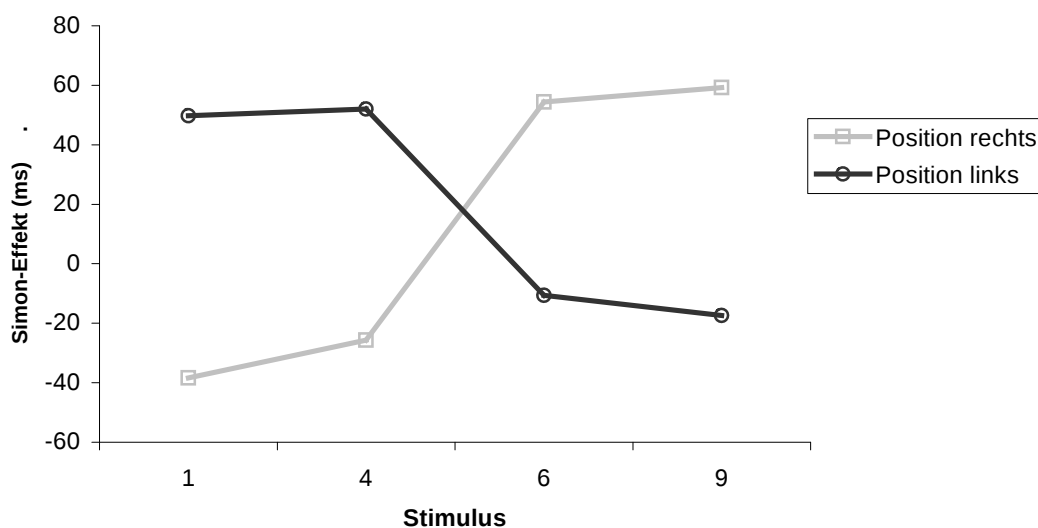


Abb. 4: Der Simon-Effekt der einzelnen Stimuli auf den Positionen rechts und links. Dabei sind auf der Y-Achse die Differenzen zwischen den entsprechenden Simon-inkongruenten und Simon-kongruenten Reaktionszeiten aufgetragen, so dass positivere Werte eine stärkere Ausprägung des Simon-Effekts beschreiben.

Der Interaktionseffekt von Position und Zahlengröße erreichte mit $F(3,93)=5.57$; $p=0.001$ das Signifikanzniveau. Auf den Positionen unten und links waren die Reaktionszeiten für Zahlen kleiner als 5 schneller (499ms bzw. 493ms) als für Zahlen größer als 5 (515ms bzw. 506ms). Auf den beiden anderen Positionen ergaben sich viel geringere Unterschiede (obere Position: 504ms sowohl für größere als auch für kleinere Zahlen; auf der rechten Position: 499ms für kleinere und 497ms für größere Zahlen). Das Vorhandensein eines SNARC-Effekts (Dehaene, Bossini & Giraux, 1993) ist durch den signifikanten Interaktionseffekt von Hand und Zahlengröße ($F(1,31)=26.80$; $p<0.001$) belegt. Die Reaktionszeiten der rechten Hand auf größere Zahlen waren schneller (486ms) als auf kleinere Zahlen (516ms) während die linke Hand schneller auf kleinere Zahlen reagierte (482ms) als auf größere (525ms). Auch der Interaktionseffekt von Position und Distanz zur 5 erreichte mit $F(3,93)=4.19$; $p=0.008$ Signifikanz. Dabei ist der Distanzeffekt am größten auf der rechten Position (31ms), gefolgt von der oberen (30ms), der unteren (20ms) und der linken (18ms). Der Interaktionseffekt von Position, Zahlengröße und Distanz zur 5 war mit $F(3,93)=2.96$; $p=0.036$ ebenfalls signifikant. Wie aus Abbildung 5 deutlich wird, ist der Distanzeffekt auf allen Positionen mit Ausnahme der linken für größere Zahlen größer, auf der linken ist er dagegen für kleinere Zahlen stärker ausgeprägt. Mit einem t-Test für abhängige Stichproben zeigte sich nur für die linke Position ein signifikanter Unterschied des Distanzeffekts für größere und kleinere Zahlen ($t(31)=2.07$; $p=0.047$). Auf den anderen drei Positionen lagen die t-Werte zwischen $t(31)=-0.85$ und $t(31)=-1.60$. Die p-Werte betrugen zwischen $p=0.12$ und $p=0.4$.

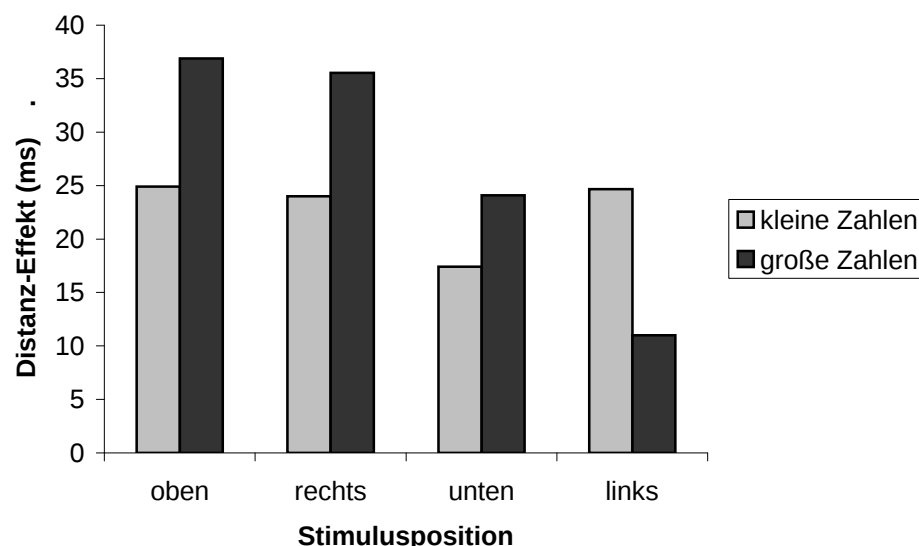


Abb. 5: Der Distanzeffekt in Abhängigkeit von Stimulusposition und Zahlengröße. Dabei sind auf der Y-Achse die Differenzen der Reaktionszeiten zwischen standardnahem und standardfernem Stimulus aufgetragen, so dass positivere Werte eine stärkere Ausprägung des Distanzeffekts beschreiben.

Bei getrennter Untersuchung nur für rechte und linke Position (s. Abbildung 6) ergab sich entsprechend ein stärkerer Distanzeffekt für eine kongruente Position des Stimulus im Raum und auf dem MZS, bei Inkongruenz war der Effekt schwächer ausgeprägt ($t(31)=2.32$; $p=0.027$).

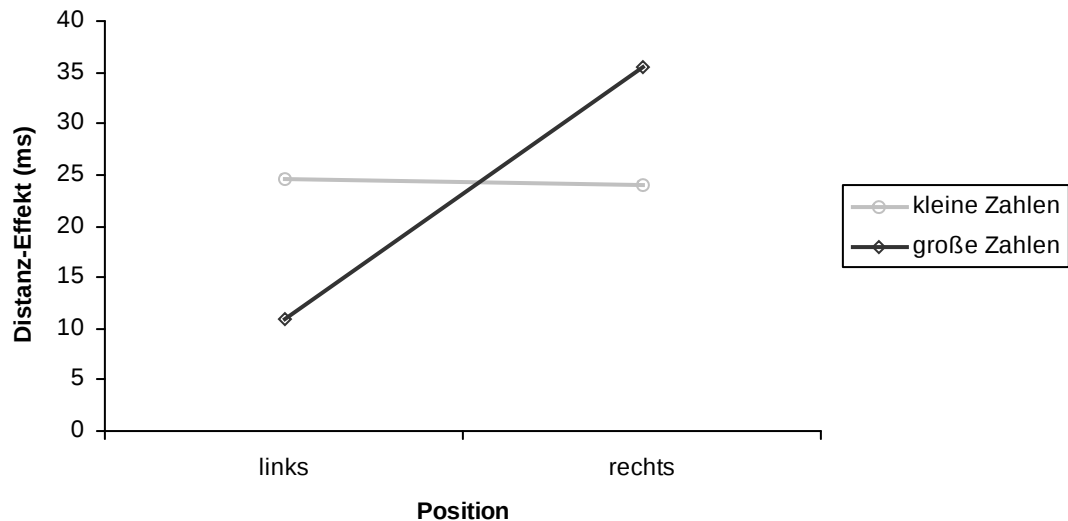


Abb. 6: Der Distanzeffekt auf den lateralen Positionen nach Zahlengröße. Dabei sind auf der Y-Achse die Differenzen der Reaktionszeiten zwischen standardnahe und standardfernem Stimulus aufgetragen, so dass positivere Werte eine stärkere Ausprägung des Distanzeffekts beschreiben.

Der dreifache Interaktionseffekt von Hand, Zahlengröße und Distanz zur 5 war mit $F(1,31)=7.73$; $p=0.009$ signifikant. Es zeigt sich für die rechte Hand ein stärkerer Distanzeffekt bei den größeren Zahlen (31ms), während er bei kleineren Zahlen geringer ausfiel (16ms). Für die linke Hand war komplementär ein stärkerer Distanzeffekt für kleinere Zahlen (30ms) als für größere (23ms) zu beobachten.

5.1.1.1 Analyse des SNARC-Effekts

Die Reaktionszeiten des Reaktionszeitexperiments ergaben folgendes: Getestet gegen null waren die SNARC-Steigungen auf allen vier Positionen hoch signifikant. Tabelle 1 zeigt die SNARC-Steigungen in allen vier Positionen und den statistischen Vergleich. 23 der insgesamt 32 Probanden zeigten konsistent über alle vier Positionen eine negative SNARC-Steigung.

	SNARC-Steigung	t-Wert	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	95% Konfidenzint. der Differenz		Probanden mit neg. Steigung (%)
						Untere	Obere	
oben	-11.79	-4.63	31	< .001	-11.79	-16.98	-6.59	26 (81%)
rechts	-13.81	-5.77	31	< .001	-13.81	-18.69	-8.93	29 (91%)
unten	-11.27	-4.82	31	< .001	-11.27	-16.04	-6.51	27 (84%)
links	-9.73	-4.58	31	< .001	-9.73	-14.06	-5.40	26 (81%)

Tab. 1: Vergleich der SNARC-Steigungen gegen null auf den vier Positionen. Reaktionszeitdaten des Reaktionszeitexperiments der insgesamt 32 Probanden.

Die SNARC-Steigung für jede der vier Positionen wurde mittels t-Test für abhängige Stichproben verglichen (mit Signifikanzniveau $p=0.0083$ nach Bonferroni-Korrektur wie oben beschrieben). Der Vergleich von rechter und linker Position verfehlte die Signifikanz sehr knapp ($t(31)=-2.79$; $p=0.009$, zweiseitig). Die SNARC-Steigung an der rechten Seite war dabei -4.08ms steiler als auf der linken Seite. Die t-Werte der anderen, deutlich nicht signifikanten Vergleiche bewegten sich zwischen $t(31)=-0.34$ bis $t(31)=1.66$ und die p-Werte zwischen $p=0.11$ und $p=0.74$.

5.1.1.2 Perzentil-Analyse

Es wurde zusätzlich eine Perzentil-Analyse angefertigt, um den Einfluss der Antwortgeschwindigkeit genauer zu untersuchen. Für jeden Probanden getrennt wurden hierzu die Reaktionszeiten der einzelnen Bedingungen in eine Gruppe schneller und eine zweite Gruppe langsamer Reaktionszeiten geteilt. Kriterium für die Einteilung war der Median. Die mit dem Median identischen Reaktionszeiten wurden aus der weiteren Berechnung ausgeschlossen, da keine Einordnung in einer der beiden Gruppen sinnvoll ist.

Innerhalb dieser beiden Untergruppen wurden dann wie oben beschrieben die SNARC-Steigungen berechnet. Die SNARC-Steigungen für Reaktionszeiten unterhalb und oberhalb des Median wurden für die jeweiligen vier Positionen in einem 2-faktoriellen varianzanalytischen Modell mit Messwiederholungen für die Faktoren Quantil (unterhalb, oberhalb des Median) und Position (oben, rechts, unten, links) analysiert. Die SNARC-Steigung war wesentlich größer für Antworten oberhalb des Median (-15.77ms) als für diejenigen unterhalb (-5.77ms). Der Haupteffekt des Quantils war entsprechend signifikant ($F(1,31)=43.00$; $p<0.001$). Weder der Haupteffekt der Position ($F(3,93)=1.24$; n.s.) noch der Interaktionseffekt Quantil $\times$ Position ($F(3,93)=1.57$; n.s.) erreichten das Signifikanzniveau von $\alpha=0.05$.

Mit dem Ziel, den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit der Antworten und Position der Stimuli spezifischer zu untersuchen, wurde ein zweites varianzanalytisches Modell mit den Faktoren Quantil (unterhalb, oberhalb des Median) und Position (rechts, links) berechnet. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den im Abschnitt 5.1.1.1 beschriebenen t-Test-Analysen. Der Haupteffekt des Quantils war signifikant ($F(1,31)=28.02$; $p<0.001$). Die SNARC-Steigung war wesentlich größer für Antworten oberhalb des Median (-15.87ms) als für diejenigen unterhalb (-5.92ms). Die SNARC-Steigung war -3.25ms größer für rechts präsentierte Zahlen als für linksseitige. Statistisch hat dieser Unterschied ($F(1,31)=3.88$; $p=0.058$) den p-Wert von $p=0.05$ knapp verfehlt. Die leichte Abweichung zu den entsprechenden t-Test-Vergleichen aus Abschnitt 5.1.1.1 ist vermutlich auf den Ausschluss des oder der Medianwerte aus jeder experimentellen Bedingung im Falle der Varianzanalyse zurückzuführen. Trotzdem war der Interaktionseffekt Quantil $\times$ Position signifikant ($F(1,31)=4.95$; $p=0.034$). Für Antworten unterhalb des Median ergaben sich vergleichbare SNARC-Steigungen für rechte (-6.21ms) und linke Positionen (-5.63ms); aber für Antworten oberhalb des Median war mit $F(1,31)=2.39$; $p=0.023$ ein ausgeprägter Unterschied vorhanden (für die rechte Position -18.84ms und für die linke -12.91ms).

5.1.1.3 Fehleranalyse

Entsprechend der Analyse der Reaktionszeiten wurde auch eine Varianzanalyse der Fehlerraten aller Bedingungen durchgeführt. Hierbei wurden die relativen Fehlerhäufigkeiten mit $\arcsin(\sqrt{\text{relative Fehlerhäufigkeit}})$ transformiert, da insbesondere kleine Fehlerhäufigkeiten nicht annähernd normalverteilt sind, sondern eher einer

Binominalverteilung folgen. Mit dieser Transformation gelingt eine bessere Anpassung an eine Normalverteilung, was für die Anwendbarkeit von Varianzanalysen sinnvoll ist.

Der Haupteffekt der Position erreichte mit $F(3,93)=2.79$; $p=0.045$ das Signifikanzniveau von $p=0.05$. Es zeigten sich für die obere und die rechte Position etwas geringere Fehlerraten (5.2% bzw. 5.3%) als für die untere und linke (6.2% bzw. 6.3%). Der Haupteffekt der antwortenden Hand war signifikant ($F(1,31)=8.85$; $p=0.006$). 6.3% der Antworten der rechten Hand wurden als falsch erfasst, bei der linken Hand waren es nur 5.1%. Auch der Effekt Zahlengröße war mit $F(1,31)=7.06$; $p=0.008$ signifikant. Bei kleineren Zahlen betrug die Fehlerrate 6.3%, bei den größeren 5.1%. Auch die Distanz zur 5 hatte einen sehr signifikanten Einfluss ($F(1,31)=37.50$; $p<0.001$), wobei 4.7% der Antworten auf Zahlen weit vom Standard fehlerhaft waren und 6.8% der nah am Standard gelegenen. Mit $F(3,93)=5.19$; $p=0.002$ war auch die Interaktion von Position und Hand signifikant. Dabei wurden auf der rechten, unteren und linken Position mehr Fehler mit der rechten Hand gemacht als mit der linken (rechts 0.9%-Punkte, unten 1.9%-Punkte und links 3.0%-Punkte) während auf der oberen Position 0.9%-Punkte mehr Fehler mit der linken Hand als mit der rechten gemacht wurden. In der Interaktion zwischen Hand und Zahlengröße, die ein Indikator für den SNARC-Effekt ist (signifikant mit $F(1,31)=19.69$; $p<0.001$), wurden mit der rechten Hand auf kleine Zahlen 3.8%-Punkte mehr Fehler gemacht als bei Antworten auf die größeren Zahlen. Umgekehrt war die Fehlerrate bei Antworten der linken Hand auf größere Zahlen 1.3%-Punkte höher als bei der Antwort auf kleinere Zahlen. Auch die Interaktion von Antworthand und Distanz zur 5 war mit $F(1,31)=5.98$; $p=0.020$ signifikant. Für die linke Hand war die Auswirkung der Distanz vom Standard auf die Fehlerrate stärker (für Zahlen weit vom Standard 3.6% und für Zahlen näher daran 6.7%) als für die rechte Hand (weit vom Standard 5.8% und nah 6.8%). Der Interaktionseffekt Position, Hand und Distanz wurde ebenfalls signifikant ($F(3,93)=3.96$; $p=0.036$), wobei nur für Antworten der rechten Hand auf rechtsseitige Stimuli mehr Fehler bei weit vom Standard liegenden Zahlen als bei nah daran liegenden gemacht wurden (6.4% bzw. 5.0%). In allen anderen Fällen wurden bei weit vom Standard liegenden Zahlen weniger Fehler gemacht als bei nah gelegenen. Dies ist wohl auf einen extrem hohen Fehlerwert einer einzigen Bedingung zurückzuführen: 11.0% für Antworten der rechten Hand auf den Stimulus „1“ auf der rechten Position. Dies ist wahrscheinlich auf ein hohes Maß an Inkongruenz zwischen Zahlengröße und räumlichen Eigenschaften von Stimulus und Antwort zurückzuführen. Zuletzt war auch die Interaktion von Hand, Zahlengröße und Distanz signifikant ($F(1,31)=13.90$; $p=0.001$). Für die rechte Hand ist der Distanzeffekt bei kleineren Zahlen umgekehrt als üblicherweise erwartet: auf die weit vom Standard gelegene 1 wurde

häufiger falsch geantwortet als auf den Stimulus 4 (8.5% bzw. 7.9%). Für Antworten der rechten Hand auf größere Zahlen und für Antworten der linken Hand war dies andersherum. Auf weit vom Standard gelegene Zahlen wurde weniger falsch geantwortet als auf nah gelegene. Auch hierfür könnte wieder der eben beschriebene hohe Einzelwert verantwortlich sein.

5.1.2 Varianzanalyse der Reaktionszeiten des fMRT-Experiments

Für die statistische Auswertung der Reaktionszeitdaten des fMRT-Experiments konnten die Daten von 15 Probanden verwendet werden. Die Daten eines Probanden waren wegen technischer Probleme mit einer Antworttaste nicht zu verwenden. Der Mittelwert der Reaktionszeiten aller Probanden lag bei 553ms (Standardfehler des Mittelwerts 23.2ms). Die Fehlerrate betrug 3.8% der Antworten bei einer Standardabweichung von 1.8%.

Die Reaktionszeiten des fMRT-Experiments wurden in einem varianzanalytischen Modell untersucht. Vier Faktoren (Position, Hand, Zahlengröße und Distanz zur 5) wurden in einem Messwiederholungsdesign verwendet. Der Faktor Position gliederte sich in vier Stufen (oben, rechts, unten, links), der Faktor Hand in zwei (rechte Hand, linke Hand), der Faktor Zahlengröße in zwei (>5 und <5) und der Faktor Distanz in zwei Stufen (nah an 5 und weit von 5).

Der Haupteffekt Position erreichte keine Signifikanz ($F(3,42)=1.65$; $p=0.194$), wobei die Reaktionszeiten auf den verschiedenen Positionen in der folgenden Reihenfolge zunahmen: rechts = 548ms < oben = 552ms < unten = 555ms < links = 556ms.

Auch der Haupteffekt der Antworthand erreichte kein signifikantes Niveau mit $F(1,14)=1.53$; $p=0.236$. Dagegen wurde der Haupteffekt Zahlengröße mit $F(1,14)=8.62$; $p=0.011$ signifikant. Auf die kleineren Zahlen 1 und 4 (557ms) wurde 9ms langsamer geantwortet als auf die größeren 6 und 9 (549ms). Mit $F(1,14)=18.08$; $p=0.001$ wurde auch der Haupteffekt der Distanz zur 5 signifikant, auf weit vom Standard 5 gelegene Zahlen (1 und 9) wurde schneller (547ms) reagiert als auf die standardnahen Zahlen 4 und 6 (559ms).

Als Interaktionseffekt erreichte die Interaktion von Position und Hand Signifikanz ($F(3,42)=15.63$; $p<0.001$). Die rechte Hand war schneller als die linke auf Stimuli, die auf den Positionen oben, rechts und unten präsentiert wurden (oben um 5ms, rechts um 28ms und unten um 10ms) während auf der linken Position die linke Hand 16ms schneller war als die

rechte. Auch der Interaktionseffekt Position und Zahlengröße war mit $F(3,42)=5.62$; $p=0.002$ auf signifikantem Niveau. Die Differenz der Reaktionszeiten von größeren und kleineren Zahlen betrug auf der oberen Position 25ms (für kleinere 565ms und für größere 540ms), während sie auf den anderen Positionen sehr viel kleiner war (in allen drei Fällen <8 ms).

Auch der Interaktionseffekt von Hand und Zahlengröße, der den SNARC-Effekt (Dehaene et al., 1993) beschreibt, war mit $F(1,14)=14.48$; $p=0.002$ signifikant. Es zeigten sich, wie durch den SNARC-Effekt beschrieben, schnellere Reaktionszeiten der rechten Hand auf größere Zahlen (525ms) als auf kleinere (574ms), während bei der linken Hand umgekehrte Verhältnisse vorlagen (auf kleinere Zahlen schneller (540ms) als auf größere (573ms)). Knapp verfehlte der Interaktionseffekt Position $\times$ Distanz zur 5 die Signifikanz ($F(3,42)=2.77$; $p=0.053$), wobei auf der Position oben kaum Unterschied zwischen nah und weit entfernten Zahlen bestand (552ms bzw. 553ms), während auf den anderen Positionen (rechts, unten und links) weiter vom Standard entfernte Zahlen schneller beantwortet wurden als weniger weit entfernte (um 14ms bzw. 19ms bzw. 18ms).

Als einziger weiterer Effekt wurde die Interaktion zwischen Hand, Zahlengröße und Distanz zur 5 signifikant ($F(1,14)=5.52$; $p=0.035$). Dabei war für die rechte Hand der Distanzeffekt bei größeren Zahlen stärker ausgeprägt (15ms) als für kleinere (4ms). Für die linke Hand war der Effekt der Distanz umgekehrt, also für kleinere Zahlen stärker (18ms) als für größere (4ms), ausgeprägt.

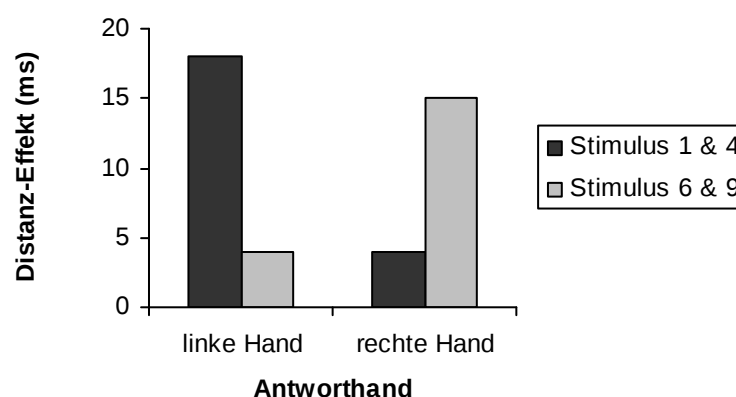


Abb. 7: Interaktion Antworthand, Zahlengröße und Distanz zur 5. Dabei sind auf der Y-Achse die Differenzen der Reaktionszeiten zwischen standardnahe und standardfernem Stimulus aufgetragen, so dass positivere Werte eine stärkere Ausprägung des Distanzeffekts beschreiben.

5.1.2.1 Analyse des SNARC-Effekts

Die SNARC-Steigungen waren auf allen vier Positionen hoch signifikant von null verschieden. Tabelle 2 zeigt die SNARC-Steigungen in allen vier Positionen und den statistischen Vergleich. Dabei zeigten 11 der 15 ausgewerteten Probanden negative SNARC-Steigungen konstant über alle vier Positionen.

	SNARC-Steigung	t-Wert	Df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz		Probanden mit neg. Steigung (%)
						Untere	Obere	
oben	-12.99	-3.24	14	.006	-12.99	-21.61	-4.38	13 (87%)
rechts	-11.28	-3.26	14	.006	-11.28	-18.69	-3.87	13 (87%)
unten	-16.04	-4.12	14	.001	-16.04	-24.39	-7.69	15 (100%)
links	-13.64	-3.35	14	.005	-13.64	-22.38	-4.90	12 (80%)

Tab. 2: Vergleich der SNARC-Steigungen mit null auf den vier Positionen. Reaktionszeitdaten des fMRT-Experiments der insgesamt 15 Probanden.

Die SNARC-Steigung für jede der vier Positionen wurde mittels t-Tests für zwei abhängige Stichproben verglichen. Nach Bonferroni-Korrektur zeigten sich mit Signifikanzniveau bei $p=0.0083$ keine signifikanten Unterschiede auf den vier Positionen. Die t-Werte bewegten sich zwischen $t(14)=-2.22$ bis $t(14)=1.54$ und die p-Werte zwischen $p=0.043$ und $p=0.75$.

5.1.2.2 Perzentil-Analyse

Die Mittelwerte der Reaktionszeiten unterhalb und oberhalb des Median wurden nach oben beschriebener Methode für jeden Stimulus bestimmt und die SNARC-Steigungen berechnet. Die SNARC-Steigungen für Reaktionszeiten unterhalb und oberhalb des Median wurden für die vier Positionen in einem 2-faktoriellen varianzanalytischen Modell mit Messwiederholungen für die Faktoren Quantil (unterhalb, oberhalb des Median) und Position (oben, rechts, unten, links) analysiert. Die SNARC-Steigung war wesentlich größer für Antworten oberhalb des Median (-17.86ms) als für diejenigen unterhalb (-8.01ms). Der Haupteffekt des Quantils war entsprechend sehr signifikant ($F(1,14)=20.29$; $p<0.001$). Weder

der Haupteffekt der Position ($F(3,42)=1.94$; n.s.) noch der Interaktionseffekt Quantil $\times$ Position ($F(3,42)=0.03$; n.s.) erreichten das Signifikanzniveau von $p=0.05$.

Um spezifischer für die Positionen rechts und links zu testen, wurde (wie oben für die Daten des Reaktionszeitexperiments beschrieben) ein zweites varianzanalytisches Modell mit den Faktoren Quantil (unterhalb, oberhalb des Median) und Position (rechts, links) berechnet. Der Haupteffekt Quantil war signifikant ($F(1,14)=16.32$; $p=0.001$). Die SNARC-Steigung war wesentlich größer für Antworten oberhalb des Median (-16.58ms) als für diejenigen unterhalb (-7.60ms). Die Effekte Position ($F(1,14)=1.16$) und die Interaktion von Quantil $\times$ Position ($F(1,14)=0.008$) erreichten aber keine Signifikanz.

5.1.2.3 Fehleranalyse

Entsprechend der Analyse der Reaktionszeiten wurde auch eine Varianzanalyse der Fehlerraten aller Bedingungen durchgeführt. Wie bei der Fehleranalyse der Daten des Reaktionszeitexperiments beschrieben erfolgte auch hier die Transformation der relativen Fehlerhäufigkeiten zur Anpassung an eine Normalverteilung.

Der Haupteffekt der Position verfehlte deutlich das Signifikanzniveau von $p=0.05$. Auch der Haupteffekt der antwortenden Hand ($F(1,14)=0.31$; $p=0.588$) und der Zahlengröße ($F(1,14)=0.11$; $p=0.743$) waren nicht signifikant. Als einziger Haupteffekt erreichte die Distanz zur 5 Signifikanz ($F(1,14)=6.43$; $p=0.024$), wobei 4.4% der Antworten auf Zahlen nah am Standard fehlerhaft waren aber nur 3.3% der Antworten auf weit vom Standard gelegene. Mit $F(3,42)=2.75$; $p=0.054$ verfehlte die Interaktion von Position und Hand das Signifikanzniveau von $p=0.05$ knapp. Dabei wurden allein auf der rechten Position mit der linken Hand mehr Fehler gemacht als mit der rechten (4.1% mit links und 3.0% mit rechts), während auf allen anderen Positionen mit rechts fehlerhafter als mit links geantwortet wurde (Differenzen von 0.4%-Punkten oben, 0.9%-Punkten unten und 2.0%-Punkten links und damit am stärksten ausgeprägt). Als Indikator für den SNARC-Effekt wurde die Interaktion von Zahlengröße und Antworthand mit $F(1,14)=5.03$; $p=0.042$ signifikant. Es zeigten sich größere Fehlerhäufigkeiten bei Reaktion der rechten Hand auf kleine Zahlen (4.8%) als auf größere (3.4%) und umgekehrte Verhältnisse für die linke Hand (Fehlerhäufigkeiten von 2.5% für kleinere und 4.6% für größere Zahlen). Weiterhin war die Interaktion von Position und der Distanz zur 5 signifikant ($F(3,42)=4.20$; $p=0.011$). Auf der oberen Position wurde auf Zahlen nah am Standard weniger fehlerhaft (3.8%) geantwortet als auf die weiter davon entfernten (4.6%). Auf den anderen Positionen verhielt es sich, deutlich vor allem unten und links,

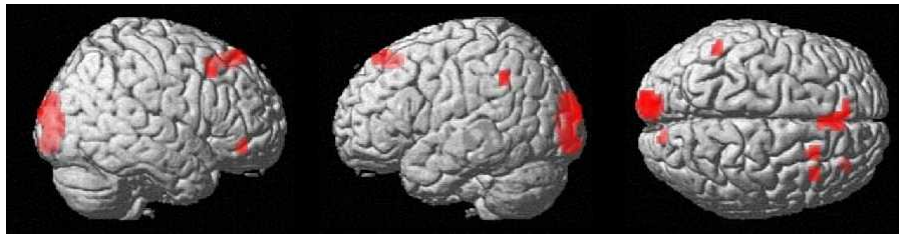
andersherum (weniger fehlerhaft auf Zahlen weit vom Standard, und zwar rechts 0.8%-Punkte, unten 1.9%-Punkte und links 2.3%-Punkte). Auch die Interaktion von Position, Zahlengröße und Distanz zur 5 wurde mit $F(3,42)=4.20$; $p=0.011$ signifikant. Dabei wurde nur auf der oberen Position auf große, weit vom Standard gelegene Zahlen fehlerhafter geantwortet als auf große Zahlen nah am Standard (5.5% bzw. 2.6%). In allen anderen Fällen wurde auf standardnahe Zahlen fehlerhafter geantwortet als auf standardferne (Differenzen bewegten sich zwischen 0.5- und 3.6%-Punkten). Zuletzt war noch der Effekt der Interaktion von Antworthand, Zahlengröße und Distanz zur 5 signifikant ($F(1,14)=5.42$; $p=0.035$). Es zeigte sich mit der rechten Hand für große Zahlen ein stärkerer Effekt der Distanz (1.4%-Punkte weniger Fehler für standardweite Zahlen als für standardnahe) als für kleinere Zahlen (nur 0.5%-Punkte Unterschied in gleicher Richtung). Andersherum war mit der linken Hand der Effekt der Distanz nur bei den kleinen Zahlen deutlich ausgeprägt (2.3%-Punkte weniger Fehler auf Zahlen weit vom Standard), während für größere Zahlen nur 0.4%-Punkte weniger Fehler auf standardweite Zahlen gemacht wurden.

5.2 Ergebnisse fMRT

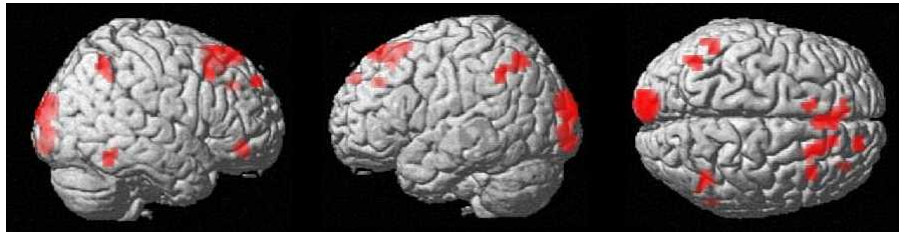
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der fMRT- Messungen vorgestellt. In der Regel wurde für die Ermittlung der Aktivierungen bezüglich der einzelnen (Kontrast-)Effekte ein Signifikanzniveau von $p=0.001$ pro Voxel mit einer Clustergröße von $k=10$ Voxel verwendet. An einigen Stellen wurden weniger strenge Niveaus berücksichtigt, worauf aber jeweils hingewiesen wird. Neben der üblichen kategorialen statistischen Auswertung wurde bei bestimmten Kontrasten zusätzlich eine parametrische Auswertung durchgeführt, was eine direkte Analyse der Veränderung des fMRT Signals in Abhängigkeit von Stimuluseigenschaften wie Zahlengröße oder Distanzen möglich macht.

Zuerst erfolgt die bildliche Darstellung der wichtigsten Aktivierungen. Die dabei angegebenen teils abweichenden Signifikanzniveaus wurden nur zum Zweck einer optimalen und übersichtlichen Darstellung gewählt. Im Anschluss daran folgt die genaue Beschreibung der einzelnen Kontraste in tabellarischer Form. In den Aktivierungstabellen sind die Aktivierungen, die auch nach strenger FDR-Korrektur das Niveau von 0.05 unterschreiten, zur besonderen Kennzeichnung fett gedruckt.

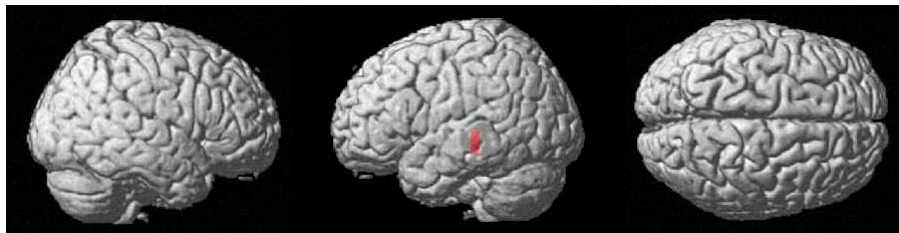
Kontrast



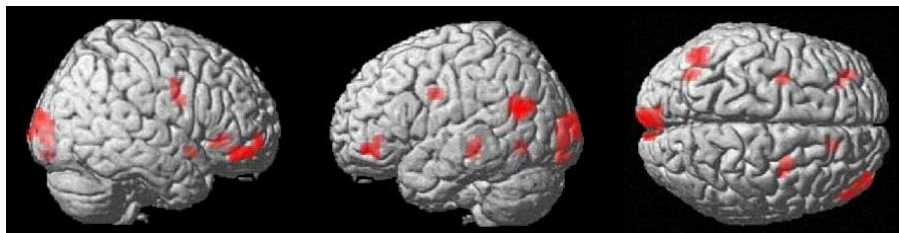
Nah am Standard - weit vom Standard



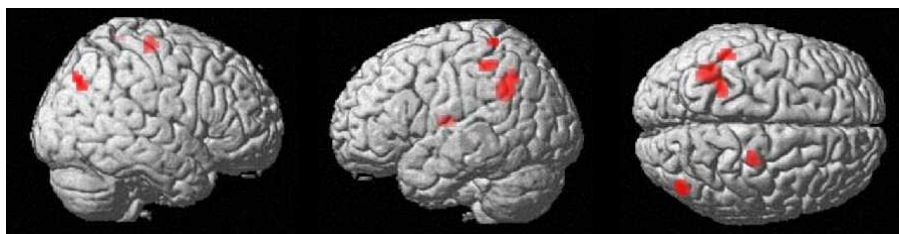
Distanz vom Standard,
parametrisch



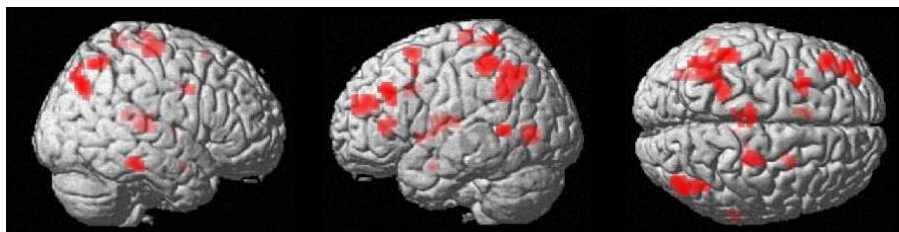
Größer 5 - kleiner 5



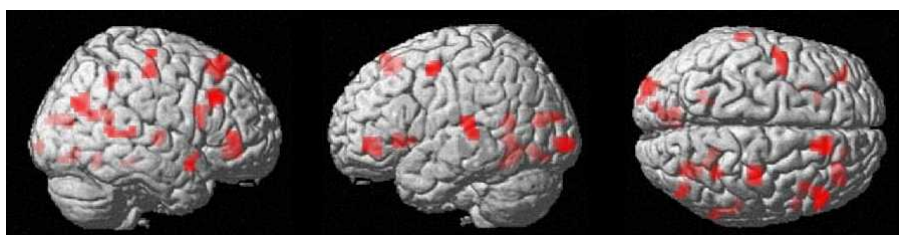
Zahlengröße, parametrisch



Kleiner 5 - größer 5 (#)



Kleiner 5 - größer 5 (\$)



SNARC-Effekt

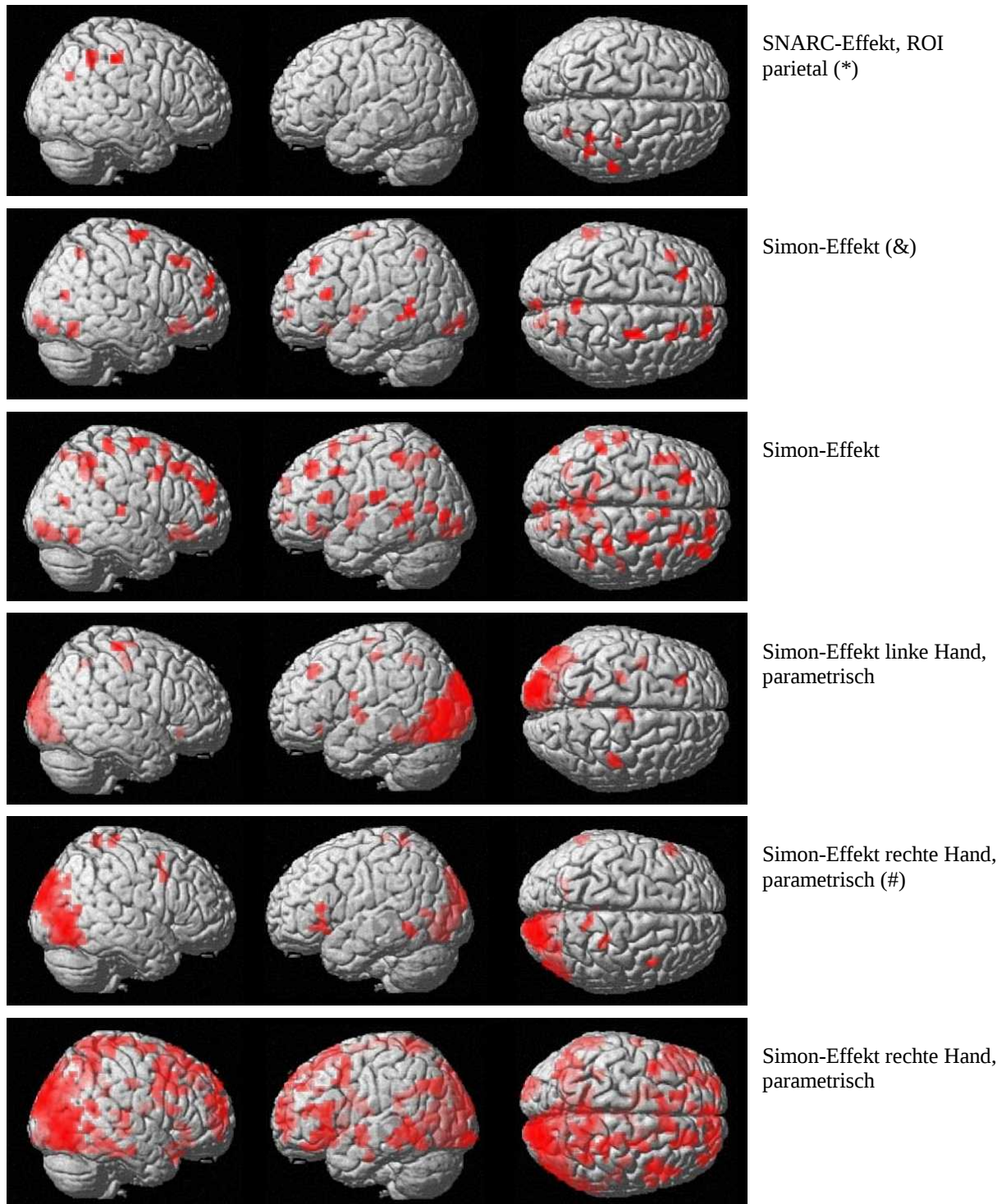


Abb. 8: Ergebnisse der fMRT nach Kontrasten mit $p < 0.01$ und $k = 10$. Zur besseren Darstellung und Visualisierung der aufgetretenen Aktivierungen wurden die Signifikanzniveaus teilweise variiert: #: $p < 0.001$ und $k = 10$. \$: $p < 0.005$ und $k = 10$. *: $p < 0.01$ und $k = 5$. &: $p < 0.005$ und $k = 15$.

5.2.1 Häodynamische Korrelate der Distanz vom Standard

5.2.1.1 „Nah zum Standard versus fern vom Standard“

Der Haupteffekt der Distanz vom Standard ergibt sich aus den Aktivierungen, die bei Zahlen nah des Standards auftreten, abzüglich der Aktivierungen bei Zahlen fern des Standards.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Anteriores Cingulum, nach links reichend (*)		32/8	3, 29, 46	3.83	58
Parietal					
Gyrus parietalis inf., Sulcus intraparietalis (*)	l	40	-48, -45, 35	6.93	13
Intraparietaler sulcus, hIPS (\$)	r	40	42, -53, 47	3.43	7
Intraparietaler sulcus, hIPS (\$)	l	40	-39, -59, 50	3.27	5
Okzipital					
Sekundäre und tertiäre Sehrinde (#)	l	19, (18)	-9, -89, 27	6.84	21
	l	18	-12, -98, 16	4.40	Nebenmax.
Primäre Sehrinde (#)	l	17	-12, -90, 5	4.55	14
Primäre und sekundäre Sehrinde (*)	r	17, (18)	15, -84, 7	3.20	16
	r	18	12, -84, 15	3.14	Nebenmax.

Tab. 3: Aktivierungen für den Effekt „nah zum Standard versus fern vom Standard“ mit Angabe der angewandten statistischen Parameter. #: $p=0.001$ pro Voxel und $k=10$; *: $p=0.01$ und $k=10$; \$: $p=0.01$ und $k=5$.

Daneben wurden in der kategorialen Auswertung Aktivierungsmaxima im rechten superioren und mittleren Gyrus frontalis, entsprechend BA 8 und BA 11, und linkseitig im superioren frontalen Gyrus (BA 8) festgestellt.

In der parametrischen Auswertung des entsprechenden Kontrasts, der ebenfalls den Einfluss abnehmender Distanz zum Standard beschreibt, zeigten sich folgende Aktivierungen.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus frontalis superior	r	8	18, 35, 54	3.70	13
Anteriores Cingulum	r	8	3, 26, 48	4.20	15
Parietal					
Intraparietaler sulcus	r	40	42, -53, 47	4.15	12
	r	40	45, -47, 41	3.07	Nebenmax.
Intraparietaler sulcus, anterior	l	40	-48, -45, 35	4.79	10
Intraparietaler sulcus, posterior	l	40	-39, -59, 47	3.86	12
Okzipital					
Sekundäre und tertiäre visuelle Areale	l	19, 18	-9, -89, 24	6.22	102

Tab. 4: Aktivierungen für den Effekt „nah zum Standard versus fern vom Standard“ in parametrischer Auswertung. Alle mit $p=0.005$ und $k=10$.

5.2.2 Hämodynamische Korrelate der Zahlengröße

5.2.2.1 „Zahlen größer 5 versus Zahlen kleiner 5“

Der Haupteffekt der Zahlengröße beschreibt diejenigen Areale, die bei größeren Zahlen stärker als bei kleineren aktiv waren. Hier ergaben sich mit oben genanntem Signifikanzniveau keine Aktivierungen. Mit niedrigeren statistischen Parametern von $p=0.01$ und $k=5$ ergab sich Aktivierung im Kopfbereich des linken Nucleus Caudatus $[-33, -29, -4]$ ($k=14$; $t(15)=3.79$).

5.2.2.2 „Zahlen kleiner 5 versus Zahlen größer 5“

Dieser Effekt beschreibt den umgekehrten Sachverhalt des vorangegangenen Kontrasts. Auf dem üblichen statistischen Niveau traten folgende Aktivierungen auf.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus precentralis	r	4	24, -20, 59	5.16	12
Parietal					
Gyrus parietalis inferior, tiefer intraparietaler Sulcus oder evtl. Gyrus angularis	l	40	-36, -51, 33	7.16	55
Gyrus parietalis inferior	l	40	-48, -35, 49	4.35	10
Gyrus parietalis inferior	r	39	45, -68, 39	4.67	14
Gyrus postcentralis	l	5	-27, -40, 66	5.02	11
Subkortikal					
Putamen	l		-21, -11, 9	4.51	13

Tab. 5: Aktivierungen für den Effekt „Zahlen kleiner 5 versus Zahlen größer 5“. Alle mit $p=0.001$ und $k=10$.

5.2.2.3 „Zahlengröße“ in parametrischer Auswertung

Bei Berechnung mit den üblichen statistischen Parametern fand sich in diesem Kontrast, der Aktivierungen mit ansteigender Zahlengröße beschreibt, lediglich ein Cluster, so dass auch Aktivierungen mit signifikanter Aktivierung bei weniger strengen Kriterien beschrieben werden.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus frontalis inferior (*)	r	47	50, 40, -15	3.91	10
Anteriores Cingulum (*)	r		12, 29, -6	4.75	14
Okzipital					
Prim. und sek. Sehrinde, nach links reichend (*)		17, 18	3, -93, 18	3.81	32
Temporal					
Gyrus temporalis medius (#)	l	39	-45, -63, 22	6.56	10
Subkortikal					
Limbisches System, Ncl. caudatus (Schwanz) (*)	l		-33, -29, -4	4.99	18

Tab. 6: Aktivierung für den Effekt „Zahlengröße“ in parametrischer Auswertung. #: $p=0.001$ und $k=10$; *: $p=0.005$ und $k=10$.

5.2.3 Hämodynamische Korrelate des SNARC-Effekts

In den folgenden Kontrasten wird der SNARC-Effekt mit Hilfe derjenigen Aktivierungen beschrieben, die bei SNARC-inkongruenten Bedingungen (also Antworten der rechten Hand auf relativ kleine Zahlen oder der linken Hand auf größere) stärker als bei kongruenten (z.B. rechte Hand auf größere Zahlen) auftreten.

5.2.3.1 SNARC-Effekt beider Hände

Es zeigten sich keine signifikanten Aktivierungen mit $p=0.001$ und $k=10$. Mit weniger strengen statistischen Grenzen von $p=0.005$ und $k=10$ fanden sich folgende Aktivierungen.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus frontalis medius	r	9	48, 28, 29	5.53	15
Gyrus frontalis superior	r	8	15, 31, 43	3.93	18
Gyrus precentralis	r	4	30, -18, 45	4.05	13
Okzipital					
Sekundäre Sehrinde	l	18	-27, -93, 5	3.51	10
Temporal					
Gyrus temporalis superior	l	42	-65, -29, 10	4.35	10
Cerebellum					
Cerebellum			-3, -56, -5	4.48	30

Tab. 7: Aktivierung für den Effekt „SNARC-Effekt beider Hände“, alle mit $p=0.005$ und $k=10$.

Mit der Frage nach Aktivierung im Bereich des IPS wurde bei einer Region of Interest (ROI-) Analyse der Parietalregion, die mit wiederum liberaleren Parametern ($p=0.01$ und $k=5$) durchgeführt wurde, folgende Ergebnisse gewonnen.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Parietal					
Intraparietaler Sulcus	r	40	33, -44, 44	4.08	11
Intraparietaler Sulcus	r	40	45, -44, 49	3.34	9
Gyrus postcentralis	r	2	59, -24, 43	4.02	9
Gyrus postcentralis	r	3	33, -21, 45	3.19	7
Precuneus	r	7	27, -62, 34	2.97	7

Tab. 8: Aktivierung für den Effekt „SNARC-Effekt beider Hände“, ROI parietal. Alle mit $p=0.01$ und $k=5$.

Aktivierungen im Bereich des linken IPS zeigten sich auch bei weiter abgesenkten Signifikanzniveaus nicht.

5.2.3.2 SNARC-Effekt der rechten Hand

Der SNARC-Effekt wurde nachfolgend auch für beide Hände getrennt untersucht. Die Aktivierungen des SNARC-Effekts der rechten Hand in kategorialer Auswertung werden zuerst dargestellt.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus frontalis medius (#)	r	9	48, 28, 29	6.49	18
Gyrus frontalis superior (*)	r	6	18, 32, 54	3.78	29
- Anteriores Cingulum (*)	r	32	12, 20, 46	3.35	Nebenmax.
Gyrus frontalis medius (*)	l	9	-48, 31, 29	5.33	44
Gyrus frontalis inferior (*)	l	10	-39, 42, 17	3.89	10
Gyrus precentralis (*)	l	6	-48, 2, 44	3.51	15
Parietal					
Gyrus parietalis superior (*)	r	7, 40	33, -44, 44	4.60	45
- bis in intraparietalen Sulcus reichend (*)	r	40	45, -44, 49	4.45	Nebenmax.
Gyrus parietalis superior (*)	l	7	-30, -64, 58	4.92	21
Gyrus postcentralis (*)	r	2	59, -24, 43	2.92	17
Gyrus cinguli (*)	r	31	12, -39, 27	3.83	12
posteriores Cingulum (*)	l		-21, -55, 14	4.07	11
Okzipital					
Sekundäre Sehrinde (*)	l	18	-27, -90, 2	4.08	24
Temporal					
Gyrus temporalis superior (*)	r	22	53, 8, -13	4.23	39
Parahippocampal (*)	l	30	-15 -35, -6	3.77	16

Subkortikal					
Cerebellum (#)			-3, -50, -13	5.23	22
Cerebellum (*)			6, -36, -13	4.94	13
Putamen (#)	l		-21, 20, -1	4.96	21
Thalamus (*)	r		18, -14, 3	5.50	61
Thalamus (*)	l		-15, -17, 6	3.78	26

Tab. 9: Aktivierungen für den Effekt „SNARC-Effekt der rechten Hand“ in kategorialer Auswertung.
#: p=0.001 und k=10; *: p=0.005 und k=10.

5.2.3.3 SNARC-Effekt der linken Hand

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus frontalis superior (#)	r	8	15, 31, 43	3.72	10
Parietal					
Intraparietaler Sulcus (*)	r	40	33, -45, 41	3.18	6
Okzipital					
Sekundäre Sehrinde (#)	l	18	-6, -79, -4	3.74	13

Tab. 10: Aktivierungen für den Effekt „SNARC-Effekt der linken Hand“ in kategorialer Auswertung.
#: p=0.005 und k=10; *: ROI-Analyse parietal mit p=0.01 und k=5.

5.2.4 Hämodynamische Korrelate des Simon-Effekts

Die folgenden Kontraste beschreiben den Simon-Effekt, also die Aktivierungen, die bei Simon- inkongruenten Bedingungen stärker als bei Simon- kongruenten ausgeprägt waren. Zuerst wird der Simon- Kontrast für beide Antworthände in kategorialer Auswertung beschrieben.

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Dorsolateral präfrontaler Kortex (#)	l	45, 46	-42, 24, 15	5.55	18
Dorsolateral präfrontaler Kortex (#)	l	9	-27, 37, 34	3.82	16
Gyrus frontalis superior (#)	r	6	24, -3, 61	5.09	24
Gyrus frontalis medius (#)	r	10	9, 55, -3	4.59	18
Gyrus frontalis medius (#)	r	10	21, 56, 22	4.49	19
Frontales Augenfeld (#)	r	8	27, 28, 40	4.75	17
Gyrus frontalis inferior (#)	r	47	15, 20, -14	3.72	24
- ins anteriore Cingulum reichend (#)	r	32	12, 31, -12	3.52	Nebenmax.
- bis subcallosal reichend (#)	r	25	6, 20, -11	3.29	Nebenmax.
Parietal					
Precuneus (#)		7	3, -53, 50	4.21	17
Intraparietaler Sulcus (*)	r	40	42, -47, 47	4.01	31
Okzipital					
Sulcus parietooccipitalis (*)	r	31	21, -69, 20	4.84	15
Primäre Sehrinde (*)	r	17	18, -88, -3	4.46	27
Primäre Sehrinde (*)		17	0, -90, -3	4.46	19
Temporal					
Gyrus temporalis medius (*)	l	21, 22	-62, -38, -1	4.39	20
Gyrus fusiformis (*)	r	37	36, -62, -7	4.16	18

Subkortikal					
Putamen (*)	l		-27, -3, 6	3.76	21

Tab. 11: Aktivierungen für den Effekt „Simon-inkongruent versus Simon-kongruent“ in kategorialer Auswertung. #: p=0.001 und k=10; *: p=0.01 und k=10.

5.2.4.1 Simon-Effekt der rechten Hand in parametrischer Auswertung

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus frontalis medius (#)	r	6, (8)	45, 8, 47	4.99	15
Gyrus frontalis inferior (#)	l	45	-53, 24, 10	4.96	29
Dorsolateral präfrontaler Kortex (*)	l	46	-39, 30, 10	5.11	130
Dorsolateral präfrontaler Kortex (*)	r	46, 9	48, 25, 26	3.64	10
Gyrus frontalis superior (*)	l	9	-3, 57, 33	4.37	34
Gyrus frontalis superior et medius (*)	l	9	-39, 11, 35	4.52	29
Parietal					
Gyrus postcentralis (#)	r	4	9, -40, 66	5.18	18
Gyrus postcentralis (#)	r	3	30, -32, 62	4.69	11
Intraparietaler Sulcus (*)	r	40	39, -44, 49	5.14	27
Gyrus supramarginalis (*)	r	39	59, -49, 19	3.65	13
Okzipital					
Prim., sekundäre u. tertiäre Sehrinde (#)	r	17, 18, 19	21, -92, 21	11.17	1121
Posteriores Cingulum / prim. Sehrinde (#)	l	30/17	-15, -61, 11	4.74	16
Precuneus (*)	l	19	-33, -68, 39	5.06	35

Temporal					
Gyrus temporalis medius (#)	l	21	-62, -50, -3	5.11	15

Tab. 12: Aktivierungen für den Effekt „Simon-Effekt der rechten Hand“ in parametrischer Auswertung. Fett gedruckte Aktivierungen unterschreiten auch nach strengerer FDR-Korrektur das Niveau von 0.05. #: $p=0.001$ und $k=10$; *: $p=0.005$ und $k=10$.

5.2.4.2 Simon-Effekt der linken Hand in parametrischer Auswertung

Region	Seite	BA	Talairach-Koord. x, y, z	t-Wert	Clustergröße
Frontal					
Gyrus frontalis superior (*)	l	8	-21, 31, 37	3.98	23
Anteriores Cingulum (*)	l	32	-3, 26, -9	3.91	10
Gyrus frontalis superior (*)		6	3, -14, 64	3.38	10
Gyrus precentralis (*)	l	6	-27, -18, 51	3.34	10
Parietal					
Precuneus links (*)	l	7	-12, -44, 49	4.68	19
Posteriores Cingulum (*)	r	31	6, -15, 45	4.11	16
Gyrus postcentralis (*)	r	3	48, -20, 59	4.95	15
Okzipital					
Primäre und sekundäre Sehrinde (#)	l	17, 18	-6, -84, 4	8.63	415
Sekundäre und tertiäre Sehrinde (#)	l	19, 18	-48, -81, 10	8.11	85
Temporal					
Insula (*)	l	13	-39, 1, 17	3.66	11

Tab. 13: Aktivierungen für den Effekt „Simon-Effekt der linken Hand“ in parametrischer Auswertung. Fett gedruckte Aktivierungen unterschreiten auch nach strengerer FDR-Korrektur das Niveau von 0.05. #: $p=0.001$ und $k=10$; *: $p=0.01$ und $k=10$.

6 Diskussion

Zuerst werden die Ergebnisse der Reaktionszeitanalyse diskutiert, wobei besonders die räumlichen Aspekte der Zahlenverarbeitung untersucht werden. Es stehen der Distanz- und der SNARC (Spatial Numerical Association of Response Codes)-Effekt als Zahlengrößenphänomene, der Simon-Effekt als räumliche RAK (Reiz-Antwort-Kompatibilität) und deren Interaktionen im Mittelpunkt. Danach folgt die Interpretation und Einordnung der Ergebnisse des bildgebenden Teils der Dissertation. Es wurde mittels fMRT (funktioneller Magnetresonanztomographie) eine kombinierte Simon- und SNARC-Aufgabe untersucht, so dass die neuronalen Korrelaten dieser Effekte im Mittelpunkt stehen. Als Studie zur Zahlenverarbeitung kommt darüber hinaus den Aktivierungen im Bereich des parietalen Kortex große Bedeutung zu.

6.1 Ergebnisse der Reaktionszeitanalyse

Bei den im Folgenden beschriebenen Daten handelt es sich um die Verhaltensdaten des reinen Reaktionszeitexperiments. Die Reaktionszeitdaten, die zusätzlich während des fMRT- Teils aufgezeichnet wurden, zeigten bei allen beschriebenen Beobachtungen keine relevanten Unterschiede zu den Daten des reinen Reaktionszeitexperiments. Die Reaktionszeiten der fMRT- Messung waren deutlich langsamer und weniger fehlerhaft als die des Reaktionszeitexperiments. Davon abgesehen fielen einige Effekte weniger deutlich aus. Dies ist einerseits durch die unterschiedlichen Bedingungen während der MRT- Messung zu erklären, wie z.B. Ablenkung durch die Lautstärke des Tomographen, die ungemütliche Lagerung und die andersartige Präsentation der Stimuli über eine Videobrille. Darüber hinaus kann auch die Änderung des Bezugsrahmens im Liegen im Vergleich zum aufrechten Sitzen vor dem Bildschirm von Bedeutung sein. Besonders für die Dimension der Stimuluspositionen oben und unten spielt dies sicher eine Rolle, da sich die entsprechende Achse von der Vertikalen in die Horizontale verschiebt. Es ist gut vorstellbar, dass dies die räumliche Zahlengrößenverarbeitung entscheidend beeinflusst. Außerdem wurden die Stimuli im MRT in einer langsameren Abfolge präsentiert, was zur Gewinnung der funktionellen Bilddaten erforderlich war. Insgesamt lagen während der fMRT- Messung sicherlich weniger gute Bedingungen zur Gewinnung von unverfälschten Verhaltensdaten vor als während des

reinen Reaktionszeitexperimenten, so dass die Verhaltensdaten der fMRT- Messung hier nicht weiter besprochen werden.

Wie erwartet zeigte sich zwischen rechter und linker Hand kein signifikanter Unterschied der Reaktionszeiten. Auf Stimuli, die auf der horizontalen Achse präsentiert wurden (also auf der rechten und linken Position), wurde schneller reagiert als auf die Positionen oben und unten. Dies kann daran liegen, dass die Dimension links/rechts mit der Zahlengröße automatischer assoziiert ist als die Dimension oben/unten, wie von Müller und Schwarz (2007) beschrieben. Außerdem ist denkbar, dass sich die Aufmerksamkeit durch das zwischen den Stimuli eingeblendete Fixationskreuz auf die horizontal in der Mitte des Bildschirms liegende „Zeile“ (bestehend aus Position rechts, links und dem Fixationskreuz) richtet und damit auf die beim Lesen gebräuchliche horizontale Dimension.

Schwach signifikant wurde auf kleinere Zahlen schneller als auf größere reagiert, was durch die Eigenschaft der Problemgröße zu erklären ist. Dies entspricht auch den Ergebnissen von Nieder und Mitarbeitern (2003), die mit Hilfe von Einzelzelleableitungen im Primatenkortex zeigen konnten, dass kleine Zahlen genauer von den zugehörigen Neuronengruppen repräsentiert werden als größere Zahlen. Auf das menschliche Gehirn übertragen würde man annehmen, dass eine exakter repräsentierte Größe leichter zu enkodieren ist, was zu schnelleren Reaktionszeiten führt.

6.1.1 Der Distanzeffekt und räumliche Interaktionen

Ebenfalls erwarteten wir in einer Aufgabe, die einen Größenvergleich verlangt, einen deutlichen Distanzeffekt (Moyer & Landauer, 1967), den wir über alle Bedingungen hochsignifikant nachweisen konnten.

Es konnte außerdem erstmals eine signifikante Interaktion von Stimulusposition und Distanzeffekt gezeigt werden, wobei auf den Positionen oben und rechts ein stärkerer Distanzeffekt zu finden war als auf den beiden anderen. Dies würde auf eine stärkere Aktivierung des mentalen Zahlenstrahls (MZS) durch die räumliche Kodierung von rechtsseitigen Stimuli hinweisen. Es scheint also ein Fazilitierungseffekt vorzuliegen, durch den der Raum (also bereits auf der Ebene der Stimulusverarbeitung) die numerische Verarbeitung beeinflusst; die rechtseitige Stimulusposition führt zu einer vermehrten Aktivierung der semantischen Zahlengrößenverarbeitung und so zu einem verstärkten Distanzeffekt.

Besonders interessant ist dabei, dass der Distanzeffekt auf der linken Position vor allem für kleine Zahlen stärker ausgeprägt war als für große, während sich auf den anderen drei Positionen tendenziell umgekehrte Verhältnisse zeigten. Bei Betrachtung der beiden lateralen Positionen zeigt sich also eine starke Interaktion zwischen dem MZS und der Position der Stimuli im Raum.

Es ergab sich ein ausgeprägter und stark signifikanter Distanzeffekt, wenn die Position des Stimulus auf dem Computerbildschirm und seine Position auf dem mentalen Zahlenstrahl kongruent waren (große Zahlen rechts bzw. kleine Zahlen links), bei Inkongruenz war der Distanzeffekt schwächer ausgeprägt (s. auch Abb. 6 im Ergebnisteil).

Das bedeutet also, dass es zur Interaktion von semantischer Position auf dem MZS und der Stimulusposition im Raum gekommen ist. Bei diesem Fazilitierungseffekt erleichtert die Stimulusposition im Raum die Zahlengrößenverarbeitung, wenn sie zur Position des Stimulus auf dem MZS kongruent ist.

Für eine solche Interaktion des MZS mit einer stimulusbedingten räumlichen Kodierung gibt es weitere Anhaltspunkte. Fischer, Castel, Dodd und Pratt (2003) benutzten Zahlen als Hinweisreiz für nicht-semantische Stimuli, wobei kleine Zahlen das Erkennen von Stimuli auf der linken Seite erleichterten und große Zahlen die rechtseitigen. Die Aktivierung des MZS scheint also die visuelle Detektion zu erleichtern. Auch anhand des SNARC-Effekts wurde gezeigt (diese Arbeit; Wood (2005) Studie 2), dass es zur Interaktion kommt. Es ergab sich ein größerer SNARC-Effekt bei rechtsseitigen als bei linksseitigen Stimuli.

Zusätzlich zeigte sich auch, dass sich bei Kongruenz von Antworthand und Lage der Zahl auf dem MZS ein größerer Distanzeffekt ergibt als bei Inkongruenz. Allerdings ist hier zu beachten, dass durch die kleine Anzahl der verwendeten Stimuli möglicherweise andere Stimuluseigenschaften relativ großen Einfluss erhalten. In Bedingungen, in denen z.B. der Distanzeffekt größerer und kleinerer Zahlen beschrieben wird, besteht jeder Faktor nur aus einem einzigen Stimulus, von dem aus auf einen allgemeinen Effekt geschlossen wird.

Anhand des Distanzeffekts konnte also ein Fazilitierungseffekt nachgewiesen werden, der vor der Ebene der Antwortwahl durch laterale räumliche Position die semantische Zahlenverarbeitung beeinflusst.

6.1.2 Der SNARC-Effekt

Ein SNARC-Effekt (Dehaene et al., 1993) konnte sowohl über alle Bedingungen als auch auf jeder der einzelnen Positionen hoch signifikant nachgewiesen werden. Beim paarweisen Vergleich der SNARC-Steigungen der vier Positionen zeigten sich nach Bonferroni-Korrektur keine signifikanten Unterschiede. Bei dieser relativ konservativen Methode verfehlte der Vergleich von rechter und linker Position die Signifikanz allerdings nur sehr knapp. Dabei führten Stimuli auf der rechten Seite des Raumes zu einem stärkeren SNARC-Effekt als Stimuli auf der linken Seite (rechte Position = -13.8ms; linke Position = -9.73ms; $t(31)=-2.79$; $p=0.009$). Ähnlich wurde von Wood (2005, Studie 2) ein größerer SNARC-Effekt für rechtseitig als für linksseitig präsentierte Zahlen nachgewiesen. Anscheinend wird der MZS stärker vom rechten Antwortcode aktiviert als vom linken. Wie oben beschrieben war – als anderes Maß der semantischen Zahlenverarbeitung – auch der Distanzeffekt für Zahlen auf der rechten Position größer als für linksseitige (rechte Position = 29.7ms; linke Position = 17.8ms). Dieser Befund lässt sich nicht mit Hilfe des Triple-Code-Modells von Dehaene und Cohen (1995) erklären, da die Stimulusposition keinen Einfluss haben sollte. Das von Walsh (2003) vorgeschlagene ATOM Modell (*a theory of magnitude*) geht dagegen davon aus, dass es eine einzige abstrakte Größenrepräsentation für Zeit, Raum und Zahlensemantik gibt, was eine solche Interaktion stützen würde. Mit Blick auf das dual-route-Modell des SNARC-Effekts von Gevers und Mitarbeitern (2006) ergibt sich ebenfalls eine gewisse Differenz, obwohl das Modell eine Interaktion zwischen Aktivierung der Zahlengrößenverarbeitung und räumlichen Eigenschaften der numerischen Stimuli generell zulässt. Allerdings gehen Gevers und Mitarbeiter (2006) wie auch Keus, Jenks und Schwarz (2005) und Gevers und Mitarbeiter (2005) (die letzten beiden EEG-Studien) von einer Beschränkung des SNARC-Effekts auf die Phase der Antwortselektion aus, was mit dem in dieser Arbeit gezeigten Einfluss von räumlichen Stimuluseigenschaften nicht zu vereinbaren ist. Es kommt nämlich zur Fazilitierung der Aktivierung der Zahlengröße durch die Position der Stimuli zusätzlich zu der konventionellen Assoziierung von Zahlengröße und räumlicher Position der Antworten. Wie oben beschrieben kommt Fischer (2003) andererseits zu dem Ergebnis, dass es auch Assoziationen von Zahlengröße und Räumlichkeit gibt, die unabhängig von der Ebene der Antwortselektion sind.

Daneben ist dieser Einfluss von räumlichen Stimuluseigenschaften auf die Zahlengrößenverarbeitung auch von einer anderen Seite aus zu betrachten. Es kommt nämlich auch zu einer Interaktion von Simon-Effekt und semantischer Zahlengrößenverarbeitung in Abhängigkeit von der Kongruenz von räumlicher Stimulusposition und Zahlengröße. Bei

inkongruenter Position des Stimulus im Raum und seiner semantischen Position auf dem MZS wird der Simon-Effekt deutlich abgeschwächt, hier sogar umgekehrt. Notebaert und Mitarbeiter (2006) fanden in ihrem Experiment 3 ebenfalls eine Modulation des Simon-Effekts durch Kompatibilität bzw. Inkompatibilität in einer Größenvergleichsaufgabe. Dort zeigten Probanden in einer gemischten Simon- und Größenvergleichsaufgabe bei inkompatibler Zuordnung (mit der rechten Hand auf Zahlen kleiner 5 antworten und mit der linken auf größere) einen negativen Simon-Effekt. Die Ergebnisse dieser Dissertation bestärken den Schluss von Notebaert und Mitarbeitern (2006), dass sich die Verarbeitung der impliziten, durch Zahlen hervorgerufenen räumlichen Information mit den Repräsentationen des äußeren Raumes überschneidet.

Außerdem wurden die Reaktionszeiten im Hinblick auf den SNARC-Effekt in zwei Untergruppen (Reaktionszeiten größer und kleiner als der Median) untersucht. Dabei war der Effekt der Medianhalbierung hoch signifikant, die Position der Stimuli hatte in diesem Fall keinen Einfluss. Langsame Antworten, also diejenigen oberhalb des Medians, wiesen einen deutlich stärkeren SNARC-Effekt auf als die Gruppe schneller Antworten. Dies deckt sich mit vorangegangenen Studien (Gevers, Caessens & Fias, 2005; Mapelli, Rusconi, & Umiltà, 2003), die ebenfalls eine Zunahme des SNARC-Effekts mit zunehmender Reaktionszeit fanden. Bei den langsamen, vermutlich mit höherem kognitivem Aufwand verbundenen Antworten könnte eine stärkere Aktivierung der mentalen Zahlengrößenrepräsentation stattgefunden haben. Demnach würde die Kongruenz oder Inkongruenz von Antworthand und MZS- Position des Stimulus stärker ins Gewicht fallen und einen größeren SNARC-Effekt verursachen. Bei den schnell gegebenen Antworten wäre es vermutlich zu einer weniger intensiven Aktivierung der mentalen Zahlengrößenrepräsentation gekommen, so dass hier die Interaktionseffekte wie der SNARC-Effekt weniger stark zur Geltung kamen. Da nur eine relativ kleine Anzahl verschiedener Stimuli präsentiert wurde, ist es gut vorstellbar, dass ein Lerneffekt im Laufe des Versuchs dazu geführt hat, dass in vielen Fällen eine schnelle Antwort ohne im Vordergrund stehenden Größenvergleich und daher mit einer weniger starken Aktivierung der Zahlengrößenrepräsentation zustande kam. Um den Einfluss von räumlicher Position und Antwortgeschwindigkeit auf den SNARC-Effekt weiter zu untersuchen, wurden getrennt nur die Positionen rechts und links mit Hilfe der oben beschriebenen Aufteilung nach Medianhalbierung der Reaktionszeiten untersucht. Dabei zeigte sich ein hoch signifikanter Faktor „Medianhalbierung“ im oben bereits beschriebenen Sinne. Der Faktor „Position des Stimulus“ hatte keinen signifikanten Einfluss, allerdings war der Interaktionseffekt von Antwortgeschwindigkeit und Stimulusposition signifikant

nachweisbar. Es zeigte sich für die Gruppe schneller Antworten kein unterschiedlicher SNARC-Effekt auf rechter und linker Position. In der Gruppe der langsamen Antworten war der SNARC-Effekt allerdings auf der rechten Position deutlich stärker ausgeprägt als auf der linken. Dies wiederum würde mit der vorangegangenen Überlegung übereinstimmen, dass die Zahlengrößenverarbeitung stärker vom rechten als vom linken Antwortcode aktiviert wird. In der Gruppe der schnellen Antworten, in der es nur zu einer geringeren Interaktion mit der Zahlengrößenverarbeitung kam, war dementsprechend auch der Einfluss des Antwortcodes nicht signifikant. Bei starker Aktivierung des MZS dagegen, also in der Gruppe der langsamen Antworten, kommt die Interaktion von Zahlengrößenverarbeitung und Antwortcode deutlich zum Tragen.

Zu dem von Gevers und Mitarbeitern (2006) vorgeschlagenen dual-route-Modell ergibt sich aus diesen Daten möglicherweise auch eine weitere Differenz. Nach diesem Modell ist nämlich in einer Größenvergleichsaufgabe eher eine kategorielle Verteilung des SNARC-Effekts zu erwarten. Dies wird mit dem Vorliegen eines Distanzeffekts im Gegensatz zu einer Paritätsentscheidung begründet. In dieser Studie zeigte sich aber auf der linken Position trotz des geringsten Distanzeffekts die stärkste Ausprägung eines kategoriellen SNARC-Effekts, was zumindest der von Gevers und Mitarbeitern (2006) gewählten Argumentation widersprechen würde.

Außerdem zeigte sich eine Interaktion zwischen Position und Zahlengröße, die man als „perzeptuellen SNARC-Effekt“ beschreiben kann. Auf den Positionen links und unten wurden kleine Zahlen schneller beantwortet als größere, auf den anderen Positionen zeigte sich allerdings kein entsprechender Effekt. Dies kann auf eine Assoziation zwischen der räumlichen Position auf dem mentalen Zahlenstrahl und der Stimulusposition im Gesichtsfeld hinweisen.

6.1.3 Die Interaktion Zahlenverarbeitung und Simon-Effekt

Auch ein Simon-Effekt (Simon, 1969) ließ sich ausgeprägt nachweisen, wobei die rechte Hand außer mit der rechten Position auch (ähnlich stark) mit der oberen und (schwächer) mit der unteren Position assoziiert war. Auf Stimuli auf der linken Position wurde entsprechend deutlich schneller mit der linken Hand geantwortet. Der Raum, der im Sinne des Simon-Effekts mit der rechten Körperhälfte verknüpft ist, scheint sich also auch in vertikaler Richtung und vor allem nach oben auszubreiten, während mit der linken Hand allein Stimuli

im linken Blickfeld assoziiert waren. Eine mögliche Erklärung wäre hier, dass die Aufgabe „Größenvergleich“ bei den Probanden die Vorstellung eines mathematischen Koordinatensystems und damit die gemeinsame Kategorisierung von rechtem und oberem visuellen Raum bedingte. Dabei ist eine räumliche Assoziierung von oben/rechts und unten/links in der Literatur häufig beschrieben. Schwarz und Keus (2004) fanden z.B. mit Augenbewegungen als Antwortmodus eine Ausdehnung des SNARC-Effekts in die Vertikale, also eine Assoziierung des oberen Raumes mit größeren Zahlen und umgekehrt. Cho und Proctor haben in einer Übersichtsarbeit (2003) die Literatur zu orthogonalen Reiz-Antwort-Kompatibilitätseffekten zusammengefasst. Neben dieser Ausdehnung in die Vertikale ist der Simon-Effekt hier vor allem in Zusammenhang mit der Zahlengrößenverarbeitung untersucht worden, worauf im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

6.1.4 Die Interaktion von SNARC- und Simon-Effekt

Zusätzlich zum Auftreten beider einzelnen Effekte ließ sich auch eine Interaktion zwischen SNARC- und Simon-Effekt nachweisen, wobei sich in Simon-inkompatiblen Bedingungen ein schwächerer SNARC-Effekt als in den Simon-kompatiblen (SNARC-Steigungen -8.59ms bzw. -15.01ms) zeigte. Das bedeutet, dass in Simon-kongruenten Bedingungen eine stärkere Interferenz von Zahlengröße und Antwortcode stattfindet. Entweder könnte es zu einer stärkeren Aktivierung der Zahlengrößenverarbeitung kommen oder zu einem stärkeren Einfluss des aktivierten Antwortcodes. Dabei würde man im Falle einer stärkeren Aktivierung der Zahlengrößenverarbeitung vielleicht eher einen umgekehrten Effekt erwarten, so dass die Simon-Inkongruenz wegen des höheren kognitiven Aufwands, der vermehrten inhibitorischen Prozesse und der langsameren Reaktionszeiten zur Stärkung von Zahlengrößeneffekten führen würde. Mapelli und Mitarbeiter (2003) hatten keine Interaktion dieser beiden Effekte gefunden und gingen aufgrund des unterschiedlichen zeitlichen Verlaufs von unterschiedlichen räumlichen Repräsentationen aus. Bei längeren Reaktionszeiten kommt es nämlich wie oben beschrieben zu einer Verstärkung des SNARC- aber einer Abschwächung des Simon-Effekts (Hommel, 1993). Dagegen fanden Notebaert und Mitarbeiter (2006) eine SNARC-Simon-Interaktion, die der in dieser Arbeit beschriebenen entspricht. Sie konnten sogar eine Umkehr des SNARC-Effekts in Simon-inkompatiblen Bedingungen nachweisen und schließen aus dieser Interaktion auf eine zumindest teilweise gemeinsame räumliche Repräsentation. Dabei sehen sie den zeitlichen Verlauf von SNARC- und Simon-Effekt als unterschiedliche Geschwindigkeiten in Aktivierung und Deaktivierung ein und derselben

räumlichen Repräsentation. Die explizite räumliche Information im Sinne des Simon-Effekts würde zu schnellerer Aktivierung führen als die implizite des SNARC-Effekts. Ähnlich fanden auch Keus und Schwarz (2005) einen von der Kompatibilität der Simon-Aufgabe abhängigen SNARC-Effekt, wobei sie die Interaktion im Stadium der Antwortwahl annahmen. Ebenso kommen Gevers und Mitarbeiter auch mit Hilfe von EEG Messungen (2005, 2006) zu dem Schluss, dass sich beide Effekte mit gemeinsamem Ursprung in der Phase der Antwortwahl entwickeln. Die Annahme einer gemeinsamen räumlichen Repräsentation dieser beiden Effekte wird durch die Daten dieser Arbeit also gestützt.

6.2 Diskussion der fMRT- Daten

In dieser Arbeit, in der die Zahlenverarbeitung und ihre räumlichen Aspekte im Mittelpunkt stehen, werden mit Hilfe der fMRT die Hirnaktivierungsmuster von SNARC- und Simon-Effekt und deren Interaktion betrachtet. Die neuronalen Korrelate der verschiedenen Effekte können so untersucht, verglichen und mit den Ergebnissen der Verhaltensdaten in Bezug gebracht werden.

6.2.1 Korrelate der Zahlengrößenverarbeitung

Die Zahlengrößenverarbeitung zeigte wie erwartet Aktivierung im Bereich des intraparietalen Sulcus. Als Korrelat des Distanzeffekts war die Aktivierung um den linken IPS stärker ausgeprägt als die rechtsseitige, die erst unter Anwendung weniger strenger statistischer Kriterien nachweisbar war. In parametrischer Auswertung waren beidseitige parietale Aktivierungen um den IPS zu verzeichnen, ebenfalls linksseitig stärker ausgeprägt. Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan und Dehaene (2004) fanden als Korrelat der numerischen Distanz bei Betrachtung von Punktmustern wechselnder Punktanzahl als nichtsymbolischer Zahlennotation ebenfalls IPS Aktivierung, die bihemisphärisch, aber linksseitig geringfügig stärker ausgeprägt war. Schon Pinel und Mitarbeiter (2001) hatten beidseitige und notationsunabhängige (es wurden arabische Zahlen und Zahlwörter präsentiert) Aktivierungen um den IPS und Aktivierung des Precuneus rechts und links gefunden. Diese parietalen Aktivierungen zeigten eine enge Verbindung zum Distanzeffekt der Verhaltensdaten und außerdem ein gegenläufiges Verhältnis zur Distanz der verglichenen Zahlen (Hubbard et al., 2005). Die Tatsache, dass es um den linken IPS zu stärkerer Aktivierung als um den rechten kam, könnte ihre Ursache in der Sprachdominanz der linken Hemisphäre haben. So könnte es

durch die verbale Instruktion zu einer verstärkten Stimulus-Antwort-Verarbeitung in der für verbale Informationen bevorzugten linken Hemisphäre gekommen sein. Cohen Kadosh und Mitarbeiter (2007) untersuchten mit Hilfe der fMRT die Hemisphärenunterschiede der parietalen Aktivierungen bei Zahlengrößenverarbeitung. Sie gehen davon aus, dass der Kortex um den linken IPS unabhängig von der Stimulusnotation aktiviert wird, während das Gebiet um den rechten IPS nur auf arabische Notation reagierte. In unserem Fall bei ausschließlicher Verwendung einer Notation erklärt das jedoch nicht das Auftreten verstärkter linksseitiger Aktivierung, die also vermutlich auf die Sprachdominanz zurückzuführen ist.

Auch bei der Kontrastierung größerer mit kleineren Zahlen wäre mit zunehmender Zahlengröße eine stärkere Aktivierung der parietalen Regionen der semantischen Zahlenverarbeitung denkbar. So könnte der Kontrast „Zahlen größer 5 vs. Zahlen kleiner 5“ eine vermehrte Aktivierung der semantischen Zahlenverarbeitung im Sinne eines Problemgrößeneffektes (z.B. Miller, Perlmutter & Keating, 1984) zeigen. Da große Zahlen innerhalb eines Intervalls weniger genau repräsentiert werden als kleine (Nieder & Miller, 2004), bedeutet auch die Enkodierung und Diskriminierung größeren Aufwand, was sich auf Verhaltensebene als Problemgrößeneffekt widerspiegelt. Die hier verwendeten Zahlen beschränken sich zwar auf einen relativ geringen Bereich, aber wie schon Dehaene und Mitarbeiter (1993) fanden, werden die Intervalle, in denen Zahlengrößen verarbeitet werden, sehr schnell und flexibel definiert oder angepasst, so dass wegen der geringen Spanne der verwendeten Zahlen keine Einschränkung der Aussagekraft zu erwarten ist. Anders als erwartet, ergaben sich beim Kontrast „Zahlen größer 5 vs. Zahlen kleiner 5“ in dieser Studie allerdings keine relevanten Aktivierungsunterschiede.

Im umgekehrten Fall – also „Zahlen kleiner 5 vs. Zahlen größer 5“ – zeigte sich eine Reihe von stärker aktivierten Arealen. Zwei linksseitige Gebiete im parietalen Kortex, von denen eines mit [-36, -51, 33] möglicherweise tief im IPS lokalisiert ist oder aber im Bereich des linken Gyrus Angularis. Das zweite Areal liegt inferior parietal bei [-48, -35, 49]. In diesem Gebiet vermutet man das dem AIP des Affen entsprechende Areal (z.B. Simon et al., 2002), das bei Greifbewegungen der Hände involviert ist. In einigen Studien zur Zahlenverarbeitung wurde Aktivierung in diesem Gebiet beobachtet (Hubbard et al., 2005), was mit einer automatisierten Zahlen-Finger-Assoziation erklärt wird. Ein häufig vermuteter Ursprung dieser Assoziation ist das Fingerzählen. Rechtsseitig ergab sich ebenfalls parietale Aktivierung bei [45, -68, 39], die weit kaudal im IPS liegen könnte. Es scheint also, als ob kleinere Zahlen stärker zur Aktivierung der parietalen Areale der Zahlengrößenverarbeitung geführt hätten als größere. Eine Erklärung ist hier wieder die logarithmische Skalierung des

MZS (Moyer & Landauer, 1967; Nieder & Miller, 2004), die mit einer genaueren Repräsentation kleinerer Zahlen einhergeht. Der Kontrast „Zahlen kleiner 5 vs. Zahlen größer 5“ würde also möglicherweise weniger diffuse, genauer umschriebene und damit vermutlich stärkere Areale im parietalen Kortex aktivieren. Das wiederum könnte auch die geringere Aktivierung parietaler Regionen beim vorher beschriebenen entgegengesetzten Kontrast erklären.

In parametrischer Auswertung der Zahlengröße ergab sich eine Abhängigkeit der Aktivierungen von der numerischen Größe im dorsalen anterioren Cingulum. Diese Region wird mit Funktionen der Fehlererkennung, des Konfliktmonitorings oder des Belohnungssystems in Verbindung gebracht. Da in die fMRT-Daten auch alle falsch beantworteten trials eingingen und diese nicht aus der Analyse ausgeschlossen wurden, könnte die Aktivierung im ACC als Korrelat der Fehlerkorrektur auch alleine durch die Falschantworten zustande gekommen sein. Eine andere mögliche Erklärung wäre eine höhere Schwierigkeit bzw. Fehlerrate. Die Reaktionszeitdaten zeigten im fMRT allerdings keine signifikant unterschiedlichen Fehlerraten.

6.2.2 Korrelate des SNARC-Effekts

Mit der Frage nach neuronalen Entsprechungen des SNARC-Effekts wurden neben Aktivierungen im rechten frontalen und präzentralen Kortex und linken temporalen und okzipitalen Kortex auch im rechten parietalen Kortex Aktivierungscluster gefunden. Um den rechten intraparietalen Sulcus fanden sich zwei stärker aktivierte Regionen, während linkseitig keine Aktivierungen nachweisbar waren. In der nach Antworthand getrennten Analyse der SNARC-Effekte fanden sich für beide Hände Aktivierung nur um den rechten IPS, nicht aber linksseitig. Dabei waren die Aktivierungscluster für den SNARC-Effekt der rechten Hand signifikanter und größer. Dies könnte der oben beschriebenen Beobachtung entsprechen, dass der rechte Antwortcode den MZS stärker aktiviert als der linke.

Ob man hier überhaupt eine Aktivierung im Bereich des IPS im Sinne einer differentiellen Zahlenverarbeitung erwarten würde, ist allerdings auch fraglich, da bei einem so angelegten Effekt, der Aktivierungen SNARC-inkompatibler Ereignisse mit SNARC-kompatiblen kontrastiert, zum Beispiel Areale auftreten müssten, die für eine Suppression des kompatiblen Antwortcodes zuständig sind. Dass eine stärkere oder andersartige Aktivierung der Zahlengrößenverarbeitung folgt, lässt sich daraus nicht unbedingt ableiten. Eine IPS

Aktivierung könnte auch wie von Ansari, Fugelsang, Dhital und Venkatraman (2006) beschrieben bei der Antwortwahl entstanden sein. Sie hatten in einer fMRT-Studie versucht, die parietalen Korrelate von Zahlenverarbeitung und Antwortwahl voneinander zu trennen, wobei sie dem Gebiet um den IPS beide Funktionen zuschreiben. Eine alleinige Erklärung der Aktivierung durch Antwortwahlprozesse widerlegten ihre Ergebnisse jedoch. Sonst wäre die IPS-Aktivierung in Studien, die gar keine Antwortabgabe der Probanden fordern, (z.B. Piazza & Mitarbeiter, 2004; Eger & Mitarbeiter, 2003) auch nicht zu erklären.

In dieser Studie ließ sich also nur eine mäßige Aktivierung des IPS als SNARC-Korrelat zeigen. Andere kortikale Regionen wurden durch den SNARC-Effekt nicht selektiv aktiviert.

6.2.3 Korrelate des Simon-Effekts

Als Korrelat des Simon-Effekts zeigten sich in dieser Studie Aktivierungen im linken DLPFC, rechtsseitig im dorsalen ACC, in supplementär-motorischen Arealen rechts, in den frontalen Augenfeldern, im Precuneus und in visuellen okzipitalen Arealen. Dieses Muster deckt sich mit früheren bildgebenden Untersuchungen des Simon-Effekts, wie der von Liu und Mitarbeitern (2004), in der ebenfalls DLPFC, anteriores Cingulum, supplementär motorische Areale, prä-SMA und Precuneus aktiviert wurden. Die Aktivierung des ACC ist hier möglicherweise wieder auf die Funktion des Konfliktmonitorings zurückzuführen, da dieser Kontrast durch Gegenüberstellung von inkongruenten und kongruenten Bedingungen genau den dem Simon-Effekt zugrunde liegenden Konflikt zwischen Reiz und Antwort beschreibt.

Bei getrennter Darstellung des Simon-Effekts für rechte und linke Hand fielen zuerst erwartungsgemäß große Aktivierungscluster in der ipsilateralen Sehrinde auf. Außerdem fallen jeweils ipsilaterale Aktivierungen in supplementär motorischen Arealen auf, also rechtsseitig beim Simon-Effekt der rechten Hand und linksseitig bei dem der linken Hand. Diese Aktivierung könnte also der aufwendigeren Phase der Antwortplanung und -auswahl bei Simon-inkongruenten Bedingungen im Vergleich zu kongruenten Bedingungen entsprechen, also z.B. der Planung und Ausführung des motorischen Programms einer Antwort der rechten Hand auf einen linksseitig präsentierten Stimulus. Eine kontralaterale entsprechende Aktivierung, die der Suppression der Simon-kongruenten Antwort entspräche, war aber nicht nachzuweisen. Der DLPFC wurde bei der nach Händen getrennten Auswertung nur im Simon Kontrast der rechten Hand verstärkt aktiviert, sowohl rechts- als auch linkshemisphärisch. Möglicherweise liegt hier ein Zusammenhang mit der Händigkeit der

Probanden vor, die ohne Ausnahme Rechtshänder waren. Dies könnte auch eine Erklärung für die alleinige Aktivierung des ACC durch den Simon- Kontrast der linken Hand sein, da es durch die Dominanz der rechten Hand zu vermehrter Interferenz zwischen Reiz und Antwort kommt, die sich im Sinne des Konfliktmonitorings als ACC-Aktivierung darstellt. Im Falle eines rechtsseitigen Stimulus müsste also die Simon-kompatible und dazu auch dominante rechtsseitige Antwort supprimiert werden. Beide Hände führten zu Aktivierungen im Bereich des linken Precuneus.

Interessant ist, dass es beim Simon-Kontrast auch zu verstärkter Aktivierung im Bereich des IPS rechts mit Maximum bei [42, -47, 47] kam. Dabei lässt die nach Händen getrennte Analyse des Simon-Effekts darauf schließen, dass diese hämodynamische Reaktion vor allem vom Simon-Effekt der rechten Hand herrührt. Diese IPS-Aktivierung scheint nicht in direktem Zusammenhang mit der mentalen Zahlengrößenrepräsentation zu stehen, da dies bedeuten würde, dass es in Simon-inkongruenten Bedingungen zu einer stärkeren Aktivierung der Zahlengrößenrepräsentation käme. In den Verhaltensdaten kommt es aber in Simon-inkompatiblen Bedingungen zu einem geringeren SNARC-Effekt als in Simon-kompatiblen, so dass die IPS-Aktivierung des Simon-Kontrasts wahrscheinlich nicht Korrelat mentaler Zahlengrößenverarbeitung ist. Es handelt sich bei diesem Areal vermutlich um ein Gebiet, das in Zusammenhang mit der Interaktion von Simon-Effekt und Effekten der Zahlenverarbeitung steht.

6.2.4 Parietale Korrelate von Arithmetik und räumlicher Verarbeitung

Offensichtlich existiert im den intraparietalen Sulcus umgebenden Kortex eine Reihe verschiedener Netzwerke, die – teils überschneidend – für eine Vielzahl neuropsychologischer Leistungen verantwortlich sind (Simon et al., 2002; Simon et al., 2004). Viele Studien versuchen aktuell, die vielfältigen Funktionen und das komplexe Zusammenspiel dieser parietalen Netze anhand der bekannten parietalen Architektur des Affengehirns (wie im Abschnitt 2.2.1.1 des Kapitels Theoretische Grundlagen beschrieben) und homologer Areale am menschlichen Gehirn zu erklären.

So fanden Astafiev und Mitarbeiter (2003) um den anterioren IPS Cluster bei Augenbewegungen, Aufmerksamkeitsverschiebungen und Zeigen auf periphere Ziele im Raum. In weiteren Studien wurden im Kortex des anterioren IPS Aktivierungen für das Greifen und Zeigen gefunden (Simon et al., 2002; Culham et al., 2003), was eine dem AIP

entsprechende Funktion diesen Areals nahe legt. Dies macht die in der vorliegenden Arbeit festgestellte Aktivierung IPS-naher, anteriorer Areale in einer Simon-Aufgabe verständlich, gerade im Hinblick auf einen möglichen entwicklungsgeschichtlichen Ursprung des Simon-Effekts, der in Abwehrbewegungen liegen könnte („Bewegung in Richtung des Stimulus“).

Bezüglich der weiter posterior gelegenen Areale fanden Sereno, Pitzalis und Martinez (2001) Aktivierungsmuster im posterioren Bereich des menschlichen IPS, die bei Augenbewegungen auf Positionen im Raum aktiv waren. Es ist zu vermuten, dass hier das dem LIP entsprechende Areal zur Darstellung gekommen ist. Dieses Gebiet wurde, wie Dehaene und Mitarbeiter (2003) zeigen konnten, auch in einer Zahlenverarbeitungsaufgabe aktiviert.

Rusconi, Turatto und Umiltá (2007) untersuchten den Kortex um den IPS in einer kombinierten SNARC- und Simon-Aufgabe. Mit Hilfe der repetitiven transkraniellen Magnetstimulation (rTMS) fanden sie eine Region um den posterioren IPS, die bihemisphärisch bei der Entstehung beider Effekte eine Rolle zu spielen scheint. Es ist zu vermuten, dass sich die beschriebene Region mit Anteilen des VIP-LIP-Netzes überschneidet. In dieser Arbeit konnte mittels fMRT für beide Effekte lediglich rechtsseitige IPS-Aktivierung nachgewiesen werden. Diese lag allerdings im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen VIP-entsprechenden Gebieten etwas weniger weit posterior. Weitere Hinweise auf überschneidende posterior parietale Netze fanden Knops, Thirion, Hubbard, Michel und Dehaene (2009), die mittels fMRT gemeinsame neuronale Grundlagen von räumlicher Aufmerksamkeit und approximativem Rechnen untersuchten. Sie wählten Aktivierungsmuster im posterior superior parietalen Kortex (PSPL) aus, anhand derer sich entscheiden ließ, ob die Probanden in einem ersten Experiment (ohne numerische Stimuli oder Aufgabe) Augenbewegungen nach rechts oder nach links durchgeführt hatten. Sie fanden, dass sich in einem zweiten Experiment (Aufgabe war hier approximative Addition oder Subtraktion zweier Zahlen) mit den Aktivierungsmustern des ersten Versuchs voraussagen ließ, ob eine Subtraktions- oder Additionsaufgabe gelöst worden war. Diese Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass es bei einfachen Rechenoperationen zu räumlicher Verschiebungen auf dem mentalen Zahlenstrahl kommt, in einem gewissen Sinne also einer Verschiebung nach „rechts“ im Falle der Addition. Diese räumliche Verschiebung scheint auf neuronalen Regelkreisen im PSPL zu beruhen, die auch während Augenbewegungen zur Aktualisierung der räumlichen Information aktiv sind. Andere untersuchte Regionen wie die frontalen Augenfelder oder hIPS ließen keine gemeinsamen neuronalen Netze erkennen.

Somit kann man zusammenfassen, dass die Region um den intraparietalen Sulcus, die bei Aufgaben der Zahlenverarbeitung aktiv ist, unmittelbar an Areale angrenzt und mit diesen teilweise überlappt, die bei der Verarbeitung räumlicher Dimensionen wie Größe, Position und Blickrichtung aktiv sind (Simon et al., 2002). Zahlenverarbeitung und Arithmetik scheinen durch Aufmerksamkeitsverschiebungen auf dem mentalen Zahlenstrahl bedingt zu sein, die auf den gleichen Prozessen im Kortex um den intraparietalen Sulcus beruhen wie die Verschiebung der Aufmerksamkeit im äußeren Raum (Hubbard et al., 2005; Knops et al., 2009). Die Aktivierung des MZS aktiviert somit auf kognitiver Ebene visuell-räumliche neuronale Netze, die auch für anderweitige räumliche Verarbeitung genutzt werden. Anhand dieser visuell-räumlichen Repräsentation lassen sich die Überschneidungen der neuronalen Korrelate von SNARC- und Simon-Effekt und auch die Interaktion auf der Ebene der Verhaltensdaten erklären. Als zusätzlicher Aspekt der gemeinsamen neuronalen Aktivierung kommt die oben beschriebene Ähnlichkeit der zugrundeliegenden, kognitiven Strukturen im Sinne einer dual-route Architektur der beiden Effekte hinzu. Die in dieser Arbeit gefundene rechtsseitige IPS-nahe Aktivierung sowohl in SNARC- als auch Simon-Kontrasten unterstützt also die Vorstellung einer überschneidenden Nutzung parietaler Netze für Zahlensemantik und Verarbeitung räumlicher Dimensionen.

7 Zusammenfassung

Die semantische Zahlengröße wird in einem analogen, visuell-räumlichen System in Form eines von links nach rechts orientierten, logarithmisch komprimierten mentalen Zahlenstrahls (MZS) enkodiert; wichtigster Hinweis hierauf ist der SNARC (Spatial Numerical Association of Response Codes)-Effekt (Dehaene, Bossini & Giraux, 1993).

In dieser Arbeit wurden die räumlichen Charakteristika der Zahlengrößenverarbeitung und des mentalen Zahlenstrahls mittels Verhaltensdaten und funktioneller Bildgebung untersucht. Dabei war von besonderem Interesse, ob die Orientierung im externalen Raum einerseits und auf dem MZS andererseits auf getrennten oder gemeinsamen neuronalen Netzen beruht. Neben Effekten der Zahlengrößenverarbeitung wie dem SNARC- und Distanzeffekt (Moyer & Landauer, 1967) war hierbei auch die Reiz-Antwort-Kompatibilität (z.B. Simon-Effekt, Simon & Rudell, 1967) ein wichtiges Instrument.

In einer kombinierten Reaktionszeit- und fMRT-Studie wurde eine Größenvergleichsaufgabe einstelliger Zahlen mit dem festen Standard 5 durchgeführt. Dabei wurden die Stimuli auf vier verschiedenen Positionen (oben, unten, rechts und links) auf dem Bildschirm präsentiert. Die Antworttasten wurden mit rechter und linker Hand betätigt.

Es wurden sowohl bekannte als auch bisher nicht beschriebene Interaktionen und Effekte gefunden, die auf ein gemeinsames zugrundeliegendes Netz der räumlichen Orientierung im externalen Raum und auf dem mentalen Zahlenstrahl hindeuten.

So fand sich ein bisher nicht beschriebener Fazilitierungseffekt zwischen Stimulusposition und mentaler Zahlengrößenverarbeitung, wobei eine Kongruenz von Stimulusposition im externalen Raum und semantischer Position auf dem MZS den Distanzeffekt verstärkte. Außerdem führte rechtsseitige Stimulusdarbietung zur Steigerung des Distanzeffekts. Für den SNARC-Effekt galt Entsprechendes bei allerdings nur marginaler Signifikanz. In beiden Fällen beeinflusst die räumliche Position des Stimulus die semantische Zahlenverarbeitung.

Bezüglich der zeitlichen Einordnung dieser Interaktion lässt sich auf ein vor der Antwortwahl stattfindendes Geschehen schließen, anders als z.B. im dual-route-Modell von Gevers und Mitarbeitern (2006) beschrieben.

Andererseits fand sich auch eine Beeinflussung der Repräsentation des äußeren Raumes durch implizite, durch Zahlen hervorgerufene räumliche Information. So ergab sich eine

Modulierung des Simon-Effekts (bis hin zur Umkehr) in Abhängigkeit von der Kongruenz von Stimulusposition und Position auf dem MZS.

Es zeigte sich auch eine Interaktion von Simon- und SNARC-Effekt, wobei in Simon-kompatiblen Bedingungen ein stärkerer SNARC-Effekt zu finden war. Dieser Befund stärkt die Annahme, dass beiden Effekten sich überschneidende Netze räumlicher Repräsentation zugrunde liegen, wie von Notebaert und Mitarbeitern (2006) beschrieben.

Im bildgebenden Teil der Arbeit wurden die neuronalen Korrelate des SNARC-Effekts im fMRT untersucht, wobei sich Aktivierungen um den intraparietalen Sulcus fanden (allerdings nur rechtshemisphärisch). Darüber hinaus ließen sich keine weiteren neuronalen Netzwerke darstellen, die als SNARC-spezifisch zu bezeichnen sind. Die Aktivierungsmuster des Simon-Effekts entsprachen weitgehend dem in der Literatur beschriebenen Muster.

Bezüglich der in den Verhaltensdaten gezeigten SNARC-Simon-Interaktion fanden sich überschneidende Areale im Bereich des rechten intraparietalen Sulcus, die an der Entstehung beider Effekte beteiligt sind. Diese sind ein mögliches Korrelat der Interaktion auf Ebene der Verhaltensdaten. Die Annahme von teilweise überschneidend genutzten parietalen Netzen für Zahlengrößenverarbeitung, Arithmetik und Verarbeitung räumlicher Dimensionen wie Größe, Position oder Blickrichtung wird dadurch weiter gestützt.

8 Literaturverzeichnis

- Ansari D., Fugelsang J.A., Dhital B. und Venkatraman V. (2006). Dissociating response conflict from numerical magnitude processing in the brain: An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 32, 799-805.
- Astafiev S.V., Shulman G.L., Stanley C.M., Snyder A.Z., van Essen D.C., Corbetta M. (2003). Functional organization of human intraparietal and frontal cortex for attending, looking, and pointing. *The Journal of Neuroscience*, 23, 4689–4699.
- Bächtold D., Baumüller M. und Brügger P. (1998). Stimulus-response compatibility in representational space. *Neuropsychologia*, 36, 731-735.
- Bush G., Shin L.M., Holmes J., Rosen B.R. und Vogt B.A. (2003). The Multi-Source Interference Task: validation study with fMRI in individual subjects. *Molecular Psychiatry*, 8, 60-70.
- Carlomagno S., Iavarone A., Nolfi G., Bourene G., Martin C. und Deloche G. (1999). Dyscalculia in the early stages of Alzheimer's disease. *Acta Neurologica Scandinavica*, 99(3): 166-174.
- Cho Y.S. und Proctor R.W. (2003). Stimulus and response representations underlying orthogonal stimulus-response compatibility effects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10, 45-73.
- Chochon F., Cohen L., van de Moortele P.F. und Dehaene S. (1999). Differential contribution of the left and right parietal lobules to number processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 617-630.
- Cohen Kadosh R., Cohen Kadosh K., Kaas A., Henik A. und Goebel R. (2007). Notation-dependent and -independent representations of numbers in the parietal lobes. *Neuron* 53, 307–314.
- Cohen L. und Dehaene S. (1994). Amnesia for arithmetic facts: a single case study. *Brain and Language*, 47, 214-232.
- Cohen L. und Dehaene S. (1996). Cerebral networks for number processing: Evidence from a case of posterior callosal lesion. *NeuroCase*, 2, 155-174.

- Cohen L. und Dehaene S. (2000). Calculating without reading: Unsuspected residual abilities in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, 17, 563-583.
- Culham J.C., Danckert S., de Souza J., Gati J., Menon R. und Goodale M. (2003). Visually guided grasping produces fMRI activation in dorsal but not ventral stream brain areas. *Experimental Brain Research*, 153, 180–189.
- De Jong R., Liang C.C. und Lauber E. (1994). Conditional and unconditional automaticity: a dual-process model of effects of spatial stimulus-response correspondence. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 20, 731-750.
- Dehaene S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Dehaene S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and additive-factor method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8: 47-68.
- Dehaene S. und Akhavein R. (1995). Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21, 314-326.
- Dehaene S. und Cohen L. (1995). Towards an anatomical and functional Model of Number Processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- Dehaene S. und Cohen L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33, 219-250.
- Dehaene S., Bossini S. und Giraux P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122, 371-396.
- Dehaene S., Dupoux E. und Mehler J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogal and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626-641.
- Dehaene S., Piazza M., Pinel P. und Cohen L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487–506.
- Eger E., Sterzer P., Russ M.O., Giraldo A.L. und Kleischmidt A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron* 37, 719-725.

- Fias W., Brysbaert M., Geypens F. und d'Ydewalle G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, 2, 95-110.
- Fias W., Lammertyn J., Reynvoet B., Dupont P. und Orban G.A. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 47-56.
- Fias W., Reynvoet B. und Brysbaert M. (2001). Are Arabic numerals processed as pictures in a Stroop interference task? *Psychological Research*, 65, 242-249.
- Fischer M. (2001). Number processing induces spatial performance biases. *Neurology*, 57, 822-826.
- Fischer M. (2003). Spatial representations in number processing – Evidence from a pointing task. *Visual Cognition*, 10, 493-508.
- Fischer M., Castel A.D., Dodd M.D. und Pratt J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience*, 6, 555-556.
- Fischer M., Warlop N., Hill R.H. und Fias W. (2004). Oculomotor bias induced by number perception. *Experimental Psychology*, 51, 91-98.
- Fitts P.M und Seeger C.M. (1953). S-R compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of experimental psychology*, 46, 199-210.
- Gevers W., Caessens B. und Fias W. (2005). Towards a common processing architecture underlying Simon and SNARC Effect. *European Journal of Cognitive Psychology*, 17, 659-673.
- Gevers W., Ratinckx E., De Baene W. und Fias W. (2006). Further evidence that the SNARC effect is processed along a dual-route architecture: Evidence from the lateralized readiness potential. *Experimental Psychology*, 53, 58-68.
- Gevers W., Reynvoet B. und Fias W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition*, 87, B87-B95.
- Gevers W., Reynvoet B. und Fias W. (2004). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized: evidence from days of the week. *Cortex*, 40, 171-172.

- Gevers W., Verguts T., Reynvoet B., Caessens B. und Fias W. (2006). Numbers and Space: A Computational Model of the SNARC Effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 32, No. 1, 32–44.
- Hasbroucq T. und Guiard Y. (1991). Stimulus-response compatibility and the Simon effect: toward a conceptual clarification. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 17, 246-266.
- Hedge A. und Marsh N.W. (1975). The effect of irrelevant spatial correspondences on two-choice response-time. *Acta psychologica*, 39, 427-39.
- Hommel B. (1993). The relationship between stimulus processing and response selection in the Simon task: Evidence for a temporal overlap. *Psychological Research*, 55, 280-290.
- Hommel B. (1994). Spontaneous decay of response-code activation. *Psychological Research*, 56, 261-268.
- Hubbard E.M., Piazza M., Pinel P. und Dehaene S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 435-448.
- Ito Y. und Hatta T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers: Evidence from the SNARC effect. *Memory & Cognition*, 32, 662-673.
- Keus I.M. und Schwarz W. (2005). Searching for the functional locus of the SNARC effect: Evidence for a response-related origin. *Memory & Cognition*, 33, 681-695.
- Keus I.M., Jenks K.M. und Schwarz W. (2005). Psychophysiological evidence that the SNARC effect has its functional locus in a response selection stage. *Cognitive Brain Research*, 24, 48–56.
- Knops A., Thirion B., Hubbard E.M., Michel V. und Dehaene S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science* 324, 1583-1585.
- Koechlin E., Naccache L., Block E. und Dehaene S. (1999). Primed numbers: Exploring the modularity of numerical representations with masked and unmasked semantic priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1882-1905.

- Le Clec'h G., Dehaene S., Cohen L., Mehler J., Dupoux E., Poline J.B., Lehericy S., van de Moortele P.F. und Le Bihan D. (2000). Distinct cortical areas for names of numbers and body parts independent of language and input modality. *NeuroImage* 12: 381-391.
- Lee K.M. (2000). Cortical areas differentially involved in multiplication and subtraction: a functional magnetic resonance imaging study and correlation with case of selective acalculia. *Annals of Neurology*, 48, 657-661.
- Liu X., Banich M.T., Jacobson B.L. und Tanabe J.L. (2004). Common and distinct neural substrates of attentional control in an integrated Simon and spatial Stroop task as assessed by event-related fMRI. *NeuroImage*, 22, 1097-1106.
- MacLin E.L., Gratton G. und Fabiani M. (2001) .Visual spatial localization conflict: an fMRI study. *Neuroreport* 12, 3633-6.
- Mapelli D., Rusconi E. und Umiltà C. (2003). The SNARC effect: an instance of the Simon effect? *Cognition*, 88, B1-B109.
- Martin R.C., Annis S.M., Darling L.Z., Wadley V., Harrell L. und Marson D.C. (2003). Loss of calculation abilities in patients with mild and moderate Alzheimer disease. *Archives of neurology*, 60, 1585-9.
- Miller K., Perlmutter M. und Keating D. (1984). Comparison of operations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 10, 46-60
- Moyer R.S. und Landauer T.K. (1967). Time required for judgments of numerical inequality. *Nature*, 215, 1519-1520.
- Müller D. und Schwarz W. (2007). Is there an internal association of numbers to hands? The task set influences the nature of the SNARC effect. *Memory & Cognition*, 35, 1151-61.
- Naccache L. und Dehaene S. (2001a). Unconscious semantic priming extends to novel unseen stimuli. *Cognition*, 80, 215-229.
- Naccache L. und Dehaene S. (2001b). The priming method: Imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 11, 966-974.

- Nieder A. und Miller E. (2003). Coding of cognitive magnitude: Compressed scaling of numerical information in the primate prefrontal cortex. *Neuron*, 37, 149-157.
- Nieder A. und Miller E.K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 101, 7457–7462.
- Nieder A., Freedman D. und Miller E. (2002). Representation of quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, 297, 1708-1711.
- Notebaert W., Gevers W., Verguts T. und Fias W. (2006). Shared spatial representations for numbers and space: the reversal of the SNARC and the Simon effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 1197-207
- Nuerk H.C., Weger U. und Willmes K. (2001). Decade breaks in the mental number line? Putting the tens and units back in different bins. *Cognition*, 82, B25-B33.
- Piazza M., Izard V., Pinel P., Le Bihan D. und Dehaene S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron* 44, 547–555.
- Piazza M., Mechelli A., Butterworth B. und Price C.J. (2002). Are subitizing and counting implemented as separate or functionally overlapping processes? *NeuroImage*, 15: 435-446.
- Pinel P., Dehaene S., Rivière D. und LeBihan D. (2001). Modulation of Parietal Activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, 14: 1013-1026.
- Pinel P., Le Clec'H G., van de Moortele P.F., Naccache L., Le Bihan D. und Dehaene S. (1999). Event-related fMRI analysis of the cerebral circuit for number comparison. *NeuroReport* 10, 1473-1479.
- Praamstra P., Kleine B.U. und Schnitzler A. (1999). Magnetic stimulation of the dorsal premotor cortex modulates the Simon effect. *NeuroReport*, 10, 3671-4.
- Rusconi E., Turatto M. und Umiltà C. (2007). Two orienting mechanisms in posterior parietal lobule: An rTMS study of the Simon and SNARC effects. *Cognitive Neuropsychology*, 24/ 4, 373-392.

- Schmithorst V.J. und Brown R.D. (2004). Empirical validation of the triple-code model of numerical processing for complex operations using functional MRI and group Independent Component Analysis of the mental addition and subtraction of fractions. *NeuroImage*, 22, 1414-1420.
- Schwarz W. und Keus I.M. (2004). Moving eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, 66, 651-664.
- Sereno M. I., Pitzalis S. und Martinez A (2001). Mapping of contralateral space in retinotopic coordinates by a parietal cortical area in humans. *Science* 294, 1350–1354.
- Simon J.R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 174-176.
- Simon J.R. und Rudell A.P. (1967). Auditory S-R compatibility: the effect of an irrelevant cue on information processing. *The Journal of Applied Psychology*, 51, 300-4.
- Simon O., Kherif F., Flandin G., Poline J.-B., Rivière D., Mangin J.-F., Le Bihan D. und Dehaene, S. (2004). Automatized clustering and functional geometry of human parietofrontal networks for language, space, and number. *NeuroImage* 23, 1192-1202.
- Simon O., Mangin J.F., Cohen L., LeBihan D. und Dehaene S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, 33: 475-487.
- Simon, J.R., Acosta E., Mewaldt S. und Speidel C. (1976). The effect of an irrelevant directional cue on choice reaction time: Duration of the phenomenon and its relation to stages of processing. *Perception & Psychophysics*, 19, 16-22.
- Stroop J.R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Talairach J. und Tournoux P. Coplanar Stereotaxic Atlas of the Human Brain. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1988.
- Tlauka M. (2002). The processing of numbers in choice-reaction tasks. *Australian Journal of Psychology*, 54, 94-98.

- Wallace R.J. (1971). S-R compatibility and the idea of a response code. *Journal of Experimental Psychology*, 88, 354-360.
- Walsh V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Science*, 7, 483-488.
- Wood G. (2005). Neuronal and Cognitive Correlates of Attentional and Automatic Semantic Number Processing. Dissertation, Philosophische Fakultät der RWTH Aachen.
- Zorzi M. und Umiltà C. (1995). A Computational Model Of The Simon Effect. *Psychological Research-Psychologische Forschung*, 58, 193-205.

9 Danksagung

An erster Stelle gilt mein herzlicher Dank Herrn Universitätsprofessor Dr. Klaus Willmes-von Hinckeldey für die geduldige Betreuung meiner Arbeit trotz aller Verzögerungen und Durststrecken.

Vor allem danke ich Dr. phil. Dipl.-Psych. Guilherme Wood für seine hervorragende und intensive Betreuung, Einarbeitung und Hilfe. Ohne seine Unterstützung und die vielen Stunden, die er mit mir in diese Arbeit investiert hat, wäre sie sicherlich nicht zu einem so guten Abschluss gekommen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei den zahlreichen Kollegen der Abteilung funktionelle Bildgebung des IZKF Biomat für die Unterstützung bei der Aufzeichnung und Verarbeitung der fMRT- Daten.

Ein großer Dank geht auch an meine Probanden, die den langen und wenig komfortablen Versuch tapfer über sich haben ergehen lassen. Zu guter Letzt danke ich meiner Familie für ihre Geduld und Unterstützung!

10 Erklärung zur Datenaufbewahrung

Hiermit erkläre ich, dass die dieser Dissertation zu Grunde liegenden Originaldaten

- der fMRT-Messungen im IZKF Biomat., Abteilung „funktionelle Bildgebung“, Universitätsklinikum Aachen, Pauwelsstr. 30, 52074 Aachen, und
- der Reaktionszeitexperimente in der Neurologischen Klinik, Lehr- und Forschungsgebiet Neuropsychologie, Universitätsklinikum Aachen, Pauwelsstr. 30, 52074 Aachen

hinterlegt sind.